



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

TECHNOLOGIE BEZODTOKOVÝCH ČISTÍREN PRO MALÉ PRODUCENTY ODPADNÍCH VOD

EFFLUENT-FREE TREATMENT PLANT TECHNOLOGY FOR SMALL WASTEWATER
PRODUCERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Škarpa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Pavel Škarpa
Název	Technologie bezodtokových čistíren pro malé producenty odpadních vod
Vedoucí práce	doc. Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá hledáním nových možností likvidace odpadních vod. Teoretická část zahrnuje dnes známé postupy pro vypouštění vyčištěných odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních, stejně jako vyvážení odpadní vody po předchozí akumulaci. Dále je v teoretické části shrnuta legislativa České republiky týkající se likvidace odpadních vod. Část měření se zabývá novou potenciální možností, jímkou s předřazenou úpravou vody. Pokud je úprava prováděna na principu přírodní čistírny odpadních vod, lze snížit objem vody evapotranspirací. Proto je cílem práce stanovení reálné evapotranspirace vertikálního filtru, nalezení metodiky návrhu vertikálního filtru pro dosažení optimální evapotranspirace a vhodné technologické uspořádání. Dalším cílem je na základě dlouhodobých záznamů teploty vzduchu dostupných z databáze Českého hydrometeorologického ústavu. Průměrná denní evapotranspirace naměřená na laboratorním modelu dosáhla v září 2021 hodnoty 4,5 mm/den. V březnu 2022 dosáhla téměř 2 mm/den. Rovnice pro stanovení potenciální evapotranspirace aplikované ve výpočtové části práce dosáhly největší shody 67,5 % s evapotranspirací naměřenou na laboratorním modelu, a proto budou dále rozvíjeny s cílem dosažení mnohem vyšší spolehlivosti výpočtu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přírodní čistírna odpadních vod, septik, anaerobní separátor, vertikální filtr, evapotranspirace

ABSTRACT

The work aims to find new ways to dispose of wastewater. The theoretical part covers the currently known procedures for the discharge of treated wastewater into surface or groundwater, as well as the balancing of wastewater after previous accumulation. Furthermore, the theoretical part summarises the legislation of the Czech Republic concerning wastewater disposal. The measurement part deals with a new potential option, a sump with upstream water treatment. If the treatment is carried out on the principle of natural wastewater treatment, the volume of water can be reduced by evapotranspiration. Therefore, the aim of this work is to determine the realistic evapotranspiration of a vertical filter, to find a design methodology for a vertical filter to achieve optimal evapotranspiration and a suitable technological arrangement. Another objective is to use long-term air temperature records available from the Czech Hydrometeorological Institute database. The average daily evapotranspiration measured on the laboratory model reached a value of 4.5 mm/day in September 2021. In March 2022 it reached almost 2 mm/day. The equations for determining the potential evapotranspiration applied in the calculation part of the work achieved the highest agreement of 67.5% with the evapotranspiration measured on the laboratory model and will therefore be further developed to achieve much higher reliability of the calculation.

KEYWORDS

Natural wastewater treatment plant, septic tank, anaerobic separator, vertical filter, evapotranspiration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Pavel Škarpa *Technologie bezodtokových čistíren pro malé producenty odpadních vod*. Brno, 2022. 87 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce doc. Ing. Michal Kriška, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Technologie bezodtokových čistíren pro malé producenty odpadních vod* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

Pavel Škarpa
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Technologie bezodtokových čistíren pro malé producenty odpadních vod* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

Pavel Škarpa
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

1	ÚVOD A CÍLE	13
1.1	Úvod.....	13
1.2	Cíl práce	13
2	PROBLEMATIKA ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD	14
2.1	Napojení na kanalizaci	14
2.1.1	Druhy kanalizačních přípojek.....	14
2.1.2	Popis.....	15
2.1.3	Výhody a nevýhody	15
2.2	Jímka na vyvážení (žumpa)	16
2.2.1	Umístění.....	16
2.2.2	Provedení.....	16
2.2.3	Výhody a nevýhody	17
2.3	Septik a anaerobní separátor.....	17
2.3.1	Provedení.....	18
2.3.2	Odkalování.....	19
2.3.3	Účinnost.....	19
2.3.4	Výhody a nevýhody	19
2.4	Přírodní čistírna odpadních vod.....	20
2.4.1	Horizontální filtr.....	20
2.4.2	Vertikální filtr	21
2.4.3	Problémy přírodních čistíren	22
2.4.4	Výsledky správného návrhu	23
2.4.5	Výhody a nevýhody	23
2.5	Aktivační domovní čistírna odpadních vod	24
2.5.1	Přítoková komora	24
2.5.2	Aktivační nádrž.....	24
2.5.3	Kalajem	24
2.5.4	Pískový filtr	24
2.5.5	Údržba.....	25
2.5.6	Účinnost.....	25
2.5.7	Výhody a nevýhody	25
2.6	Legislativní rámec	26
2.6.1	Vypouštění do vod podzemních	26

30	27
2.6.2 Vypouštění do povrchových vod a do kanalizací.....	27
2.6.3 Nejlepší dostupné technologie	30
2.6.4 BAT- zneškodňování odpadních vod.....	32
2.6.5 Zákon o vodách.....	33
2.6.6 Nakládání s vodami.....	33
3 MĚŘENÍ – BEZODTOKOVÝ SYSTÉM	34
3.1 Systém bez akumulace přebytečné vody	34
3.2 Systém s akumulací přebytečné vody.....	35
3.2.1 Dimenzování	36
3.3 Intenzita slunečního záření v průběhu roku	36
3.4 Evapotranspirace	37
3.4.1 Výpar z vodní hladiny	37
3.4.2 Výpar z půdy.....	38
3.4.3 Evapotranspirace z vertikálního filtru.....	39
3.4.4 Potenciální evapotranspirace	40
3.5 Popis laboratorního modelu	44
3.5.1 Bilanční rovnice pro laboratorní model	50
3.6 Naměřená data	51
3.6.1 Filtrace naměřených dat.....	57
3.6.2 Druhá fáze filtrace vstupních dat	59
3.6.3 Zpracování naměřených dat v týdenních průměrech	61
3.6.4 Finální filtrace vstupních dat.....	63
3.6.5 Kalibrace empirických koeficientů	66
4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	67
4.1 Výpočet pro denní kroky.....	67
4.2 Výpočet pro denní kroky s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla	69
4.3 Zpracování dat v týdenních průměrech	72
4.4 Kombinace zpracování dat v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	74
5 ZÁVĚR	78

6	BIBLIOGRAFIE	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK	87

1 ÚVOD A CÍLE

1.1 ÚVOD

Likvidace odpadních vod vznikajících z provozu, nebo při užívání nemovitosti, je povinností každého majitele. Řešení musí být zpracováno už v předprojektové přípravě, řešené před výstavbou daného objektu.

Projektové zpracování se liší na základě možností dané lokality, jako je například přítomnost obecní kanalizace. U chat, rodinných domů a podobných staveb, umístěných mimo dosah kanalizace, existuje spektrum možností, kterými lze odpadní vody likvidovat. Nejčastějším řešením je jejich čištění s následným vypouštěním do podzemních, či povrchových vod.

Existují však lokality, v nichž je nežádoucí vypouštění vyčištěných odpadních vod do recipientů či jejich zasakování. Může se jednat o přírodní rezervace, či pozemky, v jejichž blízkosti je zdroj pitné vody. V podobných lokalitách může být velmi složité získání stavebního povolení k zařízení určeného k čištění odpadních vod.

Zdánlivě jediným řešením může být pro vlastníka podobné nemovitosti jímka na vyvážení. Lze však pochybovat o šetrnosti jímky na jakost povrchových i podzemních vod. Povinností majitele nemovitosti produkující odpadní vody akumulované v jímce je zařídit její vyvážení na blízkou čistírnu odpadních vod. Lidský faktor však může selhat, díky čemuž může dojít k přeplnění a úniku nevyčištěných odpadních vod do okolí. Další úniky jsou dány průsakem u nádrží ve špatném stavebním stavu.

Bezodtoková jímka na vyvážení však může být realizována i s předřazeným zařízením, upravujícím vlastnosti odpadní vody. V případě úniku upravené odpadní vody by byl negativní vliv na jakost okolního vodního prostředí výrazně menší.

1.2 Cíl práce

Dílčím cílem práce je výčet a popis možností likvidace odpadních vod z nemovitostí a jejich zhodnocení, popis evapotranspirace v teoretické rovině. Důležitým cílem je stanovení potenciální evapotranspirace a měření reálné evapotranspirace pro vertikální filtr s vegetací. Vyhodnocení výsledků povede k optimalizaci velikosti vertikálního filtru v závislosti na produkci odpadních vod z nemovitosti (chaty, rodinného domu) s ohledem na četnost vyvážení upravené odpadní vody. Cílem práce je kromě výše uvedeného nalezení spolehlivé metody návrhu velikosti vertikálního filtru k maximalizaci evapotranspirace při bezodtokové likvidaci odpadních vod. Metoda návrhu velikosti vertikálního filtru by měla vycházet z veřejně dostupných dat územních teplot z databáze Českého hydrometeorologického ústavu.

2 PROBLEMATIKA ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Pokud kdokoli produkuje odpadní vodu, měl by ji likvidovat na základě technických a ekonomických možností. Měl by ale zohledňovat skutečnost, že musí dodržet platná a povolená řešení, dána legislativním rámcem. V současné době platná norma pro nejmenší producenty [1] umožňuje tyto způsoby likvidace odpadních vod z nemovitostí:

- napojení na kanalizaci,
- žumpa (jímka na vyvážení),
- přírodní čistírna odpadních vod,
- aktivační čistírna odpadních vod,

2.1 NAPOJENÍ NA KANALIZACI

První možností, jak se u jednotlivých nemovitostí lze zbavovat odpadní vody, je zároveň tou nejjednodušší – předání problému s odpady třetí osobě. V případě likvidace odpadních vod u nové nemovitosti se nejčastěji nabízí připojení na stávající kanalizaci. Pokud je v dostupné vzdálenosti od zdroje odpadní vody kanalizační systém, je potřeba se s tímto systémem propojit kanalizační přípojkou. Kanalizační přípojka je potrubí, odvádějící odpadní vody z vnitřní kanalizace do stoky veřejné kanalizace [2].

Pokud chce majitel nemovitosti řešit čištění odpadních vod, ukládá mu nejprve Zákon o vodovodech a kanalizacích povinnost připojení nemovitosti na veřejnou kanalizaci kanalizační přípojkou, jestliže mu to nařídí obec [3]. Pokud takové nařízení neexistuje nebo obec z nějakého důvodu netrvá na připojení přes kanalizační přípojku, teprve potom může producent znečištění hledat další možnosti (popsané níže).

Odpadní voda přes kanalizační přípojku odtéká nejčastěji kanalizační stokou do obecní čistírny odpadních vod, kde je vyčištěna, a následně vypouštěna do vodního toku. Tento způsob řešení likvidace odpadních vod je preferovaný, jelikož umožňuje systematickou kontrolu a udržení kvality odtékající odpadní vody do vodního toku. Na druhou stranu se jedná o systematické odvodňování zastavěné krajiny, resp. protichůdné řešení k zadržování vody v krajině. Budoucí pojetí kanalizačních systémů by mělo řešit problém ještě předtím, než vznikne, případně přímo v místě zdroje problému – nikoli předávat tento problém třetí osobě tak, jak je to definováno při využití kanalizačního systému.

2.1.1 Druhy kanalizačních přípojek

Kanalizační přípojka se dělí na: [2]

- veřejnou část (pod veřejným pozemkem)
- domovní část (pod soukromým pozemkem)

Jednou samostatnou přípojkou společnou pro splaškové i dešťové vody se odvodňuje nemovitost u jednotného kanalizačního řadu. Znamená to, že v bezdeštném období se přípojkou odvádí koncentrované splašky a naopak za deště dochází k ředění odpadních vod, což je z pohledu následné likvidace odpadních vod problematické – většinou v důsledku zapojení odlehčovací komory dochází ke znečištění vodního toku.

Dvojicí samostatných přípojek odvádějících splaškové a dešťové vody odděleně se nemovitosti napojují na oddílný kanalizační systém, tzn., splašková odpadní voda odtéká splaškovým potrubím a v neřaděné formě pokračuje na čistírnu odpadních vod. Dešťové vody potom mohou odtékat do vodního toku buď přímo nebo přes hrubé mechanické předčištění.

2.1.2 Popis

Potrubí by mělo být co nejkratší, v kolmém směru na stoku. Pro jmenovitou světlost DN 150 je předepsán minimální sklon potrubí 2 %, pro DN 200 a větší průměry je předepsaný sklon nejméně 1 %. Největší dovolený spád je 40 % [2], nicméně se musí zohledňovat druh použitého materiálu.

Potrubí by mělo být kryto nejméně 1 m zeminy, v případě vedení pod komunikací určenou k jízdě či stání vozidel pak 1,8 m. Potrubí jmenovité světlosti DN 150 a DN 200 se na stoku napojují nejčastěji do určené odbočky, nebo vložky, která je na stoce zřízena. Pokud na zděné či betonové stoce není vložka, provede se napojení otvorem o daném průměru, který se buďto vyvrtá, nebo vyfrézuje. U neprůlezných stok se přípojky zaústí do horní poloviny profilu stoky. Přípojky se po dohodě s provozovatelem veřejné kanalizace mohou také zaústit do vstupních šachet [2].

Jmenovitá světlost přípojky se určuje výpočtem. Nejmenší hodnota je DN 150, u průměrů větších než DN 200 je nutné v projektu doložit hydrotechnický výpočet, který zdůvodňuje, proč není možno využít menších průměrů [2]. Pro čištění přípojky musí být zřízena revizní nebo vstupní šachta.

2.1.3 Výhody a nevýhody

Připojení na kanalizační systém má, stejně jako všechny ostatní možnosti, výhody pro producenta, stejně jako nevýhody. Mezi základní výhody se může řadit:

- jednoduché a levné řešení pro investora,
- odpadá nutnost provádět vzorky vyčištěné odpadní vody, která vzniká u domovních čistíren odpadních vod,
- nevzniká zábor plochy,
- jednoduchá údržba,

Nevýhody:

- voda se nezdržuje v krajině,
- není možnost opětovného využití vody jak na závlahu zahrady, tak pro splachování WC,

2.2 JÍMKA NA VYVÁŽENÍ (ŽUMPA)

Jímka na vyvážení je zakrytá, vodotěsná, bezodtoková podzemní nádrž s neprodyšným stropem, v níž jsou shromažďovány splaškové odpadní vody. Žumpy se zřizují v případech, kdy nelze splaškové vody odvádět přímo do kanalizace, nebo přes malé čistírny odpadních vod. Kanalizace nemovitosti s žumpou je oddílná, vnitřní splašková kanalizace je zaústěna do žumpy, zatímco dešťová kanalizace může být vedena do dešťového kanalizačního řádu, přilehlého vodního toku, akumulární jímky, trativodu, na terén apod. [4]. Odpadní voda jímkou neprotéká, jedná se o akumulaci veškeré vznikající odpadní vody. V jímce sice dochází k postupnému rozkladu organické hmoty, nicméně ve srovnání s čistícími procesy probíhajícími na čistírně odpadních vod se jedná o velice extenzivní proces.

2.2.1 Umístění

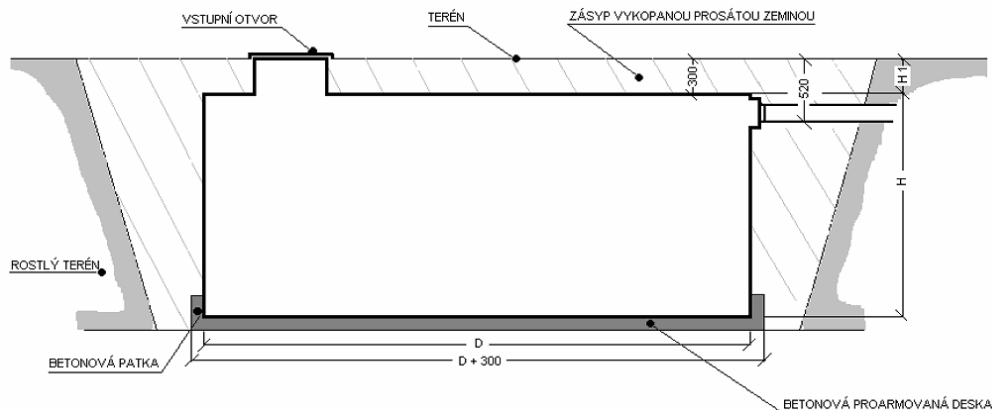
Jímka na vyvážení musí být umístěna tak, aby k ní byl možný příjezd fekálního vozu. Její vzdálenost od vnější stěny budovy má být minimálně 1 m. Vzdálenost od domovních, veřejných a neveřejných studní stanovuje ČSN 75 5115. Od domovní studny je třeba dodržet vzdálenost 5 m u málo propustného půdního prostředí, u propustného půdního prostředí pak 12 m. V případě veřejných a neveřejných studní se tato vzdálenost zvětšuje na 12 a 30 m. Při návrhu a umístění samotné žumpy je taktéž potřeba přihlédnout k možnosti budoucího připojení na kanalizaci [4].

2.2.2 Provedení

Jak je psáno výše, žumpa musí být nepropustná a neprodyšná. Vhodné je provedení z vodostavebního betonu, nebo plastu, v případě možného výskytu podzemní vody musí být plastové jímky obetonovány z důvodu prevence proti vyplavání nádrže nad terén. V zátopovém území je třeba žumpu taktéž zabezpečit proti vyplavení při povodni. Konstrukce musí odolávat tlaku zeminy, zadržovaným odpadním vodám (anaerobní prostředí vede ke vzniku bioplynu, který obsahuje agresivní sirovodík), a případně i jiným vlivům [4].

Žumpa musí být odvětrána, což se zajišťuje větracím potrubím vnitřní kanalizace. Odvětrání se provádí z důvodu negativního vnímání zápachu, který se může zadržovat ve vnitřním prostoru nad úrovní hladiny. Z pohledu provozování je potřeba pouze sledovat

hladinu splašků v jímce, aby nedošlo k přetékání. Proto se doporučuje osadit signalizaci (většinou plovák, který přes víko může signalizovat vysokou hladinu).



Obrázek 1 - Schéma žumpy [5]

2.2.3 Výhody a nevýhody

Z pohledu kvality podzemních vod v lokalitě, kde se nenachází kanalizační systém, je ve své podstatě jímka na vyvážení nejlepší možné řešení. Kvalitní jímka, která garantuje nulový únik vody do podloží, zaručuje zároveň téměř nulové vnosy znečištění do podzemních vod. Přesto má jímka na vyvážení několik výhod i nevýhod. Mezi drobné výhody patří:

- nízká pořizovací cena,
- není potřeba řešit uvádění do provozu (ve srovnání s čistírnami odpadních vod),
- spolehlivé řešení pro střídavý nebo minimální provoz (chaty, sezonní provozy),
- při výstavbě nevyžaduje navazující objekty (trativod, šachta) ani přípojky,
- není třeba provádět rozbory odpadních vod.

Nevýhody jímky na vyvážení jsou:

- nutnost vyvážení v případě naplnění (většinou nákladné a problematické),
- musí se kontrolovat úroveň hladiny odpadní vody v jímce,
- může vznikat zápach.

2.3 SEPTIK A ANAEROBNÍ SEPARÁTOR

Septik je průtočná, zakrytá nádrž, nejčastěji rozdělená na 3 komory, který stejně jako žumpa musí být neprodyšná a odvětraná potrubím vyvedeným nad střechu nemovitosti. Taktéž do septiku nebo anaerobního separátoru nesmí být zavedena dešťová voda [6].

Hlavní funkcí septiku i separátoru je mechanické předčištění. To znamená, že dochází k separaci nerozpuštěných látek, neboli k mechanickému čištění. Zachycené nečistoty se

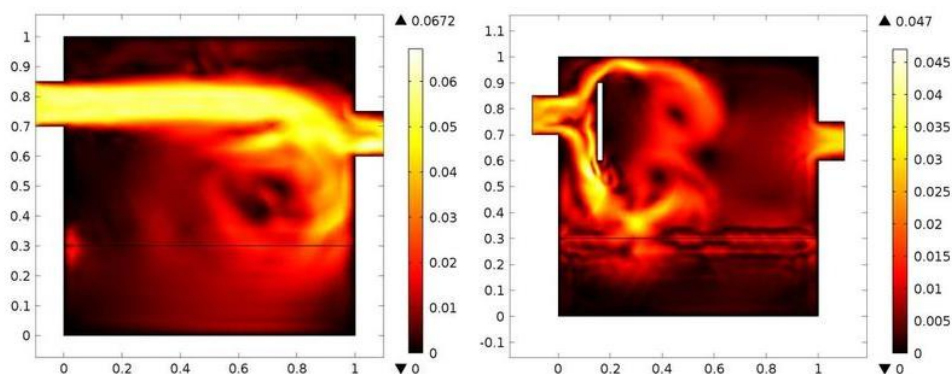
poté rozkládají anaerobními procesy ve vodním prostoru. Výsledkem je snížení organického znečištění kolem 30 %, ale zejména zadržetí nerozpuštěných látek v rozmezí 50 – 90 %. Nerozpuštěné látky, většinou organického původu, přímo snižují koncentraci znečištění BSK_5 a $CHSK_{Cr}$, většinou jde ruku v ruce účinnost všech uvedených parametrů. Účinnost ale závisí na mnoha faktorech, jako je například doba zdržení, nebo hydraulické řešení vnitřního uspořádání. V praxi se septiky bez dalšího stupně čištění používají jen výjimečně [6], [7], resp. dle zákona o vodách nelze toto řešení využívat jako jediný stupeň čištění. Za septikem/separátorem musí být připojeno zařízení, které bude redukovat zejména amoniakální dusík přeměnou na dusičnany.

Inovativní formou septiku je anaerobní separátor s optimalizovanou a prodlouženou dobou zdržení a zvýšenou účinností [1].

2.3.1 Provedení

Provedení nádrže je obdobné jako v případě jímek na vyvážení. Většinou se jedná o plastové nebo betonové nádrže, dělené soustavou přepážek a norných stěn. Při dimenzování septiků a separátorů se vychází z normy [1], resp. ze specifické spotřeby vody 125 l/os/den, doby zdržení vody v septiku 4 až 6 dní a kalový prostor o objemu 0,395 m³/os/rok. Celkově tedy vychází 1,4 m³/obyvatele [7]. V současné době a tedy i v souladu s normou [1] je možné dimenzovat septiky na dobu zdržení 3 dny a separátory ideálně na 4-5 dní. Současně je potřeba u obou nádrží potřeba počítat s kalovým prostorem, který může tvořit až 60 % objemu nádrže.

Pro zvýšení sedimentační účinnosti septiku, resp. při změně na anaerobní separátor, se doporučuje využití jak norných stěn, tak usměrňovacího potrubí. U špatně řešených technických provedení může docházet ke zkratovým proudům a vyplavování zadržného znečištění z první do druhé, resp. z druhé do třetí komory [7].



Obrázek 2 - Rozložení rychlosti proudění v septiku bez rozrážecí (normé) stěny (vlevo) a s rozrážecí stěnou (vpravo) [7]

2.3.2 Odkalování

Míra odkalování septiku je závislá zejména na koncentraci nerozpuštěných látek v přitékající odpadní vodě. V prvních 12ti měsících provozu septiku bývá akumulace kalu velmi vysoká (přibližně 250 l/osobu/rok). Po dvou letech však akumulace klesá pod 150 l/osobu/rok. Optimální četnost odkalování je v rozmezí 3 až 5 let, dle velikosti a obsazení nádrže. Maximální přípustný interval je 5 let, jakožto doba ve které může objem kalu zaujmout 50 % z celkového objemu nádrže [8].

2.3.3 Účinnost

Ani špičkově provedený a po hydraulické stránce optimalizovaný septik/separátor však není schopen odstranit amoniakální dusík, k jehož nitrifikaci je potřeba přítomnost rozpuštěného kyslíku. V podstatě při správném návrhu by měl být právě amoniakální dusík tím jediným důvodem k zařazení dalšího stupně čištění.

Tabulka 1 - Orientační hodnoty účinnosti pro septik/separátor [1]

Technologie čištění	Účinnost čištění v %				
	BSK ₅	CHSK	NL	N-NH ₄ ⁺	P _{celk}
Septik	15 až 30	0 až 20	50 až 60	-	-
Anaerobní separátor	50 až 75	40 až 80	70 až 90	5 až 25	10 až 45

2.3.4 Výhody a nevýhody

Vzhledem ke skutečnosti, že septik i separátor je po stránce objemové výrazně větším objektem než čistírna odpadních vod, jedná se o zcela odlišné řešení. Mezi základní výhody septiku/separátoru patří:

- možnost napojení pro objekty se střídavým, přerušovaným nebo sezónním provozem,

- odpadá nutnost připojení elektrické energie,
- jednoduchá údržba spočívající pouze ve vyvážení kalu,
- četnost vyvážení kalu u separátoru v rozmezí 5 – 10 let,

Nevýhody septiku/separátoru jsou:

- nízká čistící účinnost,
- nutnost zařazení navazujícího stupně,
- po investiční stránce nákladnější než čistírna odpadních vod,
- anaerobní procesy způsobují zápach.

2.4 PŘÍRODNÍ ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD

Přírodní, neboli kořenové čistírny odpadních vod, jsou alternativní čistírenskou technologií, založenou na pomalém a přirozeném čištění odpadních vod. Setkávají se s problémy, doprovázenými nedostatečnou čistící účinností, zapříčiněnou špatným návrhem, provedením, nebo provozem čistírny [9].

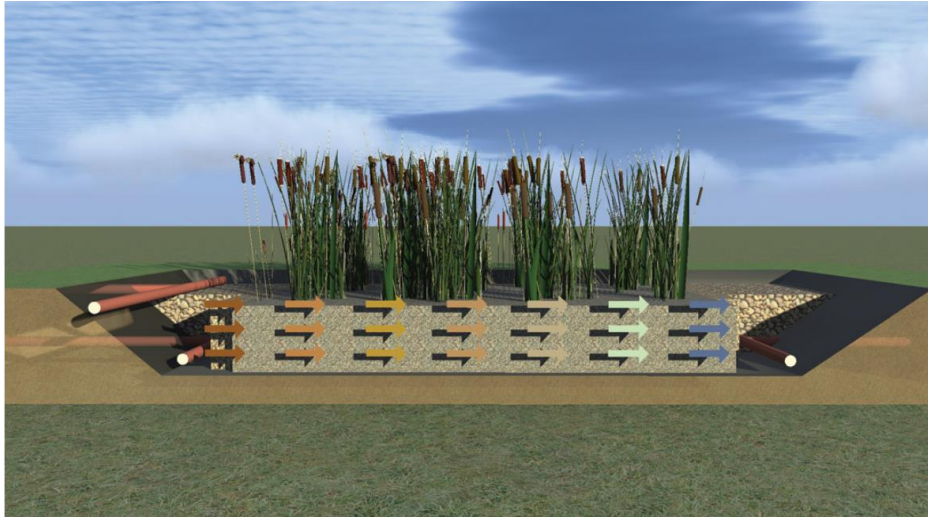
Přírodní čistírny jsou založené na různých sestavách. Například septik doplněný horizontálním filtrem, anebo septik doplněný vertikálním filtrem.

Funkce septiku v těchto sestavách je separace nerozpuštěných látek, která musí být co možná nejlepší.

2.4.1 Horizontální filtr

Většina starších kořenových čistíren v České republice využívá horizontálního filtru. Samotný filtr je většinou řešen jako mělká zemní jámka, vyplněná filtračním materiálem. Urovnaný povrch filtračního materiálu je osázen mokřadní vegetací. Horizontální směr proudění je zajištěn umístěním distribučního a drenážního potrubí, které jsou umístěny co možná nejdál od sebe. Tím dojde k postupnému zatopení filtračního materiálu čišťenou vodou, a vzniknou specifické (anaerobní) podmínky k odstraňování znečištění [10].

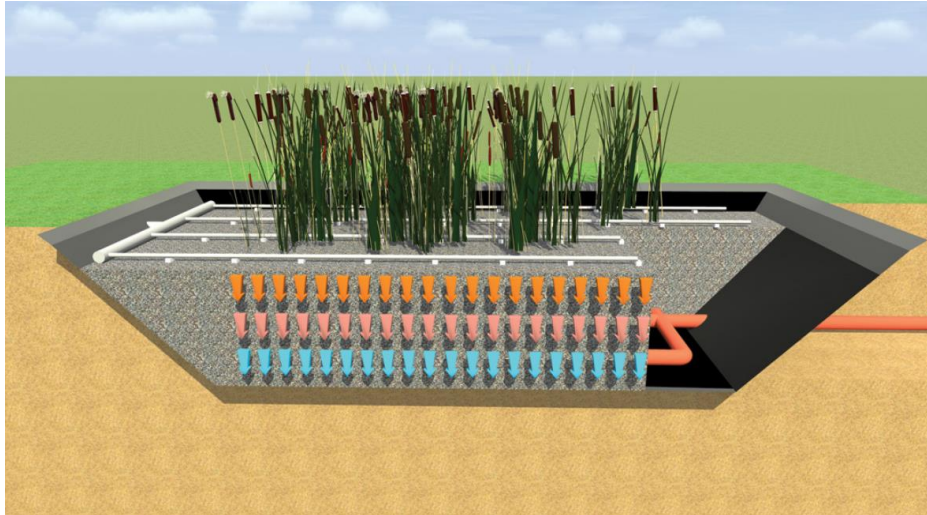
Vhodná konfigurace přítoku, odtoku a rychlosti přítoku při návrhu filtru dokáže zlepšit účinnost čištění. Zvětšení velikosti pórů při nižší rychlosti přítoku s kombinací spodní přítok + horní odtok by mohly zlepšit hydraulické chování, a tím zlepšit čištění odpadních vod [11]. Přesto jsou horizontální filtry stále méně účinné, než filtry s vertikálním prouděním a aerobním prostředím.



Obrázek 3 - Schéma horizontálního filtračního pole [10]

2.4.2 Vertikální filtr

V posledních letech se u nás začaly vyskytovat zařízení, které po vzoru Rakouských čistíren, využívají vertikální filtry. Ty jsou stejně jako horizontální filtry tvořené jako mělká zemní jámka, vyplněná filtračním materiálem, který je osázen mokřadní vegetací. Přívod čisté vody na povrch vertikálních filtrů je zajištěn distribučním potrubím, které přivádí vodu na celý povrch filtru a zajišťuje jeho skrápění v dávkách, několikrát denně, nikoliv kontinuálně. Přerušovaným přívodem čisté odpadní vody je zajištěno, že filtrační materiál není zatopený (nasyčený), ale pouze vlhký, a přitom provzdušněný. Vegetace zde zajišťuje čistící účinek jakožto nosič bakterií, má však také funkci ochrany distribučního potrubí před UV zářením a dalšími vnějšími vlivy (například vytváří tepelný izolant v zimě) [10]. Filtry s vertikálním průtokem dosahují vysoké účinnosti při odstraňování sloučenin uhlíku (organické sloučeniny stanovované jako parametr BSK₅) a amoniakálního dusíku [12].



Obrázek 4 - Schéma vertikálního filtračního pole [9]

2.4.3 Problémy přírodních čistíren

Reálné problémy těchto čistíren jsou kolmatace a následná regenerace filtračního materiálu a odstraňování amoniakálního dusíku. Tyto problémy jsou způsobeny většinou špatným návrhem čistírny, z důvodu neznalosti problematiky a nedostatečných zkušeností projektantů [9].

Kolmatace je proces povrchového ucpávání filtračního materiálu, skrze který protéká mechanicky předčištěná odpadní voda. Jejím původcem jsou nerozpuštěné látky, které se nepodařilo zachytit v mechanickém předčištění (septiku), a tudíž se zachytávají ve filtračním materiálu vegetačních filtrů, které se v důsledku toho ucpávají. V extrémních případech může dokonce dojít k povrchovému proudění vody po filtračním materiálu [10].

V případě, kdy dojde ke kolmataci, se musí odstranit nejdříve její příčina, a až poté následky. Tudíž je potřeba upravit mechanické předčištění, a to buďto zvětšením objemu septiku, anebo zlepšením jeho hydraulického řešení pomocí norných stěn a usměrňovacího potrubí [9].

Ucpaný filtr se poté opravuje buďto vytěžením filtračního materiálu, kdy se odtěží ucpaná část náplně. Dále se může daný problém řešit změnou režimu provozu horizontálního filtračního pole [9].

K odstraňování amoniakálního dusíku (jeho nitrifikaci), je potřeba aerobního prostředí. Většina kořenových čistíren v České republice je však založena na sestavě septik – horizontální filtr, kde oba čistící stupně jsou anaerobní, a tudíž v ní nejsou podmínky umožňující nitrifikaci amoniakálního dusíku [10].

2.4.4 Výsledky správného návrhu

Jak je zmíněno výše, v posledních letech se u nás navrhují čistírny s vertikálním filtrem. Na rozdíl od horizontálního filtru je filtrační prostředí vertikálního filtru aerobní, tudíž dokáže odstranit mimo jiné i amoniakální dusík. V kombinaci s dostatečným mechanickým předčištěním lze pomocí vertikálního filtru dosáhnout velmi vysokých čistících účinností (viz tabulka) [1].

Tabulka 2 - Orientační hodnoty účinnosti přírodních čistíren odpadních vod [1]

Technologie čištění	Účinnost čištění v %				
	BSK ₅	CHSK	NL	N-NH ₄ ⁺	P _{celk}
Vertikální filtr s dávkovacím systémem	60 až 90	40 až 70	40 až 70	70 až 90	5 až 25
Vegetační čistírna s horizontálním průtokem	40 až 95	50 až 90	65 až 95	5 až 60	5 až 25
Vertikální filtr s vegetací	75 až 98	70 až 97	85 až 99	50 ²⁾ až 99 ¹⁾	5 až 20
1) v letním období (tj. pro T > 12 °C)					
2) v zimním období (tj. pro T < 6 °C)					

Účinnosti uvedené v tabulce výše jsou platné dle normativních dokumentů platných v České republice. Zahraniční literatura uvádí účinnost vertikálního filtru s vegetací od 79 do 92 % [12].

2.4.5 Výhody a nevýhody

Přírodní čistírna odpadních vod založená na vertikálním směru proudění v aerobním prostředí je oproti klasické domovní čistírně spolehlivější zejména při nerovnoměrném zatížení. V porovnání s aktivační čistírnou má určité výhody, i nevýhody. K výhodám přírodních čistíren odpadních vod patří:

- jednoduchá údržba spočívající v kosení vegetace a pravidelném vyvážení kalu z mechanického předčištění,
- v případě velkého spádu pozemku možnost funkce bez elektřiny,
- minimální provozní náklady,
- pozitivní ovlivnění okolního klimatu (výpar z povrchu zvyšuje vlhkost v bezprostřední blízkosti),
- minimální ovlivnění přerušovaným provozem, sezónním provozem, apod.

Nevýhody:

- plošný zábor je výrazně vyšší ve srovnání např. s aktivační čistírnou,
- vstupní náklady jsou vyšší než ve srovnání např. s aktivační čistírnou.

2.5 AKTIVAČNÍ DOMOVNÍ ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD

Aktivační čistírny jsou nejčastěji používanou technologií. Uspořádání domovních čistíren se liší dle konkrétního typu/výrobce. Většina domovních čistíren se skládá z přítokové komory, aktivační nádrže, dosazovací nádrže a případně integrovaného kalojemu a pískového filtru [13].

2.5.1 Přítoková komora

Přítoková komora je určena k zachycení a rozmělnění hrubých nečistot, předčištění a denitrifikaci odpadních vod. Často také slouží k vyrovnání nerovnoměrného přítoku vod do čistírny [13]. Pro lepší rozmělnění bývá do přítokové komory vestavěna hrubobublinná aerace, která míchá celým prostorem a zajišťuje vyloučení zkratového proudu, promíchání směsi a zmenšení velikosti jednotlivých částic.

2.5.2 Aktivační nádrž

Biologické čištění odpadních vod se děje v aktivační nádrži prostřednictvím mikroorganismů rozptýlených ve vznosu. Mikroorganismy využívané k biologickému čištění se nazývají aktivovaný kal, a ke svému životu potřebují kyslík a organické látky, dodávané čišťenou odpadní vodou. Kyslík je dodáván stlačeným vzduchem z kompresoru čistírny. Po ukončení provzdušňování, které je taktéž určeno k míchání obsahu reaktoru, dochází u dna nádrže k usazování vrstvy aktivovaného kalu (je těžší než voda). Nad touto vrstvou se nachází vyčištěná voda, která se v určitých intervalech odčerpává [13].

Čištění odpadních vod aktivovaným kalem je poměrně nákladný proces, který je vhodnější realizovat centrálně (na území obce). Provzdušňovací zařízení vytváří 45 až 75 % celkových provozních nákladů čistírny [14].

2.5.3 Kalojem

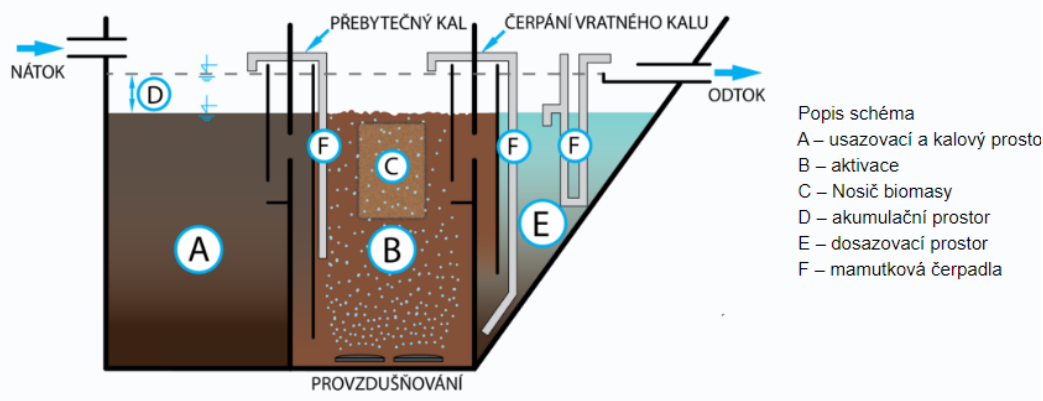
Kalojem slouží k akumulaci aktivovaného kalu, který vznikl v aktivační nádrži při čištění odpadní vody. Je třeba jej z čistírny pravidelně odčerpávat [13].

2.5.4 Pískový filtr

Pískový filtr je určen k odstranění jemných mechanických nečistot z vody po přečerpání z aktivační nádrže. Odstraňují se zde mechanické nečistoty, které se nepodařilo odseparovat v aktivační nádrži [13].

2.5.5 Údržba

Aktivační čistírny je potřeba často kontrolovat a udržívat. Často (týdně) je potřeba kontrolovat například přítok do zařízení, provzdušňování aktivace a přítoku, propustnost filtru, nebo funkci vzduchového čerpadla. V delších časových intervalech je potřeba například jednou za tři měsíce čistit pískový filtr, nebo odčerpávat přebytečný kal [15].



Obrázek 5 - Schéma aktivační domovní čistírny [16]

2.5.6 Účinnost

Tabulka 3 - Orientační hodnoty účinnosti pro aktivační čistírny odpadních vod [1]

Technologie čištění	Účinnost čištění v %				
	BSK ₅	CHSK	NL	N-NH ₄ ⁺	P _{celk}
Aktivační proces středně zatížený kal	80 až 90	60 až 85	85 až 90	5 až 30	15 až 25
Aktivační proces nízko zatížený kal	85 až 95	70 až 90	85 až 90	5 až 30 ²⁾ 65 až 95 ¹⁾	15 až 25
1.) V letním období (tj. pro T > 12°C)					
2.) V zimním období (tj. pro T < 6 °C)					

2.5.7 Výhody a nevýhody

Aktivační domovní čistírna odpadních vod je nejčastějším řešením pro objekty, které ve své blízkosti nemají kanalizační řad. Oproti extenzívním řešením se jedná o prověřenou, nastavitelnou a po investiční stránce levnější technologii. Proces vedoucí k povolení k nakládáním s odpadními vodami je mnohdy také jednodušší, vzhledem k snazší certifikaci výrobkového produktu (tzv. balená ČOV). Mezi největší výhody aktivační čistírny odpadních vod patří:

- nízké pořizovací náklady,

- minimální zábor plochy,

Nevýhody: [17]

- náchylnost aktivovaného kalu na dezinfekci (Savo apod.),
- nutnost častého přísunu živin pro aktivovaný kal,
- složitá údržba,
- spotřeba energie (provozní náklady).

2.6 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

S ohledem na výše popsané možnosti likvidace odpadních vod je při návrhu řešení potřeba zohlednit také možnosti vypouštění. V případě, že není možné připojení na kanalizační systém a likvidace vody vyvážením (jímkou na vyvážení) se jeví jako provozně nákladné řešení, přichází na řadu návrh vlastní čistírny odpadních vod. Pokud se přistoupí k čištění odpadních vod, je potřeba sledovat kvalitu vypouštěné vody, resp. je nutné dodržovat předem předepsaných odtokových koncentrací u vybraných ukazatelů.

Ukazatele a emisní standardy pro odpadní vody stanovují dvě platná nařízení vlády podle toho, kam je vyčištěná odpadní voda vypouštěná. Odpadní vodu lze vypouštět do podloží nebo do povrchových vod:

- nařízení vlády č. 57/2016 Sb. Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních [18].
- nařízení vlády č. 401/2015 Sb. Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech

2.6.1 Vypouštění do vod podzemních

Pokud producent odpadních vod není schopen vyčištěnou odpadní vodu likvidovat jiným způsobem, musí přistoupit k vypouštění odpadní vody do podloží prostřednictvím vsakovacího zařízení. Před samotným vsakovacím objektem se musí nacházet prostor/místo, které slouží k akumulaci odpadní vody nebo vzorkování, umožňující stanovení kvality vyčištěné vody. Koncentrace znečištění, stejně jako četnost vzorkování, způsob stanovení množství odpadních vod, způsob vypouštění a způsob provádění odběrů i rozborů, určuje a definuje v případě vypouštění do podzemních vod právě nařízení vlády č.57/2016 Sb.

Koncentrace znečištění, kterého musí v maximální povolené míře dosahovat čistící zařízení na odtoku, je popsáno v tab. 4 pro stavby, určené pro bydlení nebo rodinnou

rekreaci. Pokud se jedná o stavby poskytující ubytovací služby, potom se při provozování posuzuje účinnost dle tab. 5., zahrnující zejména N_{celk} i pro nejmenší producenty. Pro všechny typy producentů, kteří vypouští vodu do podloží, potom platí tabulka 6, sledující mikrobiální znečištění ve vypouštěné vodě.

Tabulka 4 - Ukazatele a emisní standardy pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci [18]

Velikostní kategorie	"m" [mg/l]				
	CHSK _{Cr}	BSK ₅	N-NH ₄ ⁺	NL	N _{celk}
< 10	150	40	20	30	X
10 - 50	150	40	X	30	30
> 50	130	30	X	30	20

Tabulka 5 - Ukazatele a emisní standardy pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb poskytujících ubytovací služby [18]

"m" [mg/l]				
CHSK _{Cr}	BSK ₅	NL	P _{celk}	N _{celk}
130	30	30	8	20

Tabulka 6 - Ukazatele a emisní standardy mikrobiologického znečištění pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci a z jednotlivých staveb poskytujících ubytovací služby [18]

"m" [KTJ/100 ml]	
Escherichia coli	Enterokoky
150	100

2.6.2 Vypouštění do povrchových vod a do kanalizací

Emisní standardy ukazatelů přípustného znečištění odpadních vod vypouštěných do povrchových vod či do kanalizačních řadů jsou stanoveny v nařízení vlády č. 401/2015 Sb. V tomto nařízení jsou stanoveny jak emisní limity odpadních vod z komunálních (městských) čistíren odpadních vod, tak emisní limity pro průmyslové čistírny odpadních vod [19].

Odpadní vody vypouštěné z komunálních čistíren odpadních vod

Tabulka 7 - Emisní standardy: Příпустné hodnoty (p³⁾, maximální hodnoty (m⁴⁾ a hodnoty průměru⁵⁾ koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v mg/l (první část) [19]

Kategorie ČOV (EO) ¹⁾⁷⁾ nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL	
	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾
< 500	150	220	40	80	50	80
5000 – 2 000	125	180	30	60	40	70
2 001 – 10 000	120	170	25	50	30	60
10 001 – 100 000	90	130	20	40	25	50
> 100 000	75	125	15	30	20	40

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	N-NH ₄ ⁺		N _{celk} ^{2),8)}		P _{celk}	
	průměr ⁵⁾	m ^{4),6)}	průměr ⁵⁾	m ^{4),6)}	průměr ⁵⁾	m ⁴⁾
< 500	-	-	-	-	-	-
5000 – 2 000	20	40	-	-	-	-
2 001 – 10 000	15	30	-	-	3	8
10 001 – 100 000	-	-	15	30	2	6
> 100 000	-	-	10	20	1	3

* Neexistence konkrétního emisního standardu nevyklučuje možnost stanovení emisního limitu pro daný ukazatel při postupu podle § 5 odst. 2 a 3.

¹⁾ Rozumí se kategorie čistírny odpadních vod vyjádřená v počtu ekvivalentních obyvatel. Počet ekvivalentních obyvatel se pro účel zařazení čistírny odpadních vod do velikostní kategorie vypočítává z maximálního průměrného týdenního zatížení na přítoku do čistírny odpadních vod během roku s výjimkou neobvyklých situací, přívalových dešťů a povodní. Pro určení velikosti aglomerace se použije stejný postup pro všechny odpadní vody odváděné kanalizací pro veřejnou potřebu. Pro účely stanovení limitů se použije vyšší z obou hodnot.

U kategorií COV pod 2000 EO lze použít pro účel zařazení čistírny do velikostní kategorie (v tabulce 1a nebo 1b v příloze č. 1 a v tabulce v příloze č. 4 k tomuto nařízení) výpočet z bilance v ukazateli BSK₅ v kg za kalendářní rok na přítoku do čistírny vydělený koeficientem 18,7. U nových ČOV se pro zařazení do velikostní kategorie v prvním roce po výstavbě (zkušební provoz) použije návrhový parametr v zatížení BSK₅. Po prvotním provedení kategorizace je v případě změny zatížení další kategorizace prováděna až s ukončením platnosti povolení k vypouštění odpadních vod.

²⁾ Celkový dusík je ukazatel, který zahrnuje všechny formy dusíku.

³⁾ Uváděné přípustné koncentrace „p“ nejsou aritmetické průměry za kalendářní rok a mohou být překročeny v povolené míře podle hodnot uvedených v příloze č. 5 k tomuto nařízení. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 2) k tabulce v příloze č. 4 k tomuto nařízení.

⁴⁾ Uváděné maximální koncentrace „m“ jsou nepřekročitelné. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku uvedený v tabulce 1 přílohy č. 4 k tomuto nařízení v souladu se stanovením hodnoty „p“.

⁵⁾ Uváděné hodnoty jsou aritmetické průměry koncentrací za kalendářní rok a nesmí být překročeny. Počet vzorků odpovídá ročnímu počtu vzorků stanovenému vodoprávním úřadem. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 2) k tabulce v příloze č. 4 k tomuto nařízení.

⁶⁾ Hodnota platí pro období, ve kterém je teplota odpadní vody na odtoku z biologického stupně vyšší než 12°C. Teplota odpadní vody se pro tento účel považuje za vyšší než 12°C, pokud z pěti měření provedených v průběhu dne byla tři měření vyšší než 12°C. V případě odběru vzorku A nebo prostého vzorku se stanovení teploty provedou v době odběru vzorku.

⁷⁾ Rozbory odtoků z biologických dočišťovacích nádrží zkolaudovaných do 3. 3. 2011 se provádějí ve filtrovaných vzorcích, koncentrace celkových nerozpuštěných látek však nesmí přesáhnout hodnotu 100 mg/l.

⁸⁾ Požadavky na dusík je možno kontrolovat pomocí denních průměrů, jestliže se prokáže, že je takto zajištěna stejná úroveň ochrany vod. V tomto případě denní průměr nesmí přesáhnout 20 mg/l celkového dusíku pro všechny vzorky, jestliže teplota na odtoku biologického stupně čistírny odpadních vod je vyšší nebo rovná 12°C. Zohlednění požadavků na funkci biologického odstranění dusíku a plnění limitů při teplotách na odtoku nižších než 12°C může být nahrazeno zohledněním pro časově určené zimní období podle oblastních klimatických podmínek, které stanoví vodoprávní úřad u tohoto ukazatele znečištění.

Tabulka 8 - Emisní standardy: přípustná minimální účinnost čištění vypouštěných odpadních vod (minimální procento úbytku)^{1),2)} v procentech [19]

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}	BSK ₅	N-NH ₄ ⁺	N _{celk} ³⁾	P _{celk}
< 500	70	80	-	-	-
5000 – 2 000	70	80	50	-	-
2 001 – 10 000	75	85	60	-	70
10 001 – 100 000	75	85	-	70	80
> 100 000	75	85	-	70	80

* Neexistence konkrétního emisního standardu nevylučuje možnost stanovení emisního limitu pro daný ukazatel při postupu podle § 5 odst. 2 a 3 k tomuto nařízení.

¹⁾ Účinnost čištění vztažená k zátěži na přítoku do čistírny odpadních vod.

²⁾ Uváděné přípustné hodnoty účinnosti čištění mají charakter „p“ hodnot a mohou být v povoleném počtu jednotlivých stanovení nedosaženy podle hodnot v příloze č. 5 k tomuto nařízení. Pro stanovení hodnot minimální účinnosti čištění použije vodoprávní úřad typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 2) k tabulce v příloze č. 4 k tomuto nařízení.

³⁾ Celkový dusík je ukazatel, který zahrnuje všechny formy dusíku.

Tabulka 9 - Minimální účinnost čištění pro kategorie výrobků označovaných v CE v procentech [19]

Kategorie výrobku označovaného CE	CHSK _{Cr}	BSK ₅	N-NH ₄ ⁺	N _{celk} ³⁾	P _{celk}
I	70	80	-	-	-
II	75	85	75	-	-
III	75	85	80	50	80

2.6.3 Nejlepší dostupné technologie

Dle zákona č. 76/2002 Sb. O integrované prevenci a omezování znečištění, se nejlepšími dostupnými technologiemi (BAT – Best Available Techniques) rozumí nejúčinnější a nejpokročilejší stádium vývoje technologií a způsobu jejich provozování, které ukazují praktickou vhodnost určitých technik jako základu pro stanovení emisních limitů a dalších závazných podmínek provozu zařízení, jejichž smyslem je předejít vzniku emisí, nebo pokud to není možné, omezit emise a jejich nepříznivé dopady na životní prostředí jako celek, přičemž: [20]

1. Technologiemi se rozumí jak používaná technologie, tak způsob, jakým je zařízení navrženo, vybudováno, provozováno, udržováno a vyřazováno z provozu.
2. Dostupnými technologiemi se rozumí technologie vyvinuté v měřítku umožňujícím zavedení v příslušném průmyslovém odvětví za ekonomicky a technicky přijatelných podmínek s ohledem na náklady a přínosy, pokud jsou provozovateli zařízení za srozumitelných podmínek dostupné bez ohledu na to, zda jsou používány nebo vyráběny v České republice.
3. Nejlepšími se rozumí nejúčinnější technologie z hlediska dosažení vysoké úrovně ochrany životního prostředí jako celku.

Hlediska pro určování nejlepších dostupných technik: [20]

1. Použití nízkoodpadové technologie.

2. Použití látek méně nebezpečných.
3. Podpora využívání recyklace látek, které vznikají nebo se používají v technologickém procesu, a případně využívání a recyklace odpadu.
4. Srovnatelné procesy, zařízení či provozní metody, které byly již úspěšně vyzkoušeny v průmyslovém měřítku.
5. Technický pokrok.
6. Charakter, účinky a množství příslušných emisí.
7. Datum uvedení nových nebo existujících zařízení do provozu.
8. Doba potřebná k zavedení nejlepší dostupné techniky.
9. Spotřeba a druh surovin (včetně vody) používaných v technologickém procesu a energetická účinnost.
10. Požadavek prevence nebo omezení celkových dopadů emisí na životní prostředí a rizik s nimi spojených na minimum.
11. Požadavek prevence havárií a minimalizace jejich následků na životní prostředí.
12. Informace zveřejňované mezinárodními organizacemi.

2.6.4 BAT- zneškodňování odpadních vod

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. uvádí výčet typických nejlepších dostupných technologií pro různé velikostní kategorie čistíren odpadních vod. Jedná se o doporučující příklady, které ovšem neplatí pro celé území striktně, závazně a nekompromisně. Každého producenta je potřeba posoudit individuálně, přesto by jakékoli jiné vybrané řešení nemělo dosahovat horších odtokových parametrů než řešení popsané v následující tabulce.

Tabulka 10 - Dosažitelné hodnoty koncentrací a účinností pro jednotlivé ukazatele znečištění při použití nejlepší dostupné technologie v oblasti zneškodňování městských odpadních vod [19]

Kategorie ČOV (EO)	CHSK _{Cr}			BSK ₅			NL	
	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace	
	p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l		prům mg/l	m mg/l
< 500	110	170	75	30	50	85	40	60
5000 – 2 000	75	140	75	22	30	85	25	30
2 001 – 10 000	70	120	80	18	25	90	20	30
10 001 – 100 000	60	100	80	14	20	90	18	25
> 100 000	55	90	85	10	15	95	14	20

Kategorie ČOV (EO)	N-NH ₄ ⁺			N _{celk}			P _{celk}		
	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]
	p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l	
< 500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5000 – 2 000	12	20	75	-	-	-	-	-	-
2 001 – 10 000	8	15	80	-	-	-	2	5	75
10 001 – 100 000	-	-	-	14	25	70	1,5	3	80
> 100 000	-	-	-	10	16	75	0,7	2	85

Tabulka 11 – Doporučené nejlepší dostupné technologie v oblasti zneškodňování městských odpadních vod [19]

Kategorie ČOV (EO)	Nejlepší dostupná technologie
< 500	Nízko až středně zatěžovaná aktivace nebo biofilmové reaktory
5000 – 2 000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací
2 001 – 10 000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací a se simultánním srážením fosforu + mikrosíta či jiná filtrace
10 001 – 100 000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů + terciální stupeň včetně srážení fosforu eventuálně dávkování externího substrátu
> 100 000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů + terciální stupeň včetně srážení fosforu, dávkování externího substrátu

2.6.5 Zákon o vodách

Vodní díla jsou v zákonu o vodách definované jako 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 sledovaných zákonem o vodách. Mezi tyto stavby patří mimo jiné dle § 55 (1) c) čistírny odpadních vod, jakož i stavby k čištění odpadních vod před jejich vypouštěním do kanalizací [21].

Dále vodní zákon v § 55 (3) definuje, že se za vodní díla nepovažují mimo jiné bezodtokové jímky včetně přítokového potrubí [21].

2.6.6 Nakládání s vodami

Každý, kdo nakládá s povrchovými nebo podzemními vodami, je povinen dbát o jejich ochranu a zabezpečovat jejich hospodárné a účelné užívání podle podmínek vodního zákona, a dále dbát o to, aby nedocházelo k znehodnocování jejich energetického potenciálu a k porušování jiných veřejných zájmů chráněných zvláštními právními předpisy [21].

Při provádění staveb nebo jejich změn nebo změn jejich užívání je stavebník povinen podle charakteru a účelu užívání těchto staveb je zabezpečit jak zásobováním vodou, tak i odváděním odpadních vod kanalizací k tomu určenou. Není-li kanalizace v místě k dispozici, odpadní vody se zneškodňují přímým čištěním s následným vypouštěním do vod povrchových nebo podzemních. V případě technické neproveditelnosti napojení na kanalizační řad a čištění odpadních vod s následným vypouštěním do povrchových nebo podzemních vod lze odpadní vody akumulovat v nepropustné jímce (žumpě) s následným vyvážením akumulovaných vod na zařízení schválené pro jejich zneškodnění [21].

3 MĚŘENÍ – BEZODTOKOVÝ SYSTÉM

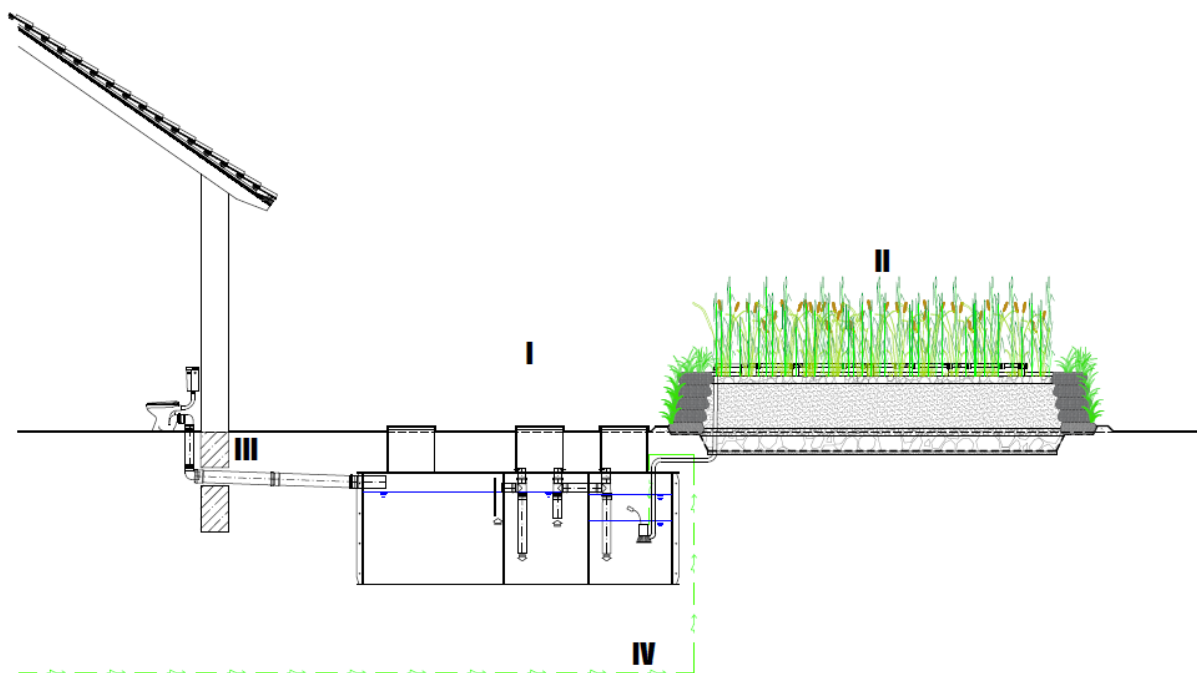
Praktická část bakalářské práce se soustředí na testování systému, který je určen k částečnému nebo úplnému výparu odpadní vody s cílem eliminace vnosu znečištění do povrchových nebo podzemních vod. V případě, že by docházelo k úplnému výparu odpadní vody např. prostřednictvím vertikálního filtru s vegetací, potom se může jednat o zcela bezodtokové zařízení. Definice bezodtokového řešení přitom uvažuje se skutečností, že odpadní voda nebude odtékat, ale např. objem zadrženého kalu s případným přebytkem nevypařené vody se bude vyvážet stejně jako klasická jímka na vyvážení. Odtokové potrubí nicméně toto zařízení může zcela postrádat, stejně jako výustní nebo vsakovací objekt.

Bezodtokové řešení likvidace odpadních vod vychází ze spojení čistírny odpadních vod a vodotěsné jímky na vyvážení (žumpy). Jedná se tedy o zařízení, zahrnující předúpravu odpadní vody takovou, aby bylo možné tuto vodu napouštět na povrch filtru a nedošlo tím k postupnému ucpávání filtru. Následně, po zbavení nerozpuštěných látek, je voda filtrována vertikálním filtračním náplně, přičemž dochází k intenzivní evapotranspiraci. Při zvýšené produkci nebo naopak vlivem nepříznivých klimatických podmínek dochází k postupnému plnění akumulární jímky za vertikálním filtrem. V případě naplnění akumulární jímky je tedy potřebné ji vyvést. Oproti řešení s klasickou žumpou je v tomto případě umožněno opětovné využití upravené odpadní vody v nemovitosti, která je jejím zdrojem, čímž se snižuje četnost vyvážení odpadní vody fekálním vozem. V případě využití principu přírodní čistírny odpadních vod se dále potřeba vyvážení snižuje řízenou evapotranspirací upravované odpadní vody z vertikálního filtru.

Legislativně se za vodní díla nepovažují bezodtokové jímky včetně přítokového potrubí (viz výše). Platí tedy, že bezodtokové řešení likvidace odpadních vod není vodním dílem a nevztahuje se na ni vodní zákon. V praxi vede tato situace k řešení, které nevyžaduje povolení nakládání s odpadními vodami – odpadají tedy povinnosti vzorkování odpadní vody, na druhou stranu je provozovatel nucen přebývajícím vodu vyvážet.

3.1 SYSTÉM BEZ AKUMULACE PŘEBYTKOVÉ VODY

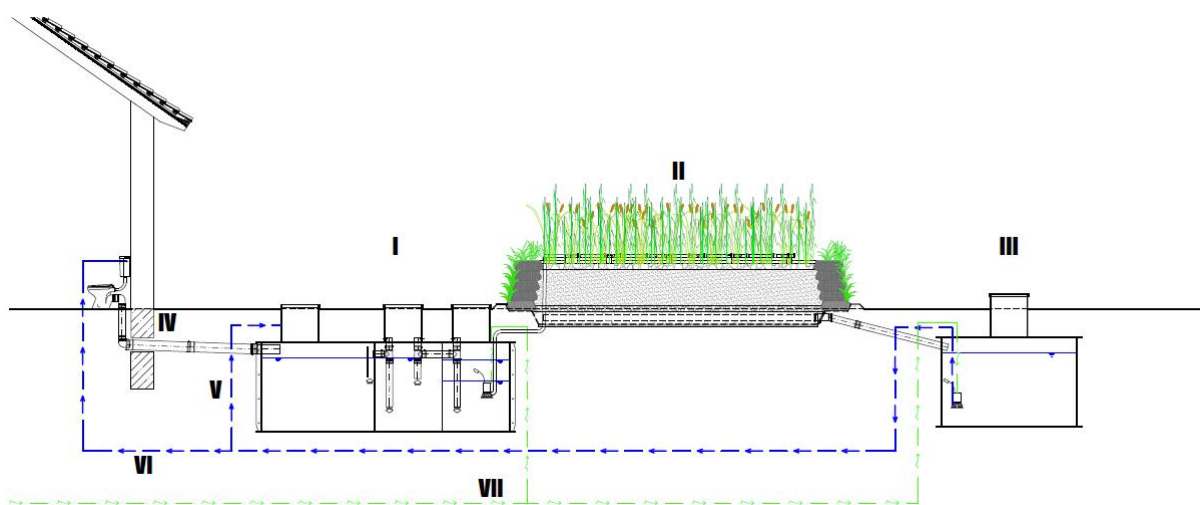
Systém sestává z anaerobního separátoru (septiku) dle kapitoly 2.3: septik nebo anaerobní separátor a vertikálního filtru s vegetací dle kapitoly 2.5.2. Pokud se vyžaduje stanovení velikosti vypařovací plochy, je nutné řešit tento systém pro nejhorší možnou situaci, která může při provozování nastávat. Následně při zahrnutí srážkových úhrnů a minimální intenzity výparu v rámci celého roku, za kombinace s největším množstvím odpadní vody, které může na systém přitékat, vychází plocha vertikálního filtru nejspíše natolik obsáhlá, že nelze uvažovat s ekonomicky příznivým řešením.



Obrázek 6 - Schéma bezodtokového přírodního systému likvidace odpadních vod bez akumulace, kde: I – Anaerobní separátor, II – Vertikální filtr s vegetací, III - Přítok odpadních vod z nemovitosti, IV - Podzemní vedení NN

3.2 SYSTÉM S AKUMULACÍ PŘEBYTKOVÉ VODY

Systém s akumulací je složen z anaerobního separátoru (septiku) dle kapitoly 2.3 – septik a anaerobní separátor, vertikálního filtru s vegetací dle kapitoly 2.5.2 – vertikální filtr a akumuláční jímka.



Obrázek 7 - Schéma bezodtokového přírodního systému likvidace odpadních vod s akumulací upravených odpadních vod, kde: I – Anaerobní separátor, II – Vertikální filtr s vegetací, III – Akumulační jímka, IV – Přítok

odpadních vod z nemovitosti, V – Cirkulace upravených odpadních vod, VI – Recyklace užitkové vody ke splachování WC, VII – Podzemní vedení NN

V případě uplatnění systému s akumulací přebývajících vody se tyto vody mohou využívat v domácnosti jako užitkové, např. pro účely splachování WC (30 l/os/den). U bezodtokového systému bez akumulace přebytečné vody nelze žádný objem vody opětovně využívat v domácnosti, navíc nelze upravenou odpadní vodu v případě přebytku vyvážet. Proto je nutno navrhnout vertikální filtr takové velikosti, aby byla veškerá voda evapotranspirací převedena do atmosféry, čímž se značně zvýší nároky na plochu celého objektu. Navíc mohou investiční a provozní náklady vyjít ve prospěch řešení s akumulační jímkou. Po provozní stránce lze uspořit finance snížením užívání pitné vody (recyklací užitkové vody) a také je potřeba zohlednit cenu jímky a menšího filtru v porovnání s větším filtrem bez jímky.

3.2.1 Dimenzování

Metodický postup pro návrh bezodtokového systému přírodní likvidace odpadních vod neexistuje. Při jejich návrhu se vychází z výpočtů potenciální evapotranspirace, na jejímž základě se navrhne velikost vertikálního filtru tak, aby byla potřeba vyvážení upravené odpadní vody minimální.

3.3 INTENZITA SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ V PRŮBĚHU ROKU

Sluneční záření se skládá ze záření přímého a difuzního. Průměrná hodnota ročního globálního záření se pohybuje kolem hodnoty 1 000 kWh/m² [22]. Podíl přímého záření je v létě 70 – 80 %, v zimě pak až 90 %. V průběhu roku má intenzita slunečního záření nerovnoměrný průběh, nejnižších hodnot dosahuje v zimním období, nejvyšších pak v období letním. Určité rozdíly v intenzitě jsou pak dány také lokalitou. Platí, že intenzita nabývá větších hodnot v horských oblastech, nežli v nížinách pro menší rozptyl záření v atmosféře. Svou roli hraje také znečištění ovzduší lidskou činností, kdy v průmyslových oblastech dochází ke zvýšení difuze pro vyšší koncentraci polutantů v ovzduší [22].

Tabulka 12 - Měsíční úhrn záření v kWh/m² a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících [22].

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
kWh/m ²	22	36	83	117	150	167	167	139	100	56	25	19
hod/měsíc	53	90	157	187	247	266	266	238	190	117	53	35

Hodnoty intenzity slunečního záření jsou směrodatné pro evapotranspiraci při dopadu kolmo na plochu. V takovém případě by se Vertikální filtr s vegetací z bezodtokového přírodního řešení likvidace odpadních vod musel stavět s orientací plochy na jižní stranu a našikmo tak, aby byla bilance vody převedené do atmosféry co největší. Ideální sklon pro letní měsíce je 35° (slunce vysoko), v zimě pak 55° (slunce nízko nad obzorem) [22].

3.4 EVAPOTRANSPIRACE

Proces vypařování vody z vodní hladiny, půdy a povrchu rostlin se souhrnně nazývá evapotranspirace. Samotné vypařování vyplývá z neustálého pohybu molekul vody, který je přímo úměrný k teplotě (s nárůstem teploty se zvyšuje pohyb molekul vody). Některé molekuly mohou se zvyšující se teplotou nabýt energie pro překonání přitažlivosti sousedních molekul, a přecházejí pak do ovzduší [23].

Vypařování je složitý proces závislý na velkém počtu činitelů (velikost a tvar plochy, zbarvení povrchu, vegetační pokryv, zásoba vody (nasycení půdy), teplota a vlhkost vzduchu, barometrický tlak či vítr) [23]. Odhaduje se, že 60 % srážek se vrací do atmosféry evapotranspirací [24].

Evapotranspirace nemá však vliv jen na hydrologický cyklus. Mimo jiné ovlivňuje balanc povrchové energie a uhlíkový cyklus [24].

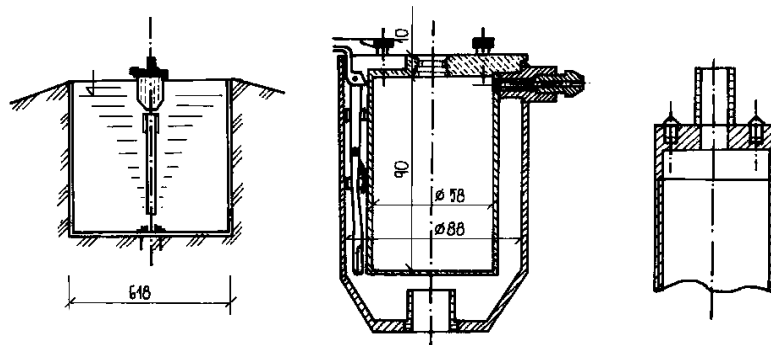
3.4.1 Výpar z vodní hladiny

Nejvýznamnější složku ztrát vody u vodních nádrží tvoří výpar z vodní hladiny. V České republice se pohybuje v rozmezí 1 – 3 mm za den a 200 až 800 mm za rok. Mění se v závislosti na teplotě, nadmořské výšce a jiných podmínkách. Pro přibližné určení evaporace lze použít množství vzorců, závislých většinou na sytostním doplňku. Průměrný denní úhrn výparu $H_{v,d}$ [mm] lze dle Šermera určit dle následujícího vztahu: [23]

$$H_{v,d} = 0,931 d + 0,20$$

kde d je průměrná měsíční hodnota sytostního doplňku [23].

Pro měření výparu bylo dříve používáno zejména Wildova výparoměru, pracujícího na principu listovních vah. Dále se používal také výparoměr Rónův s výparnou hladinou o půdorysné ploše 2 000 cm². Dnes se nejčastěji používá Šermerův výparoměr o půdorysné výparné ploše 3 000 cm² [23].



Obrázek 8 - Šermerův výparoměr [23]

Přesnější výsledky výparu udávají větší výparoměry, mezi které lze zařadit například evaporační pánev o ploše 20 m^2 a hloubce 2 m, nebo lyzimetr s hloubkou 5 m a průměrem 2 m [24].

Hodnota výparu naměřená na výparoměru se pak nazývá výparnost. Se skutečnou evaporací se však výparnost neshoduje pro konstrukční nedostatky příslušných výparoměrů. Kromě jiných nedostatků je hodnota ovlivněná zejména plochou vodní hladiny měřícího zařízení. Pro stanovení skutečné hodnoty výparu se tedy naměřené hodnoty násobí opravnými redukčními součiniteli dle typu výparoměru použitému k měření. Pro minimalizaci chyby dané malou plochou vodní hladiny se používá tzv. bazénových výparoměrů, které mají velkou hladinu vody. Hodnoty naměřené bazénovým výparoměrem se považují za skutečnou evaporaci z vodní hladiny bez potřeby další opravy pomocí redukčních součinitelů při průměru vodní hladiny nejméně 3,5 m [23].

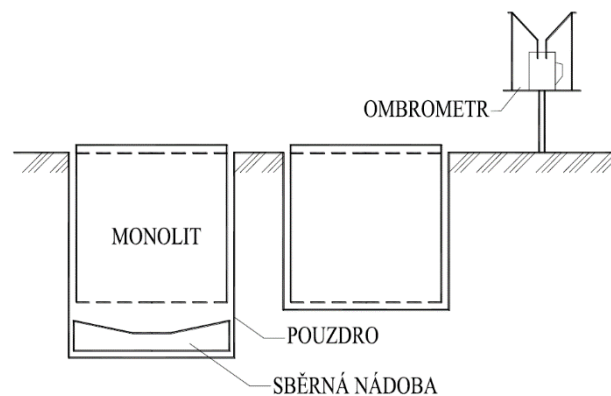
3.4.2 Výpar z půdy

Výpar z půdy závisí na meteorologických podmínkách a vlastnostech půdy. Lze konstatovat, že výpar je tím menší, čím silnější je povrchová vrstva vysušené půdy a čím pomaleji se vlhkost doplňuje kapilárně ze spodních vrstev. Drsný a zvlněný povrch přispívá k výparu více než povrch rovný a hladký. Větších hodnot výparu se dosahuje u tmavších půd. Důležitý je také vliv polohy a orientace. Největší výpar je na jihozápadních svazích, menší na východních a nejmenší na severních. Výpar se také zvětšuje úměrně se sklonem svahů v případě jižních a východních svahů, a neúměrně na severních. Velký vliv má také zastínění půdy vegetací, kdy může dojít k omezení výparu z půdy až na hodnotu 20 %. Rostliny ale výpar zvětšují přímým vypařováním vody z povrchu listů, tzv. transpirací [23].

Transpirace je přirozený projev životního procesu rostlin. Kořeny rostlin nasávají podzemní vodu obsahující živiny, a pak část z ní vypařují listy. Živiny a část vody vytváří rostlinnou tkáň. Množství vody, které je potřeba pro vytvoření 1 g sušiny tkáně, v gramech je tzv. transpirační součinitel. Pohybuje se v rozmezí 250 až 700 g, nejčastější hodnota u

zemědělských kultur je 300 až 450 g [23]. Kromě převádění vody z půdy do ovzduší způsobuje transpirace ochlazování okolního ovzduší [25].

Měřicí zařízení při měření výparu z půdy a transpirace je třeba přizpůsobit přírodním poměrům. Všechny způsoby měření, výpočty i příklady platí převážně pro poměry, v nichž byly odvozeny, a zdaleka nevystihují skutečnost. Výpar z půdy se měří pomocí lyzimetru, což je sada tří válcových nádob, naplněných rostlým vzorkem půdy a zapaštěných do země. Za hodnotu výparu za určité období (zpravidla den) se usuzuje z úbytku hmotnosti nádoby při převážení. Přitom se zohledňuje množství srážek naměřených za stejné období [23].



Obrázek 9 - Schéma lyzimetru Popova [23]

Důležitá je však hodnota celkového výparu z povodí. Její stanovení umožňuje základní bilanční rovnice, která vyjadřuje vztah mezi úhrnem srážek spadlých za určité období (výška vodního sloupce v mm vytvořená na bezodtokové oblasti), úhrnem výparu a úhrnem odtoku jednoduchou relací.

$$H_o = H_s - H_v.$$

Pro výpočet úhrnu výparu H_v je třeba znát hodnotu úhrnu srážek H_s a úhrnu odtoku H_o [23].

3.4.3 Evapotranspirace z vertikálního filtru

Zejména transpirace rostlin osazených na povrchu a stěnách filtru vede k převádění vlhkosti z filtračního souvrství vertikálních filtrů. V případě horizontálních nebo vertikálních filtrů se jedná pouze o filtrační souvrství určené k biologickému čištění odpadních vod, které je od okolí celé odděleno hydroizolační fólií, aby nedošlo k úniku čištěných odpadních vod na okolní povrch, či infiltraci do podzemí.

Vliv evapotranspirace na účinnost čištění je negativní. Transpirací dochází ke snižování objemu vody v náplni filtru. Koncentrace znečišťujících látek ve zbylé vodě se tedy zvyšuje [26].

U bezodtokových přírodních systémů se pro maximalizaci evapotranspiračního úhrnu používají stěny vertikálního filtru z pytlů naplněných pískem s travní směsí. Samotné pytle se provádějí z geotextilie, nebo z polypropylenu. Tyto filtry jsou také hydroizolací chráněny proti úniku upravovaných odpadních vod do podzemí. Pytle tvořící stěny filtrů však nejsou od filtračního prostředí odděleny hydroizolací. Je totiž žádoucí jejich syčení vodou pro zvětšení objemu vypařené vody. Pro zajištění bezpečnosti z hlediska úniku upravovaných odpadních vod jsou pytle skládány na sebe tak, aby tvořily svažitý povrch, kdy spodní řada pytlů je položena na hydroizolaci, která je vyvedena z vnější strany vertikálního filtru nad spodní úroveň těchto pytlů.

Pro stanovení směrodatné hodnoty výparu z těchto zařízení byl sestaven model bezodtokového přírodního systému (popsán v kapitole 7 Popis modelu bezodtokového přírodního systému), který tvoří uzavřený systém nádrže o známých rozměrech s čerpadlem. Pomocí spínače je čerpadlo zapojeno do elektrické sítě. Dávkování vody na vertikální filtr díky tomu probíhá v předdefinovaných intervalech. Voda z modelu vertikálního filtru odtéká zpět do nádrže s čerpadlem. Kromě čerpadla je v jejím vnitřním prostoru položeno čidlo pro měření tlaku. V bezprostřední blízkosti nádrže je pak čidlo zaznamenávající atmosférický tlak vždy v okamžiku zaznamenání tlaku v nádrži. Pomocí barometrické kompenzace se následně určuje hydrostatický tlak u dna nádrže v daných časových intervalech (v případě modelu každé 3 hodiny). Na základě naměřených dat lze stanovit úbytek či příbytek vody v systému ve formě objemu za danou časovou jednotku (3 hodiny). Příbytek vody srážkami je pak zohledňován s pomocí dat naměřených na nejbližší srážkoměrné stanici (meteorologická stanice Ústavu vodního hospodářství krajiny, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně).

Objem úbytku z nádrže o půdorysu $1,2 \text{ m}^2$ se pak přepočítá na půdorys modelu vertikálního filtru s velikostí $2,25 \text{ m}^2$ na vnější straně stěn vertikálního filtru. Výpočtem bude stanoven výpar na 1 m^2 vertikálního filtru přírodních čistíren odpadních vod.

3.4.4 Potenciální evapotranspirace

Potenciální evapotranspirace představuje maximální evapotranspiraci, které lze dosáhnout v konkrétním regionu za předpokladu, že není omezeno zásobování vodou [27]. Výsledná hodnota je následně modifikována na základě aktuálního nasycení půdy. Ke stanovení potenciální evapotranspirace byly použity čtyři jednoduché a prověřené metody, uvažující s parametry, které je možno získat standardním měřením [28].

1) Metoda Hargreaves

Rovnice Hargreaves-Samani vykazuje spolehlivé výsledky v několika částech světa. Jedná se o empirickou rovnici udávající různé výsledky v závislosti na klimatických charakteristikách daného regionu. Proto je nutné rovnici kalibrovat ke spolehlivému

stanovení potenciální evapotranspirace. Nejčastější metodou kalibrace je lineární regrese, úprava koeficientů a exponentů v rovnici. Dále lze tyto metody kombinovat dle potřeby [29].

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

kde: [28], [29]

- $E_{p1,i}$ – průměrná denní potenciální evapotranspirace [mm/den]
- A, B, C – empirické koeficienty (hodnoty viz níže)
- $T_{prům}$ – průměrná denní teplota [°C]
- T_{min} – minimální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- T_{max} – maximální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $R_{a,i}$ – extraterestrické záření [MJ/m²/den]

Extraterestrické záření je závislé na solární konstantě, zeměpisné šířce určující polohu plochy, ze které se výpar realizuje a na dalších faktorech závislých na pořadí dne v roce [28].

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

kde: [28]

- $R_{a,i}$ – extraterestrické záření [MJ/m²/den]
- G_{sc} – solární konstanta [0,08165 MJ/ m²/den]
- $d_{r,i}$ – inverzní relativní vzdálenost od Země ke Slunci [rad]
- $\omega_{s,i}$ – hodinový úhel západu slunce [rad]
- φ_i – průměrná zeměpisná šířka určující polohu plochy [rad]
- δ_i – solární deklinace [rad]

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

kde: [28]

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

$$\delta_i = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1,39\right)$$

kde: [28]

- δ_i – solární deklinace [rad]
- J – pořadí kalendářního dne v roce [-]

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

kde: [28]

- $\omega_{s,i}$ – hodinový úhel západu slunce [rad]

- φ_i – průměrná zeměpisná šířka určující polohu plochy [rad]
- δ_i – solární deklinace [rad]

2) Metoda Turc

Jednu z nejčastěji používaných rovnic pro výpočet potenciální evapotranspirace hustých porostů představuje metoda Turc. Využitím lze stanovit denní úhrn potenciální evapotranspirace pro dny s kladnou průměrnou teplotou vzduchu. Vzorec vychází z podobného principu jako metoda Hargreaves. Výpočet uvažuje průměrnou denní teplotu vzduchu, průměrnou denní hodnotu solárního záření a délku slunečního svitu pro jednotlivé dny v roce. Rovnici lze kalibrovat dle referenčních evapotranspiračních hodnot [28].

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

kde: [28]

- $E_{p2,i}$ – průměrná denní potenciální evapotranspirace [mm/den]
- A, B – empirické koeficienty (hodnoty viz níže)
- $T_{prům}$ – průměrná denní teplota [°C]
- $R_{S,i}$ – denní solární záření [MJ/m²/den]

Denní solární záření se stanovuje na základě maximální a minimální denní teploty a extraterestrického záření [28].

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

kde: [28]

- $R_{S,i}$ – denní solární záření [MJ/m²/den]
- T_{min} – minimální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- T_{max} – maximální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $R_{a,i}$ – extraterestrické záření [MJ/m²/den]

3) Metoda Thornthwaite

Nejvíce využívaná metoda ze všech výše uvedených, je metoda Thornthwaite, původně sestavená pro klimatické podmínky ve střední oblasti USA, využívá se však celosvětově. Spočívá v odhadu potenciální evapotranspirace pro standardní měsíc o délce 30 dnů, z nichž každý den má 12 hodin slunečního svitu. Odhad je definován jako funkce průměrné měsíční teploty vzduchu. Výpočet se provádí pouze pro dny s kladnou hodnotou průměrné teploty vzduchu. Empirický koeficient (viz dále) lze dle potřeby kalibrovat s využitím referenčních hodnot, kterými může být reálná evapotranspirace [28].

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

kde: [28]

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

$$C = \frac{N_i}{360}$$

kde: [28]

- N_i – délka slunečního svitu v i -tém dni [hod]

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

kde: [28]

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

4) Metoda Blaney-Criddle

Přímočará metoda pro výpočet potenciální evapotranspirace uvažující průměrnou denní teplotu a délku denního slunečního svitu. Rovnici lze opět kalibrovat, a to s pomocí dvojice empirických koeficientů (viz dále) [28].

$$E_{p4,i} = p_i * (A * T_{prům} + B)$$

kde: [28]

- $E_{p4,i}$ – průměrná denní potenciální evapotranspirace [mm/den]
- p_i – průměrné denní procento z celkové délky ročního slunečního svitu [%]
- $T_{prům}$ – průměrná denní teplota [°C]
- A, B – empirické koeficienty

$$p_i = \frac{N_i}{4380} * 100$$

kde: [28]

- N_i – denní délka slunečního svitu [hod]
- 4380 – celkový počet hodin denního slunečního svitu v roce [hod]

3.5 POPIS LABORATORNÍHO MODELU

Úhrn evapotranspirace z přírodních čistíren odpadních vod nebyl ještě nikdy zkoumán. Pro zajištění co možná nejreprezentativnějších dat byl sestaven model takového zařízení, protože v reálném provozu není jednoduché získání přesných dat.

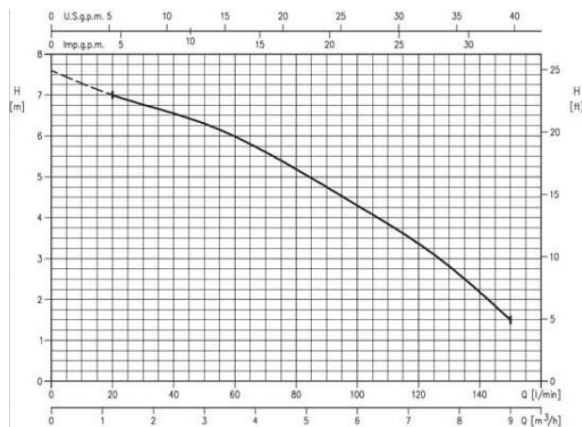
Konstrukce akumulční nádrže sestává z IBC kontejneru o celkovém objemu 1 000 l, s rozměry 1 200 x 1 000 x 1 160 [mm], do něž je zaústěn odtok vody z vertikálního filtru. Zároveň je osazen ponorným kalovým čerpadlem Ebara Optima. Čerpadlo je opatřeno plovákem, jeho zapojení je však dáno pravidelným spínáním elektrické energie v daných intervalech. Ze začátku měření bylo čerpadlo zapínáno od páté ranní hodiny do deváté večerní každou lichou hodinu, na dobu jedné minuty. V březnu 2022 bylo syčení filtru vodou, dané výše popsaným spínáním elektrické energie, posouzeno jako malé. Povrch pytlů tvořících stěny vertikálního filtru byl suchý, a rostliny osazené ve filtračním prostředí schly. Proto bylo nastaveno spínání ve stejných hodinách vždy na 6 minut.



Obrázek 10 – Akumulační nádrž



Obrázek 11 - Ponorné kalové čerpadlo Ebara Optima [30]



Obrázek 12 - Q/H křivka ponorného kalového čerpadla Ebara Optima [30]

V nádrži je kromě čerpadla také čidlo Solinst Levelogger pro snímání hladiny vody (zaznamenává pokles hladiny v čase). Jedná se o válcové čidlo pověšené na provázku umožňujícím jeho vytahování pro získávání potřebných dat. Zařízení je uloženo na dně nádrže. Čidlo Levelogger je doplněno podobným zařízením, zvaným Barologger, které zaznamenává atmosférický tlak v okamžiku zaznamenání hydrostatického tlaku v akumulární nádrži. Při výsledném získávání potřebných dat je v programu Levelogger automaticky prováděna barometrická kompenzace zohledňující vliv kolísání atmosférického tlaku (záznam Barologgeru) na tlak vodního sloupce (záznam Leveloggeru).



Obrázek 13 - Čidlo Solinst Levellogger [31]



Obrázek 14 - Čidlo Solinst Barologger [32]



Obrázek 15 - Schéma barometrické kompenzace [33]

Tabulka 13 - Technické parametry čidel [31]

Přesnost měření:	$\pm 0.05\%$ FS (Barologger 5: ± 0.05 kPa)	FS = plný rozsah (full scale)
Rezoluce:	0.002% až 0.0006% FS	
Jednotky měření:	m, cm, ft., psi, kPa, bar, °C, °F (Barologger 5: psi, kPa, mbar, °C, °F)	
Normalizace:	Automatická teplotní kompenzace	
Teplotní rozsah:	0 °C až 50°C (Barologger -10 °C až + 50°C)	
Přesnost teplotního senzoru:	± 0.05 °C	
Výdrž baterie:	10 roků - jedno čtení za minutu	
Přesnost hodin:	± 1 minuta/rok (-20 °C až 80 °C)	

Vertikální filtr je konstruován celý jako nadzemní s předpokladem intenzivního výparu odpadní vody. Obvod filtru byl proveden z kamenné hrázky, s vnitřními rozměry 1,5 x 1,5 m. Do vzniklého prostoru byla vložena hydroizolační vrstva (hydroizolace EPDM tloušťky 1,02 mm PondGard oboustranně krytá geotextilií).



Obrázek 16 – Hydroizolační souvrství

Následně byly vytvořeny stěny filtru z pytlů plněných cihelným recyklátem o frakci 0/4 mm od dodavatele Pokros Čebín s travní směsí. Spodní vrstva je tvořena z PP pytlů, další vrstvy jsou tvořeny speciálními pytli z netkané geotextilie o hustotě 300 g/m². Geotextilní pytle jsou šity tak, aby z části zasahovaly na dno vertikálního filtru s cílem intenzivního nasycení vodou. Celkově jsou realizovány 3 vrstvy pytlů o celkové výšce vertikálního filtru 80 cm.



Obrázek 17 - Realizace stěn vertikálního filtru z pytlů plněných recyklátem.

Výše popsané řešení stěn filtru (s pytli a travní směsí) bylo zvoleno pro maximalizaci evapotranspiračního úhrnu (stěny nejsou od samotného filtračního souvrství odděleny hydroizolací, protože je žádoucí jejich sycení upravovanou odpadní vodou). Spodní vrstva pytlů byla plněna směsí recyklátu a travní směsí Gardol na slunná místa, další vrstvy jí byly jen posypány.

Zavlažování pytlů je zajištěno kapkovými zavlažovači napojenými na čerpadlo ve výše popsané akumulční nádrži. Konkrétně se jedná o kapkovač AXIOS o kapacitě 8 l/h od dodavatele Agrotherm.



Obrázek 18 - Kapková závlaha AXIOS

Samotné filtrační prostředí bylo voleno tak, aby co nejvíce odpovídalo reálnému provedení běžných vertikálních filtrů. Drenážní vrstva z praného kameniva o frakci 8/16P mm o tloušťce 100 mm je vybavena potrubím PVC DREN DN 40 délky 2 m.



Obrázek 19 - Realizace drenážní vrstvy a prostupu hydroizolací

Drén je napojen na potrubí PP-HT DN 40 přes prostup hydroizolací (řešen přírubovou tvarovkou připojenou z obou stran prostřednictvím nerezových šroubů, kontaktní plocha byla opatřena těsnící pryží). V případě modelu byla pro malou výšku filtru vynechána přechodná vrstva z praného kameniva frakce 4/8P mm, a tak je nad drenáží přímo umístěna 600 mm vysoká vrstva z praného kameniva 0/4P mm (desetiprocentní propad

je v rozmezí $0,2 < d_{10} < 0,4$ a současně propad sítím s průměrem ok menším než $0,063$ musí být $< 3 \%$).



Obrázek 20 - realizace filtrační vrstvy a výsadba mokřadních rostlin

Po dokončení filtrační vrstvy byly vysázeny mokřadní rostliny (5 x sítina sivá, 3 x ostřice latnatá) a nakonec byla realizována krycí vrstva o tl. 100 mm z přírodního praného kameniva frakce 8/16P mm.



Obrázek 21 - Vertikální filtr

Odtok vody z vertikálního filtru do akumulární nádrže je řešen gravitačním potrubím PP-HT DN 40. Celková délka odtokového potrubí je 6,5 m a nachází se na něm jedno koleno 60° a jedno koleno 90° .



Obrázek 22 - Odtokové potrubí z vertikálního filtru do akumulční nádrže (vlevo: pohled od filtru k nádrži, vpravo: boční pohled)



Obrázek 23 - Pohled na model vertikálního filtru v květnu 2022

3.5.1 Bilanční rovnice pro laboratorní model

Celková bilance výparu je ve výše popsaném modelu dána jako derivace objemu vody v akumulční nádrži v čase, tedy dle následující bilanční rovnice:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{(t)} - E_{p(Vt)} + H_s$$

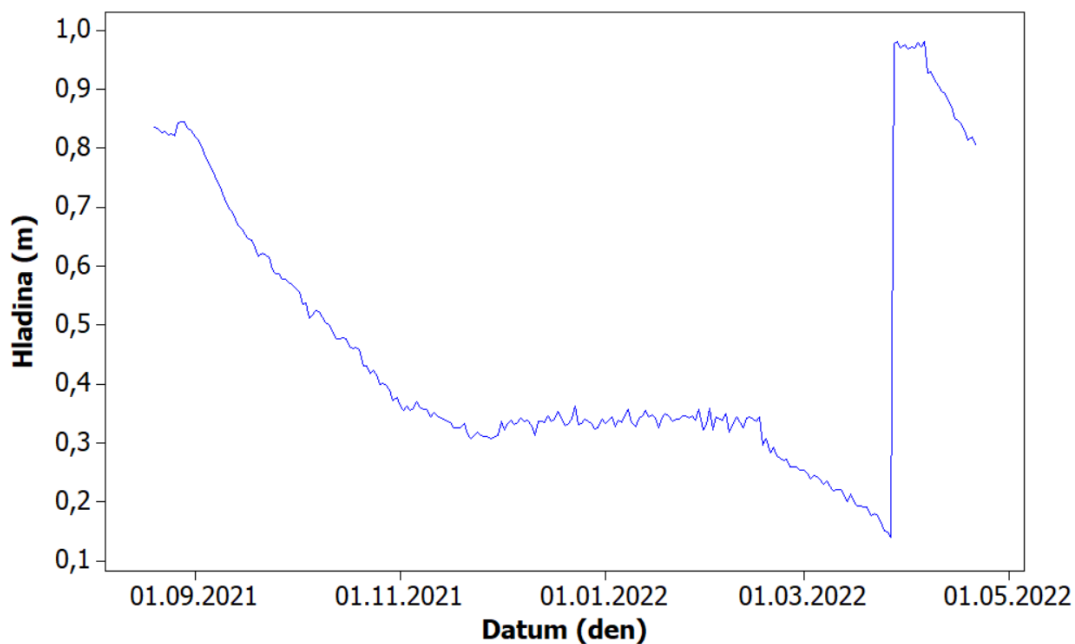
kde:

- dV/dt – změna objemu vody v akumulární nádrži v čase
- $Q_{(t)}$ – přítok vody z akumulární nádrže na vertikální filtr
- $E_{p(Vt)}$ – úhrn evapotranspirace z vertikálního filtru
- H_s – úhrn srážek vody na vertikální filtr

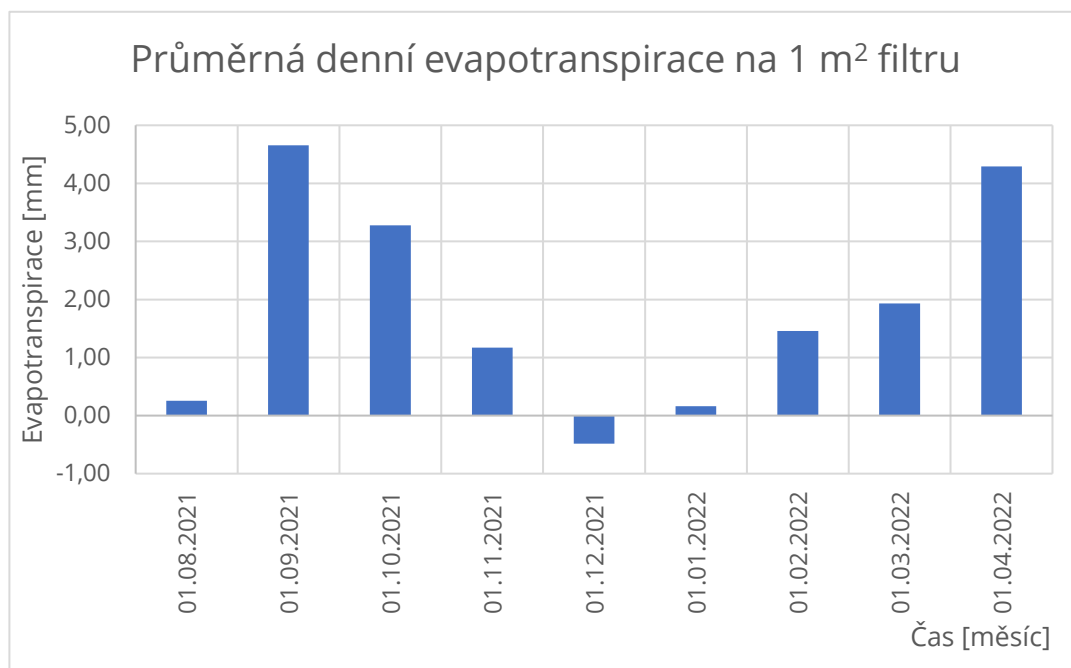
Podle výše uvedené rovnice probíhá vyhodnocování naměřených hodnot podle naměřených srážek a poklesu hladiny, resp. dílčích úhrnů evapotranspirace pro jednotlivé dny. Podíl dV/dt definuje

3.6 NAMĚŘENÁ DATA

Měření dat probíhalo od 19. srpna 2021. V akumulární nádrži byl sledován hydrostatický tlak nad čidlem, ponořeném u dna nádrže. Kromě měření hladiny byla zaznamenávána i teplota vody, a to v intervalu tří hodin. Druhé čidlo, umístěné v zastíněném prostoru v blízkosti modelu, sledovalo vývoj atmosférického tlaku a teplotu vzduchu každou hodinu. Naměřená sada dat byla stažena pomocí optické čtecí hlavy do notebooku s nainstalovaným programem Levelogger od výrobce čidel Solinst. Přímo v programu Levelogger byla provedena barometrická kompenzace, díky níž nebyla naměřená sada dat zatížena chybou v důsledku kolísání atmosférického tlaku. Poté se v programu Excel stanovily průměrné denní hodnoty teploty vody i vzduchu. Společně s poslední hodnotou hydrostatického tlaku u dna nádrže v každém dni byla data převedena do statistického programu Minitab.



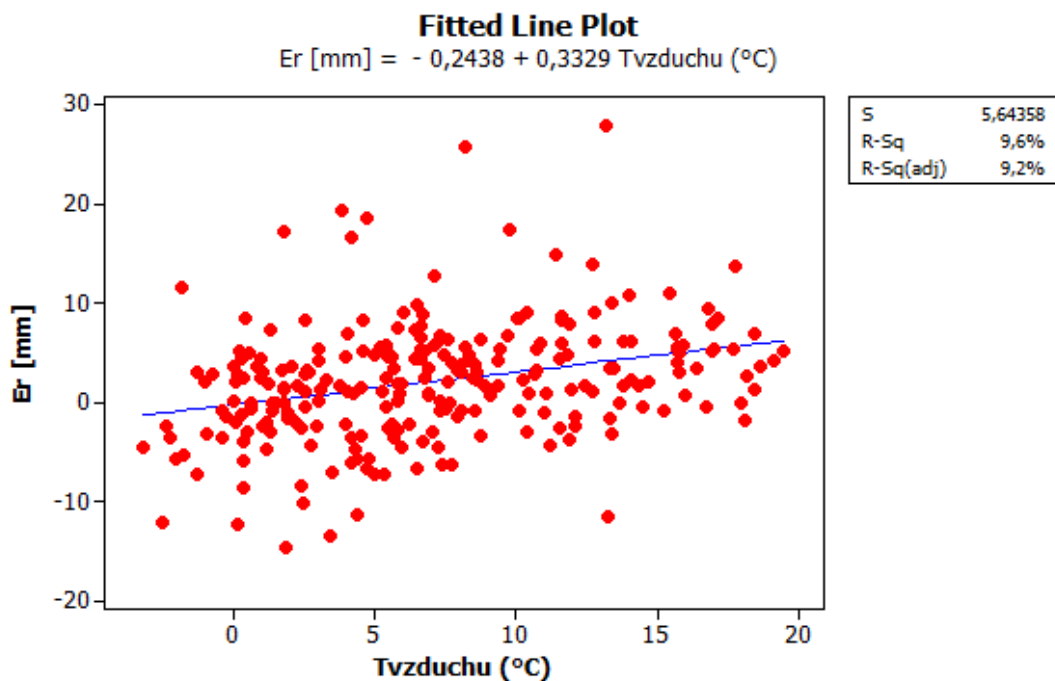
Obrázek 24 - Záznam úrovně hladiny v akumulční nádrži



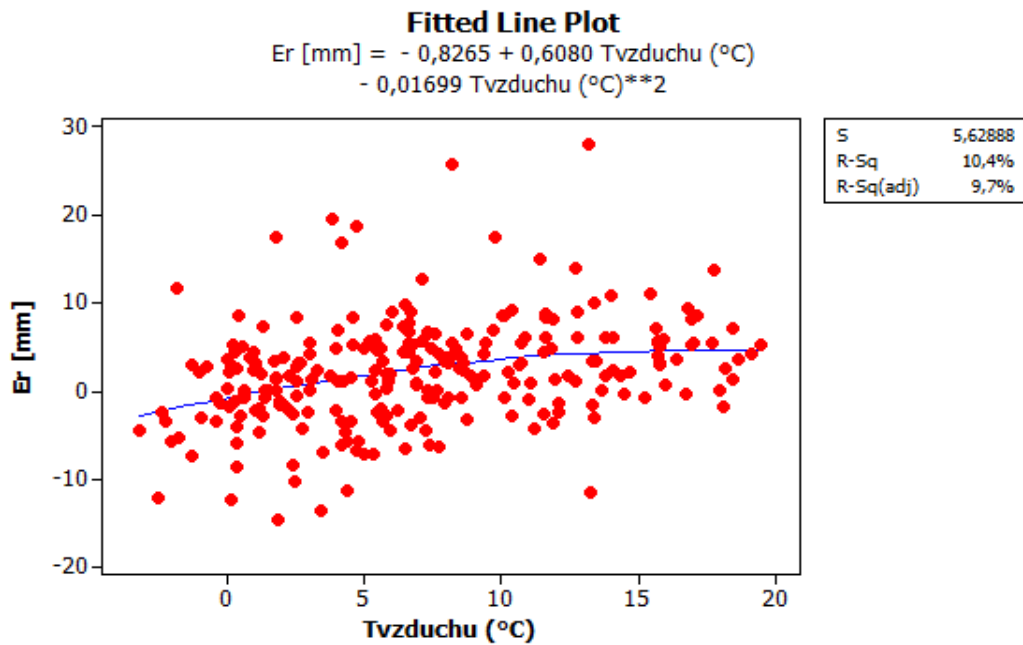
Obrázek 25 - Průměrný denní výpar v daném měsíci

Znalost denního poklesu hladiny vody v nádrži a plochy nádrže (1,20 m²) umožnila výpočet denního objemu vypařené (případně deštěm zachycené) vody. Objem vypařené vody vztážený na plochu modelu vertikálního filtru (2,25 m²) pak v přepočtu na výšku vodního

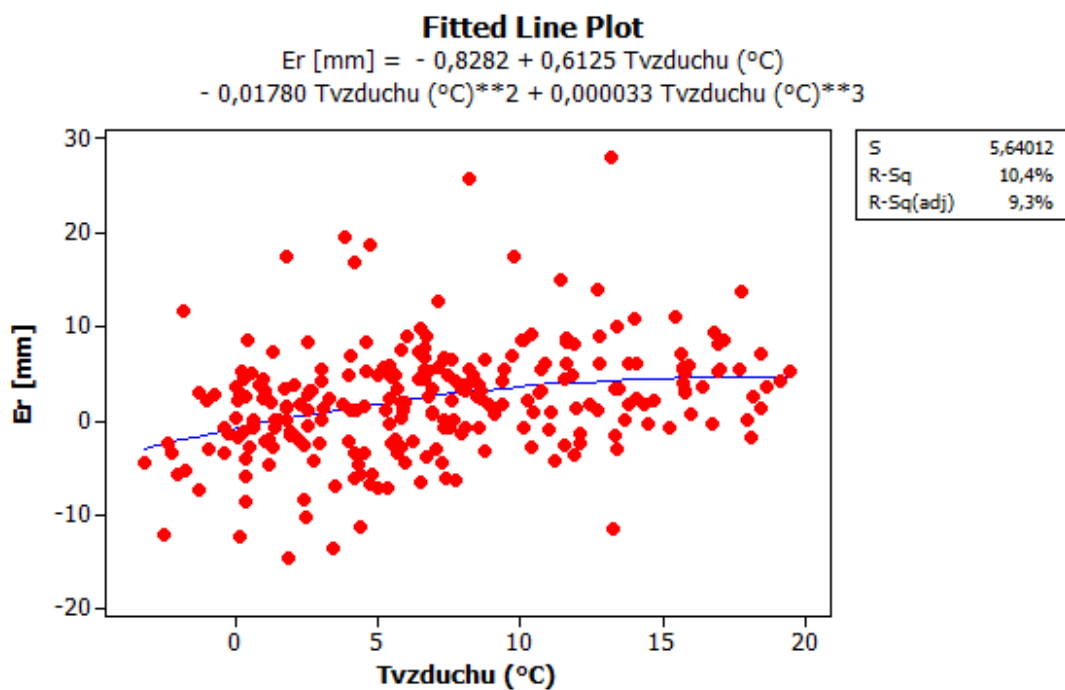
sloupce představuje evapotranspirační úhrn daného dne. Dále umístěné grafy vyobrazují závislost těchto denních úhrnů na průměrné teplotě vzduchu dne a hledají spojitost mezi těmito veličinami regresní analýzou.



Obrázek 26 - Lineární regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu

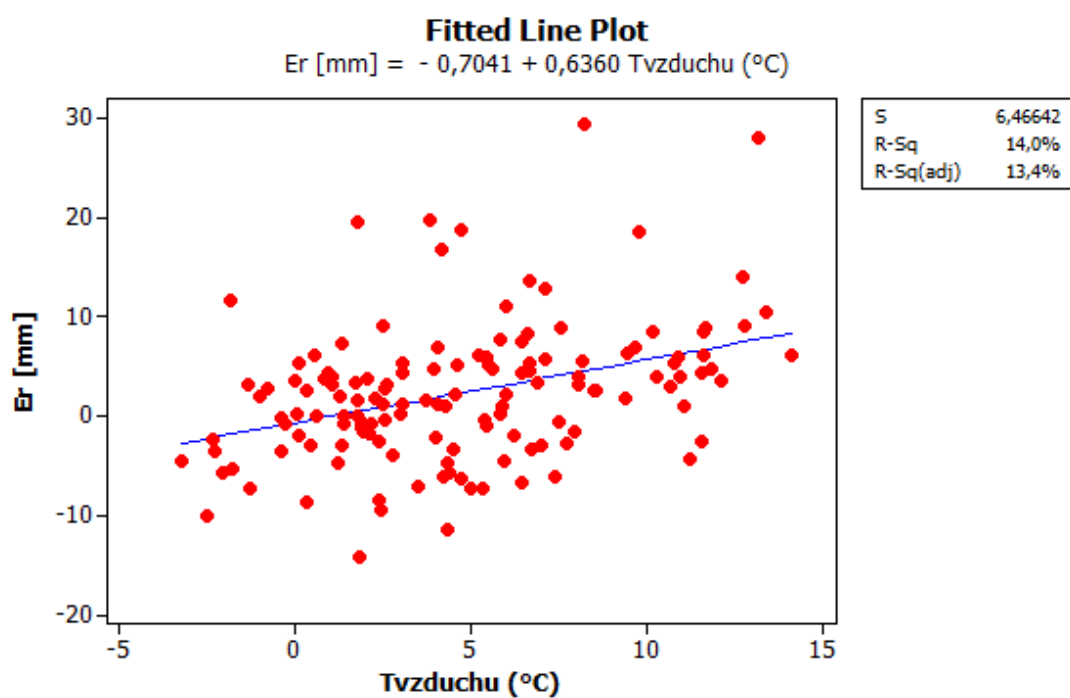


Obrázek 27 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu

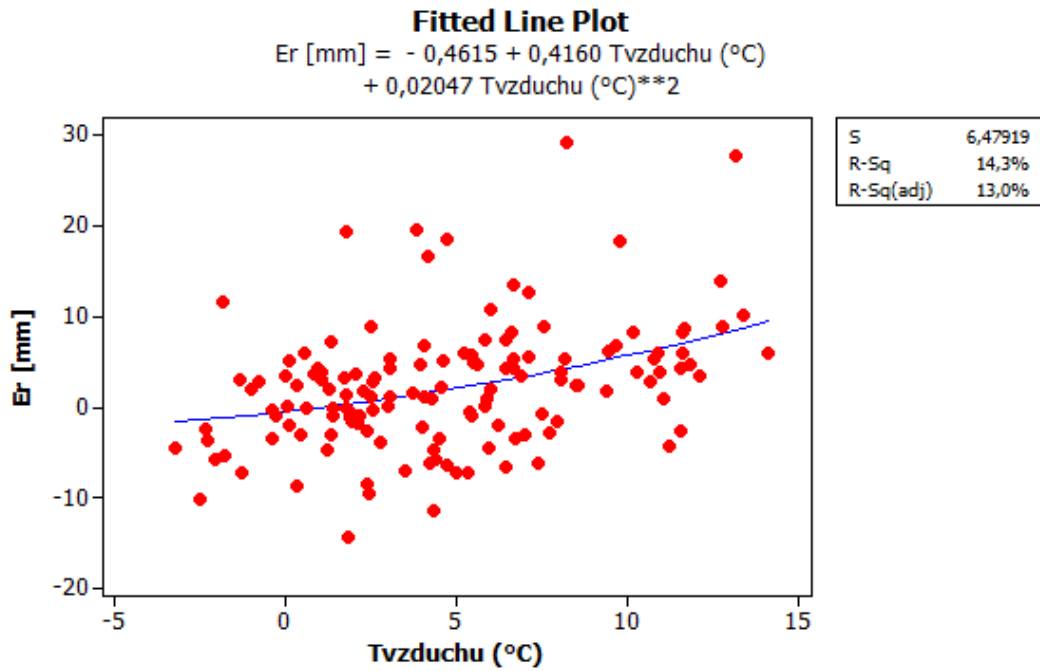


Obrázek 28 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu

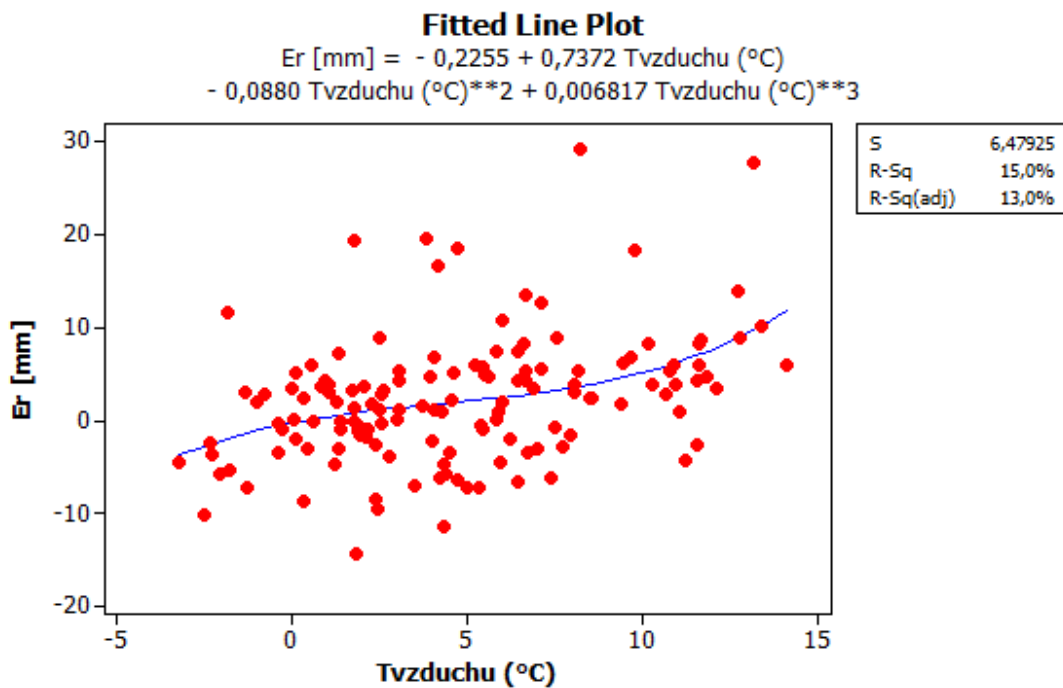
Závislost evapotranspiračního úhrnu na teplotě vzduchu, je zřetelně zatížena zápornými hodnotami vypočteného úhrnu. Značná část záporných dat byla způsobena srážkami. Srážková voda zachycená povrchem vertikálního filtru otekla drenáží do nádrže a tím zvýšila hladina vody v ní. Nejbližší sledování dešťových úhrnů je realizováno na meteorologické stanici ústavu vodního hospodářství krajiny. Vedoucí stanice poskytl veškerá naměřená data v období od 14. prosince 2021 do 3. května 2022. Dřívější záznamy bohužel není možné získat, protože meteorologická stanice byla mimo provoz. Naměřená data pro veškeré další statistické zpracování byla tedy brána jen pro období od 14. prosince 2022. Kompenzace naměřených srážkových událostí by měla záporné hodnoty evapotranspirace v následující regresní analýze eliminovat na minimum.



Obrázek 29 - Lineární regrese dat závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek



Obrázek 30 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek



Obrázek 31 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek

Zohlednění naměřených srážkových úhrnů bohužel nevedlo eliminaci záporných hodnot evapotranspirace. Výskyt záporných výparů je nejspíše dán charakterem zimního počasí, které způsobilo jak vytvoření ledu v nádrži, tak i zamrznutí potrubí přivádějící vodu z filtru do nádrže. Kvůli zamrznutí potrubí bylo celé měření pozastaveno. Zamrznutí hladiny vody

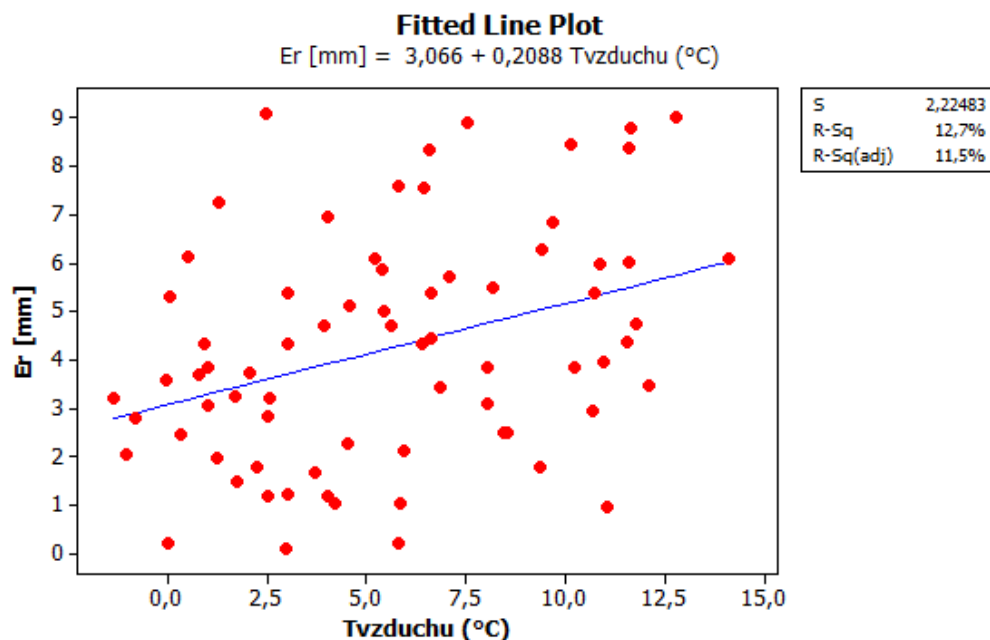
dále zapříčinilo velké kolísání hydrostatického tlaku, ke kterému není ani čidlo, ani celé měření přizpůsobeno.

Největší spolehlivosti ze všech tří regresí bylo dosaženo u kubické křivky (15,0 %). Kvadratická regrese dosáhla spolehlivosti 14,3 % a lineární 14,0 %.

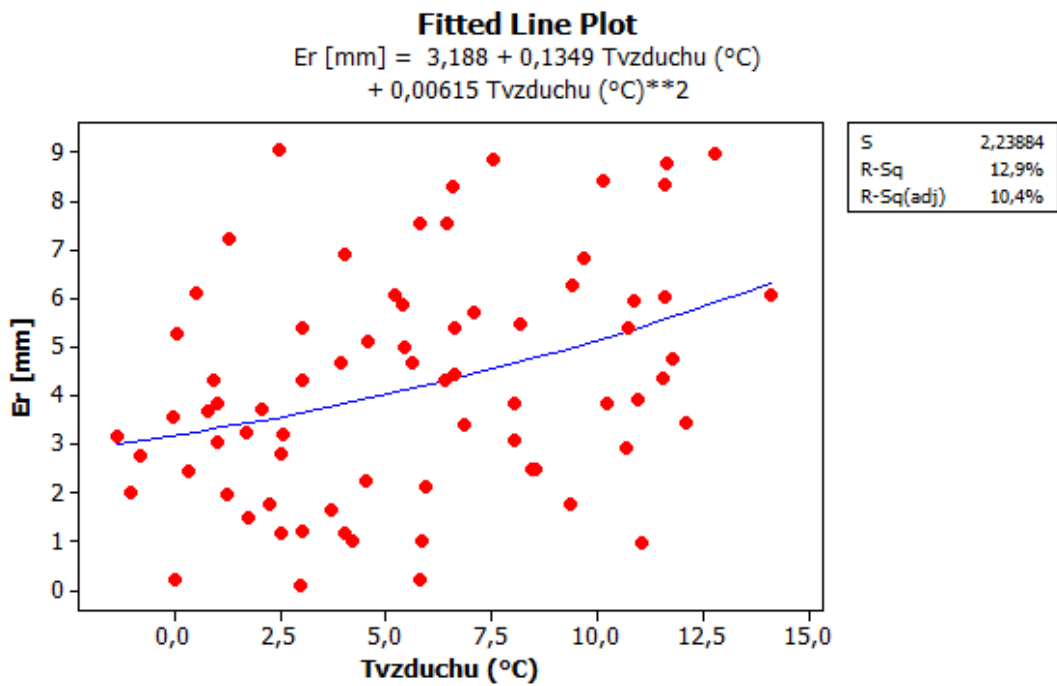
Naměřená datová řada umožňuje buďto vyřazení záporných dat (se současným vyloučením příliš velkých evapotranspiračních úhrnů), vyřazení dat naměřených v období, ve kterém bylo čerpadlo odstaveno, zprůměrování dat naměřených v daných týdnech, či kombinaci těchto metod. Za stávajícího vyhodnocení není možné predikovat budoucí výpar na základě teploty vzduchu – tato predikce je zatížena velice výraznou chybou.

3.6.1 Filtrace naměřených dat

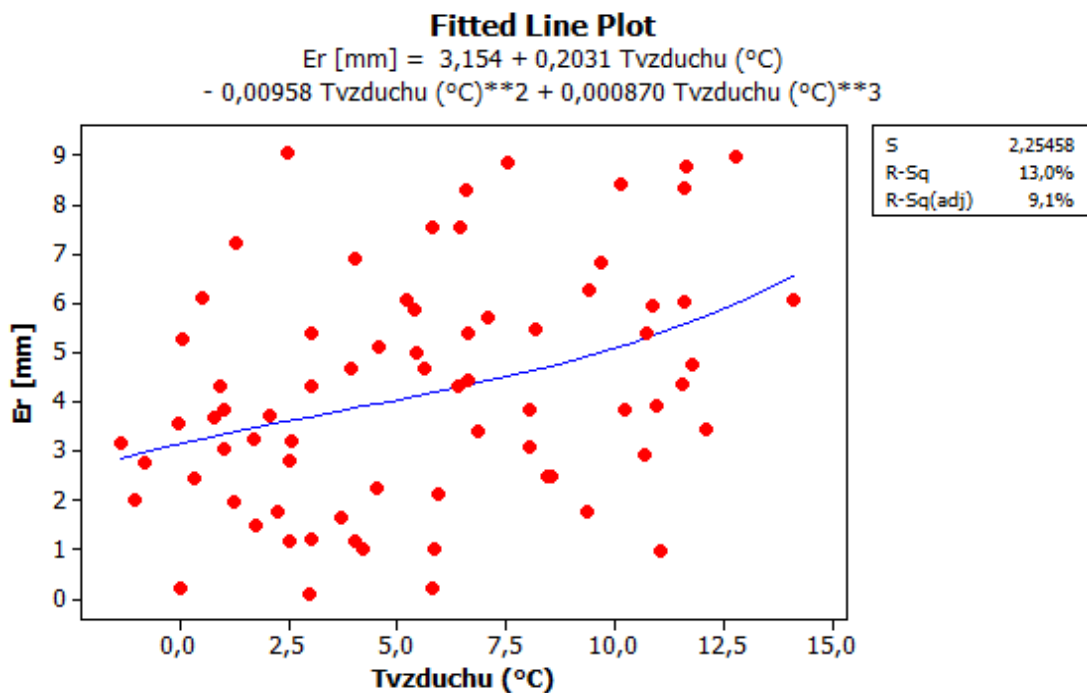
V zimním období převažuje výskyt záporných hodnot stanovených denních výparů. Jedná se s největší pravděpodobností o hodnoty způsobené vlivem mrazu. Záporné hodnoty nejsou reálné, proto jsou pro vytváření regresních modelů vyřazeny. Dále jsou vyřazeny vysoké úhrny evapotranspirace (jejichž původ je neznámý, odhadovat lze změny tlaku vlivem zamrznutí hladiny, vody v nádrži, apod.). Za vysoká data jsou pro účely práce považovány evapotranspirační úhrny nad 10 mm/den, protože v období prosince až dubna lze předpokládat evapotranspiraci o hodnotě nižší. Vstupní datová řada byla opět proložena lineární, kvadratickou, i kubickou regresní křivkou.



Obrázek 32 - Lineární regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat



Obrázek 34 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat

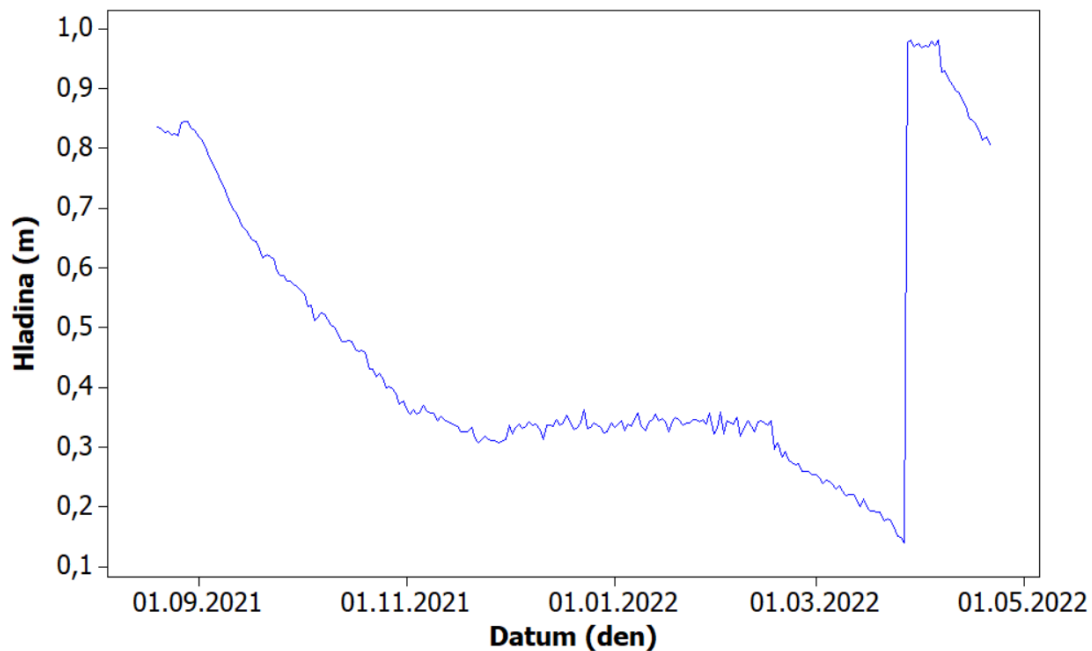


Obrázek 33 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat

Největší spolehlivosti ze všech tří metod bylo dosaženo u kubické regrese (13 %). Kvadratická regrese dosáhla spolehlivosti 12,9 % a lineární 12,7 %. Všechny tři výsledky jsou tedy méně vhodné, než výsledky z regrese nefiltrovaných dat.

3.6.2 Druhá fáze filtrace vstupních dat

Čerpadlo bylo odstaveno od 14. prosince 2021. Z níže vyobrazeného grafu je zřejmé téměř zastavení poklesu hladiny už v prosinci 2021. Hladina začala prokazatelně klesat se zapnutím čerpadla od 16. února 2022. Pokles hladiny po zapojení čerpadla byl ze začátku silný, protože se nejprve musel nasytit filtr. Po nasycení filtru voda teprve začíná odtékat do akumulární nádrže, kdy je mírnější pokles hladiny již dán pouze evapotranspirací.

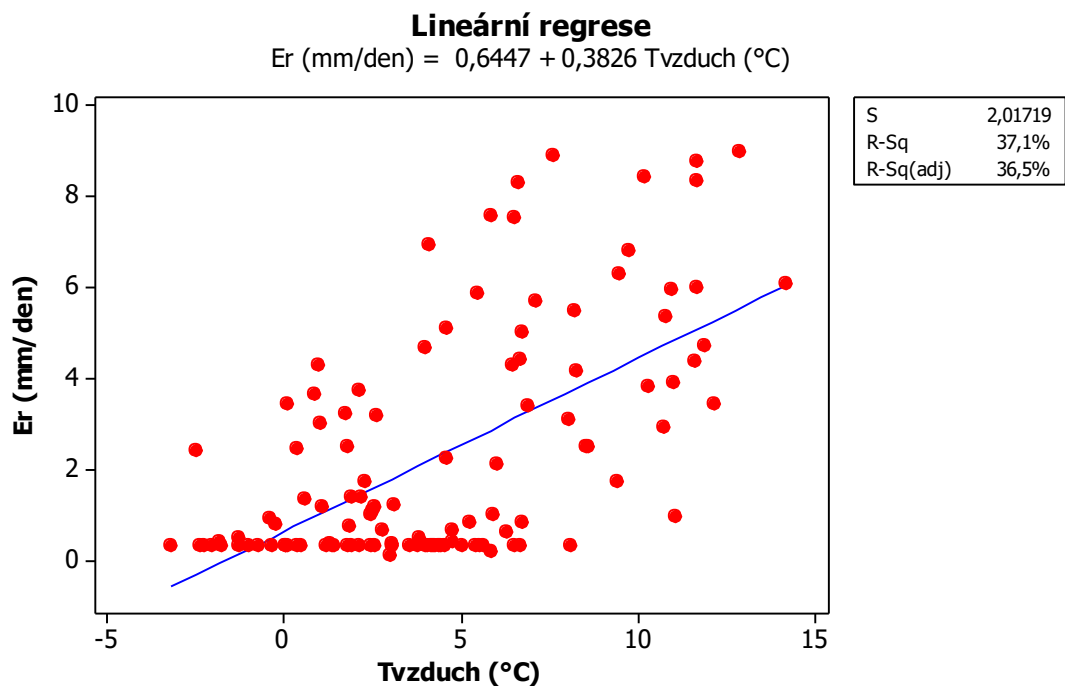


Obrázek 35 - Výška hladiny v nádrži od začátku měření

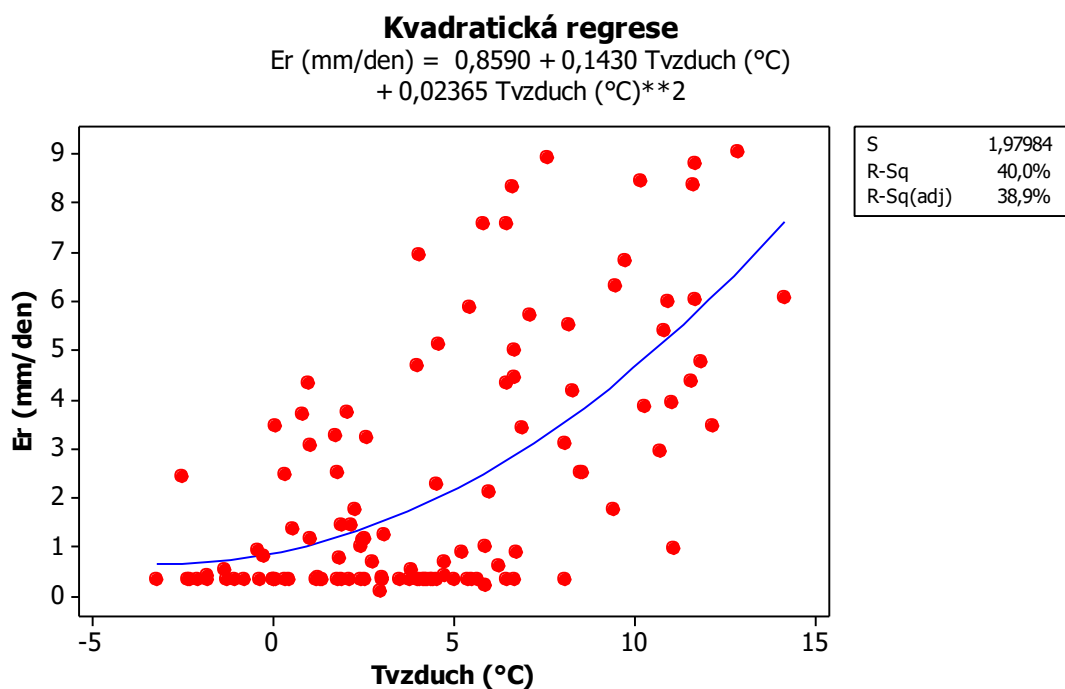
Vzhledem ke skutečnosti, že naměřené srážkové úhrny nebyly k dispozici až od 14. prosince 2021 a čerpání vody na filtr bylo vyřazeno od 14. prosince 2021 do 17. února 2022, pokles hladiny mezi tímto obdobím byl přepočítán na průměrnou denní hodnotu, čímž byl stanoven i průměrný denní výpar pro dané období.

Zároveň byly vyřazeny záporné a příliš velké evapotranspirační úhrny, a to stejným způsobem, jako v předchozí metodě.

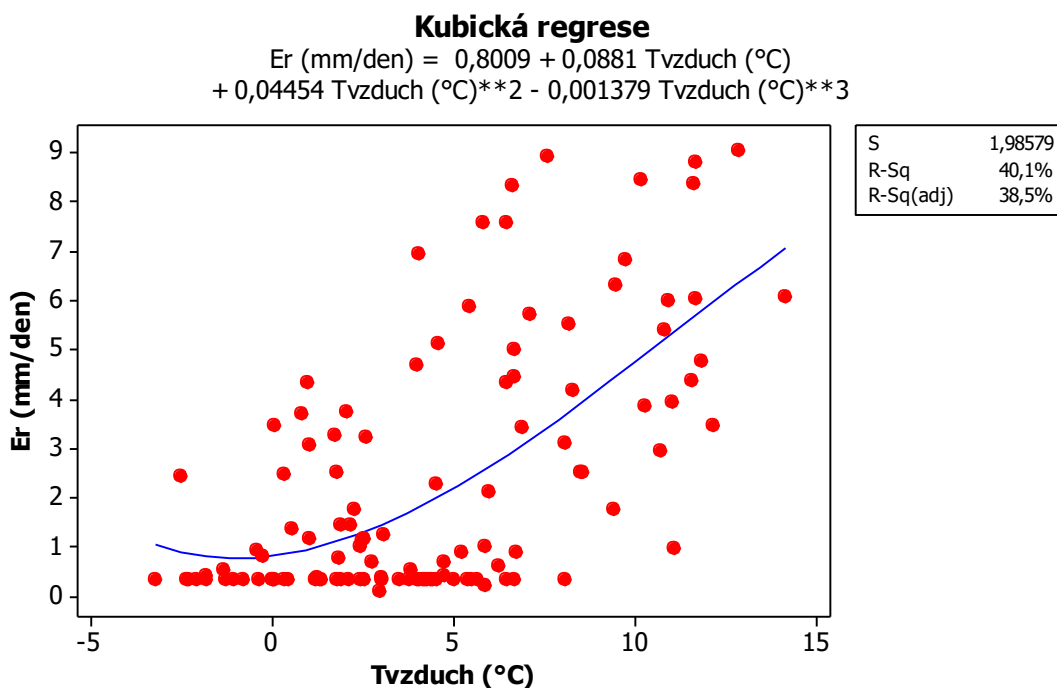
Regresní analýza byla opět provedena v závislosti reálné evapotranspirace na teplotě vzduchu.



Obrázek 36 - Lineární regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace



Obrázek 37 - Kvadratická regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace



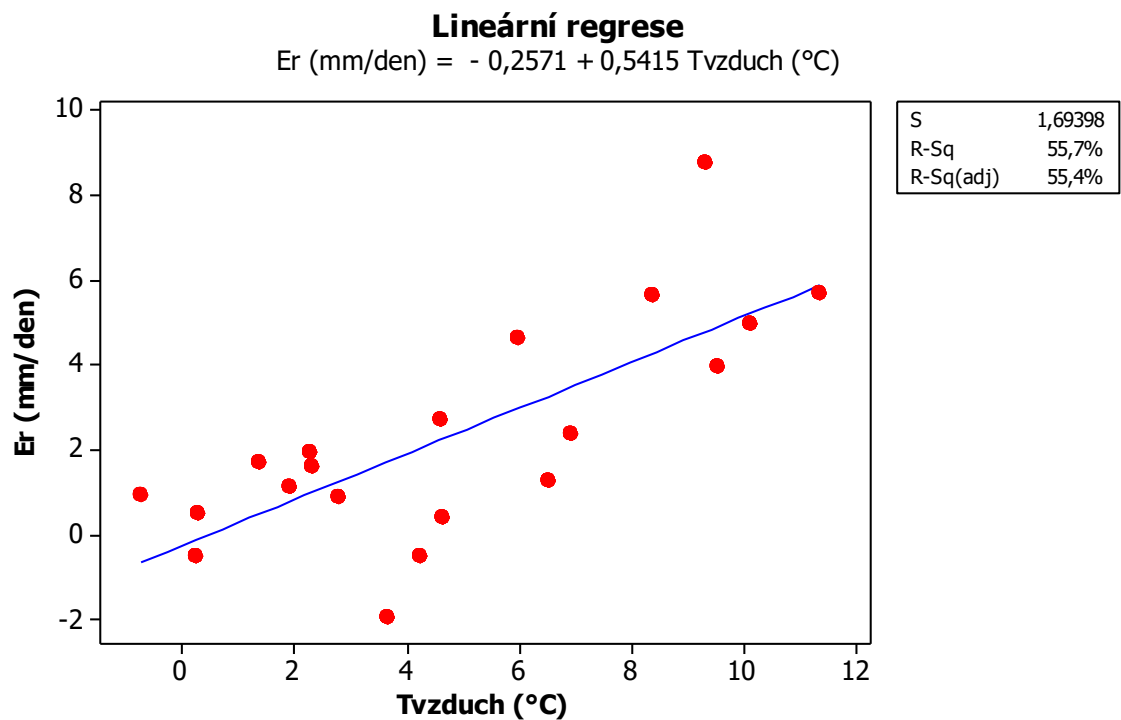
Obrázek 38 - Kubická regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace

Největší spolehlivosti ze všech tří metod bylo dosaženo u kubické regrese (40,1 %). Kvadratická regrese dosáhla spolehlivosti 40,0 % a lineární 37,1 %. Oproti předchozí metodě se jedná o výrazné zvýšení kvality výstupu lineární a kvadratické regrese. U kubické regrese se objevuje nejistota s prvotním poklesem reálné evapotranspirace se stoupáním teploty vzduchu.

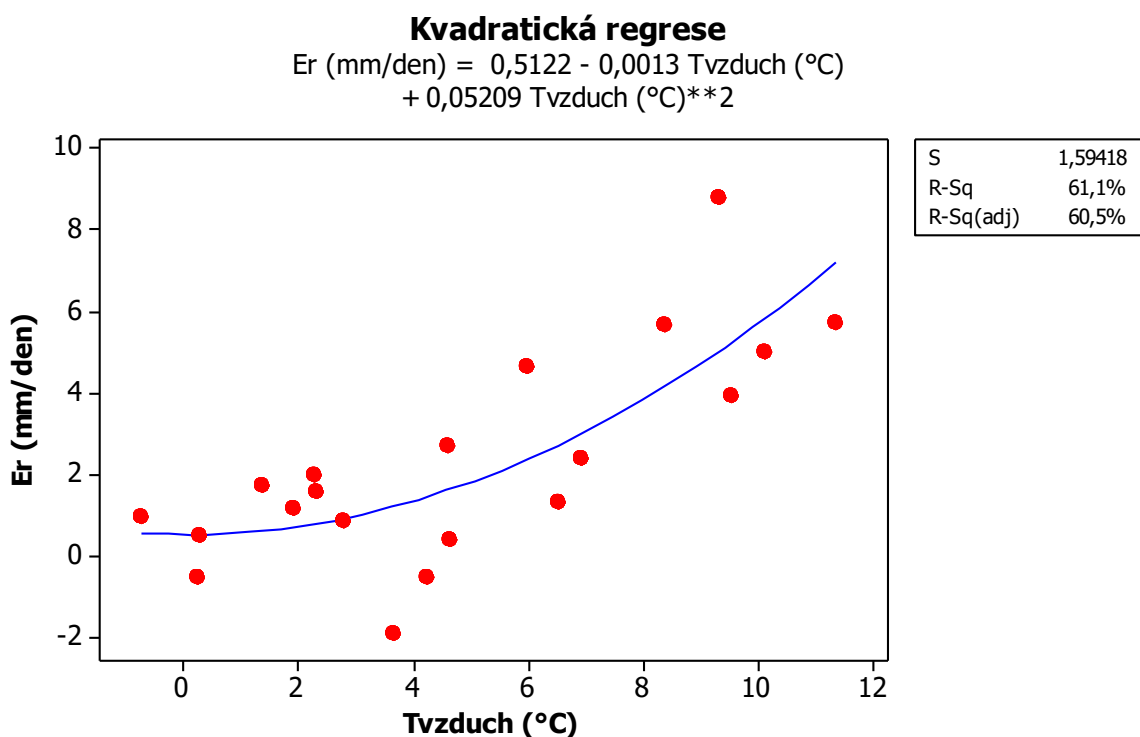
3.6.3 Zpracování naměřených dat v týdenních průměrech

Druhou metodou, kterou lze zvýšit kvalitu výstupů statistického zpracování, je zprůměrování dat do týdenních úseků. Metoda by měla na rozdíl od předchozí počítat s celou naměřenou datovou sadou. Data byla opět kompenzována o srážkové úhrny naměřené na meteostanici UHVK.

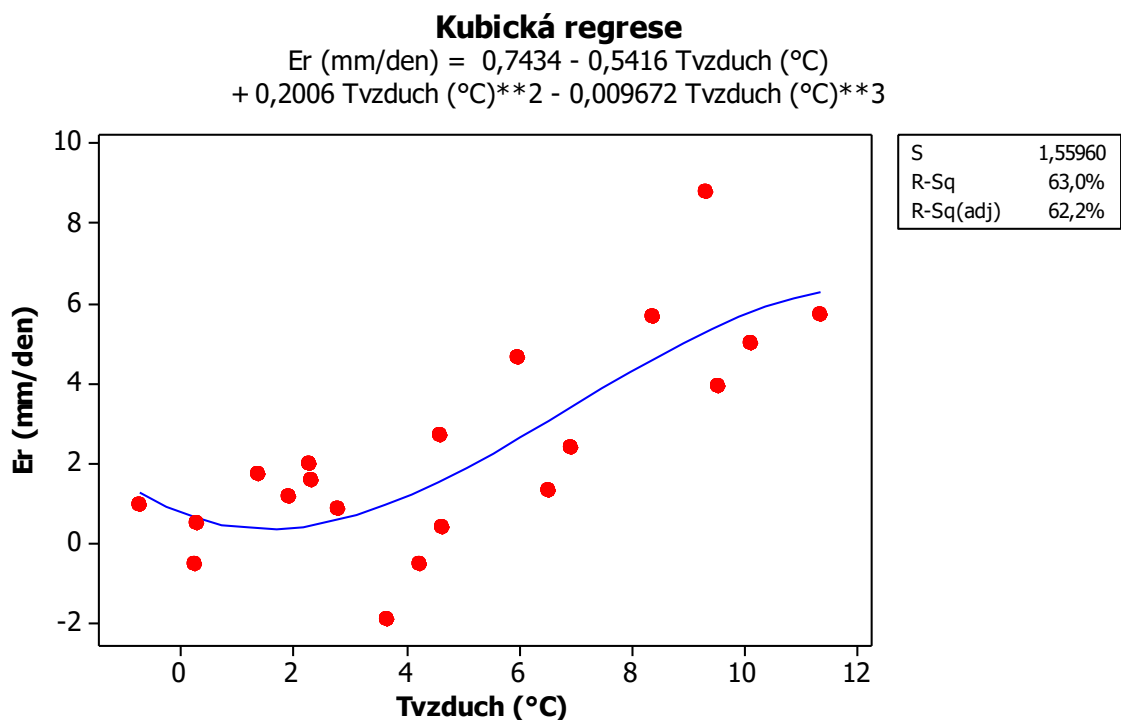
Průměrné hodnoty byly vypočteny pro naměřené hodnoty výparu. Pro první týden datové řady, postrádající první den týdne, byly průměrné hodnoty stanoveny z ostatních šesti dnů. Postup pro poslední týden byl obdobný.



Obrázek 39 - Lineární regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech



Obrázek 40 - Kvadratická regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech

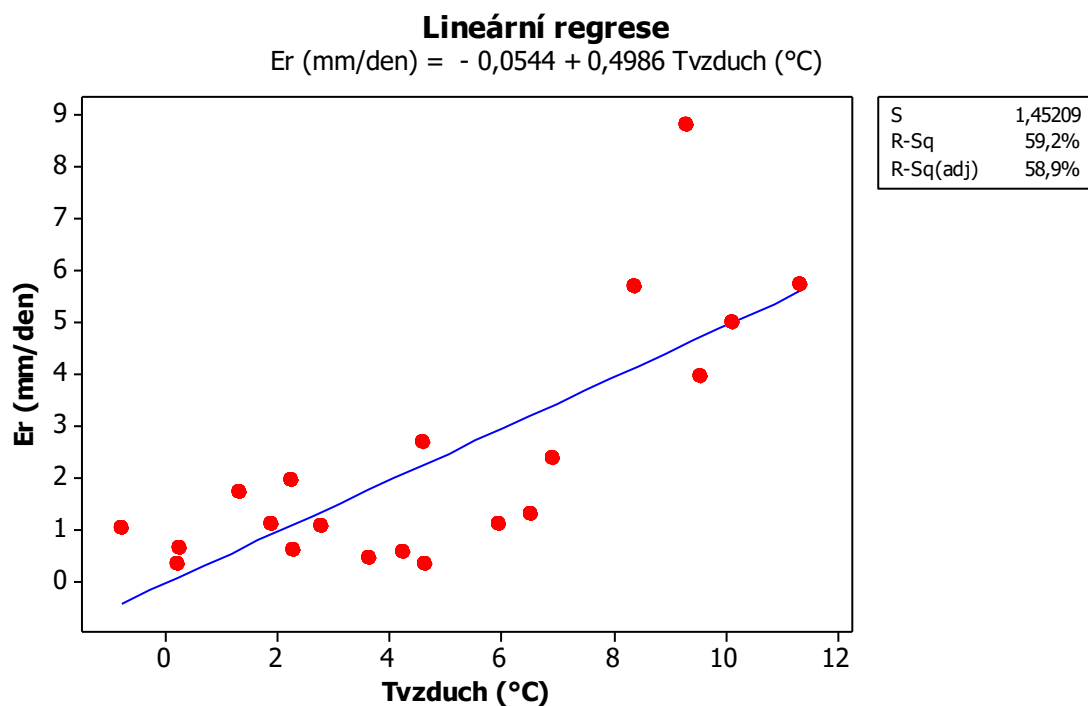


Obrázek 41 - Kubická regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech

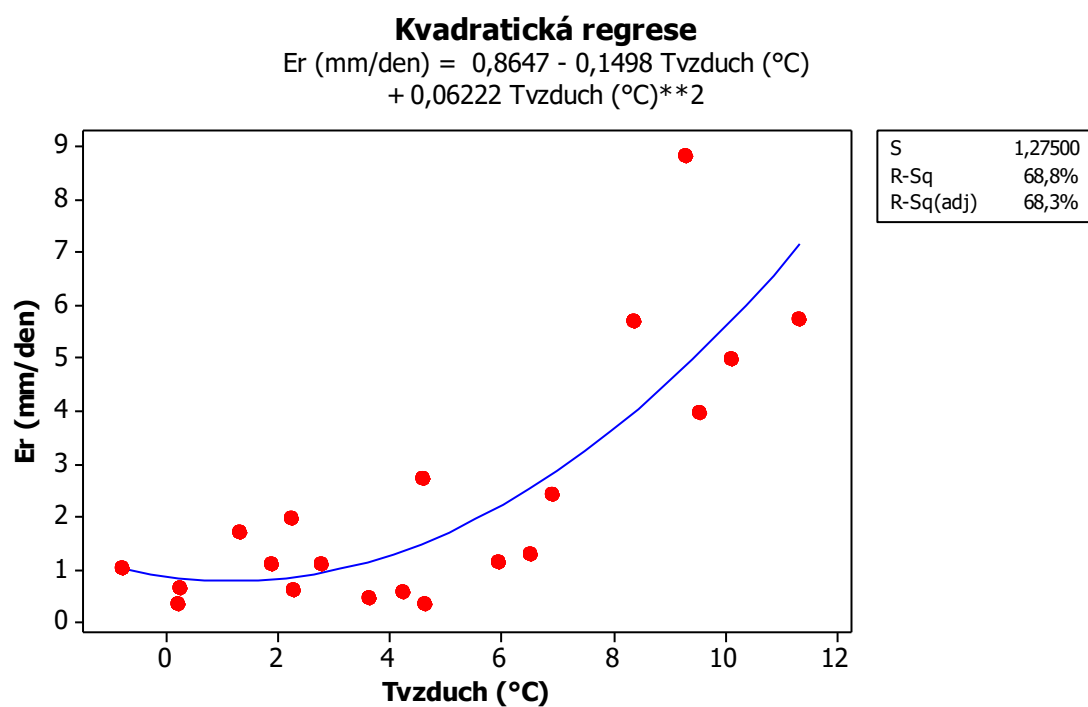
Největší spolehlivosti ze všech tří metod bylo dosaženo u kubické regrese (60,5 %). Kvadratická regrese dosáhla spolehlivosti 59,9 % a lineární 54,0 %. V porovnání s předešlou dvojicí metod se tedy jedná o statisticky nejpřesnější výstupy. U kubické regrese se ale opět objevuje počáteční pokles evapotranspirace se stoupající teplotou.

3.6.4 Finální filtrace vstupních dat

Vzhledem ke spolehlivosti metod b) i c) se jeví jako vhodné zpracování vstupních dat kombinací obou metod spočívající v nahrazení dat od 14. prosince 2021 do 17. února 2022 průměrnou denní evapotranspirací za celé období s následným stanovením týdenních průměrů. Výsledky zpracování této metody jsou vidět v následujících grafech.



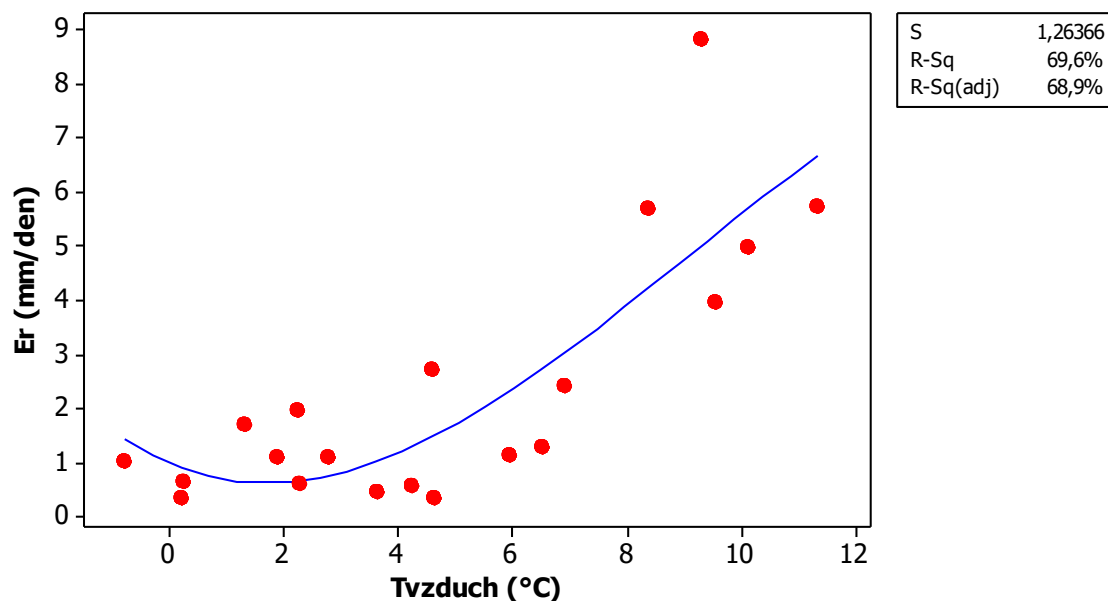
Obrázek 42 - Lineární regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat



Obrázek 43 - Kvadratická regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat

Kubická regrese

$$Er \text{ (mm/den)} = 0,9954 - 0,4553 \text{ Tvzduch (}^\circ\text{C)} + 0,1462 \text{ Tvzduch (}^\circ\text{C)}^{**2} - 0,005469 \text{ Tvzduch (}^\circ\text{C)}^{**3}$$



Obrázek 44 - Kubická regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat

Největší spolehlivosti ze všech tří metod bylo dosaženo u kubické regrese (69,6 %). Kvadratická regrese dosáhla spolehlivosti 68,8 % a lineární 59,2 %. Ze všech čtyř metod zpracování naměřených dat se jedná o statisticky nejspolehlivější výstupy. Nejistota týkající se poklesu evapotranspirace v závislosti na zvýšení teploty vzduchu se však objevuje nejen u kubické, ale i u kvadratické regrese.

3.6.5 Kalibrace empirických koeficientů

Hodnoty potenciální evapotranspirace byly stanoveny způsobem, který odpovídá metodice statistického zpracování reálné evapotranspirace. Jedná se o následující metody:

- Výpočet pro denní kroky
- Výpočet pro denní kroky s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla
- Zpracování dat v týdenních průměrech
- Kombinace zpracování dat v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla

Všechny výše zmíněné způsoby výpočtu proběhly za kalibrace rovnic referenční evapotranspirací, kterou je reálná evapotranspirace stanovená příslušným způsobem statistického zpracování naměřených dat. Kalibrace byla prováděna v programu Excel s využitím funkce řešitel. Empirické koeficienty byly upravovány tak, aby suma potenciální evapotranspirace za celé sledované období byla rovna souhrnnému úhrnu reálné evapotranspirace za sledované období. Hodnoty empirických koeficientů jednotlivých výpočtových metod (viz kapitola 3.4.4) jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 14 - Hodnoty empirických koeficientů metody Hargreaves

Koeficient	Způsob filtrace dat				
	Nefiltrovaná data	a)	b)	c)	d)
A	0,0023	0,0020	0,0018	0,0022	0,0018
B	17,8000	17,7065	16,6516	12,2389	15,3042
C	0,5000	0,4119	0,4099	0,3811	0,3854

Tabulka 15 - Hodnoty empirických koeficientů metody Turc

Koeficient	Způsob filtrace dat				
	Původní	a)	b)	c)	d)
A	0,1330	0,1655	0,1430	0,1559	0,1559
B	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000

Tabulka 16 - Hodnoty empirických koeficientů metody Thornthwaite

Koeficient	Způsob filtrace dat				
	Původní	a)	b)	c)	d)
a_u	1,1200	2,7184	2,5490	2,9581	2,9581

Tabulka 17 - Hodnoty empirických koeficientů metody Blaney-Criddle

Koeficient	Způsob filtrace dat				
	Původní	a)	b)	c)	d)
A	0,4600	0,6523	3,0913	3,6874	3,6874
B	8,0000	17,7596	0,0000	0,0000	0,0000

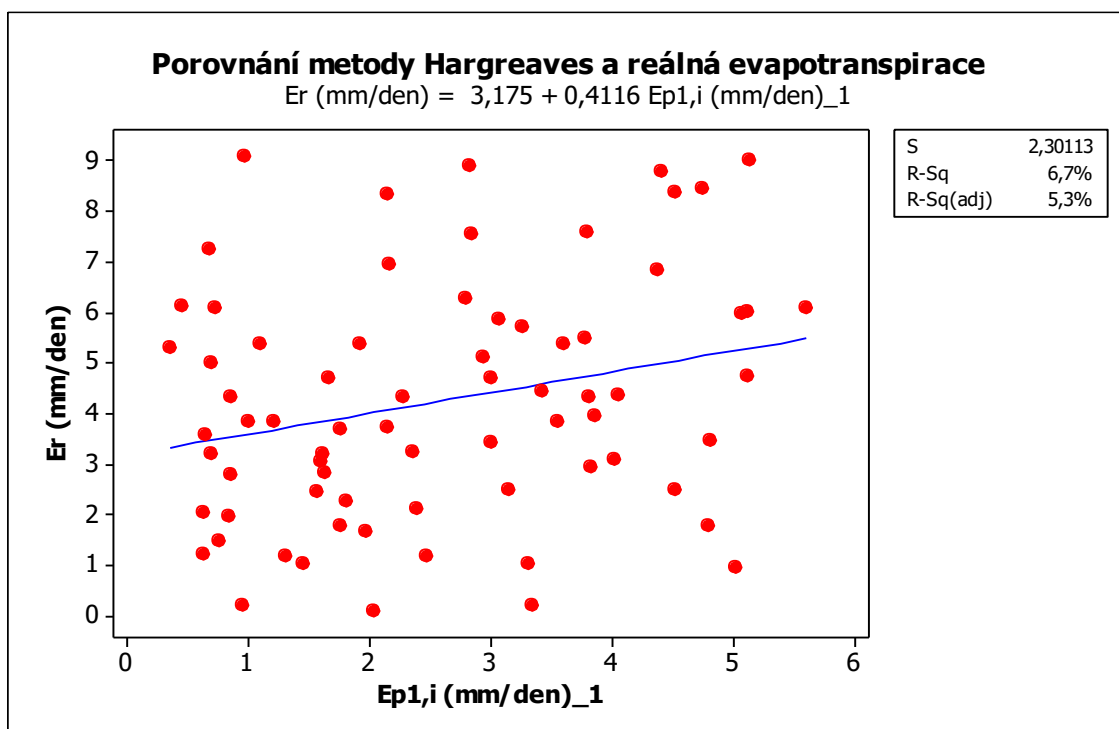
4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Již výše byly posouzeny spolehlivosti jednotlivých způsobů statistického zpracování dat. Lze předpokládat, že při zvyšující se spolehlivosti zpracování naměřených dat se bude zvyšovat spolehlivost metody stanovení potenciální evapotranspirace.

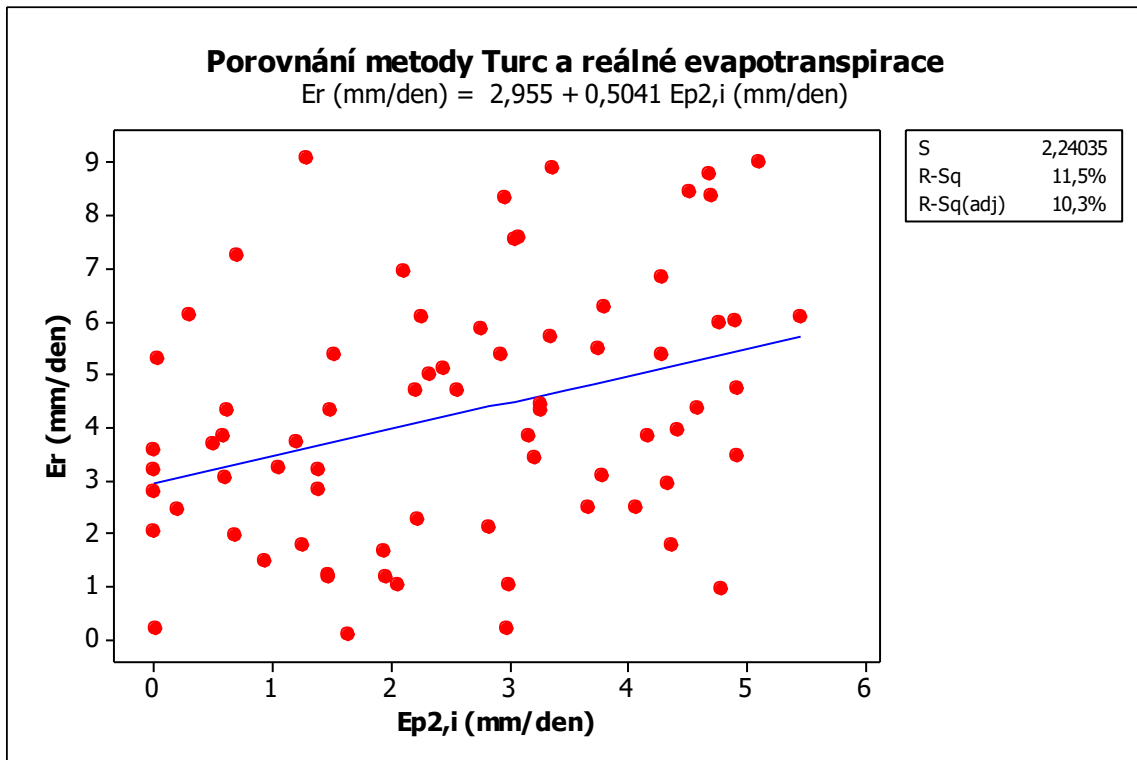
Vzhledem k předešlým nejistotám při kvadratické a kubické regresi dat jsou následující porovnání reálné a potenciální evapotranspirace prováděny pouze lineární regresi.

4.1 VÝPOČET PRO DENNÍ KROKY

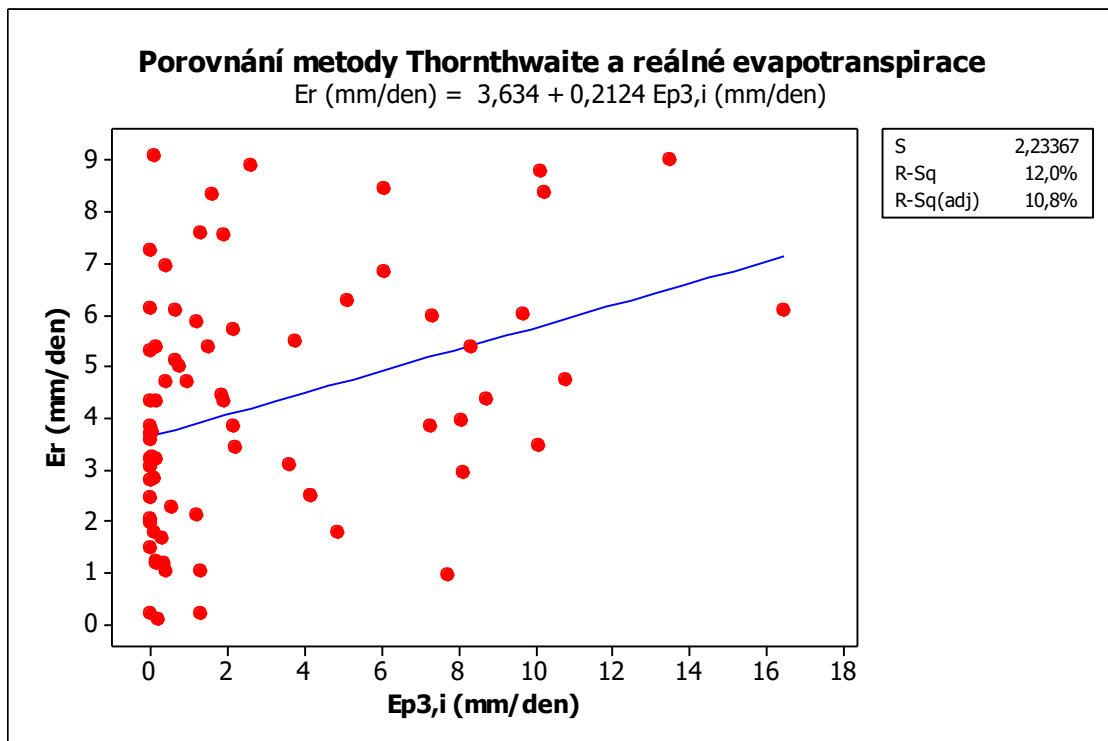
Metoda výpočtu spočívá ve stanovení denní evapotranspirace na základě znalosti naměřených průměrných, maximálních a minimálních teplot daných dnů. Dále byly použity záznamy o slunečním záření z meteorologické stanice UVHK.



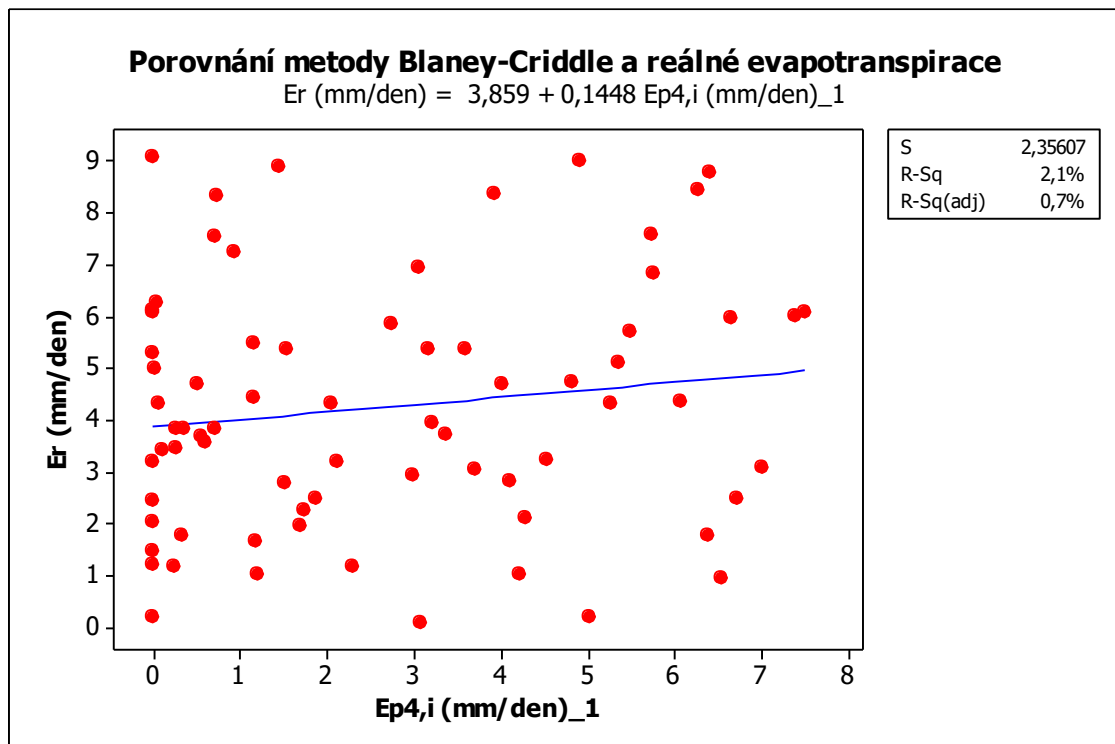
Obrázek 45 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves pro denní kroky



Obrázek 46 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc pro denní kroky



Obrázek 47 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite pro denní kroky



Obrázek 48 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle pro denní kroky

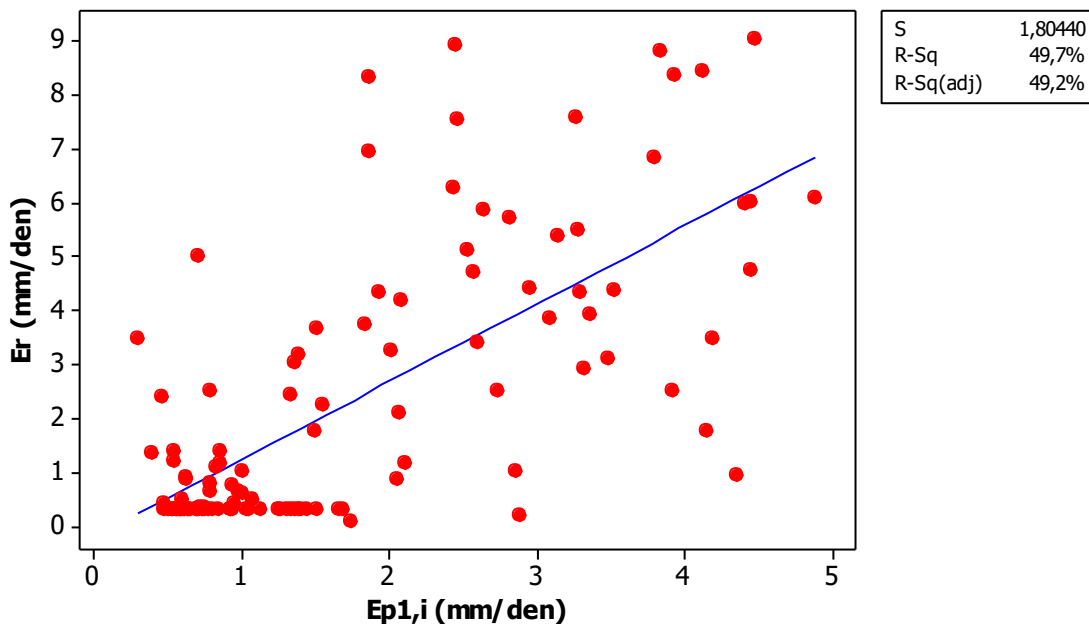
Nejspolehlivějšího stanovení dosáhla metoda Thornthwaite (12,0 %). Obdobná spolehlivost vypočtené potenciální evapotranspirace byla dosažena u metody Turc (11,5 %). Metoda Hargreaves byla vypočtena se spolehlivostí 6,7 %, a nejméně spolehlivý výstup byl vypočtený metodou Blaney-Criddle, a to se spolehlivostí 2,1 %. U všech výstupů bylo dosaženo velmi nízké spolehlivosti.

4.2 VÝPOČET PRO DENNÍ KROKY S VYŘAZENÍM DAT NAMĚŘENÝCH V OBDOBÍ Odstavení ČERPADLA

Metoda je založená na stejných vstupních datech pro výpočet jednotlivými rovnicemi potenciální evapotranspirace. Rozdíl spočívá v hodnotě referenční evapotranspirace, která byla stanovena s průměrnými hodnotami reálné evapotranspirace v období odstavení čerpadla.

Porovnání metody Hargreaves a reálné evapotranspirace

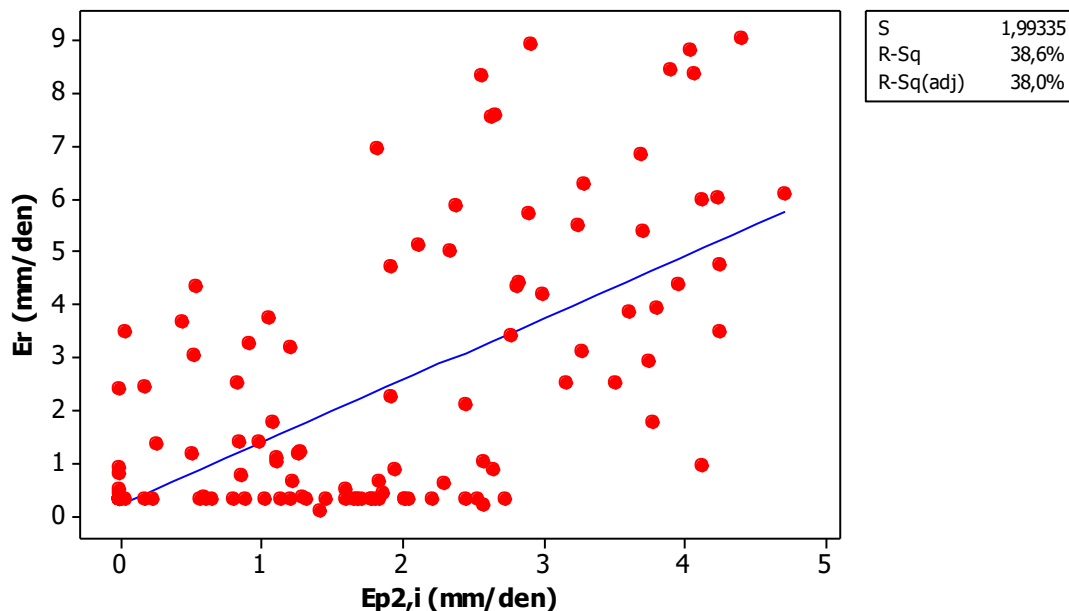
$$Er \text{ (mm/den)} = -0,2043 + 1,442 Ep_{1,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 49 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Turc a reálné evapotranspirace

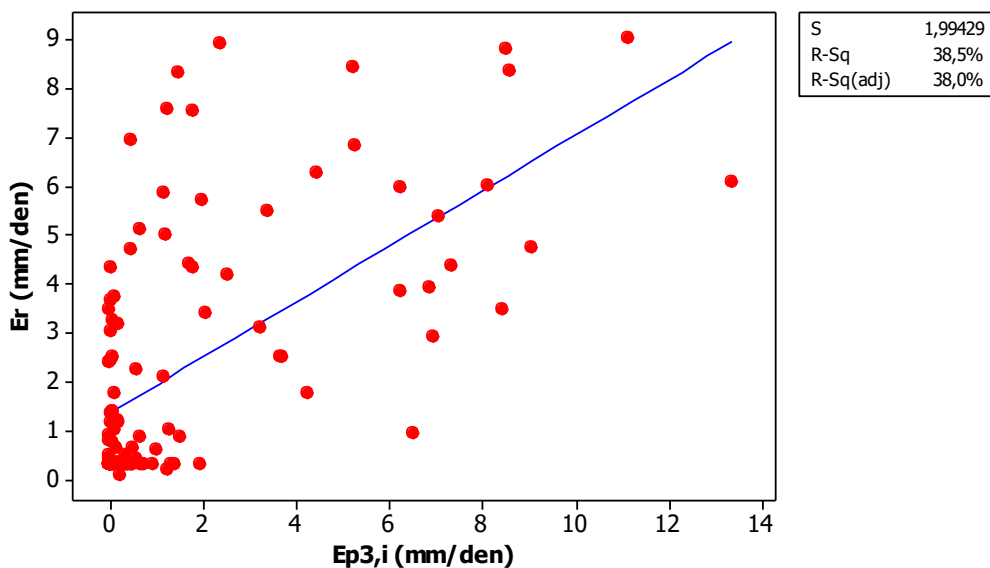
$$Er \text{ (mm/den)} = 0,2162 + 1,175 Ep_{2,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 50 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Thornthwaite a reálné evapotranspirace

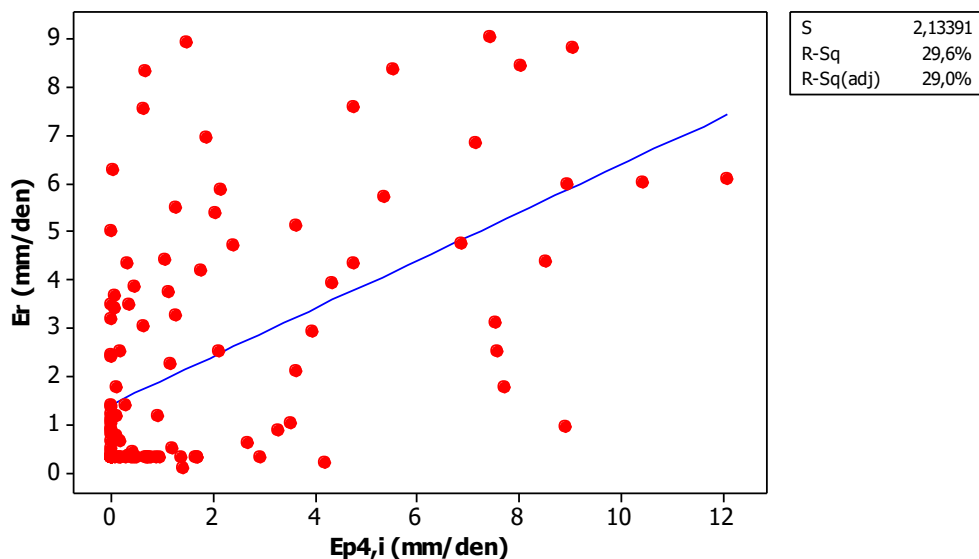
$$Er \text{ (mm/den)} = 1,361 + 0,5673 \text{ Ep}_{3,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 51 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Blaney-Criddle a reálné evapotranspirace

$$Er \text{ (mm/den)} = 1,412 + 0,4961 \text{ Ep}_{4,i} \text{ (mm/den)}$$



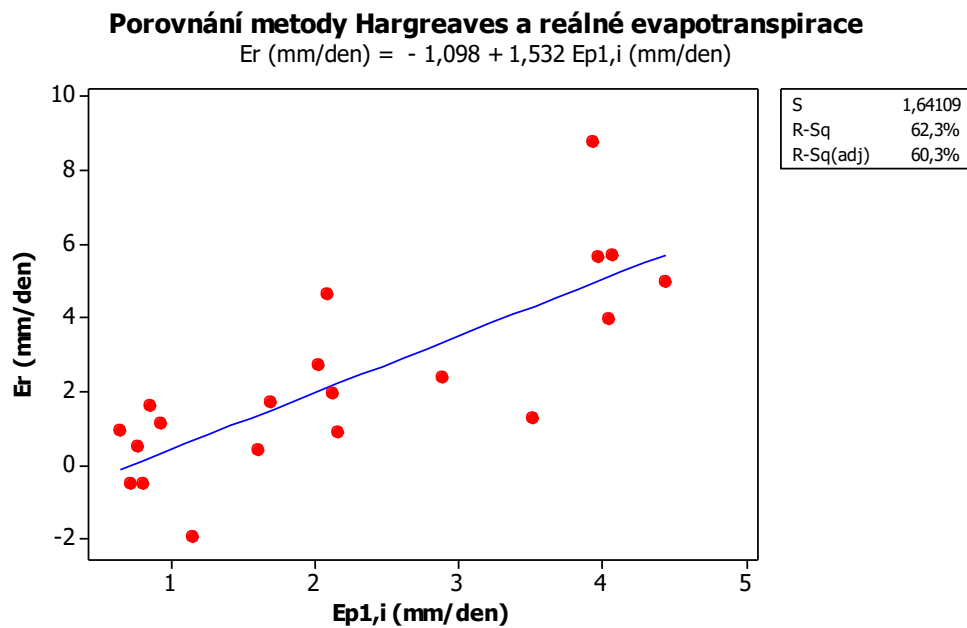
Obrázek 52 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla

Nejspolehlivějšího výstupu tentokrát dosáhla metoda Hargreaves (49,7 %). Metody Turc a Thornthwaite dosáhly téměř shodné spolehlivosti (38,6 % u metody Turc, 38,5 % metodou

Thornthwaite). Nejméně spolehlivá byla opět metoda Blaney-Criddle, která dosáhla spolehlivosti 29,6 %. Oproti předešlým výstupům se jedná o výrazné zlepšení.

4.3 ZPRACOVÁNÍ DAT V TÝDENNÍCH PRŮMĚRECH

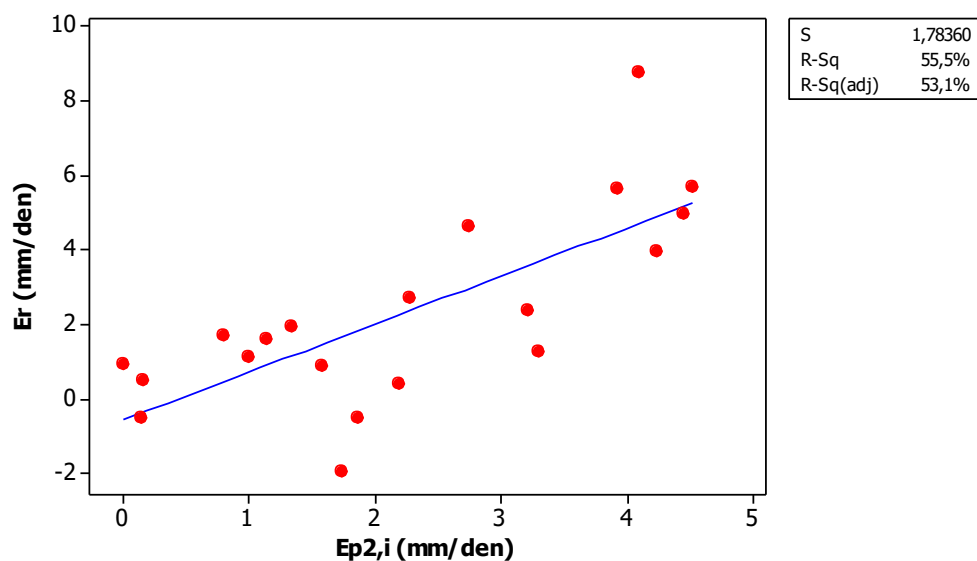
Vstupní data pro výpočet potenciální evapotranspirace byly upraveny na průměrné hodnoty daného týdne. Referenční evapotranspirace byla stanovena odpovídající metodou.



Obrázek 53 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves v týdenních průměrech

Porovnání metody Turc a reálné evapotranspirace

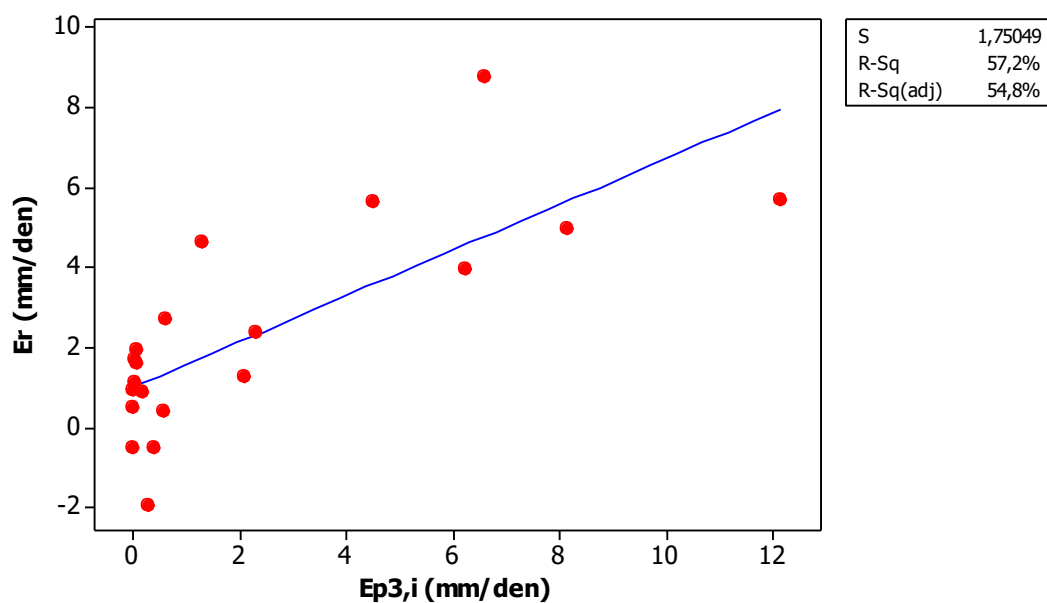
$$Er \text{ (mm/den)} = -0,5738 + 1,290 Ep_{2,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 54 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc v týdenních průměrech

Porovnání metody Thornthwaite a reálné evapotranspirace

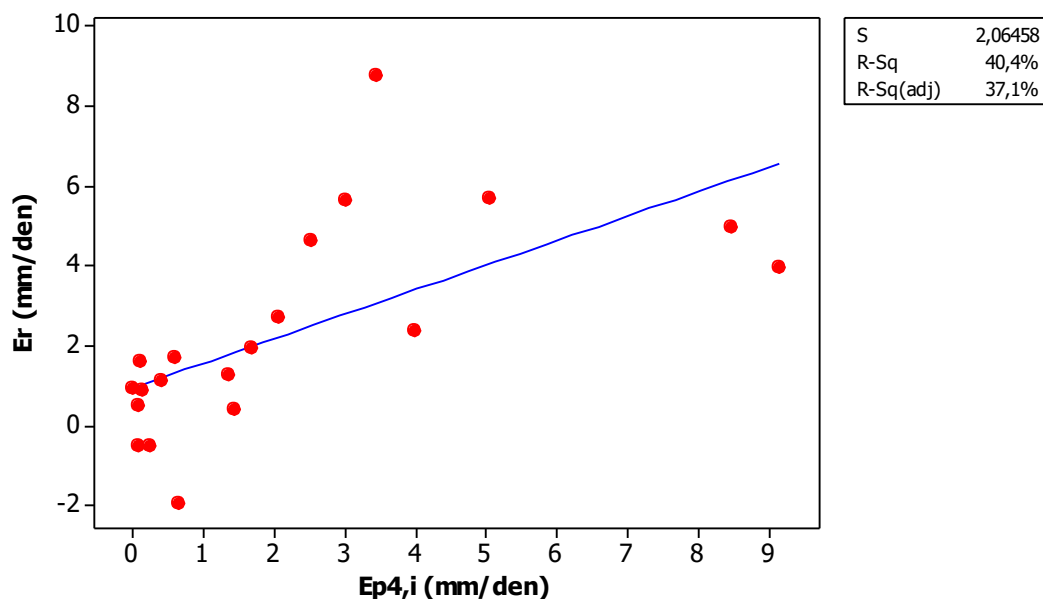
$$Er \text{ (mm/den)} = 1,006 + 0,5712 Ep_{3,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 55 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite v týdenních průměrech

Porovnání metody Blaney - Criddle a reálné evapotranspirace

$$Er \text{ (mm/den)} = 0,9378 + 0,6150 Ep_{4,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 56 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle v týdenních průměrech

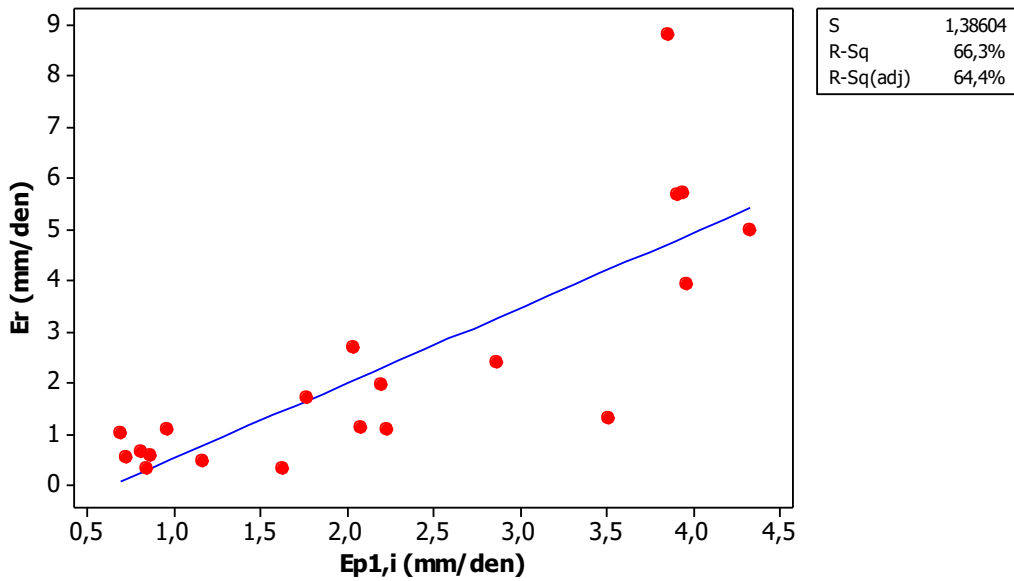
Nejspolehlivějšího výstupu dosáhla metoda Hargreaves (62,3 %). Metody Turc a Thornthwaite dosáhly podobně spolehlivých výstupů, konkrétněji metoda Thornthwaite dosáhla spolehlivosti 57,2 %, metoda Turc 55,5 %. Nejméně spolehlivá byla opět metoda Blaney-Criddle, která dosáhla spolehlivosti 40,4 %. Oproti předešlým výstupům se jedná opět o zlepšení.

4.4 KOMBINACE ZPRACOVÁNÍ DAT V TÝDENNÍCH PRŮMĚRECH S VYŘAZENÍM DAT NAMĚŘENÝCH V OBDOBÍ ODSTAVENÍ ČERPADLA

Vstupní data pro výpočet byly totožné s předchozím výpočtem. Rozdíl je v referenční evapotranspiraci, která byla stanovena nejdříve jako průměrná denní evapotranspirace pro období odstavení čerpadla a poté zprůměrována pro jednotlivé týdny.

Porovnání metody Hargreaves a reálné evapotranspirace

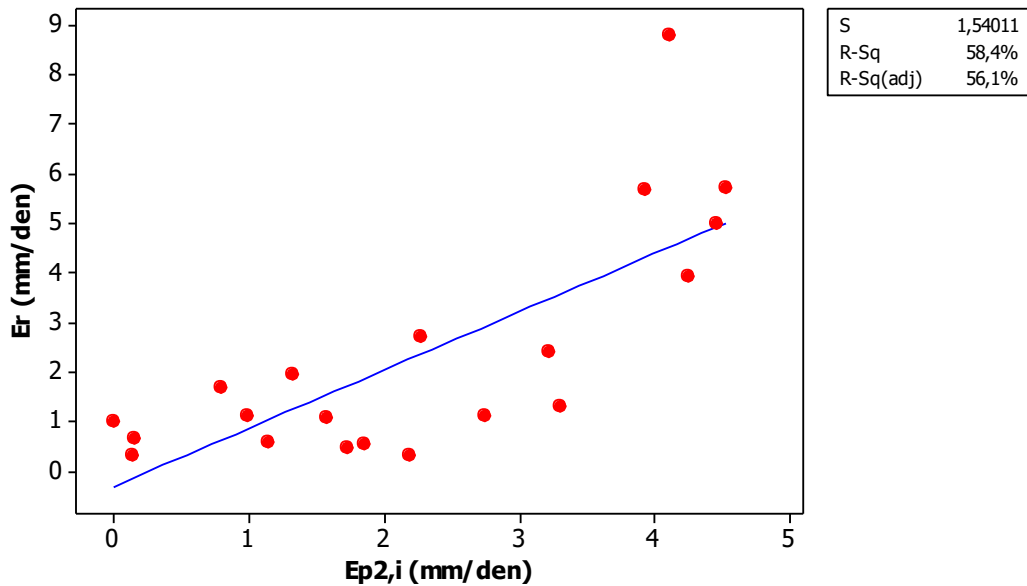
$$E_r \text{ (mm/den)} = -0,9484 + 1,469 E_{p1,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 57 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Turc a reálné evapotranspirace

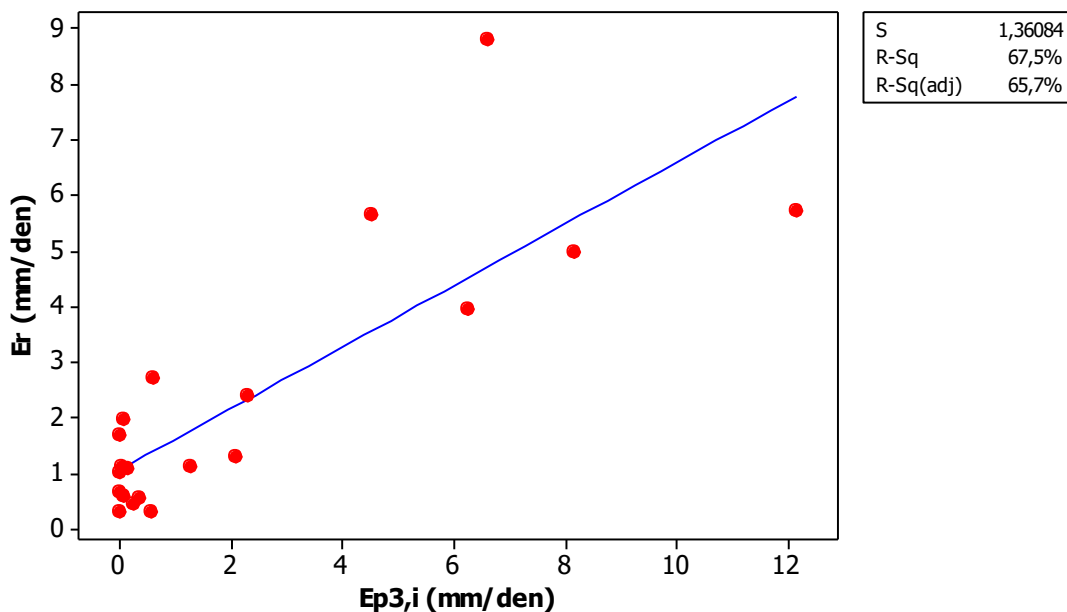
$$E_r \text{ (mm/den)} = -0,3216 + 1,180 E_{p2,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 58 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Thornthwaite a reálné evapotranspirace

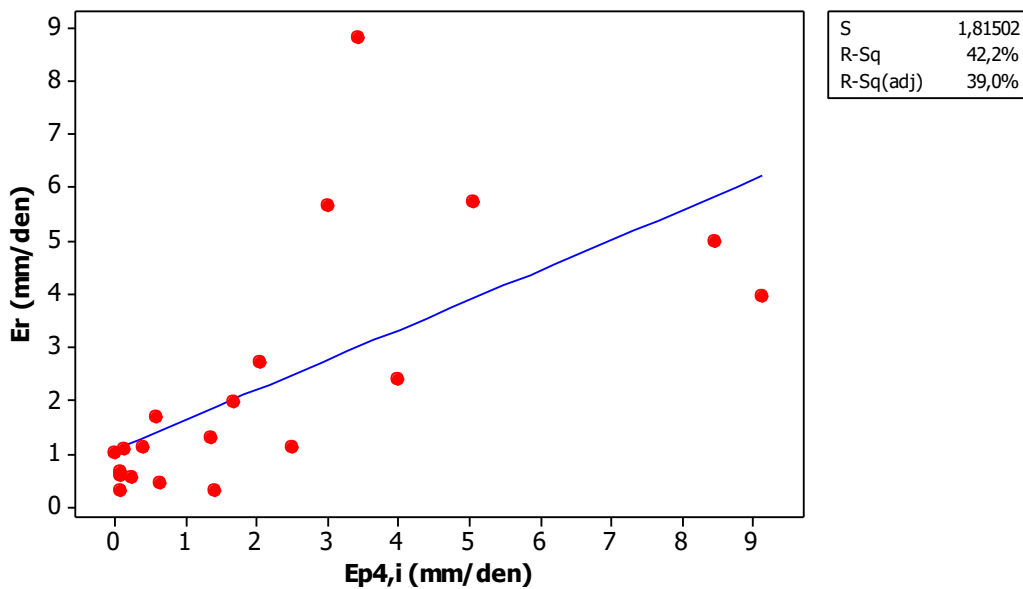
$$Er \text{ (mm/den)} = 1,053 + 0,5541 Ep_{3,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 59 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla

Porovnání metody Blaney - Criddle a reálné evapotranspirace

$$Er \text{ (mm/den)} = 1,066 + 0,5609 Ep_{4,i} \text{ (mm/den)}$$



Obrázek 60 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla

Největší spolehlivost výstupu byla v tomto případě dosažena metodou Thornthwaite, a to 67,5 %. Jedná se zároveň o nejspolehlivější výstup potenciální evapotranspirace ze všech, které byly v práci zpracovány. Druhé největší spolehlivosti, konkrétně 66,3 %, dosáhla metoda Hargreaves. Třetí byla metoda Turc se spolehlivostí 58,4 %. Nejmenší spolehlivost byla opět dosažena metodou Blaney-Criddle.

5 ZÁVĚR

Bezodtokové řešení likvidace odpadních vod z nemovitostí je oproti klasické jímce na vyvážení k okolnímu vodnímu prostředí výrazně šetrnější řešení. Pokud je systém založen na principu přírodní čistírny odpadních vod, lze snížit potřebu vyvážení upravených odpadních vod evapotranspirací z povrchu vertikálního filtru. Jedná se o perspektivní možnost, která je oproti klasické jímce na vyvážení mírně dražší (větší objemy nádrží, více nádrží a filtrační stupeň), ale vzhledem k možnosti opětovného využití přebývajících odpadních vod finančně poměrně rychle návratná.

Cílem práce bylo kromě definování teoretického uspořádání bezodtokového řešení i měření na zařízení, které by přibližovalo a rozkrývalo chování systému během prvního vegetačního období od realizace. V rámci laboratorních prací byl sestaven model evapotranspiračního filtru na výzkumném venkovním polygonu UVHK. Vzhledem k realizaci na začátku září 2021 nebylo možné podchytit letní období, současně nebylo možné získat meteorologická data z meteorostanice UVHK v tomto období, proto byla veškerá data zpracovávána až pro období, kdy již je měření komplexní. Přesto i první výsledky ukazují, že na začátku vegetačního období dochází k výraznému navýšení evapotranspirační schopnosti filtru.

Výstupem měření je stanovení reálného výparu pro období od poloviny prosince 2021 do konce dubna 2022. Na základě reálného měření byla provedena kalibrace výpočetních koeficientů pro stanovení potenciální evapotranspirace podle čtyř metod pro stejné období. Po filtraci vstupních dat byla stanovena korelace mezi potenciální (teoretickou) a reálně naměřenou evapotranspirací. Shoda mezi oběma veličinami se přiblížila 70ti procentům, což nelze považovat za uspokojivý výsledek, nicméně teprve další období a měření v celé vegetační sezoně ukáže, je-li možné uplatňovat standardní metody i pro vertikální/nadzemní řešení, která jsou vystavena jiným podmínkám než standardní přírodní povrchy. Stejně tak se ukáže, zda během letního období bude výpar dosahovat natolik významných hodnot, aby se popsání řešení začalo uplatňovat v širokém měřítku např. pro nejmenší producenty odpadních vod, kteří nemají možnost připojení se na kanalizační systém.

Vytvoření metody návrhu bezodtokové jímky s předřazenou filtrací odpadních vod na základě databáze územních teplot dostupných od Českého hydrometeorologického ústavu bude předmětem dalšího bádání, případně navazujících projekčních studií. V současné době je již zahájeno několik prací na tvorbě dokumentací ve spolupráci se spin-off VUT, firmou Conwe s.r.o., přičemž realizované objekty budou osazeny obdobnými hladinovými čidly s cílem získání dat z praxe – resp. poloprovozních modelů. Současně probíhá výstavba vypařovacích zařízení, která budou umístěna na meteorologické stanici s cílem získání dat v extrémních podmínkách – vysoké teploty, sluneční svit v nejdelší

možné relaci, apod. Teprve spojení všech naměřených dat ukáže, zda se jedná o perspektivní metodu, jak řešit problém s likvidací odpadních vod.

6 BIBLIOGRAFIE

- [1] ČSN 75 6402. *Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel*. 2017. 2017.
- [2] ČUPR, Karel. Odvádění odpadních vod z budov. *Odvádění odpadních vod z budov: 2.12 Kanalizační přípojka*. Brno, 2006a, s. 69.
- [3] TOPOL, Jan. Komplexní řešení čištění odpadních vod: Způsoby likvidace domovních odpadních vod. *TopolWater* [online]. 4, 4 s. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://www.topolwater.com/pdf/reklamni-clanky/likvidace-odpadnich-vod/zpusoby-likvidace-odp-vod.pdf>
- [4] ČUPR, Karel. *Odvádění odpadních vod z budov: 2.5 Části vnitřní kanalizace*. Brno, 2006b.
- [5] Celoplastové žumpy určené k obetonování: Usazovací nádrže do terénu bez přítomnosti spodní vody. In: *Janečka & Vlk* [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <http://www.janeckavlk.cz/zumpy/obetonovane.php>
- [6] PÍREK, Oldřich, Darina VINKLÁRKOVÁ, Karel PLOTĚNÝ a Petr MATUŠKA. *Přírodní způsoby čištění vod: Septiky - historie, normy, zvyklosti*. VII. Brno, 2012.
- [7] KRIŠKA, Michal. Domovní vegetační ČOV. *TZB info* [online]. Brno, 2014, **2014** [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/11260-domovni-vegetacni-cov>
- [8] MAC MAHON, Joanne, Jan KNAPPE a Laurence W. GILL. Sludge accumulation rates in septic tanks used as part of the on-site treatment of domestic wastewater in a northern maritime temperate climate, *Journal of Environmental Management. Science direct*. Science direct, 2022, **2022**(304). ISSN 0301-4797.
- [9] 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/>
- [10] PUMPRLOVÁ NĚMCOVÁ, Miroslava a Michal KRIŠKA. Technologie vertikálních filtrů s vegetací pro čištění odpadních vod. *TZB info* [online]. Brno, 2020, **2020** [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/21197-technologie-vertikalnich-filtru-s-vegetaci-pro-cistení-odpadnich-vod>
- [11] WANG, Yuhui, Xinshan SONG, Weihong LIAO, Ruihua NIU, Wei WANG, Yi DING, Yuan WANG a Denghua YAN. Impacts of inlet–outlet configuration, flow rate and filter size on hydraulic behavior of quasi-2-dimensional horizontal constructed wetland: NaCl

and dye tracer test. *Science direct*. Science direct, 2014, **2014**(69), 177-185. ISSN 0925-8574.

- [12] MACIEJEWSKI, Kevin, Mathieu GAUTIER, Boram KIM, Philippe MICHEL a Rémy GOURDON. 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, **2022**, 8. ISSN 0301-4797.
- [13] Popis funkce ČOV TOPAS: Popis funkce nádrží a dekantéru. In: *TopolWater* [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://www.topolwater.com/domovni-cov-funkce.htm>
- [14] KATAM, Keerthi a Debraj BHATTACHARYYA. Improving the performance of activated sludge process with integrated algal biofilm for domestic wastewater treatment: System behavior during the start-up phase, *Bioresource Technology Reports*. *Science direct*. Science direct, 2021, **2021**(13). ISSN 2589-014X.
- [15] Jak provozovat a udržovat čističku odpadních vod. In: *EKOCIS* [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://cistirny-cov.ekocis.cz/jak-provozovat-a-udrzovat-cisticku-odpadnich-vod>
- [16] ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD AS-VARIOCOMP N (30-300 EO). In: *Asio* [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/as-variocomp-n-30-300-eo>
- [17] Výhody a nevýhody čistírny odpadních vod. In: *Magazín čistírny odpadních vod* [online]. 2018 [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <http://www.cistirny.net/vyhody-a-nevyhody-cistirny-odpadni-vody/>
- [18] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č.57/2016 Sb.: Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních. In: *Zákony pro lidi*. 2016, ročník 2016, číslo 57. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-57>
- [19] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.: Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In: *Zákony pro lidi*. 2015, ročník 2016, číslo 401. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-401>
- [20] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 76/2002 Sb.: Zákon o integrované prevenci a o omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů (zákon o integrované prevenci). In: *Zákony pro lidi*. 2002, ročník 2002, číslo 76. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-76#Top>

- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: *Zákony pro lidi*. 2001, ročník 2001, číslo 254. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>
- [22] Přehled praktického využití sluneční energie. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2004 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/1960-prehled-praktickeho-vyuziti-slunecni-energie>
- [23] JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Brno, 2020. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [24] LIU, Zhaofei. Estimating land evapotranspiration from potential evapotranspiration constrained by soil water at daily scale, *Science of The Total Environment*. *Science direct*. Science direct, 2022, **2022**(834). ISSN 0048-9697.
- [25] HUANG, Jing, Fanhua KONG, Haiwei YIN, Ariane MIDDEL, Hongqing LIU, Xiandi ZHENG, Zhihao WEN a Ding WANG. Transpirational cooling and physiological responses of trees to heat: Agricultural and Forest Meteorology. *Science direct*. Science direct, 2022, **2022**(320). ISSN 0168-1923.
- [26] BIAŁOWIEC, Andrzej, Antonio ALBUQUERQUE a Peter F. RANDERSON. The influence of evapotranspiration on vertical flow subsurface constructed wetland performance. *Science direct*. Science direct, 2014, **2014**(67), 89-94. ISSN 0925-8574.
- [27] LI, Yang, Yaochen QIN a Peijun RONG. Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Science direct*. Science direct, 2022, **2022**(273). ISSN 0169-8095.
- [28] BEDNÁŘ, Martin a Daniel MARTON. Porovnání metod výpočtu potenciální evapotranspirace. In: *Juniorstav 2022: 24. Odborná konference doktorského studia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2022, s. 393 - 398. ISBN 978-80-86433-76-9.
- [29] CUNHA, Fernando França da, Anunciene Barbosa DUARTE, Gilberto Chohaku SEDIYAMA a Paulo Roberto CECON. Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. *Ciência e Agrotecnologia*. 2018, **42**(1), 104-114. ISSN 1981-1829. Dostupné z: [doi:10.1590/1413-70542018421017517](https://doi.org/10.1590/1413-70542018421017517)
- [30] Ebara Optima - ponorná kalová čerpadla. In: *Pumpa.cz* [online]. Brno: Pumpa.cz, 2021 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.pumpa.eu/cs/ebara-optima-ponorna-kalova-cerpadla/>

- [31] *Levellogger® 5 Water Level Dataloggers* [online]. Kanada: Solinst, 2022 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/levellogger/>
- [32] *1.1.2 Barologger 5* [online]. Kanada: Solinst, 2022 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/operating-instructions/user-guide/1-introduction/1-1-2-barologger.php>
- [33] *10.1.3 Barologger Edge Installation* [online]. Kanada: Solinst, 2022 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/operating-instructions/user-guide/10-levellogger-installation-maintenance/10-1-3-barologger-installation.php>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma žumpy [5].....	17
Obrázek 2 - Rozložení rychlosti proudění v septiku bez rozrážecí (norné) stěny (vlevo) a s rozrážecí stěnou (vpravo) [7]	19
Obrázek 3 - Schéma horizontálního filtračního pole [10].....	21
Obrázek 4 - Schéma vertikálního filtračního pole [9].....	22
Obrázek 5 - Schéma aktivační domovní čistírny [16]	25
Obrázek 6 - Schéma bezodtokového přírodního systému likvidace odpadních vod bez akumulace, kde: I – Anaerobní separátor, II – Vertikální filtr s vegetací, III - Přítok odpadních vod z nemovitosti, IV - Podzemní vedení NN.....	35
Obrázek 7 - Schéma bezodtokového přírodního systému likvidace odpadních vod s akumulací upravených odpadních vod, kde: I – Anaerobní separátor, II – Vertikální filtr s vegetací, III – Akumulační jímka, IV – Přítok odpadních vod z nemovitosti, V – Cirkulace upravených odpadních vod, VI – Recyklace užitkové vody ke splachování WC, VII – Podzemní vedení NN	35
Obrázek 8 - Šermerův výparoměr [23].....	38
Obrázek 9 - Schéma lyzimetru Popova [23].....	39
Obrázek 10 – Akumulační nádrž.....	44
Obrázek 11 - Ponorné kalové čerpadlo Ebara Optima [30].....	45
Obrázek 12 - Q/H křivka ponorného kalového čerpadla Ebara Optima [30].....	45
Obrázek 13 - Čidlo Solinst Levellogger [31]	46
Obrázek 14 - Čidlo Solinst Barologger [32]	46
Obrázek 15 - Schéma barometrické kompenzace [33].....	46
Obrázek 16 – Hydroizolační souvrství	47
Obrázek 17 - Realizace stěn vertikálního filtru z pytlů plněných recyklátem.....	47
Obrázek 18 - Kapková závlaha AXIOS.....	48
Obrázek 19 - Realizace drenážní vrstvy a prostupu hydroizolací	48
Obrázek 20 - realizace filtrační vrstvy a výsadba mokřadních rostlin	49
Obrázek 21 - Vertikální filtr	49
Obrázek 22 - Odtokové potrubí z vertikálního filtru do akumulační nádrže (vlevo: pohled od filtru k nádrži, vpravo: boční pohled).....	50

Obrázek 23 - Pohled na model vertikálního filtru v květnu 2022	50
Obrázek 24 - Záznam úrovně hladiny v akumulární nádrži	52
Obrázek 25 - Průměrný denní výpar v daném měsíci.....	52
Obrázek 26 - Lineární regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu	53
Obrázek 27 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu	54
Obrázek 28 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu	54
Obrázek 29 - Lineární regrese dat závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek.....	55
Obrázek 30 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek.....	56
Obrázek 31 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě vzduchu se zohledněním srážek	56
Obrázek 32 - Lineární regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat	57
Obrázek 33 - Kubická regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat.....	58
Obrázek 34 - Kvadratická regrese závislosti výparu na teplotě po přefiltrování dat	58
Obrázek 35 - Výška hladiny v nádrži od začátku měření	59
Obrázek 36 - Lineární regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace	60
Obrázek 37 - Kvadratická regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace	60
Obrázek 38 - Kubická regrese teploty vzduchu a reálné evapotranspirace.....	61
Obrázek 39 - Lineární regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech..	62
Obrázek 40 - Kvadratická regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech	62
Obrázek 41 - Kubická regrese naměřených dat zpracovaných v týdenních průměrech ..	63
Obrázek 42 - Lineární regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat	64
Obrázek 43 - Kvadratická regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat	64
Obrázek 44 - Kubická regrese naměřených dat po finální filtraci vstupních dat.....	65
Obrázek 45 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves pro denní kroky	67
Obrázek 46 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc pro denní kroky	68

Obrázek 47 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite pro denní kroky.....	68
Obrázek 48 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle pro denní kroky.....	69
Obrázek 49 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	70
Obrázek 50 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla	70
Obrázek 51 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	71
Obrázek 52 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle při vyřazení dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	71
Obrázek 53 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves v týdenních průměrech.....	72
Obrázek 54 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc v týdenních průměrech.....	73
Obrázek 55 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite v týdenních průměrech.....	73
Obrázek 56 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle v týdenních průměrech.....	74
Obrázek 57 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Hargreaves v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	75
Obrázek 58 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Turc v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	75
Obrázek 59 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Thornthwaite v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	76
Obrázek 60 - Porovnání reálné evapotranspirace a potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Blaney-Criddle v týdenních průměrech s vyřazením dat naměřených v období odstavení čerpadla.....	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Orientační hodnoty účinnosti pro septik/separátor [1]	19
Tabulka 2 - Orientační hodnoty účinnosti přírodních čistíren odpadních vod [1].....	23
Tabulka 3 - Orientační hodnoty účinnosti pro aktivační čistírny odpadních vod [1].....	25
Tabulka 4 - Ukazatele a emisní standardy pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci [18]	27
Tabulka 5 - Ukazatele a emisní standardy pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb poskytující ubytovací služby [18]	27
Tabulka 6 - Ukazatele a emisní standardy mikrobiologického znečištění pro odpadní vody vypouštěné z jednotlivých staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci a z jednotlivých staveb poskytujících ubytovací služby [18]	27
Tabulka 7 - Emisní standardy: Přípustné hodnoty (p) ³⁾ , maximální hodnoty (m) ⁴⁾ a hodnoty průměru ⁵⁾ koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v mg/l (první část) [19]	28
Tabulka 8 - Emisní standardy: přípustná minimální účinnost čištění vypouštěných odpadních vod (minimální procento úbytku) ^{1),2)} v procentech [19].....	29
Tabulka 9 - Minimální účinnost čištění pro kategorie výrobků označovaných v CE v procentech [19].....	30
Tabulka 10 - Dosažitelné hodnoty koncentrací a účinností pro jednotlivé ukazatele znečištění při použití nejlepší dostupné technologie v oblasti zneškodňování městských odpadních vod [19].....	32
Tabulka 11 - Doporučené nejlepší dostupné technologie v oblasti zneškodňování městských odpadních vod [19].....	33
Tabulka 12 - Měsíční úhrn záření v kWh/m ² a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících [22].....	36
Tabulka 13 - Technické parametry čidel [31].....	46
Tabulka 14 - Hodnoty empirických koeficientů metody Hargreaves.....	66
Tabulka 15 - Hodnoty empirických koeficientů metody Turc.....	66
Tabulka 16 - Hodnoty empirických koeficientů metody Thornthwaite	66
Tabulka 17 - Hodnoty empirických koeficientů metody Blaney-Criddle	66