

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



Diplomová práce

**Studium vlivu malých vodních nádrží
na vodní bilanci krajiny**

Autor práce: Bc. Martin Pilař

Vedoucí práce: Ing. Petr Sklenář Ph.D.

Praha 2024



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Pilař Jméno: Martin Osobní číslo: 477198

Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Studium vlivu malých vodních nádrží na vodní bilanci krajiny

Název diplomové práce anglicky: Study of the impact of small reservoirs on landscape water balance

Pokyny pro vypracování:

V diplomové práci zhodnotte význam malých vodních nádrží (MVN) jako možných adaptačních opatření v krajině v podmínkách hydrologického sucha, zejména v tzv. deficitních oblastech. Využijte monitoring hydrometeorologických prvků v lokalitě Vavříneckého rybníka v období let 2019-2022 pro hydrologickou bilanci. Zaměřte se na možnosti odhadu jednotlivých složek bilance hydrologickými modely, případně i na analýzu blízkého okolí MVN pomocí dat DPZ. Zhodnotte přínos MVN pro zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků, zvyšování zásob podzemní vody, mikroklimatické funkce aj.

Seznam doporučené literatury:

Projekt Sucho v krajině <https://www.suchovkrajine.cz/>

Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. VÚV, 2011.

BERAN, A., DAVID, V. a TYL, R. Přímý monitoring výparu z vodní hladiny Vavříneckého rybníka a jeho vliv na celkovou hydrologickou bilanci. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2023, roč. 65, č. 5, str. . ISSN 0322-8916.

Shrnutí posouzení vlivu malé vodní nádrže na složky hydrologické bilance malého povodí. Závěrečná zpráva pro MŽP v rámci programu BETA2, 2022.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Sklenář, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 25.9.2023

Termín odevzdání DP v IS KOS: 8. 1. 2024

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

25. 9. 2023

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a veškerou odbornou literaturu a zdroje informací jsem uvedl v seznamu použité literatury na konci práce. Elektronická podoba práce je identická s její tištěnou verzí.

V Praze dne 8.1.2024

Martin Pilař

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Petru Sklenářovi Ph.D. za jeho ochotu, čas, věcné poznámky a možnost osobních konzultací po celou dobu věnovanou této práci. Dále Ing. Adamu Beranovi Ph.D., Ing. Václavu Davidovi Ph.D. a Ing. Tomáši Laburdovi Ph.D. za spolupráci při poskytování vstupních dat.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje možnosti využití malých vodních nádrží jako adaptačních opatření na klimatickou změnu. Teoretická část představuje současné poznání o malých vodních nádržích jako adaptačních opatřeních, o minimálních zůstatkových průtocích a o možnostech provedení hydrologické bilance. Provedením hydrologické bilance malé vodní nádrže Vavřinec v letech 2020-2022 je potvrzena provázanost vody v nádrži s vodou podzemní. Tato nádrž také zlepšuje zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků na odtoku a plní mikroklimatickou funkci.

Klíčová slova

Malé vodní nádrže, hydrologická bilance, adaptační opatření, výpar z vodní hladiny, sucho, minimální zůstatkový průtok, mikroklimatická funkce

Abstract

The diploma thesis deals with the possibilities of using small water reservoirs as adaptation measures to climate change. The theoretical part presents current knowledge about small water reservoirs as adaptation measures, about minimum residual flows and about the possibilities of carrying out a hydrologic balance. The hydrologic balance of the small water reservoir Vavřinec in 2020-2022 confirms the interconnectedness of the water in the reservoir with groundwater. This reservoir also improves the security of minimum residual flows at the outlet and fulfills a microclimatic function.

Key words

Small water reservoirs, hydrologic balance, adaptation measures, vapor from the water surface, drought, minimum residual flow, microclimatic function

Obsah

Úvod	9
Literární rešerše	10
1 Adaptační opatření v krajině	10
1.1.1 Preventivní adaptační opatření.....	11
1.1.2 Opatření pro zvyšování odolnosti systému.....	11
1.1.3 Opatření přípravná a operativní	11
1.1.4 Opatření obnovy	11
1.2 Adaptační opatření ve vodním hospodářství	11
1.2.1 Adaptační opatření v ploše povodí	12
1.2.2 Adaptační opatření na vodních tocích a v nivách	12
2 Projekty v oblasti adaptačních opatření v krajině	14
2.1.1 Projekt „Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období“ (TITSMZP809)	14
2.1.2 Projekt „Centrum voda“	14
2.1.3 Sucho v krajině	14
2.1.4 Řešení rybníků a malých vodních nádrží z hlediska možnosti dodržování MZP a bezpečnosti při povodních.....	14
2.1.5 Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví.....	14
2.1.6 Půdní a hydrologické sucho v měnícím se klimatu	15
2.1.7 Potenciál rozvoje malých vodních ploch v krajině jako adaptačních opatření k eliminaci hydrometeorologických extrémů	15
2.1.8 Analýza adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu a urbanizace na vodní režim v oblasti vnější Prahy	15
2.1.9 PERUN	15
3 Malé vodní nádrže jako adaptační opatření.....	16
3.1 Typové rozdělení MVN	16
3.1.1 Vodárenské	17
3.1.2 Závlahové	17
3.1.3 Retenční suché	17
3.1.4 Retenční s malým zásobním prostorem.....	18
3.1.5 Usazovací.....	18
3.1.6 Krajinotvorné.....	18
3.2 Vliv MVN na hydrologický režim a vodní zdroje.....	18
3.3 MAVONA	19
3.3.1 Hydrologický bilanční model BILAN	20
4 Charakteristiky vodního režimu krajiny	22
4.1 Sucho	22

4.1.1	Definice sucha	22
4.1.2	Rozdělení sucha.....	23
4.1.3	Dopady sucha	24
4.1.4	Deficitní oblasti	25
4.2	Minimální zůstatkový průtok.....	26
4.2.1	Stanovení MZP	26
4.2.2	Stanovení MZP v zahraničí	26
4.2.3	Plánovaná změna stanovení MZP	27
5	Hydrologická bilance.....	30
5.1	Hydrologická bilance povodí	30
5.1.1	Odtok.....	31
5.1.2	Srážky	33
5.1.3	Evapotranspirace.....	34
5.1.4	Výpar z volné hladiny	36
5.1.5	Podzemní voda	42
5.2	Hydrologická bilance malé vodní nádrže	44
	Analytická část.....	45
6	Analýzy MVN Vavřínece.....	45
6.1	Hydrologická bilance MVN	45
6.1.1	Charakteristiky lokality.....	45
6.1.2	Vstupní data	46
6.1.3	Postup stanovení bilance	63
6.1.4	Výsledky bilance	64
6.2	Zabezpečení MZP na odtoku	67
6.2.1	Zabezpečení určená z měřených dat	67
6.2.2	Zabezpečení určená pomocí softwaru MAVONA	70
6.2.3	Porovnání zabezpečení MZP	72
6.3	Data z dálkového průzkumu Země ve vztahu k MVN.....	73
6.3.1	Mikroklimatická funkce MVN.....	73
6.3.2	Využití indexů odvozených ze satelitních dat	78
6.4	Diskuse výsledků.....	78
7	Závěr	80
	Použité zdroje:.....	81
	Seznam obrázků:	86
	Seznam tabulek:	87
	Seznam příloh:.....	87

Úvod

V posledních letech je snahou pro území ČR navrhovat a přijímat adaptační opatření, jež by podpořila zadržení vody v krajině a dokázala snížit celkový deficit vody. Jedním z diskutovaných opatření je výstavba či obnova malých vodních nádrží. Malé vodní nádrže a rybníky představují krajinný prvek, který bezpochyby ovlivňuje hydrologický režim, a to jak ve vztahu k povrchovým vodám, tak ve vztahu k vodám podzemním. Způsobů vzájemného ovlivnění je celá řada a zpravidla nelze jednoznačně rozlišit, zda je daný způsob negativní či pozitivní. Provázanost jednotlivých prvků je mnohdy velmi těsná. Příkladem může být zvýšení hladiny podzemní vody. Díky tomu sice dojde ke zvýšení zásoby podzemní vody, ovšem v případě, že se její hladina nachází blízko k povrchu v rámci kořenové zóny, dojde i k intenzivnějšímu odčerpávání vody evapotranspirací.

Cílem této práce je zhodnotit význam malých vodních nádrží jako možných adaptačních opatření v krajině s využitím monitoringu hydrometeorologických prvků v lokalitě Vavříneckého rybníka. Dále je cílem zhodnotit vliv malých vodních nádrží na zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků pod hrází a prověřit možnosti využití dat dálkového průzkumu Země vzhledem k navrhování a provozu malých vodních nádrží.

Literární rešerše

1 Adaptační opatření v krajině

Cílem adaptačních opatření v krajině je zmírnění dopadů změny klimatu v různých oblastech lidské činnosti. Například v zemědělství, vodním a lesním hospodářství a dalších [1]. Shrnutí poznatků o změnách klimatu přináší jednou za několik let Mezivládní panel pro změnu klimatu v hodnotící zprávě. Mezi roky 1880 až 2012 se globální průměrná roční teplota zvýšila o 0,8 °C. Oteplování je výraznější na severní než na jižní polokouli a podobně výraznější nad pevninou než nad oceánem. Od poloviny minulého století přibývá teplých a ubývá studených dní. Nejedná se pouze o četnost výskytu, ale také o intenzity těchto jevů. Oproti tomu vývoj srážkových úhrnů od počátku 20. století nepředstavuje výraznější změnu. V některých částech světa se úhrny zvýšily, jinde snížily, změny ovšem nejsou statisticky významné [2].

Na území České republiky se za posledních 60 let průměrná roční teplota vzduchu zvýšila o více než 2 °C [3]. Do roku 2050 se předpokládá pokračování nárůstu průměrné teploty vzduchu přibližně o 1,7 až 2,8 °C. [4]. Se zvyšující se teplotou dochází k většímu výparu vody z vodních ploch, polí a lesů. Při vyrovnané bilanci jsou ztráty výparem kompenzovány srážkovými úhrny, avšak srážkové úhrny na území České republiky se příliš nemění. Důsledkem je zvyšování záporného rozdílu srážek a výparu v oblastech s dlouhodobými nižšími srážkovými úhrny. Těmito oblastmi jsou například jižní a střední Morava, Polabí nebo dolní tok Vltavy [3].

Adaptační opatření je možné klasifikovat podle různých hledisek. Podle úrovně jejich zavádění můžeme rozlišovat adaptační opatření místní (efekt opatření na konkrétní vodní útvar, konkrétního uživatele vody), regionální (efekt opatření na území dílčího povodí), národní, opatření s přeshraničním účinkem a opatření s celoevropským působením nebo působením v měřítku mezinárodního povodí. Dále je možné opatření rozdělit podle jejich charakteru na opatření legislativní a institucionální, která jsou implementována formou přijetí právního předpisu, opatření pro zvyšování adaptační kapacity (informační a výukové programy), opatření organizační (změny v charakteru řízení, změny ve způsobu hospodaření na ploše povodí) a opatření strukturální, která vyžadují realizaci staveb a jiných technických zásahů. Dále můžeme opatření rozlišovat podle jejich zaměření na opatření proti přímým dopadům klimatické změny, opatření proti nepřímým environmentálním dopadům a proti nepřímým socio-ekonomickým dopadům klimatické změny. Rozdělení adaptačních opatření je možné provést i na základě hospodářského odvětví, ve kterém je adaptační opatření primárně uplatněno (správa povodí, vodohospodářská infrastruktura, zemědělství, lesnictví, energetika) [5].

Podstatným hlediskem při sestavování adaptační strategie je hledisko načasování uplatnění daného opatření. Podle tohoto hlediska je možné rozlišovat opatření preventivní, opatření na zvyšování odolnosti systému, opatření přípravná,

opatření operativní přijímaná během nepříznivé události a opatření obnovy přijímaná po skončení nepříznivé události. Komplexní adaptační strategie by měla zahrnovat různé typy opatření napříč kategoriemi – od legislativních až po strukturální opatření, od preventivních až po opatření obnovy [5].

1.1.1 Preventivní adaptační opatření

Preventivní opatření jsou zaváděna průběžně s cílem zabránit výskytu nežádoucího stavu nebo snížit následky nepříznivých stavu souvisejících s identifikovaným rizikem. Příkladem preventivního opatření je vypracování plánu pro zvládnutí sucha a nedostatku vody pro oblasti zranitelné vůči suchu. Jako vhodné adaptační opatření, které je realizováno primárně v souvislosti s ochranou před povodněmi, je omezení výstavby v oblastech aktivní zóny záplavových území [5].

1.1.2 Opatření pro zvyšování odolnosti systému

Jedná se o taková opatření, která vedou k posilování jednotlivých prvků systému, aby lépe odolávaly nepříznivým stavům. Mezi opatření pro zvyšování odolnosti systému patří například pěstování odrůd odolných vůči suchu, zvyšování druhové diverzity v lesnictví, stavební úpravy na tělesech hrází vodních nádrží pro snížení pravděpodobnosti přelití, propojování vodárenských systémů [5].

1.1.3 Opatření přípravná a operativní

Mezi přípravná a operativní opatření se řadí aktivity, které jsou uskutečňovány v krátkodobém předstihu před výskytem nepříznivé události nebo v jejím průběhu. Řada opatření ochrany před povodněmi má charakter přípravných nebo operativních opatření. Patří sem například uplatnění výstražných informačních systémů, výstavba mobilních protipovodňových hrazení, evakuace obyvatel, operativní řízení odtoku z nádrží [5].

1.1.4 Opatření obnovy

Opatření realizovaná po skončení bezprostředního působení nepříznivé události zahrnují například zpracování dokumentace k proběhlé extrémní události, obnovu infrastruktury s ohledem na zkušenosti získané z průběhu extrémní povětrnostní události, programy pro zajištění finanční podpory pro postižené oblasti [5].

1.2 Adaptační opatření ve vodním hospodářství

Cílem adaptačních opatření ve vodním hospodářství je stabilizování vodního režimu v krajině, posilování vodních zdrojů a jejich ochrana, efektivní využívání vodních zdrojů a zvládnutí extrémních hydrologických jevů – povodní a dlouhotrvajícího sucha. Veškerá podporovaná a realizovaná opatření musí být navrhována v součinnosti s dalšími opatřeními v ploše povodí, zejména opatření na vodních tocích, v nivách i ve volné krajině [4].

1.2.1 Adaptační opatření v ploše povodí

Cílem adaptačních opatření v ploše povodí pro zajištění stability vodního režimu v krajině je v maximální možné míře snížit a zpomalit povrchový odtok vody, zvýšit retenci vody v krajině a zajistit doplňování podzemních vod. K tomu přispívá zejména správné hospodaření na zemědělské a lesní půdě (např. střídání kultury, vhodné osevní postupy, lesnicko-pěstební postupy, viz kapitola 3.1 a 3.2), minimalizace negativního vlivu odvodňovacích zařízení na zrychlený odtok vody z krajiny a vhodné uspořádání krajiny (ochrana a rozvoj krajinných prvků, protierozní opatření). Významnou úlohu hraje systém malých vodních nádrží a mokřadů, které jednak stabilizují hladinu podzemních vod a také ovlivňují mikroklima ve svém okolí.

V implementačním období 2003 - 2027 jsou základním nástrojem pro zavádění široké škály adaptačních opatření ve vodním hospodářství EU plány povodí a plány pro zvládání povodňových rizik připravované podle zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, který zahrnuje požadavky Směrnice 2000/60/ES ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky (rámcové směrnice o vodní politice), Směrnice 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik (povodňové směrnice) a dalších souvisejících směrnic. Plány komplexně řeší jak dosažení dobrého stavu vod, tak i negativní dopady extrémních hydrologických situací v podobě povodní a částečně i sucha. Plány povodí představují klíčový nástroj pro zavádění adaptačních opatření pro zvládání sucha a nedostatku vody, které jsou identifikovány dále v rámci předložené adaptační strategie [4].

1.2.2 Adaptační opatření na vodních tocích a v nivách

Vodní toky hrají zásadní roli při bezpečném odvedení povodňových průtoků a zároveň představují důležitý krajinnotvorný prvek, jenž může výrazně přispět k zadržení vody v krajině. V urbanizovaných oblastech převažuje charakter kanalizovaných toků, jejichž cílem bývalo co nejrychleji odvést povodňový průtok ze zasažené oblasti. Nicméně v posledních letech převažuje silný trend s cílem revitalizovat kanalizované toky i v zastavěných územích, a to takovým způsobem, aby nebyly ohroženy životy, zdraví a majetek obyvatel. Typy opatření na vodních tocích a v nivách mohou být v zásadě dvojího druhu, a to strukturální a organizační. Strukturální typ opatření lze dále dělit na opatření technická a přírodě blízká. Přírodě blízká opatření napomáhají ke zlepšení hydromorfologického stavu vodního toku a ekologického stavu vod obecně. Technická opatření jsou významná zejména v urbanizovaných územích, kde je hlavním cílem bezpečně provést povodňové průtoky s minimalizací dopadů na majetek a životy obyvatel obcí. Většina opatření na našich tocích bude vhodnou kombinací obou přístupů. V souvislosti s minimalizací dopadů na majetek a životy obyvatel obcí jsou velmi vhodným nástrojem také organizační opatření, jako např. správně zpracovaný povodňový plán, funkční varovný a monitorovací systém napojený na jednotný systém varování a výstrah. Dále uvedená opatření mohou významně přispět k nalezení kompromisu mezi protipovodňovou ochranou a požadavky na ekologický charakter toku. Mezi významná adaptační opatření na vodních tocích patří [4][6]:

- mapování povodňových rizik
- vyhodnocení povodňových škod
- zpomalení odtoku v určitých částech povodí
- výstavba suchých nádrží
- výstavba malých vodních nádrží
- obnovení přirozených záplavových území
- zajištění dostatečné průtočné kapacity mostů a propustků a jejich ochrana proti ucpání splávím
- pravidelná údržba koryt s cílem zajištění požadované kapacity pro převedení povodňových průtoků

Změněná morfologie revitalizovaných toků z hlediska povodní vede k menší průtočné kapacitě, zkrácení postupové doby povodní a většímu rozlivu mimo řečiště. V úsecích toku, kde existuje údolní niva, způsobí rozliv zmenšení kulminačních průtoků. Tento efekt se však projeví jen u povodní s rychlým vzestupem a krátkým trváním, u objemných povodní z několikadenních srážek nebo z několikadenního tání sněhu je nevýznamný. Revitalizace mohou tedy vést k adaptaci na přívalové povodně. Výsledkem revitalizace je i zvětšení objemu vody v toku. Navýšení objemu v porovnání s objemy odtoku je ale malé, a voda z říční sítě vyteče během doby řádově kratší, než jsou doby trvání hydrologického sucha [7].

2 Projekty v oblasti adaptačních opatření v krajině

Problematika týkající se klimatické změny, adaptačních opatření v krajině, sucha, změn ve vodním hospodářství je v současné době velmi populární vědecko-výzkumnou činností. Vzniká a probíhá celá řada projektů s různými zaměřenými.

2.1.1 Projekt „Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období“ (TITSMZP809)

Hlavním cílem projektu bylo „posoudit vliv MVN na hydrologickou bilanci a její složky v různém prostorovém měřítku. Analýza byla provedena v blízkém okolí MVN, ve zdrojových povodích a v povodích se soustavami rybníků a MVN“ [8].

2.1.2 Projekt „Centrum voda“

Cílem výzkumného projektu SS02030027 Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu je „odpovědět na otázku, zda budeme mít i nadále dostatek kvalitní vody“ [9].

2.1.3 Sucho v krajině

Informační webový portál sucho v krajině vznikl na základě práce meziresortní skupiny VODA-SUCHO na platformě VÚV TGM v součinnosti MŽP a MZe. Cílem portálu je shromažďování a představování informací a o problematice sucha široké veřejnosti s vidinou osvěty [10].

2.1.4 Řešení rybníků a malých vodních nádrží z hlediska možnosti dodržování MZP a bezpečnosti při povodních

„Hlavním cílem navrhovaného projektu je posoudit možnosti rybníků, rybníčních soustav a malých vodních nádrží s ohledem na dodržování minimálních zůstatkových průtoků v období sucha a zároveň zajištění bezpečného převedení kontrolních povodňových průtoků. Projekt se bude zabývat reálnými a technicky proveditelnými možnostmi rybníků a MVN s ohledem na zajištění minimálních zůstatkových průtoků pod vodním dílem“ [11].

2.1.5 Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví

„Cíle projektu spočívají v zajištění a ochraně hrází historických rybníků, které jsou součástí našeho kulturního technického dědictví a tvoří významné prvky podílející se na charakteru krajiny v mnoha oblastech České republiky. Tohoto cíle bude dosaženo navržením technologie vhodné k provádění oprav těles hrází historických rybníků a její experimentální ověření s využitím sekčního fyzikálního modelu hrází“ [12].

2.1.6 Půdní a hydrologické sucho v měnícím se klimatu

„Podstatou navrženého projektu je vyhodnocení schopnosti klimatických modelů a standardně využívaných metod korekce systematických chyb reprodukovat důležité charakteristiky sucha v různých časových měřících“ [13].

2.1.7 Potenciál rozvoje malých vodních ploch v krajině jako adaptačních opatření k eliminaci hydrometeorologických extrémů

„Hlavním cílem výzkumu bude vyhodnocení potenciálu rozvoje malých vodních ploch (MVP) v krajině jako adaptačních opatření formou návrhu nových a obnovou původních MVP a dalších vodních ploch na potenciálně vhodných lokalitách v povodí v kontextu probíhajících hydrometeorologických extrémů (sucho, povodně). Projekt je zaměřen na problematiku zvýšení retence povodí - zvýšení schopnosti krajiny zadržovat vodu na základě návrhu a realizace adaptačních opatření formou MVP jako součástí komplexního systému přírodně blízkých opatření“ [14].

2.1.8 Analýza adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu a urbanizace na vodní režim v oblasti vnější Prahy

„Projekt si klade za cíl posoudit dlouhodobý vliv postupující urbanizace dalších a dalších ploch na vodní režim v okrajových částech Prahy, v úzké vazbě na probíhající klimatické změny a jejich očekávané dopady v budoucnu. Cílem projektu je také posoudit účinnost stávajících navržených a již realizovaných adaptačních opatření, případně navržení dalších doplňujících opatření, zavést poloprovoz systému umožňujícího hodnocení okamžitých srážkoodtokových poměrů na malých tocích a vytvoření užitého vzoru - typového projektu takového opatření“ [15].

2.1.9 PERUN

Projekt „Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia (PERUN) je zaměřen na výzkum klimatických extrémů, sucha a důsledků jeho prohlubování v České republice. Cílem projektu je vytvoření výzkumného centra, které se bude dlouhodobě věnovat výzkumu v oblasti změny klimatu. Jde o analýzu probíhající a predikci budoucí změny, včetně identifikace rizik pro životní prostředí a pro společnost. Výstupem budou nejaktuálnější podklady nutné pro přípravu a aktualizaci strategických dokumentů a pro rozhodovací procesy nejen v oblasti adaptací na změnu klimatu, ale i pro hodnocení mitigačních opatření v procesu jejich přípravy i realizace“ [16].

3 Malé vodní nádrže jako adaptační opatření

Z celé řady různých adaptačních opatření jsou malé vodní nádrže jednou z diskutovaných možností, která by podpořila zadržení vody v krajině a snížila celkový deficit vody. Dle českých technických norem, konkrétně ČSN 752410, je malá vodní nádrž definována jako nádrž s maximální hloubkou 9 m a objemem ovladatelného prostoru do 2mil. m³ [3]. Malé vodní nádrže v závislosti na své funkci zachycují povodňové průtoky v rozsahu disponibilního retenčního prostoru, transformují povodňové vlny a chrání území nebo objekty před negativními účinky velkých vod nebo transportem půdních částic z erozních procesů apod. Nejčastěji jsou navrhovány víceúčelové nádrže, které plní více funkcí současně [17].

MVN mají potenciál v suchých obdobích nadlepšovat průtoky pod hrází, mohou zvyšovat úroveň podzemní vody v okolí nádrže. Při špatně zvolené funkci MVN, nevhodném umístění v rámci ČR mohou být dopady MVN na hydrologickou bilanci negativní. Kombinace oblasti s dlouhodobou zápornou vláhovou bilancí a nedostatečným přítokem bude způsobovat nadměrné vypařování vody z nádrže [3].

Vše však závisí na typu a ovladatelnosti spodních výpustí, zvoleném způsobu manipulace a manipulačním řádu. Často bývá v projektech nádrží uváděno, že nádrž bude v suchých obdobích sloužit k nadlepšování průtoků, po realizaci k tomu však nedochází (zejména u rybochovných či rekreačních nádrží, kde naopak v suchých obdobích téměř veškerou vodu zadržují a vypouští se pouze nezbytné stanovené minimum) [18].

Adaptační opatření v podobě MVN kromě technického řešení samotného prostoru nádrže vyžaduje zohlednění dalších vstupních faktorů v procesu návrhu a realizace. Opatření vyžaduje zábor zemědělské půdy, řešení majetkoprávních vztahů či zpracování projektové dokumentace. Opatření by se mohlo dostat do střetu s veřejným zájmem na ochranu přírody a krajiny podle Zákona o ochraně přírody a krajiny č.114/1992 Sb. Jedná se například o významné krajinné prvky, územní systémy ekologické stability, zvláště chráněné druhy a území, nebo soustavu chráněných území NATURA 2000. Často je vhodné MVN doplnit i jinými adaptačními opatřeními, které podpoří funkce nádrže [17].

3.1 Typové rozdělení MVN

Detailním typy MVN jsou:

- Vodárenské
- Závlahové
- Retenční suché
- Retenční s malým zásobním prostorem
- Čistící, usazovací a krajínotvorné

Jednotlivé typy MVN mají různý vliv na šest hodnocených skupin. Těmito skupinami jsou:

- a) Vliv na kvantitu vody
- b) Vliv na hydromorfologii toku
- c) Vliv na kvalitu vody
- d) Vliv na vodní a vodu vázané organismy
- e) Vliv na krajinu a suchozemské organismy
- f) Socio-ekonomický dopad [17]

3.1.1 Vodárenské

Vodárenské MVN slouží k zásobování obyvatelstva a služeb pitnou nebo užitkovou vodou. Hlavní funkcí tohoto typu nádrže je akumulace velkého množství vody v krajině, která může sloužit jako zásoba pro suchá období. Pokud jsou nádrže umísťovány na vodní toky, vznikají migrační bariéry. Nádrže také zabraňují přirozené rozkolísanosti průtoku, což negativně ovlivňuje morfologii toku pod MVN. Nádrže ovlivňují teplotu vody, mikroklima a mohou zlepšovat estetické hodnoty krajiny. Výstavba MVN může způsobit zábor či degradaci původních cenných biotopů, tvorbou nových je možné zvýšení biologické i habitatové diverzity vodních biotopů v krajině. Zvýšení je nutné posuzovat s ohledem na poškození stejných ukazatelů pro tekoucí vody. MVN může omezit možnosti rozlivu vody do nivy. Nadlepšování průtoků pod MVN s cílem zlepšení ekologických poměrů je v praxi nedořešené. K nadlepšování nedochází, v suchých obdobích může MVN způsobovat vysychání různě dlouhých úseků toku a zapříčinit úhyn vodních organismů [17].

3.1.2 Závlahové

Tento typ nádrží se oproti vodárenským liší pouze způsobem využití vody. Veškeré vlastnosti a charakteristiky jsou totožné [17].

3.1.3 Retenční suché

Hlavní funkcí tohoto typu je ochrana osob a majetku před povodněmi. Vytvořený ochranný retenční prostor se plní při průchodu povodňových vod, snižují se povodňové průtoky a poté dochází k řízenému vyprazdňování. Tímto dochází ke zpomalení odtoku vody z krajiny. Při vhodném geologickém podloží může být zvýšena infiltrace vody do půdy v oblasti zátopy. Pokud jsou podobně jako dva předchozí typy umísťovány na vodní tok, vzniká migrační bariéra. Při provedení revitalizace vodního toku v zátopě MVN může být vliv nádrže na chemismus vody pozitivní. Prodloužila by se doba zdržení vody v korytě, omezila eutrofizace, snížil transport nerozpuštěných látek. V časových periodách prázdného zádržného prostoru je možné jeho využití, například zatravněný prostor může sloužit jako zdroj krmiva pro dobytek. Další nezmíněné charakteristiky jsou podobné jako u předchozích typů. Tento typ je vhodné doplnit dalšími opatřeními jako jsou tůně nebo ponechané zemníky, které mohou funkci tůní částečně nahradit [17].

3.1.4 Retenční s malým zásobním prostorem

Oproti suchým nádržím, jsou po průchodu povodňové vlny vyprazdňovány na úroveň hladiny zásobního prostoru. V ostatních ohledech jsou téměř totožné jako suché [17].

3.1.5 Usazovací

Protierozní nádrže, které slouží k zachycení erozních smyvů, se jinak výrazně neliší od retenčních nádrží, a proto jejich funkce a vlivy jsou obdobné [17].

3.1.6 Krajnotvorné

Krajnotvorné nádrže a nádrže na ochranu bioty jsou velmi specifickým typem MVN. Jedná se o velmi mělké nádrže, s mírnými svahy, členitými břehy a rozsáhlým litorálním pásmem ideálně mimo vodní tok bez regulace odtoku, určené pro zajištění optimálních životních podmínek, zejména pro chráněnou faunu a floru. Tento typ není vhodný a ani primárně určený pro chov ryb. Další vlivy se neliší od ostatních typů MVN [17].

3.2 Vliv MVN na hydrologický režim a vodní zdroje

Realizace malé vodní nádrže se vždy plánuje s konkrétním účelem (ochrana před povodněmi, chov ryb, požární nádrž a další). Před zahájením samotného procesu povolení výstavby (nebo obnovy) je třeba zvážit několik klimaticko-hydrologických faktorů:

- „*Posouzení klimatických veličin (srážky, výpar, sluneční svit, teploty vzduchu), zda je reálné a efektivní MVN v dané lokalitě vybudovat/provozovat – aby MVN plnila svůj účel a nevysychala*“,
- „*posouzení hydrologických poměrů (N-leté průtoky, M-denní průtoky, průměrné průtoky - Q_0) – aby se MVN naplnila a významně negativně neovlivnila hydrologickou bilanci vodního toku*“,
- „*posouzení hydrogeologických poměrů dané lokality – zda nebude docházet k vysokým ztrátám vody do podloží MVN, jak ovlivní výšku hladiny podzemní vody v okolí, zda a jak ovlivní případné podzemní vodní zdroje v okolí MVN*“ [19].

Pro samostatné hodnocení vlivu MVN na hydrologický režim a vodní zdroje lze použít metodický postup, který je výstupem projektu TITSMZP809. K dispozici je na webovém portálu www.suchovkrajine.cz. Posouzení vhodnosti realizace MVN je rozděleno do čtyř částí. V první části je představena poloha a hlavní funkce zamýšlené MVN. Druhá část je věnována problematice vhodnosti MVN pro danou lokalitu, dopady na okolí a analyzuje vliv plánovaných odběrů jednotlivých složek hydrologické bilance. Třetí část je věnována posouzení pozitivních a negativních dopadů a hodnocení nulové varianty. Ve čtvrté části je uvedeno doporučení a jeho odůvodnění. Výsledkem posouzení jsou možnostmi z hlediska výstavby „ano“, „ne“ a požadavek na další doplnění odborných podkladů [19].

Veškeré očekávané nebo plánované dopady MVN nemusí po realizaci přesně odpovídat stanoveným předpokladům. Je proto důležité zabývat se fungujícími MVN a studovat jejich vlivy v reálném čase s cílem lepšího porozumění fungování systému a zlepšení přesnosti předpokládaných vlivů nových nebo obnovovaných MVN.

Výsledky analýzy ukazují komplexnost ovlivnění hydrologického režimu MVN, stejně tak jako ovlivnění MVN jednotlivými hydrologickými procesy. Vhodným příkladem je výpar z vodní hladiny. Z hydrologického pohledu je vnímán jako ztráta vody, která bude chybět v toku pod nádrží. Z druhé strany, pozitivní vlastností výparu z vodní hladiny je dopad na mikroklima, kdy dochází k ochlazení okolního prostředí. I přes ztrátu vody výparem může MVN zajistit zabezpečení MZP pod nádrží v obdobích velmi nízkých průtoků. Za kladné funkce MVN je zvýšení zásob podzemní vody v důsledku infiltrace ze vzdušné vody v nádrži. Dalším kladným přínosem MVN je retardace odtoku při jednotlivých srážkoodtokových událostech. Nejde pouze o transformaci povodňové vlny, ta u běžných nádrží se stálou hladinou nadržení a malým retenčním prostorem nebude příliš významná, ale o celkové zpomalení a vyrovnaní odtoku při méně významných, avšak častějších událostech [19].

Přestože se se většina recenzovaných studií shoduje, že hlavním dopadem MVN je změna průtoku a snížení kulminačních průtoků, intenzita těchto změn se velmi těžko předvídá. Lišit se může v závislosti na povodí a také na funkcích nádrže. MVN ovlivňují také hydromorfologii, přenos sedimentů biodiverzitu a další [20].

Podobně jako hydrologický režim, může MVN změnit ekologickou kvalitu recipientů opět s pozitivními nebo negativními dopady na povodí. Dvěma hlavními kontaminujícími prvky vodního prostředí jsou u nás dusík (N) a fosfor (P). Zachycení a uložení těchto prvků je v podmínkách střední Evropy považováno za důležitou funkci rybníka. Nejvyšší hodnoty fosforu jsou obvykle nalezeny v uložených sedimentech, a to až 1000x větší než ve vodě [21].

Ekosystémy MVN mohou významně redukovat i mikrobiální znečištění přinášené přítoky. Pokud je jako hlavní funkce nádrže stanoveno podpora diverzity nebo zvýšení samočisticí schopnosti povrchových vod v povodí, předpokládá se realizace funkčních litorálních porostů a opevnění tak, aby byl umožněn rozvoj těchto porostů. Pro samočištění je důležité, aby tyto porosty byly v maximální možné míře v kontaktu s vodou. Důležitá je také otázka správného a optimálního složení rybí osádky v nádrži [21].

3.3 MAVONA

MAVONA je aplikace pro simulaci funkce malé vodní nádrže. K dispozici je na webové adrese <https://mvn.vuv.cz/>. Aplikace umožňuje rámcové posouzení vlivu malé vodní nádrže na odtokový režim a je tak podpůrným nástrojem pro jejich navrhování.

Aplikace slouží k základnímu posouzení chování MVN a jejího vlivu na celkový odtok. Do bilančního výpočtu vstupují veličiny: přítok, MZP pod nádrží, odběr, výpar z hladiny, srážky na hladinu. Dále je potřeba zvolit období pro výpočet. Defaultně je období

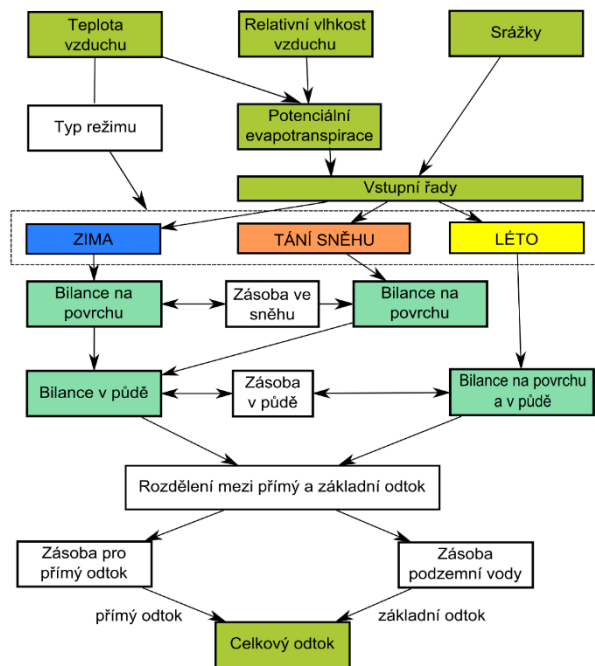
nastaveno na maximum. Aktuálně jsou dostupná data do srpna 2021. Uživatelské rozhraní umožňuje zobrazení řad jednotlivých proměnných a průběh objemu v nádrži v závislosti na bilanci. Aplikace dále generuje doplňkové informace: průměrná doba plnění nádrže, pravděpodobnost zabezpečení MZP a odběru, index aridity, m-denní průtoky pro profil nádrže, doporučené MZP na základě platného metodického pokynu z roku 1998.

Průměrná doba plnění nádrže se při jednotlivých simulacích liší. Výpočet se určuje z náhodně generovaného výběru dat z období pro výpočet. Zabezpečení MZP je uvažována z objemového hlediska, nikoliv průtokového zabezpečení. Simulace neuvažuje s měnící se plochou hladiny, která by ovlivňovala hodnoty výparu. Výsledky bilance jsou stanoveny v měsíčním kroku a jedná se o objemové hodnoty jednotlivých veličin [3].

Aplikace je generalizována na celé území České republiky, a to tak, že pro každý útvar povrchových vod (ÚPOV) jsou k dispozici simulované odtoky modelem BILAN. Základní princip fungování toho modelu bude představen v následující podkapitole. Pro jednotlivé útvary povrchových vod jsou k dispozici také srážky a výpar (evapotranspirace). K provedení výpočtu je potřeba znát základní charakteristiky navrhované nádrže. Objem nádrže, plochu zátopy a plochu povodí ve vybraném nebo vybraných útvarech povrchových vod. Povodí lze také nahrát pomocí GIS vrstvy ve formě shapefile, plocha z této vrstvy bude vypočtena automaticky. Pokud povodí zasahuje do více ÚPOVů a ÚPOVy jsou označeny manuálně, aplikace nerozezná, jaká část povodí spadá do konkrétního ÚPOV, a odtoky ze všech ÚPOVů se sečtou, a pak se stanoví podíl plochy povodí MVN k součtu ploch ÚPOVů. Z tohoto důvodu je lepší zadávat povodí jako shapefile. Pro tento typ zadání aplikace rozezná, jakými částmi povodí zasahuje do různých ÚPOVů, a proto je možné vzít příslušnou část odtoku z bilanci ovlivňujících ÚPOVů [22].

3.3.1 Hydrologický bilanční model BILAN

Model Bilan je vyvíjen více jak 15 let na oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek, dvě složky přímého odtoku zahrnující i hypodermický odtok a základní odtok. Základní struktura modelu a principy výpočtu jsou shodné v denní i měsíční verzi, stejně jako to, že povodí jsou uvažována jako celistvá. Povodí je schematizováno na soustavu nádrží, vertikálně jsou rozlišeny tři úrovně – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody.



Obrázek 1: Schéma modelu hydrologické bilance BILAN [23]

Vstupem do modelu jsou denní nebo měsíční:

- Srážkové úhrny (mm)
- Průměrné teploty (°C)
- Průměrná vlhkost vzduchu (%)
- Pozorované odtokové výšky (mm)
- Užívání vody (mm/měsíc)
- Potenciální evapotranspirace (mm)

Obecně je bilance vody v určité nádrži počítána podle vztahu:

$$S(d) = S(d - 1) + IN(d) - OUT(d)$$

kde velikost zásoby vody $S(d)$ pro daný den d je zjištěna jako zásoba vody v předchozím dni $S(d-1)$ a vstupů do nádrže $IN(d)$ a výstupů z nádrže $OUT(d)$.

Pro bilanci na povrchu půdy hrají zásadní roli vstupní srážkový úhrn a územní výpar, jehož velikost je určována podle potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody, v létě se do ní zahrnuje také voda v půdním profilu. Intercepce je v bilanci uvažována jako součást vody v půdním profilu. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu také zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda infiltruje do půdní zóny, kde plní nádrž s kapacitou, která je jedním z kalibrovaných parametrů. Při překročení této kapacity voda přetéká a následně je dělena do dvou lineárních nádrží. Odtoky z nich představují pomalou (základní odtok) a rychlou (přímý odtok) odezvu povodí. Celkový odtok je pak dán jejich součtem. Kromě odtokových dat poskytuje model výstupní časové řady zásob v jednotlivých nádržích a ve sněhu.

4 Charakteristiky vodního režimu krajiny

Očekávané dopady klimatické změny, které je možné identifikovat na základě současných výsledků vyhodnocení pozorovaných změn nebo z výsledků modelování dopadů změny klimatu na vodní režim krajiny a na vodní hospodářství, zahrnují pokračující nárůst průměrné teploty vzduchu a s tím související nárůst evapotranspirace. Celkový výpar z povodí je však limitován množstvím dostupné vláhy. V okamžiku, kdy nebude k dispozici zásoba vody v půdě a v dalších podpovrchových vrstvách, dojde k útlumu evapotranspirace a s ní spojeného efektu ochlazování vzduchu. Takový vývoj může vést ke zvýšení nebezpečí výskytu horkých vln, propagace sucha a zvýšení nebezpečí vzniku lesních požárů v některých částech republiky [4]. Výpar vody dokáže eliminovat teplotní extrém v časovém i prostorovém měřítku. Odpařující se voda krajinu ve dne výrazně ochlazuje (měrné skupenské teplo vypařování vody při normálním tlaku a teplotě 25 °C je 2243,7 kJ/kg) a akumulované teplo opět uvolňuje v noci. Vodní pára se může snadno dostávat z teplejších do chladnějších míst v horizontálním i vertikálním směru, kde dochází k její kondenzaci a teplo se uvolňuje. Příkon slunečního záření za letní den je asi 7 kWh/m². Výpar vody, ke kterému značnou měrou přispívá evapotranspirace rostlin, představuje až 23 % spotřeby sluneční energie, která by se jinak přeměnila v teplo. Pokles evapotranspirace o 1 l/m² (700 Wh) za den navodí tok zjevného tepla přibližně 40x vyšší, nežli je efekt skleníkových plynů. Například pokles evapotranspirace za jediný den o 1 mm na území České republiky způsobí uvolnění množství zjevného tepla, které je srovnatelné s celoroční produkcí elektrické energie ve všech elektrárnách v ČR. Při odvodňování půdy navíc dochází k rozkladu organických látek, čímž dochází k dalšímu uvolňování energie. Rozdíl v teplotě dostatečně zavlažené zeleně a odvodněného prostředí, např. vydlážděného náměstí lze snadno ověřit termovizní kamerou, na větších plochách snímky z družice [24].

4.1 Sucho

Obecné označení pro nedostatek vody v krajině. Je vyvoláno nedostatkem srážek a ovlivňováno výparem a dalšími faktory, včetně antropogenních. Definice sucha proto není jednoznačná [25].

4.1.1 Definice sucha

Jednou z možných definic sucha je deficit srážek oproti statistickému normálu, které během sezóny nebo zvláště po delší časové období, nestačí pokrýt poptávku v důsledku lidské činnosti. Všechny typy sucha pocházejí z deficitu srážek, což vede k nedostatku vody pro některé činnosti [26]. Období sucha se vzájemně liší jednou ze tří základních vlastností: intenzitou, trváním a územním rozsahem [26]. Sucho je většinou jevem nahodilým, který se vyskytuje z velké části nepravidelně v období podnormálních srážek s trváním od několika dní až po několik měsíců. Sucho bývá velmi často doprovázeno nadnormálními teplotami vzduchu, nižší relativní vlhkostí vzduchu,

zmenšenou oblačností a větším počtem hodin slunečního svitu. Důsledkem těchto faktorů je vyšší výpar (evapotranspirace) a další prohlubování nedostatku vody [27].

4.1.2 Rozdělení sucha

Sucho se dělí obvykle do čtyř kategorií, a to na meteorologické, hydrologické, zemědělské a socioekonomické.

4.1.2.1 Meteorologické

V přírodních podmínkách České republiky je prvotní příčinou všech typů sucha nedostatek atmosférických srážek. Meteorologické sucho je tedy vždy prvním typem sucha, ostatní následují s větším či menším zpožděním [27]. Intenzita a trvání jsou hlavní charakteristiky tohoto typu sucha [26]. Kromě množství a intenzity spadlých srážek vztahených k dlouhodobým srážkovým poměrům pro dané místo a roční dobu, stanovili mnozí autoři různé definice klimatického sucha pomocí klimatologických indexů, a to v závislosti na dalších meteorologických prvcích (teplota vzduchu, výpar, rychlost větru, sluneční svit, vlhkost vzduchu aj.), jejichž hodnoty mohou v příslušném období dopady srážkového deficitu na sucho zmírnit nebo naopak výrazně prohloubit [27].

4.1.2.2 Hydrologické

Hydrologické sucho je spojeno spíše s dopady srážkového období na schodek povrchových nebo podzemních zásob vody než s vlastním nedostatkem srážek. Hydrologické sucho se obvykle dostaví se zpožděním, neboť uplyne více času, než se nedostatek vody projeví poklesem hladin v přehradních nádržích, rybnících, v průtocích vodních toků a v úrovni hladin podzemních vod. Důsledkem hydrologického sucha jsou citelně postižena i jiná hospodářská odvětví [26]. Vznik hydrologického sucha je ovlivněn i užíváním vody, proto je třeba na hydrologické sucho pohlížet jako na přírodní fenomén, který však může být prohlouben lidským působením [27].

4.1.2.3 Zemědělské

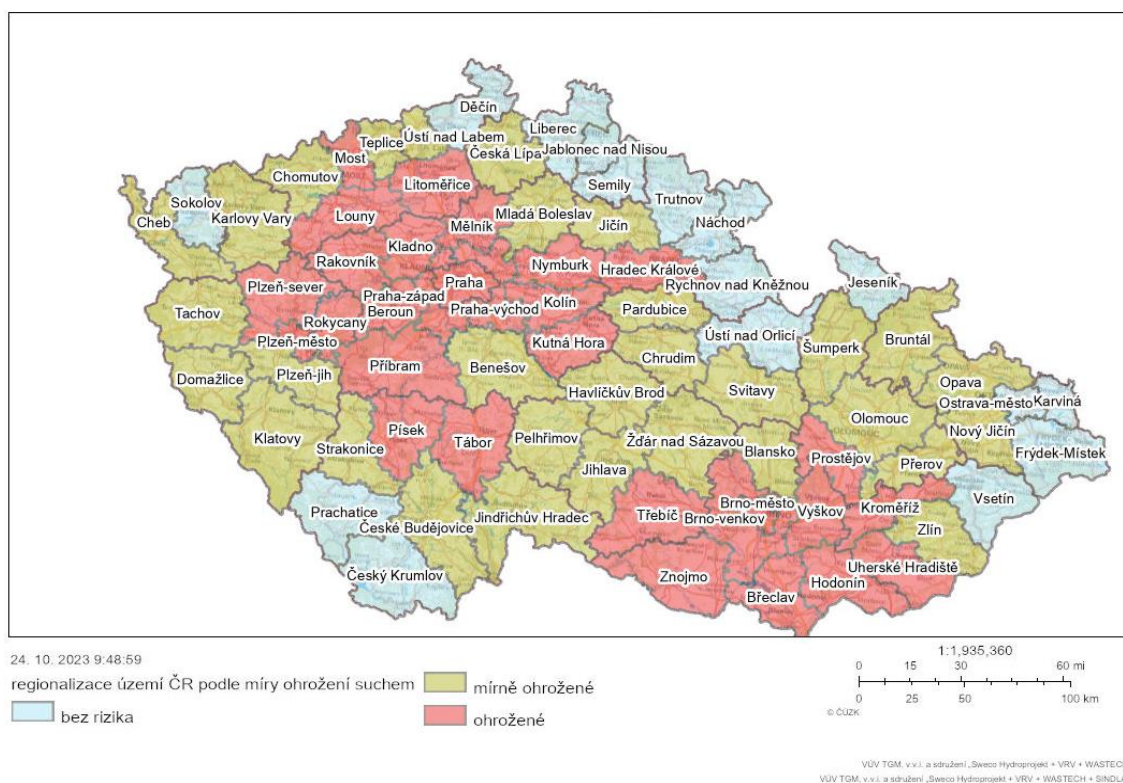
Půdní sucho je základním předpokladem vzniku sucha zemědělského. Půdní sucho lze obecně definovat jako nedostatek vody v kořenové vrstvě půdního profilu, který způsobuje poruchy ve vodním režimu zemědělských plodin i volně rostoucích rostlin. Zemědělství je obvykle prvním ekonomickým sektorem postiženým suchem, protože nedostatek půdní vlhkosti záhy vede k rychlému vyčerpání zbytkových zásob, zejména pokud je doba deficitu vlhkosti spojena s vysokými teplotami a nepříznivými větrnými podmínkami [26,27].

4.1.2.4 Socioekonomické

Socioekonomické sucho je definované pomocí ekonomických ukazatelů, kdy poptávka po nejrůznějších produktech a službách nemůže být uspokojena v důsledku nedostatku vody [28].

4.1.3 Dopady sucha

Suchem mohou být ovlivněny všechny typy vod a s nimi i druhy na vodu vázaných organismů včetně některých terestrických druhů rostlin a živočichů (např. obojživelníci, ptáci, savci), které jsou s vodou úzce spjaty, ať už habitatově, reprodukčně, či potravně [29]. Jeden z nejvýznamnějších dopadů hydrologického sucha představuje zhoršená možnost, popřípadě nemožnost zásobování obyvatelstva pitnou vodou, a to vzhledem k jejímu nedostatku, případně nevyhovující kvalitě či jejímu znečištění. Snížení dodávek vody, nemožnost odběrů vody, nemožnost odběrů vody potřebné jakosti (vhodná teplota, neznečištěná voda), představuje vážný problém i pro využití vody v průmyslu a energetice. Kvůli nedostatku vody či její nevyhovující kvalitě může být omezena nebo dokonce přerušena činnost podniků. V energetice mohou nastat problémy s chlazením tepelných a jaderných elektráren, i když hlavním dopadem je omezení, případně zastavení provozu vodních elektráren, které nemohou při malých průtocích fungovat. Výskyt malých průtoků má vliv i na plavbu. Tu je nutno omezit, případně zastavit, neboť lodní doprava je konstruována na plavbu za přesně definovaných minimálních průtoků. Z hlediska využití vody je podstatné také omezení, respektive úplné zastavení zavlažování v zemědělství a používání vody pro další účely, kde není potřeba vody akutní (zavlažování okrasných ploch, kropení ulic a prašných prostředí). Vodní nádrže na vodním toku významně eliminují vliv suchého období nadlepšováním průtoku na úseku toku pod nádrží [30].



Obrázek 2: Regionalizace území ČR podle míry ohrožení suchem [31]

4.1.4 Deficitní oblasti

Výzkum v rámci projektu Centrum Voda přispěje k lepšímu poznání, a to i v oblasti porovnání budoucích požadavků na vodu s množstvím disponibilní vody a určení deficitních území, doby a hloubky deficitu. Deficitní oblasti budou určeny na základě predikce vývoje zabezpečení vodních zdrojů v ČR do roku 2050 a porovnání budoucích požadavků na vodu s množstvím disponibilní vody ovlivněným klimatickou změnou.

Protože oblasti s deficitními vodními zdroji budou v rámci WP 1 stanoveny až na přelomu 2023-24, pro první etapu řešení části WP 3 bylo nutno zájmové území výzkumu stanovit jiným způsobem. Po dohodě s odbornými guaranty MŽP byl využit materiál „Politika územního rozvoje ČR“, který obsahuje tzv. specifické oblasti, ve kterých se projevuje aktuální problém ohrožení území suchem, a to na základě vyhodnocení hydrologických bilančních dat primárně na podzemních vodách. Z toho důvodu jsou hranice těchto oblastí vedeny po hranicích hydrogeologických rajonů.

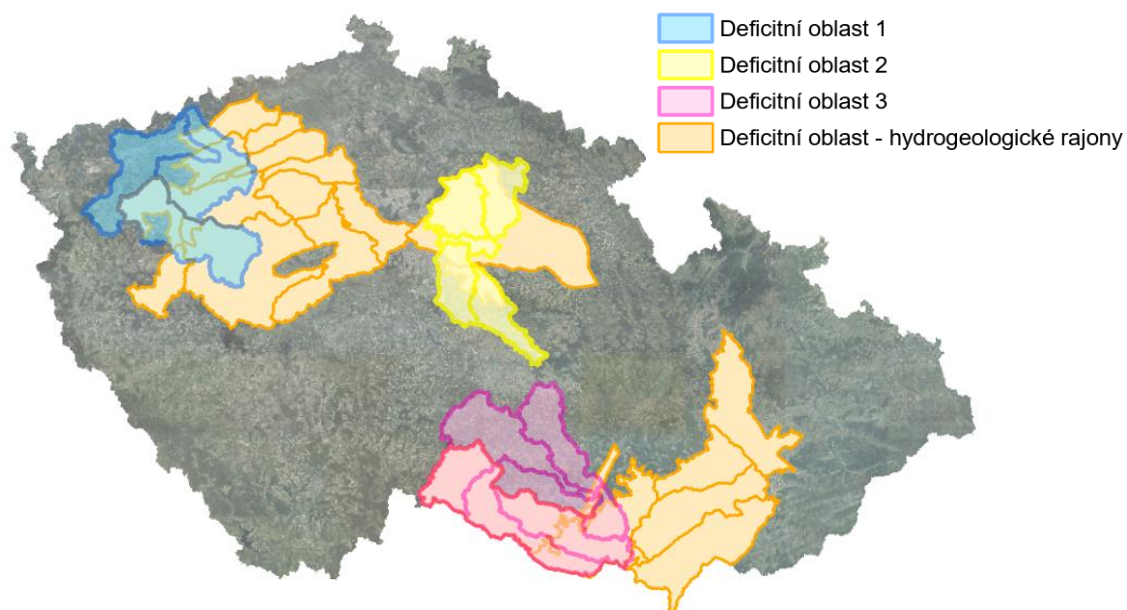
V rámci ČR byly deficitní oblasti definovány jako hranice hydrogeologických rajonů a povodí povrchových vod. Nejedná se zatím o finální podobu deficitních oblastí a v rámci dalších prací v projektu může dojít k jejich úpravám [32].

Výběr deficitních oblastí pro roky 2021-2023:

Oblast 1 Západní Čechy - 4 hydrolog. povodí 3. řádu (4 534,5 km²) 13 hydrogeolog. rajonů

Oblast 2 Východní Čechy - 5 hydrolog. povodí 3. řádu (2 702 km²) 10 hydrogeolog. rajonů

Oblast 3 Jižní Morava - 7 hydrolog. povodí 3. řádu (5 557 km²) 9 hydrogeolog. Rajonů



Obrázek 3: Deficitní oblasti ČR [32]

4.2 Minimální zůstatkový průtok

„Minimálním zůstatkovým průtokem (dále jako MZP), je průtok povrchových vod, který ještě umožňuje obecné nakládání s povrchovými vodami a ekologické funkce vodního toku a zohledňuje možnosti rekreační plavby. MZP stanoví vodoprávní úřad v povolení k nakládání s vodami. Vodoprávní úřad přitom přihlédně k podmínkám vodního toku a možnostem rekreační plavby, charakteru nakládání s vodami a vychází z opatření k dosažení cílů ochrany vod přijatých v plánu povodí podle § 26. Dále stanoví místo a způsob měření minimálního zůstatkového průtoku a četnost předkládání výsledků těchto měření vodoprávnímu úřadu“ [33].

4.2.1 Stanovení MZP

Postup stanovení MZP je dle aktuálně platné metodiky stanoven v metodickém pokynu odboru ochrany vod Ministerstva životního prostředí ke stanovení hodnot minimálních zůstatkových průtoků ve vodních tocích. Tento metodický pokyn vymezuje postup stanovení a způsob kontroly dodržování hodnot MZP v profilech vodních toků ovlivněných nakládáním s vodami. Tento postup je obdobný postupům, které uplatňují vyspělé střeoevropské země [34].

Zůstatkový průtok je chápán jako takový průtok, který zůstane v toku v daném úseku (profilu) po jednom či více odběrech vod nebo jejich jiném užívání. Pro jeho stanovení je nutné znát hodnoty průtoků Q_{364d} , Q_{355d} , Q_{330d} (což znamená, že hodnota daného průtoku byla dosažena nebo překročena průměrně 364, 355 nebo 330 dní v roce) stanovené z řady průměrných neovlivněných průtoků z let 1931 – 1980. Pokud tyto neovlivněné průtoky nejsou k dispozici, použije se řada průměrných denních průtoků z let 1931 – 1960. Směrné hodnoty MZP se stanoví podle následující tabulky:

Tabulka 1: Stanovení směrné hodnoty minimálního zůstatkového průtoku dle současné metodiky [34]

Průtok Q_{355d} (m^3/s)	Minimální zůstatkový průtok
<0,05	Q_{330d}
0,05-0,5	$(Q_{330d} + Q_{355d}) * 0,5$
0,5-5,0	Q_{355d}
>5,0	$(Q_{355d} + Q_{364d}) * 0,5$

Hodnoty MZP mohou být stanoveny vyšší než směrné hodnoty, ve výjimečných případech stanoveny nižší než směrné hodnoty, pokud je nutno splnit specifické požadavky, které nelze zajistit pomocí jiných opatření [34].

4.2.2 Stanovení MZP v zahraničí

V zemích EU a ve světě existuje široká škála různých metod pro stanovování minimálních zůstatkových průtoků. Tyto metody lze v zásadě rozdělit do několika skupin: na metody založené na hydrologických charakteristikách, metody založené na hydraulických charakteristikách, metody založené na kombinaci hydrologických a morfologických charakteristik nebo metody experimentální založené na vícekritériálním rozhodování zohledňujícím ekologická kritéria [35].

4.2.2.1 Slovensko

Situace je obdobná jako u nás, pro stanovení minimálního zůstatkového průtoku se používá hydrologická metoda a případně metoda simulace habitatu. Do budoucna se plánuje změna metody pro stanovení minimálního zůstatkového průtoku, aby byla více zohledněna přirozená proměnlivost průtoku v čase a nedocházelo k porušení hydraulického propojení podzemních a povrchových vod [35].

4.2.2.2 Německo

Využívá ke stanovení hydrologickou metodu založenou na hodnotě Q347d a simulaci habitatu, přístup ke stanovení není v jednotlivých spolkových zemích stejný, každá k této problematice přistupuje rozdílně a používají se zde i experimentální metody [35].

4.2.2.3 Rakousko

Využívá hydrologické metody a kvantitativní simulaci habitatu [35].

4.2.2.4 Švýcarsko

Používají se hydrologické metody, zákonem mají stanovené hodnoty minimálního reziduálního průtoku, který musí v toku zůstat po odběru určitého množství [35].

4.2.2.5 Velká Británie

Pro zlepšení ekologického stavu vodních útvarů dle Rámcové směrnice pro vodní politiku (2000/60/ES) byla vypracována čtyřstupňová studie zaměřená na stanovení environmentálních standardů. Studie se tedy zabývá identifikací fyzikálních parametrů, klasifikací recipientů do skupin, vytvořením ekologických základů pro standardy a definice výsledných environmentálních standardů pro každou skupinu vodních útvarů. Velká Británie se problematikou stanovení minimálního zůstatkového průtoku zabývá už dlouhá léta. Výsledkem dlouhodobého studia je modelový nástroj Low Flows 2000, který je používán Agenturou pro životní prostředí a Skotskou agenturou pro ochranu životního prostředí pro stanovení množství vody pro povolení, ohodnocení environmentálních dopadů a také potenciálu pro využívání vodní energie [35].

4.2.3 Plánovaná změna stanovení MZP

Nový metodický přístup stanovení MZP slouží jako podklad pro nařízení vlády ČR a vyvolává širokou diskusi nad jeho dopadem, a to jak z hlediska ochrany přírody, z hlediska jeho dopadu na nakládání s vodami a hospodaření na nádržích. Problematika MZP totiž vyvolává přirozený rozkol mezi nakládáním s vodami a ochranou přírody a jen u minima případů lze nalézt ideální kompromis. Dosud platný metodický pokyn z roku 1998 je úměrný své době, ale nevyhovuje požadavkům na tzv. ekologické průtoky (minimální průtok pro zachování přírodního prostředí tekoucích vod). Nový přístup je založen na regionálním rozdělení respektující hranice povodí a odlišné hydrologicko-geologické charakteristiky. Do výpočtu MZP zavádí více hydrologických charakteristik a vytváří podmínky pro sezonní rozdělení MZP během roku. Základní kritéria pro nové

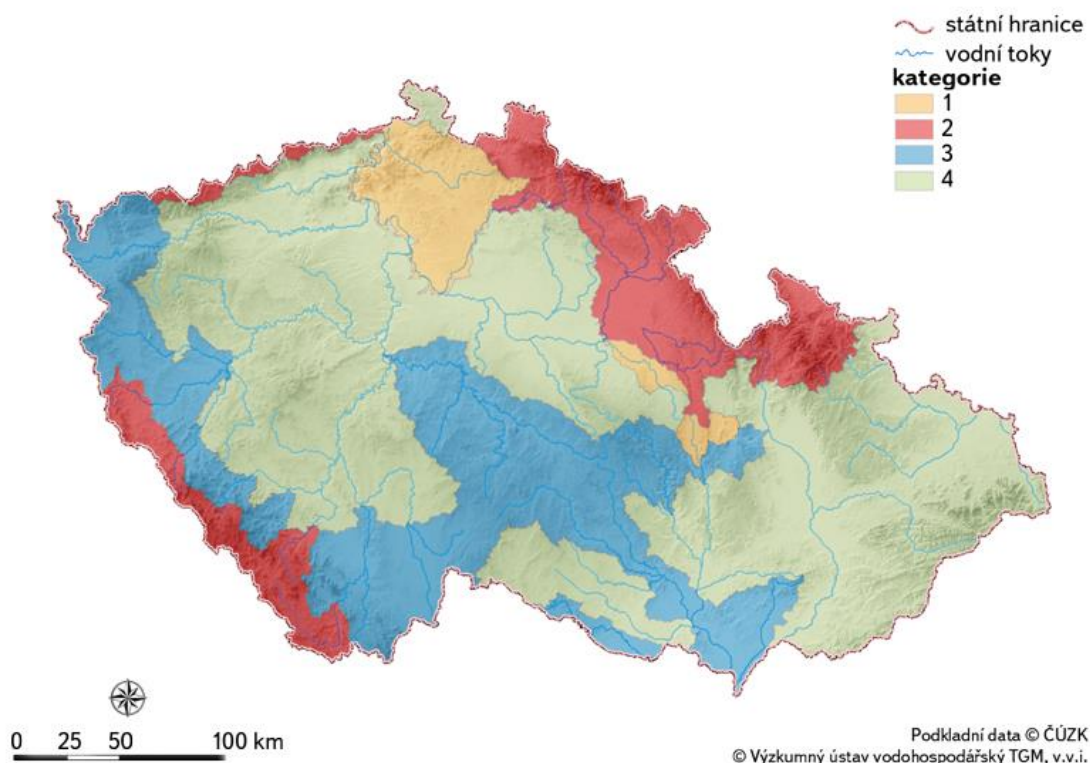
stanovení MZP jsou: Regionalizace, Sezonalita, Dopady na biologické složky a ekologický průtok, využití hodnot m-denních průtoků [36].

4.2.3.1 Sezonalita

Hodnota Q_{MZP} bude proměnná v roce, aby lépe vystihla přirozený vodní režim, v jarním období by docházelo k nadlepšení MZP. Výsledným rozdělením bylo stanovení tzv. hlavní sezóny v období květen až leden a jarní sezóny v období únor až duben. Vodoprávní úřad stanoví pro nakládání s vodami dvě hodnoty minimálního zůstatkového průtoku v roce v závislosti na ročních sezónách [37].

4.2.3.2 Regionalizace

Pro potřeby stanovení Q_{MZP} je území ČR rozděleno podle parametru K_{99} do čtyř oblastí (K_{99} je poměr mezi průtokem $Q_{99\%}$ a průtokem Q_a , přičemž $Q_{99\%}$ je průměrný denní průtok v profilu vodního toku, který byl dosažen nebo překročen v dlouhodobém průměru pro 99 % dní v referenčním období a Q_a je dlouhodobý průměrný průtok v profilu vodního toku). Regionalizace je založena na myšlence podílu základního odtoku na celkovém odtoku, hydrologických poměrů a množství srážek na povodí [37].



Obrázek 4: Regionalizace ČR dle K_{99} [36]

- Oblast 1 – tvoří z velké části křídové sedimenty, které představují drenážní báze a kde základní odtok, tj. odtok ze zásob podzemních vod, tvoří podstatnou část celkového odtoku. Parametr $K_{99} > 0,18$.

- Oblast 2 – tvoří horská území, která jsou velmi vodná, vyrovnaný charakter odtoku je dán především vysokým úhrnem srážek. Parametr $K_{99} > 0,15$.
- Oblast 3 – do této oblasti patří lokality podhůří pohraničních pohoří a oblasti Českomoravské vrchoviny, tedy oblasti krystalické struktury, vzhledem k nadmořské výšce, zde dochází k dřívějšímu nástupu období jarního tání než ve 2. oblasti, srážkový úhrn je zde nižší. Parametr K_{99} se pohybuje v rozmezí hodnot 0,1 – 0,15.
- Oblast 4 – výrazně nevyrovnaný režim průtoků během roku. Parametr K_{99} je menší než 0,1.

4.2.3.3 Využití hodnot m-denních průtoků

Pro stanovení Q_{MZP} budou použity m-denní průtoky stanovené pro referenční období 1981 - 2010 dle nového katastru ČHMÚ, kde je zohledněno nakládání s vodami [37].

4.2.3.4 Dopady na biologické složky a ekologický průtok

Návrh hodnoty MZP v podmínkách ČR vychází z výsledků vyhodnocení expertních studií přírůstkové metodiky IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) a jejího modelového nástroje PHABSIM (Physical Habitat Simulation System). Z výsledků vychází, že ryby potřebují průtok kolem Q_{330d} , hlavně pro lokality ve 2. a 3. oblasti. V těchto oblastech se průtok Q_{330d} pohybuje kolem hodnoty 25 – 30 % Q_a [37].

4.2.3.5 Výpočet hodnot MZP pro jednotlivé oblasti

Pro návrh metody stanovení MZP je uvažován orientační požadavek na MZP cca 20–30 % Q_a , což je v souladu se závěry dokumentu EK. Doporučením pro dosažení dobrého ekologického stavu je zajistit ekologický průtok v rozsahu 25–50 % Q_a , navržená úroveň 20–30 % představuje dolní hranici z daného rozpětí.

Kategorie	Hlavní sezona (květen-leden)	Jarní sezona (únor-duben)
1	$(1-Q_{355d}/Q_a)*Q_{330d}*1,2$	Q_{330d}
2	$(1-Q_{355d}/Q_a)*Q_{330d}*1,1$	Q_{330d}
3	$(1-Q_{355d}/Q_a)*Q_{330d}*1,05$	Q_{330d}
4	$(1-Q_{355d}/Q_a)*Q_{330d}*1,07$	Q_{330d}

5 Hydrologická bilance

Hydrologická bilance je v současné době definována zákonem o vodách č. 150/2010 Sb., § 22, který uvádí, že hydrologická bilance spolu s vodohospodářskou bilancí tvoří vodní bilanci. Dle § 2 je hydrologická bilance definována jako „porovnání přírůstků a úbytků vody s vyhodnocením změn vodních zásob v povodí, v hydrogeologickém rajonu, v území nebo ve vodním útvaru za daný časový interval z hlediska množství a jakosti vody, které charakterizuje prostorové a časové rozdělení oběhu vody v přírodním prostředí“. O 10 konkrétních podmínkách stanovení hydrologické bilance v České republice pojednává vyhláška č. 431/2001 Sb. [38].

5.1 Hydrologická bilance povodí

Hydrologická bilance vyjadřuje všechny zdroje a ztráty vody v daném povodí pomocí hydrologické rovnice. Nejčastější se jedná o povodí orografické, jehož hranice je vymezena rozvodní čarou (rozvodnicí), která probíhá přes nejvyšší kóty a odděluje od sebe jednotlivá povodí [39]. Druhým typem rozvodnice je hydrogeologická. Při jejím odvozování se využívá znalostí proudění podzemní vody a geologické struktury povodí. Důležité je si uvědomit, že ne vždy korespondují orografické rozvodnice s těmi hydrogeologickými a že hodnoty složek hydrologické bilance jsou těmito skutečnostmi ovlivněny. Závěrovým profilem, kde se bilancuje množství vody v povodí, bývá nejčastěji vodoměrná stanice s kontinuálním záznamem vodních stavů, respektive průtoků [40].

Hydrologická bilance povodí se v podmínkách střední Evropy provádí pro hydrologický rok, který začíná 1.11. a končí 31.10. Hydrologickou bilanci lze zpracovávat i pro jiné časové periody např. měsíc, rok, několik let či hydrologickou událost (povodeň). Zkracováním bilančního období klesá přesnost výpočtu, jelikož lze hůře stanovit a separovat jednotlivé složky, náležející právě definovanému časovému úseku. Jednotka jednoho kalendářního roku je volena tak, aby i pevné srážky (sněhové) se mohly zúčastnit odtokového procesu v tomto období [41].

Vzájemný vztah bilanční prvků pro povodí je dán bilanční rovnicí:

$$H_S = H_O + H_V \pm R$$

Kde	H_S	je	množství srážek spadlých na povodí
	H_O		množství odtoku vody z povodí
	H_V		množství výparu z povodí
	R		změna zásoby vody v povodí za danou časovou periodu (v rybnících, jezerech, půdě, sněhu, podzemních vodách)

Hodnoty jednotlivých členů hydrologické bilance se obvykle uvádí v mm vodního sloupce. Pro výpočty v rozsahu povodí se obvykle převádí na m³. Vrstvička vody o 1 mm na ploše 1

m² je 1 litr nebo-li 0,001 m³ [39].

Pro období dlouhé řady let lze člen R zanedbat a rovnici lze zjednodušit na tvar [41]:

$$H_S = H_O + H_V$$

Anglická literatura uvádí základní bilanční rovnici ve tvaru [42]:

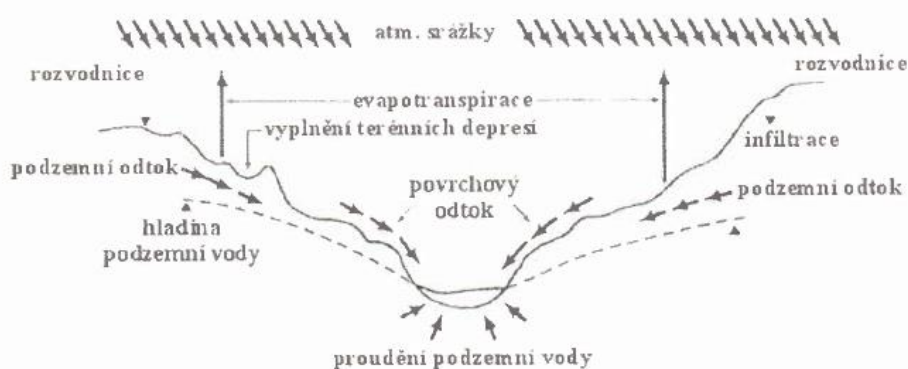
$$\Delta S = P - (E + T + G + Q)$$

Kde ΔS je změna zásoby, P jsou srážky, E výpar, T evapotranspirace, G podpovrchový odtok a Q povrchový odtok.

Bilanční rovnice zahrnující pouze povrchovou vodu má následující tvar [42]:

$$\Delta S = P - (E + T + I + Q)$$

Kde I je infiltrace a ostatní členy už byly definovány.



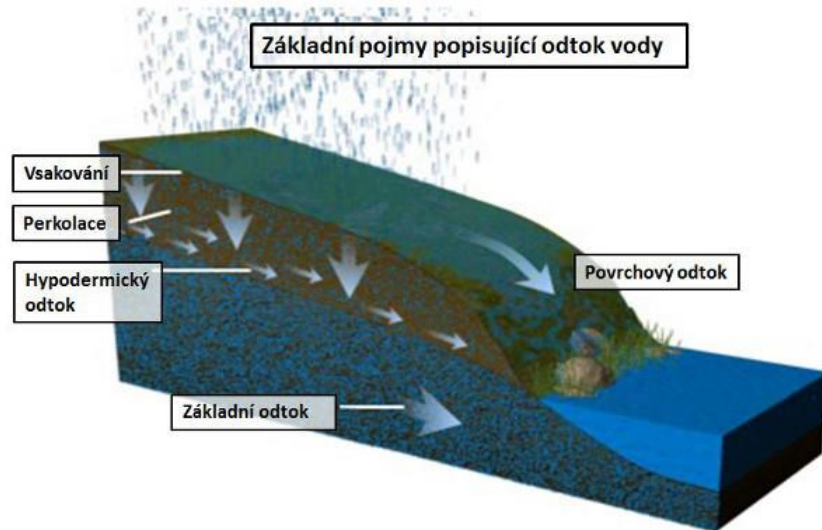
Obrázek 5: Vstupní členy hydrologické bilance [39]

Jednotlivé členy rovnice lze stanovit různými metodami. Přítok a odtok lze měřit běžnými způsoby měření průtoků. Podzemní přítok a odtok je ve většině případů neznámý a dopočítáván je z rovnice. Srážky lze získat ze srážkoměrných stanic nebo pomocí vlastního měření. Měření evapotranspirace je prováděno na malém množství povodí, a proto často bývá dopočtena na základě průměrných teplot. Pokud evapotranspiraci nelze dopočítat a není ani prováděno měření, lze využít tabulkové hodnoty pro obdobné přírodní poměry. Výpar z volné hladiny lze získat přímou i nepřímou metodou. Výparoměr je metoda přímá. Mezi metody nepřímé patří například metoda tepelné bilance. Dalším způsobem stanovení je určení výparu pomocí empirických vzorců [43].

5.1.1 Odtok

Celkový odtok je hlavním výstupem vody z povodí. Charakterizovat se dá jako objem vody, který odečte z povodí za jednotku času. Dělíme ho na podpovrchový, hypodermický a povrchový odtok. Povrchový odtok je část celkového odtoku, která stéká přímo po povrchu terénu. Může být soustředěný, v rámci hydrografické sítě vodních toků, nebo nesoustředěný, tzv. povrchový splach. Povrchový odtok, ke kterému dojde při překročení infiltrační kapacity půdy se nazývá Hortonovský. Povrchový

a hypodermický je v součtu označován jako odtok přímý. Podpovrchový, označovaný jako základní je tvořen vodou, která se infiltrovala a odtéká podzemím, je oproti hypodermickému a povrchovému odtoku značně zpomalený. Právě tento odtok zásobuje vodou potoky a řeky i v období bez srážek [44].



Obrázek 6: Jednotlivé složky odtoku [45]

5.1.1.1 Měření průtoků

Povrchový odtok vychází především z hydrologických měření, které se provádí v hydrologických stanicích. Základní měření, prováděná v těchto stanicích, jsou měření průtoků vody a vodních stavů. Z hydrologického hlediska je průtok množství vody, která proteče průtočným profilem za jednotku času. Udává se v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nebo v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. Průtok můžeme zjistit několika způsoby:

- Přímé měření průtoků
- Měření průtoků přepady
- Měření průtoků pomocí hydrometrické vrtule (hydrometrování)
- Měření průtoků pomocí indikátorů
- Hydrotechnický výpočet průtoku
- Měření průtoku pomocí moderních metod

5.1.1.2 Odtok z nádrže

U malých vodních nádrží se odtok řídí pomocí spodní výpusti. Nádrž se vypouští například kvůli rekonstrukci tělesa hráze a funkčních objektů, odbahnění nebo výlovů, pokud je nádrž určena pro chov ryb. Požerák je nejčastěji používaným typem uzávěru spodní výpusti u malých vodních nádrží. Je tvořen uzavřenou či otevřenou šachtou s drážkami pro dluže a umožňuje dobře regulovat hladinu vody v nádrži. V závislosti na nastavení dluží lze u vícedlužových požeráků vypouštět vodu ode dna nebo od hladiny.

Dalšími typy spodních výpustí jsou lopatový uzávěr, čepový uzávěr, stavidlový uzávěr a šoupátkový uzávěr [46].



Obrázek 7: Spodní výpust-požerák [47]

5.1.2 Srážky

Atmosferické srážky vznikají kondenzací vodních par obsažených ve vzduchu. Ke kondenzaci může docházet na povrchu těles, rostlin, zemském povrchu, a hlavně v atmosféře na kondenzačních jádrech. Kondenzačními jádry mohou být například prachové částice, na nichž dochází k růstu kapek, které pak dopadnou na zemský povrch. Podle skupenství rozlišujeme srážky kapalné a pevné. Podle způsobu a místa vzniku lze srážky rozdělit na horizontální, ty se tvoří kondenzací par bezprostředně na povrchu země či předmětech, rostlinách atp., a vertikální, vznikající ve volné atmosféře a podle právě existujících meteorologických podmínek z ní vypadávají jako déšť, sníh, kroupy apod. Množství horizontálních srážek je v porovnání s vertikálními za jeden hydrologický rok obvykle malé [41].

Množství srážek vpadlých na povodí je jedním z hlavních prvků bilanční rovnice. U srážek je důležité sledovat jejich parametry tak, aby byl získán správný obraz o jejich plošném rozložení, o časovém průběhu, o délce trvání, úhrnu a tím i o jejich intenzitě. Množství srážek je zpravidla vyjadřováno jako srážková výška v mm. Množství srážek v bodě lze vyjádřit jako srážkový úhrn. 1 mm kapalných srážek na ploše 1 m² dá objem 1 l, na ploše 1 km² je objem 1000 m³ [41].

Srážkové úhrny jsou měřeny v síti srážkoměrných stanic, ve kterých je instalován srážkoměr, případně zapisující ombrograf. V těžko dostupném terénu v horách jsou srážky zachycovány za delší období pomocí totalizátorů [41]. Síť srážkoměrných stanic v České republice buduje a spravuje Český hydrometeorologický ústav. Meteorologická a klimatologická měření probíhají v síti 802 stanic ČHMÚ (stav v červnu 2011). Rozsáhlá klimatologická měření poskytuje síť 179 dobrovolnických klimatologických stanic, z nichž

většina, 140 stanic, je plně nebo částečně automatizována. Pozorovací program 559 dobrovolnických srážkoměrných stanic (z toho 77 automatizovaných) je omezen jen na měření srážek a vlastností sněhové pokrývky. Doplňkové údaje o ročním úhrnu srážek navíc poskytuje i 26 totalizátorů, umístěných v obtížně přístupných horských lokalitách. Stanice jsou řízeny a spravovány jednotlivými regionálními pobočkami ČHMÚ v bývalých krajských městech. Regionální pobočky ČHMÚ zároveň vyřizují veškeré žádosti o data a s nimi spojené služby ze stanic na území jejich působnosti [48].

Srážky se měří v 7 hodin ráno, takže udávají 24hodinové úhrny za předchozí den. Výška sněhové pokrývky se měří denně, vodní hodnota sněhu jednou za 5-10 dní. Vodní hodnota sněhu je údaj, který vzniká poměrem výšky vodního sloupce, který vznikl roztáním sněhu, k výšce sněhu před roztáním. Výška sněhové pokrývky se měří sněhoměrnou latí. Pokud nás primárně zajímá množství vody uložené ve sněhu, lze použít váhový sněhoměr, kterým se určuje vodní hodnota sněhu [41].

5.1.3 Evapotranspirace

Evapotranspirace zahrnuje evaporaci (výpar z vodní hladiny, půdy a povrchu vlhkých rostlin) a transpiraci rostlin. Evapotranspirace je ovlivněna několika činiteli, jako sluneční záření, množství srážek, rychlostí větru či vegetačním pokryvem. Nejvýznamnějším činitelem při tomto procesu je sluneční záření, které přemění vodu, respektive její kapalnou skupenství, na skupenství plynné. Tento je nazýván výpar [49].

Evapotranspirace se dále dělí na skutečnou a potenciální. Potenciální evapotranspirace je teoretická horní hranice výparu z plochy v daných přírodních a meteorologických podmínkách. Vyjadřuje schopnost vzdušného prostředí odebrat vodu z povrchu, odpovídá přibližně výparu z volné vodní hladiny nebo evapotranspiraci z trávníku s optimální vlhkostí. Je závislá především na teplotě vzduchu. Skutečná závisí na teplotě vzduchu, respektive potenciální evapotranspiraci, a je omezena množstvím vody, které je pro výpar a transpiraci k dispozici. Bývá také označována termínem územní výpar. Dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek činí v ČR 680 mm, skutečná evapotranspirace je 490 mm, celkový odtok 190 mm, to znamená, to je pouze 28 % srážek, zatímco 72 % srážek se vypaří [49].

K určení evapotranspirace se používají půdní lyzimetry. Jsou to nádoby s hlínou a vegetací zasazené do půdy. Změny vlhkosti se určují na základě změny váhy půdního lyzimetru. Existuje celá řada vzorců pro určení potenciální evapotranspirace jako je například Penmannův vzorec a Turcův vzorec. Nejčastěji používanou metodou je výpočet potenciální evapotranspirace následujícím vzorcem podle Thornthwaita, který vychází z průměrné měsíční teploty vzduchu [39]

$$PET = 16,2 \times \left(\frac{10 \times \theta}{I} \right)^a \times F(\lambda)$$

Kde PET je potenciální evapotranspirace v mm/měsíc,

θ je průměrná teplota ve stínu pro uvažované období,

a je koeficient rovný

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2} \times I - 7,71 \cdot 10^{-5} \times I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} \times I^3.$$

I je roční termický index, který je součtem měsíčních indexů i :

$$i = \left(\frac{\theta}{0,5}\right)^{1,514} \text{ a } I = \sum_{n=1, \dots, 12} i_n$$

$F(\lambda)$ je korekční koeficient, který vychází ze zeměpisné šířky a měsíce v roce (viz. obr.8)

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
LAT. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Obrázek 8: Korekční koeficient $F(\lambda)$ pro Thornthwaitův vzorec

Ve sloupci vlevo jsou stupně zeměpisné šířky, v horním řádku měsíce v roce. Evapotranspirace je v hydrologickém cyklu hlavním procesem způsobujícím ztráty vody, s výjimkou velmi vlákénko nebo velmi studeného klimatu. Když se evapotranspirace snižuje, zvyšuje se v závislosti na propustnosti půdy buď povrchový odtok nebo infiltrace.

5.1.4 Výpar z volné hladiny

Výpar z vodní hladiny je jednou ze základních složek oběhu vody v přírodě a významně ovlivňuje celkovou hydrologickou bilanci povodí. Výpar z vodní hladiny je důležitým členem hydrologické bilance vodních nádrží. V posledních letech je význam výparu z volné hladiny navíc umocňován dopady klimatických změn. Zvyšování průměrné teploty vzduchu má za následek zvýšený úbytek vody výparem, nicméně tyto ztráty nejsou kompenzovány srážkovými úhrny, které jsou víceméně stejné a nerovnoměrně rozdělené. Na území České republiky se proto vyskytují oblasti, kde potenciální evapotranspirace významně převyšuje srážkové úhrny na povodích s vyšším zastoupením vodních ploch, případně při určování bilance vodních nádrží, je zapotřebí přesné určení výparu z vodní plochy. Vliv výparu z vodní hladiny na celkovou hydrologickou bilanci povodí může být značný, a to především v letech s nízkými srážkovými úhrny [50].

Výpar z vodní hladiny je z fyzikálního hlediska fázovým přechodem vody ze skupenství kapalného do plynného. V rámci fázového přechodu je spotřebovávána energie vyjádřená latentním teplem. Množství energie spotřebovávané na výpar při běžných teplotách činí cca 2450 kJ/kg. Mikroklima je ovlivňováno prostřednictvím výparu z vodní hladiny zejména tak, že je vzduch nad hladinou rybníků ochlazován díky spotřebě energie potřebné ke změně skupenství vody z kapalného na plynné. Tento vliv lze obecně chápat jako pozitivní, má však i svou druhou stránku. Tou je odčerpávání vody z hydrografické sítě právě prostřednictvím výparu. Zjednodušeně řečeno voda vypařená z hladiny rybníků chybí ve vodních tocích pod nimi [51].

V širším hledisku ovšem je nutno brát v úvahu další procesy, které se v povodí či území zátohy odehrávají či by se odehrávaly v případě neexistence vodní plochy. Konkrétně se jedná především o evapotranspiraci. Pokud by se totiž v daném místě nenacházela vodní plocha, bylo by území velmi pravděpodobně pokryto vegetací, která svým kořenovým systémem odebírá vodu z půdního profilu a prostřednictvím transpirace ji v podobě vodní páry transportuje do atmosféry [52].

5.1.4.1 Metody stanovení výparu

Hodnoty výparu z volné hladiny lze určit přímou a nepřímou metodou. Přímou metodu reprezentuje plovoucí výparoměr. Výparoměr plovoucí na hladině vodní plochy dokáže nejlépe simulovat meteorologické podmínky dané vodní nádrže. Jde o věrné zachycení teploty vody, která se v klasických zakopávaných výparoměrech ve srovnání s podmínkami vodních ploch na jaře rychleji ohřívá a na podzim zase rychleji chladne. Vodní plochy totiž mají díky svému velkému objemu určitou setrvačnost, díky níž je teplota stálejší než v samotné měrné nádobě. Stejně tak je monitoring výparu přímo na vodní hladině reprezentativnější s ohledem na další podmínky ovlivňující tento proces, jako je oslunění, a především rychlost větru. Plovoucí výparoměr je založen na měření změny hydrostatického tlaku v závislosti na výšce hladiny. Samotný přístroj se skládá z konstrukce plovoucího voru, na kterém je umístěno přímé měření výparu, z výparoměrné

nádoby a příslušenství (snímač hydrostatického tlaku v nádobě, čerpadla, snímač teploty apod.) a dataloggeru uloženého ve speciální skříni [3].

Nepřímé metody se liší především mírou empirie a zahrnutí základních fyzikálních principů ovlivňujících intenzitu tohoto procesu. Proces výparu z vodní hladiny je ovlivňován především následujícími principy:

- transport vodních par od hladiny vody (aerodynamický princip)
- transfer tepelné energie potřebné ke změně skupenství vody (energetický princip).

Měřitelné fyzikální veličiny ovlivňující výpar z vodní hladiny pak zahrnují především:

- vlhkost vzduchu
- teplota vzduchu
- teplota vody
- tlak vzduchu
- rychlost větru.

Nejjednodušší metody stanovení výparu jsou založeny na empirických vztazích výparu a geografických charakteristik. Složitější metody zahrnují fyzikální principy uplatňující se při procesu výparu [52].

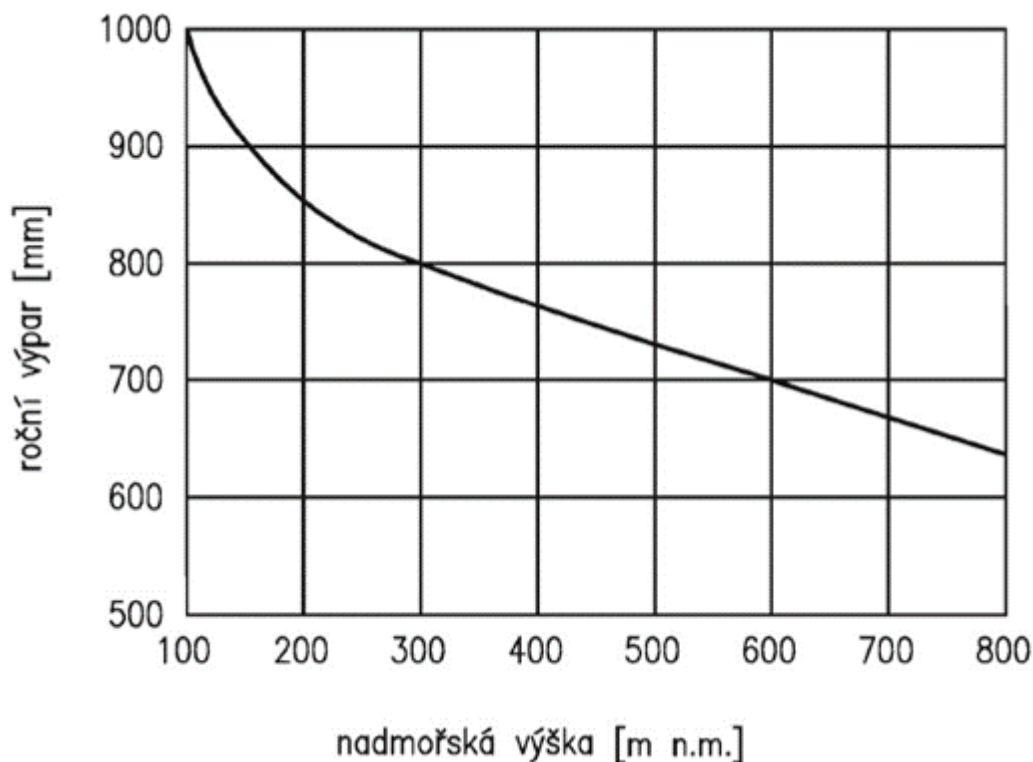
5.1.4.1.1 Orientační stanovení výparu dle ČSN 75 2410

V České inženýrské praxi je nejčastěji využíván empirický vztah mezi průměrnou výškou ročního výparu a nadmořskou výškou. Tento vztah je zakotven i v normě ČSN 75 2410 (Obr. 9).

Roční výšku výparu lze dle normy orientačně rozdělit na jednotlivé měsíce podle podílů uvedených v Tab. 2. Uvedený vztah lze použít pouze pro orientační stanovení výparu v případě stanovování orientační roční bilance za účelem posuzování dostatku vody pro provoz malých vodních nádrží, avšak pro potřeby detailnějšího posuzování je tento postup nedostatečný a je namístě použít podrobnější a přesnější postupy [52].

Tabulka 2: Orientační rozdělení ročního výparu na jednotlivé měsíce dle ČSN 75 2410

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Podíl ročního výparu (%)	2	2	4	8	11	14,5	18	17	11,5	7	4	3



Obrázek 9: Nomogram pro orientační stanovení průměrné roční výšky výparu uvedený v normě ČSN 75 2410.

5.1.4.1.2 Stanovení výparu na základě vodní bilance

Metoda vodní bilance vychází z porovnání přítoků a odtoků vody do a z nádrže. V případě přítoků se jedná zejména o přítok vody do nádrže vodními toky. Nelze vynechat ani přísun v podobě podzemní vody proudící do nádrže a srážek vypadlých přímo na vodní hladinu, ani přímý odtok z pozemků v okolí samotné nádrže. Na straně odtoků se jedná o odtok vody z nádrže spodními výpustěmi, eventuálně bezpečnostními přelivy a patními drény. Pokud je z nádrže realizován odběr vody, je nutno zahrnout i ten. Bilance pro požadované období pak je dána vztahem [52]:

$$EV = \frac{V_{in,SW} + V_{in,GW} + V_p + V_{in,DR} - V_{out,SW} + V_{out,GW} - V_{cons}}{A}$$

Kde je

EV	výška výparu za sledované období
$V_{in,SW}$	objem přítoku povrchové vody hydrografickou sítí
$V_{in,GW}$	objem přítoku podzemní vody do nádrže z okolního prostředí
V_p	objem srážek spadlých na vodní plochu
$V_{in,DR}$	objem přítoku přímého odtoku z okolních pozemků
$V_{out,SW}$	objem odtoku spodními výpustmi, bezpečnostními přelivy a patními drény
$V_{out,GW}$	objem odtoku vody z nádrže do okolního prostředí
V_{cons}	objem odběrů vody z nádrže
A	plocha vodní hladiny

Metoda stanovení výparu na základě vodní bilance je uvedena především pro úplnost, protože její uplatnitelnost je velmi omezená. Nejistota hodnot jednotlivých bilančních položek může být natolik vysoká, že výsledná hodnota se může řádově lišit od reality. Některé položky jsou navíc jen velmi obtížně stanovitelné (měřením nebo výpočtem). Jedná se především o přítok či odtok podzemní vody a přítok vody z okolních pozemků [52].

5.1.4.1.3 Metoda teplené (energetické) bilance

Metody vycházející z bilancování energie jsou založené na stanovení výparu prostřednictvím množství tepla potřebného pro změnu skupenství vody z kapalného na plynné. Teplu potřebné pro výpar je dáno vztahem:

$$\lambda = (2500,8 - 2,36 * T + 0,0016 * T^2 - 0,00006 * T^3)$$

Kde λ je energie potřebná ke změně skupenství jednotkového množství vody - latentní teplo výparu (J/g) a T je teplota při níž k výparu dochází (°C).

Zdrojem energie je sluneční záření. Bilance energie pak zahrnuje krom energie spotřebované na výpar odražené záření, energii spotřebovanou na ohřátí vody apod. Při znalosti množství tepelné energie spotřebované na výpar z vodní hladiny nádrže by pak výška výparu (v mm) odpovídala:

$$EV = \frac{E}{\lambda * A}$$

Kde E množství energie spotřebované na vypaření vody (kJ) a A je plocha vodní hladiny.

Pro tento způsob stanovení je potřeba znalost všech energetických toků, které je v praxi víceméně nereálné. Metoda je podobná metodě předchozí s tím rozdílem, že se určuje bilance tepla. Tak je například třeba určit množství slunečního záření dopadajícího na vodní hladinu, množství odraženého záření od hladiny, množství tepla vyzářeného z vody do atmosféry atd. [52].

5.1.4.1.4 Rovnice pro výpočet výparu dle Penmanna

Jednou z rovnic zahrnujících jak aerodynamický princip, tak princip energetický je rovnice Penmannova. První člen rovnice představuje energetický princip, druhý pak princip aerodynamický [52].

$$EV = 86,4 * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n - G}{\lambda * \rho} + \frac{\gamma}{\lambda + \Delta} * 0,26 * (0,5 + 0,54 * u_2) * (e_s - e_a)$$

Kde

EV	výpar z vodní hladiny (mm/den)
Δ	sklon křivky nasycení (kPa/°C)
γ	psychrometrická konstanta (kPa/°C)
R_n	čistá celková radiace (W/m ² /den)
λ	skupenské teplo výparu (MJ/kg)

- G tok tepla do vody ($\text{W}/\text{m}^2/\text{den}$)
 u_2 rychlost větru ve výšce 2 m nad hladinou (m/s)
 $e_s - e_a$ sytostní doplněk – rozdíl mezi tlakem nasycených vodních par a aktuálním tlakem vodních par (mbar)

5.1.4.1.5 Metoda podle Oudina

„Rovnice byla odvozena na základě studie, která porovnála více než 25 existujících vzorců pro výpočet potenciální evapotranspirace na více než 300 povodích. Řady potenciální evapotranspirace pak byly použity s uspokojivým výsledkem jako vstupní data do čtyř odlišných hydrologických modelů“ [53].

$$PE = \frac{0,408 * R_e * (t + 5)}{100} \text{ pro } (t + 5) > 0$$

$$PE = 0 \text{ pro } (t + 5) \leq 0$$

Kde PE potenciální evapotranspirace (mm/den)

$$R_e = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{SC} * d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

R_e extraterestrická radiace ($\text{MJ} * \text{m}^{-2} * \text{d}^{-1}$)

G_{SC} sluneční konstanta = $0,0820 \text{ MJ} * \text{m}^{-2} * \text{min}^{-1}$

d_r inverzní relativní vzdálenost Země–Slunce

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right)$$

φ zeměpisná šířka (rad)

δ deklinace Slunce (úhlová vzdálenost Slunce od rovníku) (rad)

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

ω_s hodinový úhel západu Slunce (rad)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

J číslo dnu v roce od 1 (1. leden) po 365 nebo 366 (31. prosinec)

5.1.4.1.6 Regresní vztahy

Vzhledem ke komplikovanému přímému měření je výpar z volné hladiny často zjišťován ze vzorců, které jako vstupní data vyžadují dostupné měřené meteorologické veličiny. V článku BERAN, A. a VIZINA, A. *Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2013, 55, č. 4.* byly odvozeny empirické vztahy pro výpočet výparu z vodní plochy na základě dat ze stanice Hlasivo za období 1957–2012. Vzhledem ke změně průměrné roční teploty a výskytu roků s extrémními srážkovými úhrny byly tyto vztahy aktualizovány [54].

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

Vysvětlivky:

E = výpar [mm/den], R = průměrná denní radiace [W/m²], Tv = teplota vody [°C], Tvzd = teplota vzduchu [°C], H = relativní vlhkost vzduchu [%/100], V = vítr [m/s]

Explanatory notes:

E = evaporation [mm/den], R = average daily radiation [W/m²], Tv = water temperature [°C], Tvzd = air temperature [°C], H = relative air humidity [%/100], V = air velocity [m/s]

Obrázek 10: Výběr vzorců a jejich hodnocení na základě MRE a KGE [50]

Hodnocení vzorců bylo provedeno na základě nejnižší hodnoty průměrné relativní chyby (MRE) a nejvyšší hodnoty Kling-Gupta účinnosti (KGE). Vzorce byly testovány na historické datové sadě ze zrušené výparoměrné stanice Tišice. Výsledky ukazují, že pro výpočet výparu pro jinou lokalitu je vhodnější využít vzorce, které se zakládají na jednoduché párové regresi s jednou meteorologickou veličinou (teplotou vody, nebo teplotou vzduchu), na rozdíl od vzorců využívající vícenásobné regrese. Při použití vzorců je vždy nutné ověřit rozsah jejich platnosti [50].

Všechny vytvořené vzorce byly validovány na datové řadě Hlasivo 1999–2005. K dispozici byly všechny veličiny, které vstupují do odvozených vzorců.

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

Vysvětlivky:

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

Explanatory notes:

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

Obrázek 11: Maximální a minimální hodnoty veličin naměřené ve stanici Hlasivo (měsíční průměry)

Všechny regresní vztahy pro výpočet výparu byly odvozeny na základě dat měřených pouze od května do října. Obor platnosti těchto vztahů je definován rozsahem hodnot uvedených na Obr. 11 [50].

5.1.5 Podzemní voda

Veškerá voda nacházející se pod zemským povrchem bývá označována termínem podpovrchová voda. Voda obsažena v nasycené zóně půdních a geologických celků se označuje jako voda podzemní. Podzemní voda je významnou součástí hydrologického cyklu. Srážková voda částečně odtéká po povrchu, částečně se vsakuje do půdy a stává se součástí podpovrchového proudění [49]. Infiltrace, jinými slovy vsakování, velmi ovlivňuje vodní režim půdy, intenzitu povrchového odtoku a zásoby podpovrchové vody. Půda má jen omezenou infiltrační kapacitu, což je množství vody infiltrované za určitý čas. To závisí nejenom na typu půdy, ale i na její počáteční vlhkosti. Čím nižší je počáteční vlhkost, tím vyšší je infiltrační kapacita. Časem dosáhne infiltrační schopnost konstantní hodnoty. Pokud je intenzita srážek nižší než infiltrační kapacita půdy, nedochází k formování povrchového odtoku [39].

Díky vzduť hladiny vody v rybnících totiž dochází i ke zvýšení hladiny podzemní vody jejich okolí. Množství vody zadržované v krajině díky rybníkům je tak ještě vyšší. Množství vody, která je takto v krajině zadržena, velmi závisí na vlastnostech geologického prostředí. Krom toho, že tvoří zásobu, může být v řadě případů využita vegetací v okolí vodní plochy [51].

Proudění podzemní vody v okolí nádrže je ovlivňováno hladinou vody akumulované v nádrži. Proudění může mít směr jak do nádrže, tak z ní. V případě, že voda proudí do nádrže, je tato podzemní vodou dotována, v případě opačném dotuje nádrž podzemní vodu v jejím okolí. Vzduť vody v nádrži dokonce může dojít ke změně směru proudění v porovnání se stavem při prázdné nádrži. Prakticky tak mohou nastat následující situace:

- podzemní voda dotuje jak vodní tok při prázdné nádrži, tak nádrž při vzduť hladině
- při prázdné nádrži dochází k dotaci vodního toku z podzemní vody, při vzduť je podzemní voda dotována vodou v nádrži
- podzemní voda je dotována jak v případě prázdné nádrže, tak v případě jejího naplnění vodou.

Komunikace mezi podzemní vodou a vodou v nádrži probíhá zpravidla prostřednictvím filtračního proudění, ostatní způsoby, jako například influkce (pronikání vody do geologického prostředí puklinami), jsou spíše okrajové a mohou se vyskytovat v lokalitách, kde by nádrž byla v kontaktu s otevřenými puklinami, trhlinami či krasovými dutinami. Míra a rychlost proudění je závislá na celé řadě faktorů. V první řadě se jedná o složení a propustnost geologického prostředí. Pokud jsou svrchní vrstvy málo propustné, je rychlost změn hladiny podzemní vody nižší. Propustnost nemusí být homogenní ani izotropní. Jednotlivé vrstvy podloží mohou mít velmi odlišené hodnoty propustnosti. Druhým významným faktorem s významným dopadem na způsob ovlivnění podzemní vody vzduťím v nádržích, je morfologie terénu. Dosah ovlivnění je s ohledem na tento faktor zpravidla větší v územích plochých s malými sklony v okolí nádrže. Vliv může mít také kolmatace dna a svahů nádrží. Kolmatace je utěsnění dna a břehů nádrže jemnozrnnými materiály (jílými částicemi). Tento efekt je zpravidla výraznější u nádrží s vysokým stupněm zanášení, což je jev vyskytující se zejména v oblastech, ve kterých se vyskytuje významný transport sedimentů. Existují i nádrže, kdy jsou dno i břehy utěsněny záměrně za účelem udržení vody v nádrži. Důležitá i celková úroveň hladiny podzemní vody v území a její hloubka pod terénem. Roli hrají i další faktory např. dynamika hladiny podzemní vody, srážkový režim apod. [52].

5.1.5.1 Průsak vody hrázemi

Průsak tělesem hráze je obecně z hlediska provozu malých vodních nádrží uvažován jako ztráta. Je však nutno zdůraznit, že v méně vodných obdobích se může jednat o významnou část průtoku pod nádrží, jelikož možnost regulace odtoku je u takovýchto nádrží velmi omezená. V podstatě lze říci, že díky průsaku může být za vhodných podmínek v méně vodných obdobích zajišťován minimální zůstatkový průtok, čehož lze běžnou manipulací dosáhnout jen velmi obtížně. Průsak hrázemi malých vodních nádrží je primárně závislý na materiálu tělesa hráze. S ohledem na primární účel nádrže je snaha průsak co nejvíce omezit a používat pro konstrukci hráze materiály s co nejnižší propustností. Přesto je průsak přirozeným procesem, který může v podrobném posuzování bilance hrát důležitou roli.

Existují metody výpočtu průsaku zahrnující jak metody relativně jednoduché, tak metody podrobnější a komplexnější. K těm druhým patří metody založené na fyzikálním popisu proudění vody pórovitým prostředím prostřednictvím diferenciálních rovnic řešených metodou konečných prvků. Pro popis proudění vody v nasycené části hráze platí stejný princip jako pro proudění podzemní vody. Problémem aplikace těchto metod ovšem je potřeba detailní informace o materiálu hráze, která zpravidla není k dispozici. V případě odhadu vlastností tělesa hráze mohou být dosažené výsledky dokonce horší než v případě aplikace zjednodušených metod. Z toho důvodu je ve většině případů vhodnější využít zjednodušených metod. Mezi ty patří metoda dle Kudina uvedená v řadě technických publikací zaměřených na malé vodní nádrže [52].

5.2 Hydrologická bilance malé vodní nádrže

Při bilancování MVN je nutno brát v úvahu mnoho proměnných a bilanci je nutné stanovovat pro každou lokalitu zvlášť, neboť i podmínky jsou v každé lokalitě odlišné. Faktory, které je nutné vzít v úvahu při bilancování MVN, jsou následující: poměr přítoku a odtoku z nádrže, plocha a objem zadržované vody, výpar z vodní hladiny, srážky na volnou hladinu a průsak hrází nebo do podloží. Upraveným vzorcem hydrologické bilance lze vyčíslit hydrologickou bilanci vodní nádrže. Tento vztah je popsán následujícím vzorcem:

$$R = (U + S + P) - (O + I + H + A)$$

Objem vody v nádrži R lze získat sečtením zdrojových členů a odečtením ztrátových členů. První závorka představuje zdrojové členy. U je povrchový přítok, S srážky na vodní hladinu, P je dotace podpovrchovou vodou. Druhá závorka reprezentuje ztrátové členy. O je odtok z nádrže, I infiltrace do podloží, H výpar z volné hladiny a A je případný antropogenní odběr vody. Sestavení bilanční rovnice průběžně v čase umožňuje hodnotit nejen správnost fungování nádrže, ale i vliv nádrže na hydrologický režim [55].

Analytická část

Analytická část práce je rozdělena na tři dílčí úkoly. Prvním je provedení hydrologické bilance MVN Vavřinec na základě měřených dat. Vypočtený objem vody v nádrži bude porovnán s objemem odpovídajícím měřené hladině. Další části budou věnovány zabezpečení MZP na odtoku a možnosti využití dat z dálkového průzkumu Země k návrhu, posouzení nebo plnění dílčích funkcí malé vodní nádrže.

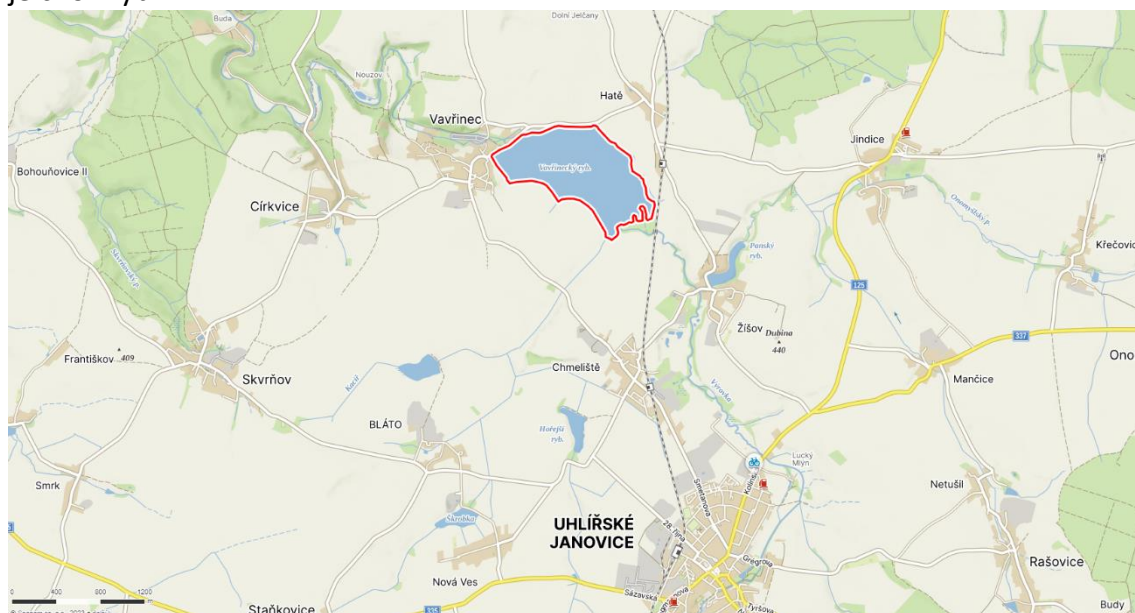
6 Analýzy MVN Vavřinec

6.1 Hydrologická bilance MVN

Hydrologická bilance MVN Vavřinec bude provedena pro období mezi roky 2020-2022 včetně. Z tohoto období jsou k dispozici hydrometeorologická data, která budou podrobně představena v následujících částech práce.

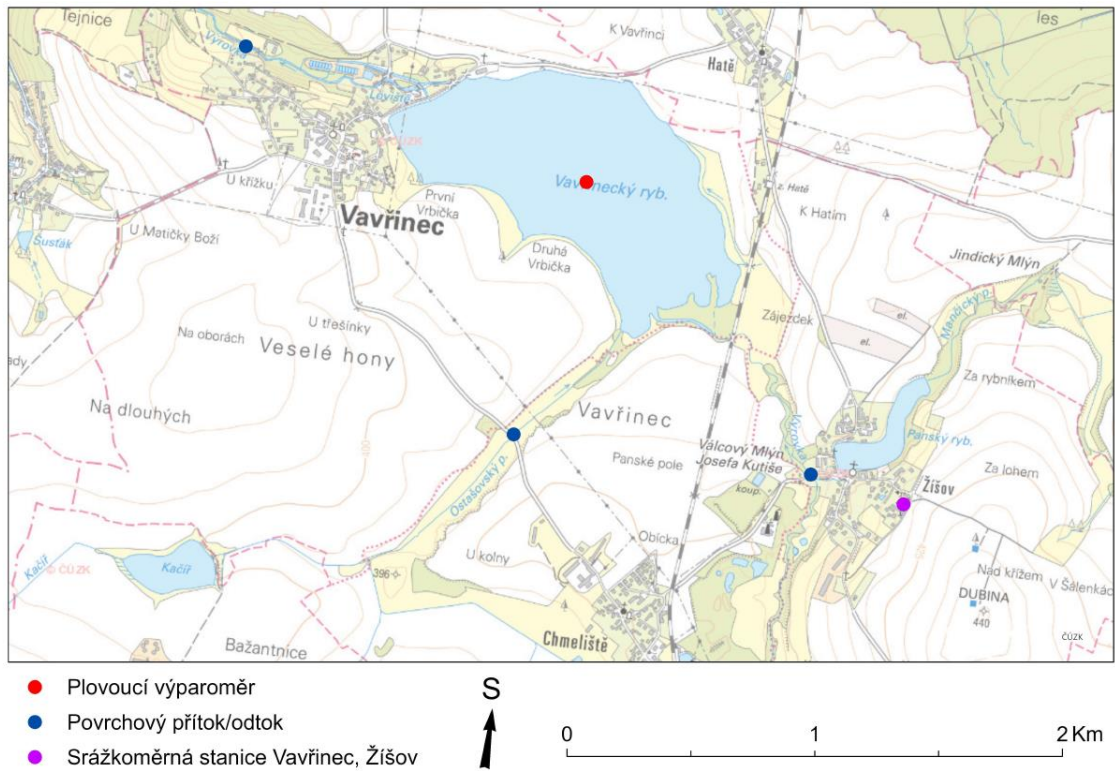
6.1.1 Charakteristiky lokality

Vavřinecký rybník se nachází ve Středočeské kraji v okrese Kutná Hora, asi tři kilometry od města Uhlířské Janovice. S rozlohou hladiny přes 73 hektarů a objemem přes 1 mil. m³ se jedná o největší rybník na Kutnohorsku a v kontextu celé České republiky patří k těm velkým. Dotován je Výrovkou, na které se rozprostírá (ř. km 49,4), a také Ostašovským potokem. Plocha rybníka má obloukovitý tvar. Hlavní funkcí rybníka je chov ryb.



Obrázek 12: Vavřinecký rybník [56]

Lokalita Vavřineckého rybníka se rozkládá v hydrogeologickém rajonu 6531 Kutnohorské krystalinikum. Prostředí je charakteristické výskytem puklinově propustných hornin. K infiltraci srážek dochází prakticky v celé ploše území. Výjimkou jsou málo propustné horniny, sprašové plochy, kde je infiltrace velmi omezena [3,57]. Přírodní zdroje podzemních vod jsou spíše podprůměrné, hodnoty specifického



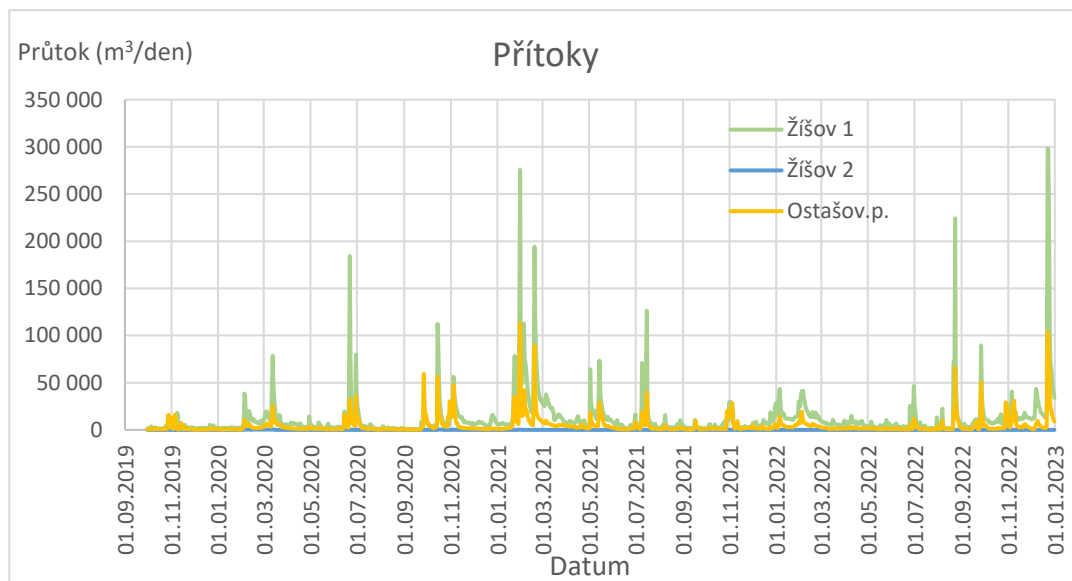
Obrázek 14: Umístění monitorovacích zařízení

6.1.2.1 Přítoky

Vodoměrné stanice na přítocích zaznamenávají vodní stav. K měření jsou vybrány stabilní profily (mosty), pro které je zkonstruována měrná křivka. Objem přítoku do nádrže je stanoven integrací hodinových časových řad průtoků v monitorovacích profilech Ostašovský potok, Žišov 1 a Žišov 2. Řada pro profil Ostašovský potok a Žišov 1 začíná 30.9.2019 a končí 31.12.2022. Řada profilu Žišov 2 je od 30.9.2019 do 2.3.2022.

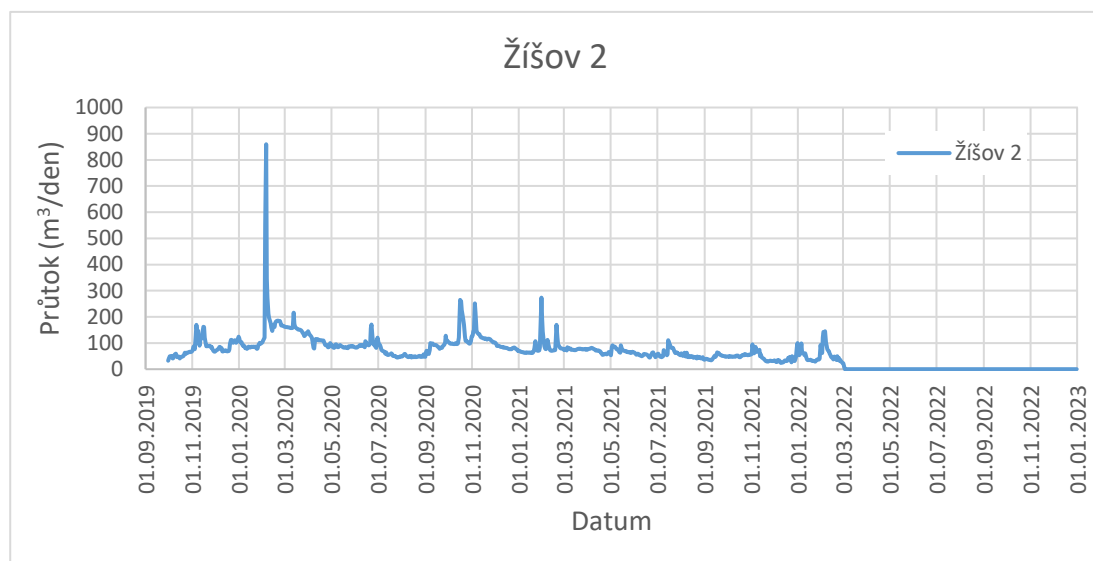


Obrázek 15: Monitoring přítoku ŽIŠOV 1



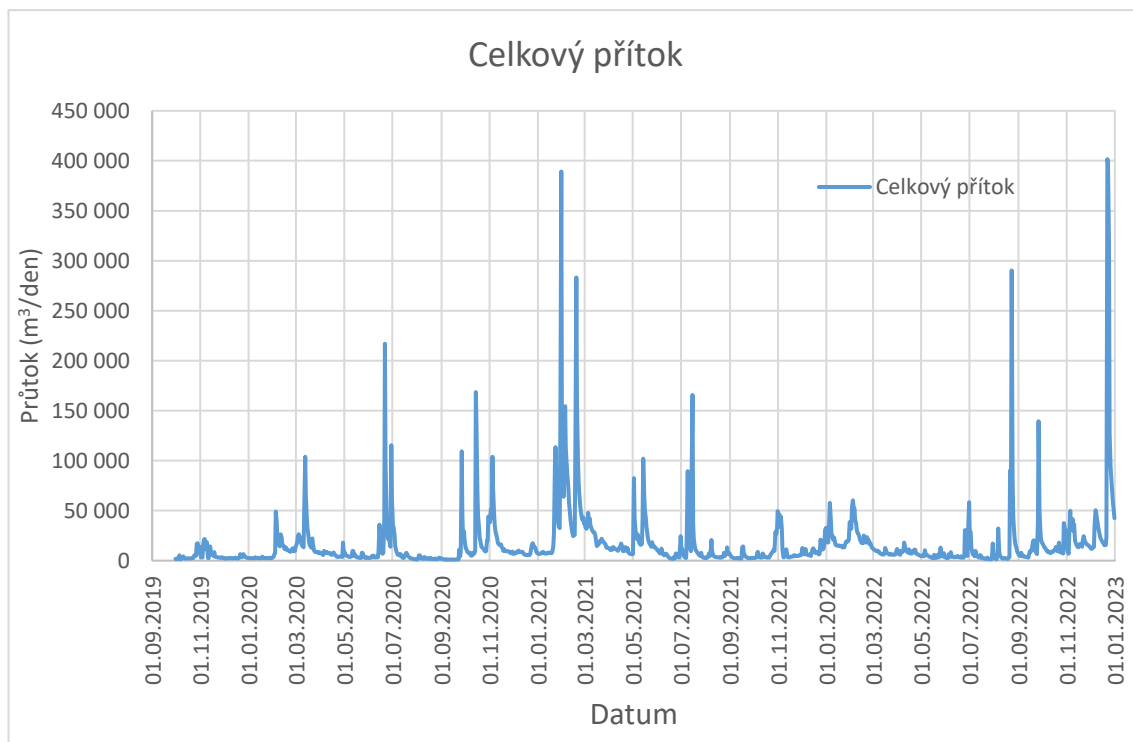
Obrázek 17: Průběh jednotlivých přítoků

Z grafu jednotlivých přítoků je patrné, že Přítok Žišov 2 je oproti Žišov 1 a Ostašovskému potoku několikanásobně nižší, až zanedbatelný. Průměrná hodnota denního průtoku za sledované období pro Žišov 1 je 11898 m³/den, pro Ostašovský potok 4462 m³/den, pro Žišov 2 81,7 m³/den. Celkový průměrný denní přítok je 16421 m³/den.



Obrázek 16: Přítok Žišov 2

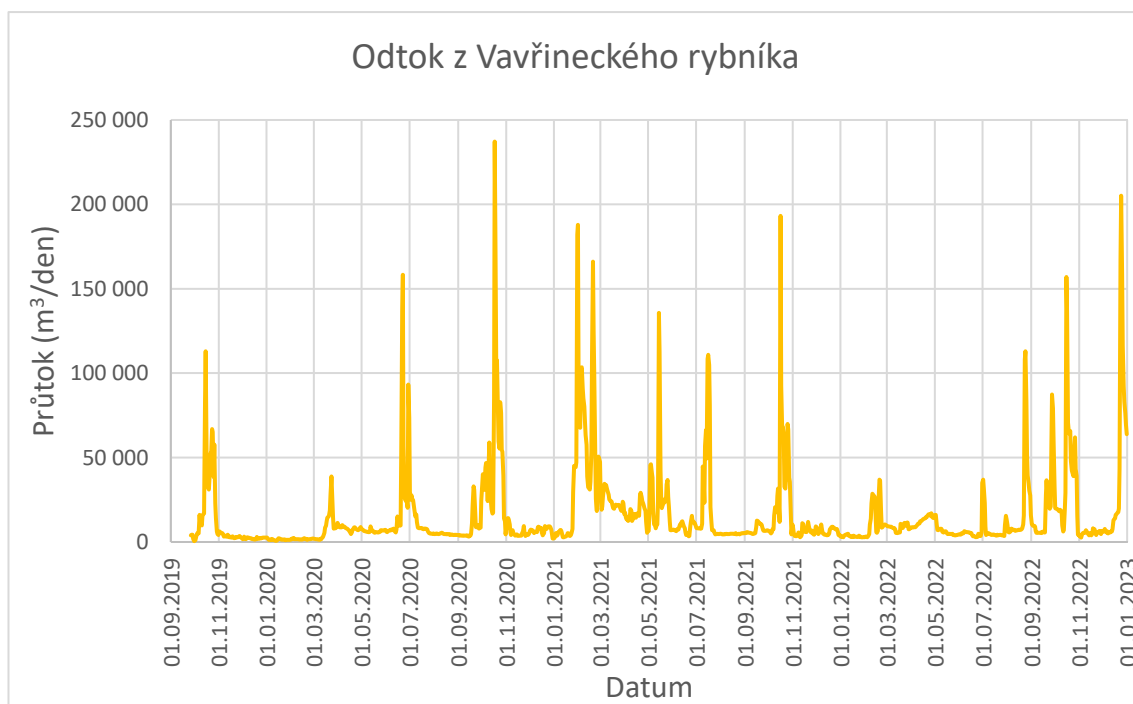
Nejvyšší denní hodnoty celkového přítoku byly 30.1.2021 a 23.12.2022. Hodnoty se blíží 400 000 m³/den. Obě tyto události mají stejnou příčinu. 23.12.2022 napadlo 7,4 mm srážek a teploty se dlouhou dobu pohybovali nad 0 °C. 30.1.2021 tomu bylo podobně, od 28.1. do 30.1. včetně napadlo celkově 20,5 mm srážek. Oproti tomu přítok 18.2.2021, který byl přibližně 283 000 m³/den, byl pravděpodobně způsoben táním sněhové pokrývky. 17.2. napadly pouze 2 mm srážek, ale od 16.2. se po více než 10 dnech dostali teploty nad 0 °C.



Obrázek 18: Průběh celkového přítoku do rybníku Vavřinec

6.1.2.2 Odtok

Vodoměrná stanice na odtoku, stejně jako na přítocích zaznamenává vodní stav a pomocí měrné křivky zkonstruované pro daný profil je z vodního stavu určen průtok. K monitoringu je vybrán stabilní profil ve skále. Objem odtoku je stanoven integrací časových řad průtoků v monitorovacím profilu pod hrází rybníka Vavřinec (Výrovka).



Obrázek 19: Odtok z Vavřineckého rybníka

K dispozici je časová řada průtoků v hodinovém kroku, který je následně integrován na denní časový krok. Řada pro profil odtok (Výrovka) začíná 26.9.2019 a končí 31.12.2022.

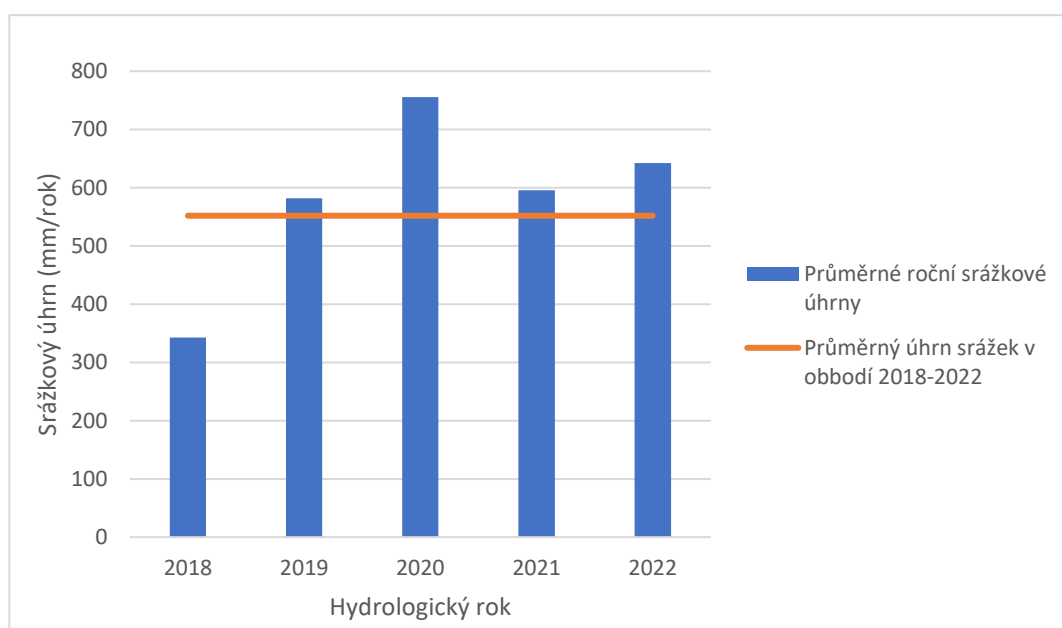
Průměrný denní odtok je $15\,927\text{ m}^3/\text{den}$. To je o $494\text{ m}^3/\text{den}$ méně, než je průměrný denní přítok. Rozdíl může být způsobem ztrátami výparem a průsaky do podloží.



Obrázek 20: Monitoring odtoku

6.1.2.3 Srážky

Dlouhodobá roční výška srážek na povodí patří mezi základní klimatologicko-hydrologické charakteristiky určující dlouhodobou hydrologickou bilanci povodí. Objem srážek byl stanoven na základě úhrnů zaznamenaných ve stanici P3STAN01 Vavřinec, Žišov. Průměrný roční úhrn srážek mezi hydrologickými roky 2018-2022 byl 583 mm. Nejvyšší srážkový úhrn byl v roce 2020 a to 755 mm. Naopak srážkově nejchudší byl rok 2018, ve kterém spadlo pouze 343 mm srážek. Průměrný roční úhrn za sledované období je silně ovlivněn rokem 2018. Medián je 595 mm. Průměrná dlouhodobá výška srážek je 745 mm za rok. Sledované období je z dlouhodobého hlediska srážkově podprůměrné. V rámci bližšího seznámení s daty byly určeny také měsíční úhrny srážek a následně z nich byly vyvozeny maximální, minimální a průměrné úhrny srážek v jednotlivých měsících za sledované období 2018-2022.

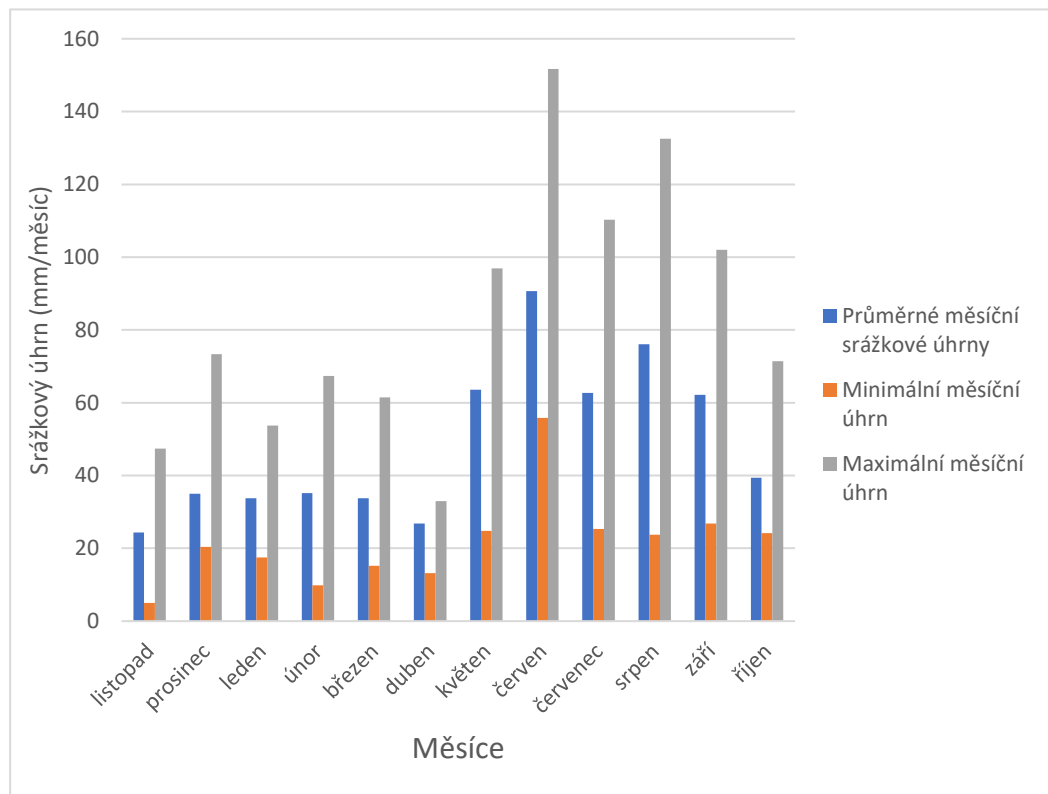


Obrázek 21: Průměrné roční srážkové úhrny

Tabulka 3: Srážkové úhrny v jednotlivých měsících

	2018	2019	2020	2021	2022	Průměr	MIN	MAX
listopad	19.2	5.0	47.4	19.3	31.0	24.4	5.0	47.4
prosinec	21.6	73.3	26.0	20.4	33.6	35.0	20.4	73.3
leden	18.6	46.6	17.5	53.7	32.5	33.8	17.5	53.7
únor	9.8	33.5	67.4	43.3	21.9	35.2	9.8	67.4
březen	22.9	43.7	61.5	25.6	15.2	33.8	15.2	61.5
duben	13.2	33.0	28.8	28.5	30.6	26.8	13.2	33.0
květen	24.8	96.9	60.7	88.9	46.5	63.6	24.8	96.9
červen	80.0	55.8	151.7	60.8	105.0	90.7	55.8	151.7
červenec	25.3	43.4	50.4	110.3	84.1	62.7	25.3	110.3
srpen	23.7	71.3	70.5	82.3	132.5	76.1	23.7	132.5
září	59.2	39.2	102.0	26.8	83.5	62.1	26.8	102.0
říjen	24.2	40.1	71.4	35.6	25.7	39.4	24.2	71.4

Za období 2018-2022 byl průměrně srážkově nejslabší měsíc listopad, v tomto měsíci dosahovaly průměrné úhrny 24,4 mm. Naopak srážkově nejvydatnější je v průměru měsíc červen. V tomto měsíci je průměrný srážkový úhrn 90,7 mm. Z grafu je patrné, že letní měsíce jsou výrazně srážkově silnější a dá se hovořit o sezonním trendu rozložení srážek během roku.

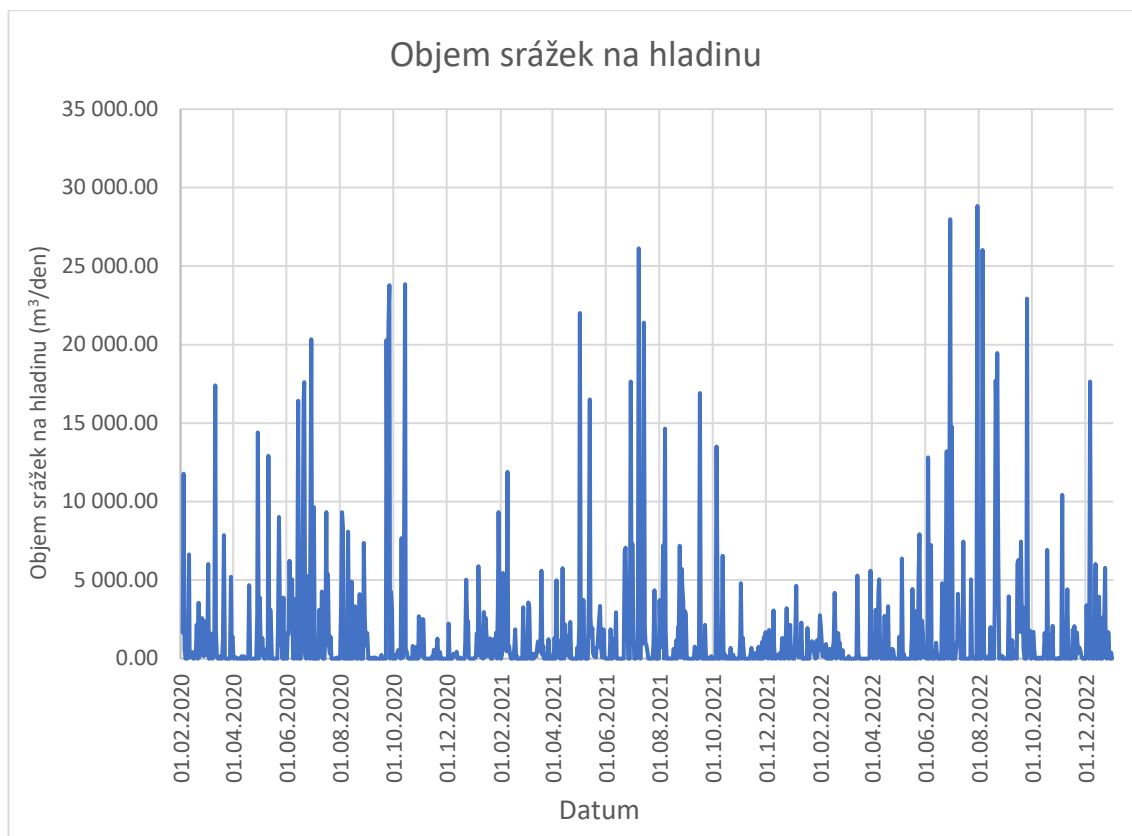


Obrázek 22: Měsíční srážkové úhrny

Ve sledovaném období 2018-2022 nastal nejvyšší měsíční srážkový úhrn v červnu hydrologického roku 2020, jeho hodnota byla 151,7 mm. Naopak nejnižší srážkový úhrn můžeme vidět v hydrologickém roku 2018, kdy v listopadu spadlo pouze 5 mm srážek. Největší rozpětí srážek bylo srpnu, kdy se maximální a minimální hodnoty úhrnu srážek lišily o 108,8 mm.

Z hlediska hydrologické bilance samotné MVN Vavřinec je nutné znát objemové příspěvky srážek na hladinu znázorněné na Obr.23. Denní objemy srážek na hladinu byly spočítány pomocí denních srážkových úhrnů a plochy hladiny, která byla odvozena na základě měření úrovně hladiny. Podrobný popis způsobu stanovení plochy hladiny je stanoven v kapitole 6.1.2.5 Charakteristické čáry.

Nejvyšší denní příspěvky do objemu nádrže způsobené srážkami dopadajícími na hladinu se blíží 30 000 m³. V porovnání s maximálními objemy přítoku tato hodnota představuje necelých 10 %. Zároveň je to přibližně dvojnásobek průměrného denního přítoku. Maximální příspěvky srážek do objemu nádrže jsou přibližně 2 % z jejího celkového objemu, který odpovídá běžným provozním úrovním hladiny.



Obrázek 23: Denní objem srážek na hladinu MVN Vavřinec

6.1.2.4 Výpar z hladiny

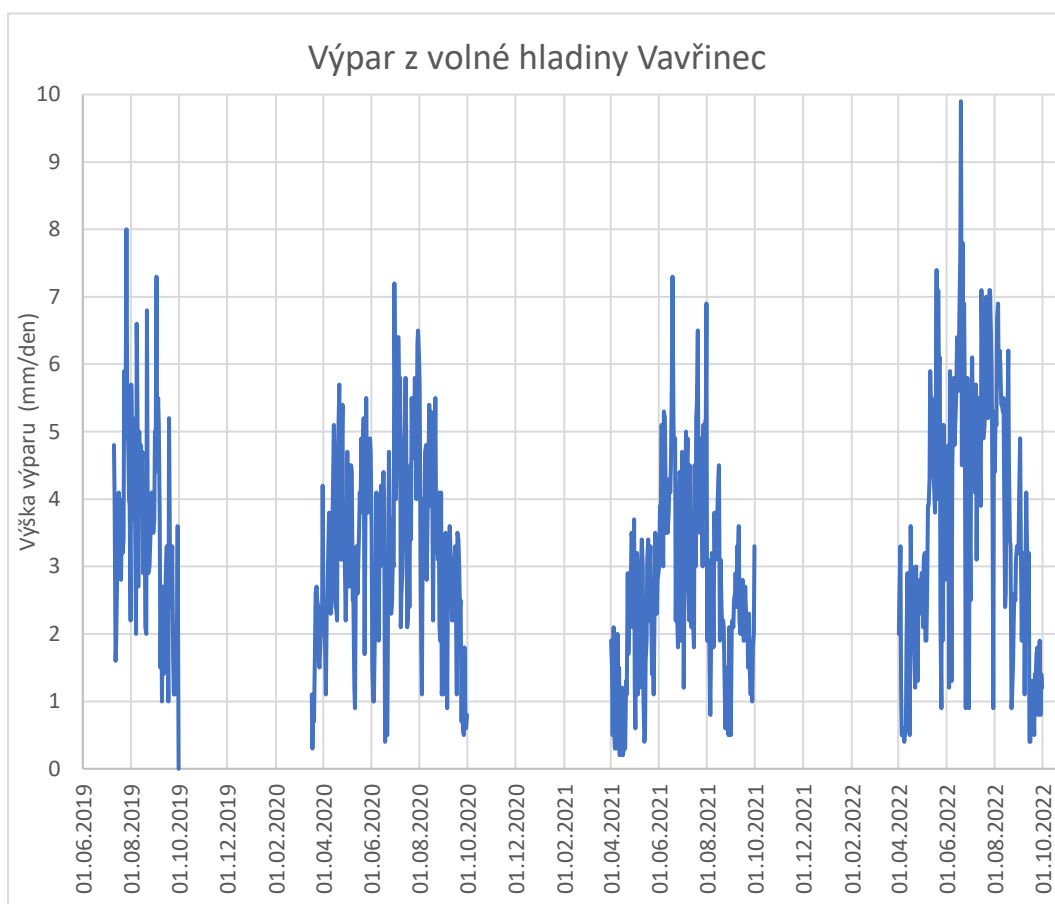
Data pořízená pomocí plovoucího výparoměru byla poskytnuta s denním časovým krokem. Výsledkem je časová řada denních úhrnů výparu vyjádřených v mm. Pro stanovení celkového objemu výparu je nutným údajem informace o ploše hladiny. Ta je sice při běžném provozu víceméně konstantní a odpovídá cca 77 ha, avšak i tak dochází k jejímu kolísání a s ohledem na zpřesnění výpočtu objemu výparu je vhodné toto kolísání do výpočtu zahrnout. Rybník je každoročně před říjnovým výlovem vypouštěn, v tomto období by objemy výparu byly značně nepřesné, pokud by změna plochy hladiny nebyla zahrnuta.

Plovoucí výparoměr používaný na rybníce Vavřinec (obr. 24) je tvořen nosnou konstrukcí zahrnující plováky a vlnolamy, jejíž součástí je měrná nádoba o průměru 620 mm. Zařízení je napájeno pomocí akumulátoru dobíjeného 2 ks solárními panely. Nádoba je vybavena obousměrným čerpadlem, které napouští/vypouští vodu do/z výparoměrné nádoby v případě změny hladiny od referenční hodnoty o 5 cm. Průměrné denní hodnoty meteorologických veličin jsou počítány jako průměr z 10minutových měření v daném dni. Hodnoty výparu jsou odvozovány z 1minutových záznamů.

Výparoměr je instalován vždy na letní sezonu na přelomu března a dubna a odstraňován byl na přelomu září a října, kdy bylo zahajováno vypouštění za účelem výlovu. K dispozici jsou časové řady výparu z volné hladiny 10.7.2019-29.9.2019, 17.3.2020-30.9.2020, 1.4.2021-30.9.2021, 1.4.2022-30.9.2022.



Obrázek 24: Plovoucí výparoměr při přepravě (Foto Ing. Petr Sklenář Ph.D.)



Obrázek 25: Průběh výparu z volné hladiny

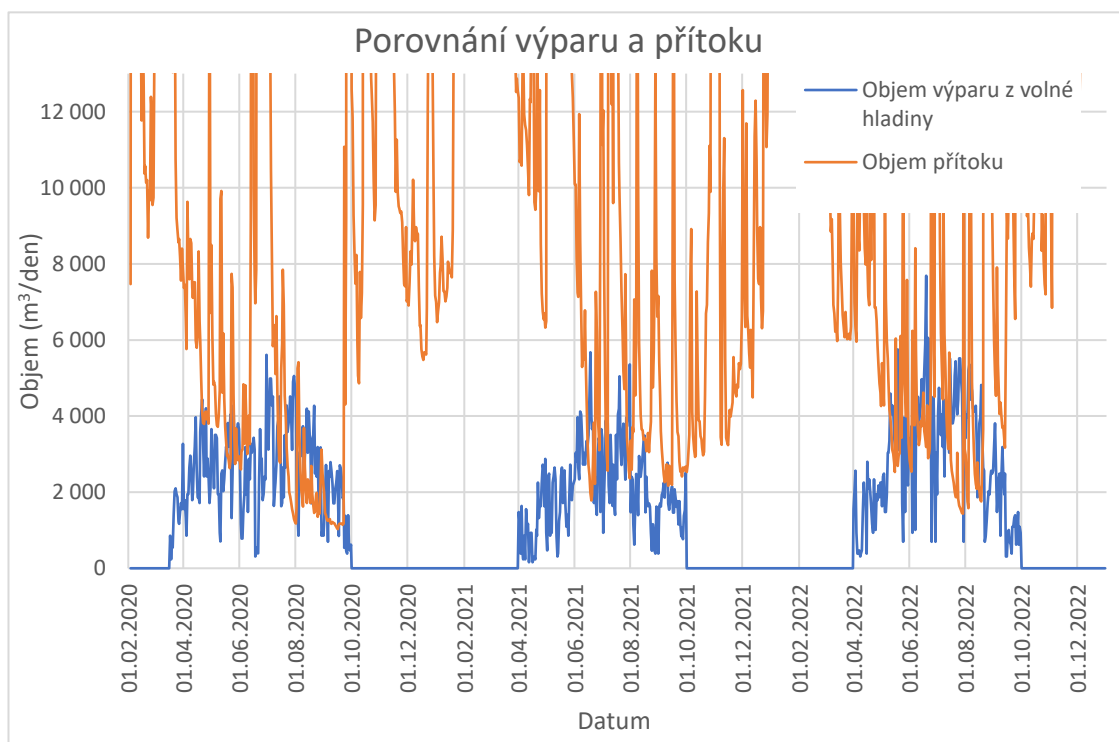
Zjištěné hodnoty výšky výparu dosahují maxima 9,9 mm za den. Tato hodnota je vysoká a představuje značné množství vody, které z nádrže ubude ve formě vodní páry.

Maximální hodnoty výparu se vyskytují dle očekávání v letních měsících, kdy svých maxim dosahují i teploty. Jak velký je objem výparu názorně ukazuje porovnání výparné a srážkové výšky ve sledovaném období.

Tabulka 4: Porovnání výparných a srážkových výšek ve sledovaném období

	2019		2020		2021		2022	
	Výpar	Srážky	Výpar	Srážky	Výpar	Srážky	Výpar	Srážky
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
duben	x	x	97.8	28.8	44.6	28.5	57.8	30.6
květen	x	x	114.3	60.7	67.8	88.9	124.3	46.5
červen	x	x	85.9	151.7	120.8	60.8	148.7	105.0
červenec	x	x	141.8	50.4	124.4	110.3	160.1	84.1
srpen	124.2	73.1	109.2	70.5	69.7	82.3	128.2	132.5
září	83.7	39.2	66.5	102.0	67.9	26.8	59.3	83.5
suma	207.9	112.3	615.5	464.1	495.2	397.6	678.4	482.2

Z tabulky je patrné, že výška výparu v některých měsících může významně převyšovat srážkovou výšku. V takovém případě se veškerá voda, která dopadla v daném měsíci na hladinu vypaří a z hlediska hydrologické bilance představuje nádrž negativní faktor. Tento výpar ale může představovat pozitivní jevy z hlediska mikroklimatické funkce nádrže. Z následujícího grafu je patrné, že v některých letních dnech, může výpar z hladiny převyšovat i objem přítoku. Maximální objem výparu je necelých 8 000 m³/den, což je zhruba 1/3-1/4 maximálních srážek na hladinu.



Obrázek 26: Porovnání objemu výparu a přítoku

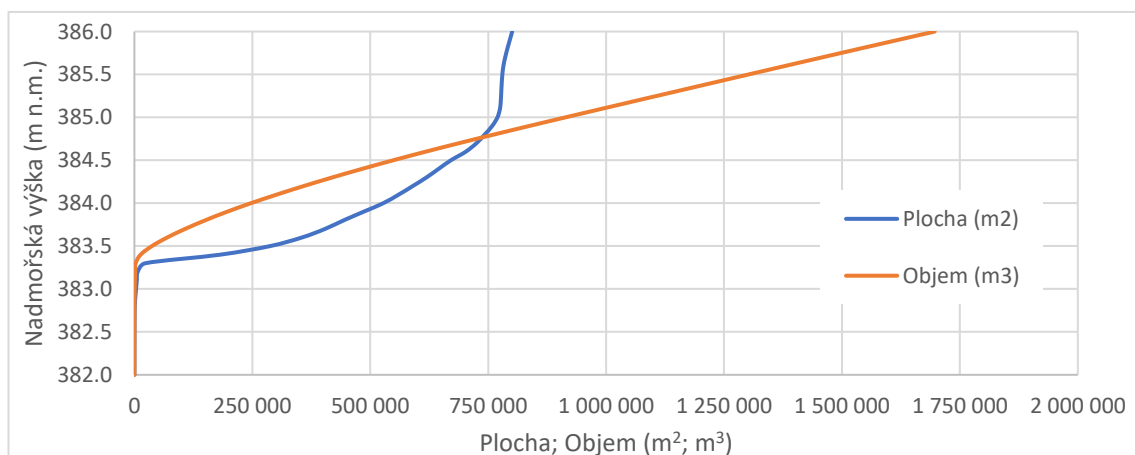
6.1.2.5 Charakteristické čáry MVN Vavřinec

Znalost charakteristických čar MVN je nutným požadavkem pro bilancování MVN. Pro účely této práce byla poskytnuta data v tabelární podobě od Ing. Tomáše Laburdy Ph.D. Data byla zpracována z leteckého měření ze dne 28.10.2019.

Tabulka 5: Tabelární podoba charakteristických čar MVN Vavřinec

Nadmořská výška	Plocha (m ²)	Objem (m ³)	Nadmořská výška	Plocha (m ²)	Objem (m ³)
382.0	43.41	12.84	384.1	560 253.89	301 569.44
382.1	64.44	18.16	384.2	590 216.52	359 077.75
382.2	89.07	25.79	384.3	619 139.25	419 578.19
382.3	122.62	36.18	384.4	644 926.87	482 804.54
382.4	175.84	50.88	384.5	670 939.32	548 555.29
382.5	246.90	71.72	384.6	702 486.55	617 266.64
382.6	344.91	100.85	384.7	725 253.76	688 705.51
382.7	504.68	142.43	384.8	742 658.46	762 118.63
382.8	801.37	205.69	384.9	758 560.33	837 183.50
382.9	1 849.04	325.74	385.0	769 631.20	913 656.58
383.0	3 544.16	594.15	385.1	774 995.08	990 923.92
383.1	5 071.00	1 025.42	385.2	776 801.21	1 068 526.65
383.2	7 060.35	1 619.51	385.3	777 777.23	1 146 256.00
383.3	23 079.00	2 672.42	385.4	778 718.10	1 224 077.89
383.4	181 722.95	13 145.23	385.5	780 049.46	1 302 009.49
383.5	287 506.23	37 071.21	385.6	782 302.51	1 380 112.36
383.6	355 022.18	69 412.48	385.7	786 086.63	1 458 517.87
383.7	404 094.96	107 486.80	385.8	790 696.48	1 537 348.92
383.8	443 548.72	149 940.53	385.9	795 778.61	1 616 669.24
383.9	485 671.19	196 318.41	386.0	800 895.98	1 696 501.51
384.0	527 685.39	247 112.14			

Hodnoty uvedené v tabulce byly následně zpracovány do grafu, který představuje batygrafické čáry malé vodní nádrže Vavřinec.



Obrázek 27: Charakteristické čáry MVN Vavřinec

Pro zjištění ploch a objemů odpovídajících naměřeným hodnotám hladiny vody v nádrži bylo nutné dodat matematický popis průběh čar mezi jednotlivými body. Cílem bylo získat co nejpřesnější popis průběhu čar mezi známými body. Pomocí softwaru Excel k čáře zatopených ploch byla přidána spojnice trendu, avšak pro složitost samotné čáry nebyla k dispozici rovnice s dostatečně uspokojujícím výsledkem. Proto byla čára zatopených ploch rozdělena na dílčích části, pro které byly přidány spojnice trendu a získány rovnice pro matematický popis průběhu mezi jednotlivými body. Vzhledem k naměřeným hodnotám hladiny není potřeba znát průběh od krajních bodů čar. Čára zátopových ploch je rozdělena na 10 úseků. Matematickým popisem jednotlivých úseků jsou většinou polynomické rovnice, pokud se nepovedlo nalézt vhodnou polynomickou rovnici zahrnující více bodů, byla pro dva sousední body použita lineární rovnice.

Tabulka 6: Rozdělení zátopové čáry

Úsek	Počátek	Konec
1	382.8	383.2
2	383.2	383.3
3	383.3	383.4
4	383.4	383.8
5	383.8	384.2
6	384.2	384.6
7	384.6	385.0
8	385.0	385.1
9	385.1	385.3
10	385.3	385.6

Jednotlivé úseky jsou popsány následujícími rovnicemi. Typ spojnice trendu a k tomu odpovídající rovnice byly hledány s cílem co nejbližší hodnoty koeficientu determinace R^2 k hodnotě 1. Jednotlivé členy rovnic jsou uváděny s přesností na 10 desetinných míst, takto sestavené rovnice při kontrolních výpočtech a porovnání s tabulkovými hodnotami dosahovaly uspokojující přesnosti. Grafické zobrazení jednotlivých úseku je součástí příloh.

Tabulka 7: Rovnice popisující čáru zátopové plochy

Úsek	Rovnice	Koeficient determinace R^2
1	$y = 602717.304564953 * x^4 - 923378322.13346 * x^3 + 530489685554.253 * x^2 - 135453953024040 * x + 12969931400555700$	1.0000000000
2	$y = 160186.528535386 * x - 61376417.3830625$	1.0000000000
3	$y = 1586439.463792 * x - 608059167.467489$	1.0000000000
4	$y = -4583351.13302612 * x^4 + 7035081336.56919 * x^3 - 4049360363210.61 * x^2 + 1035908169576340 * x - 99377347504711700$	0.9999999999
5	$y = 6740509.7991333 * x^4 - 10353631185.393 * x^3 + 5963810908237.18 * x^2 - 1526766006408620 * x + 146572443014738000$	0.9999999999

6	$y = 809929.360290527 * x^4 - 1244621507.76021 * x^3 + 717230226313.338 * x^2 - 183694943874026 * x + 17642776941685900$	0.9999999989
7	$y = -2994941.98699951 * x^4 + 4609858999.3186 * x^3 - 2660836225477.37 * x^2 + 682599768228488 * x - 65666732024295800$	1.0000000003
8	$y = 53638.788623069 * x - 19881302.4289939$	1.0000000000
9	$y = -41505.8941594362 * x^2 + 31990051.653052 * x - 6163186365.82317$	0.9999999998
10	$y = 88530.128660202 * x^3 - 102339009.561268 * x^2 + 39433939750.3466 * x - 5064981993132.17$	0.9999999974

Tabulka 8: Kontrolní použití rovnic popisujících čáru zátopových ploch

Úroveň hladiny	Tabulková hodnota plochy (m ²)	Vypočtená hodnota plochy (m ²)
382.8	801.37	692.00
382.9	1 849.04	1 732.00
383.0	3 544.16	3 452.00
383.1	5 071.00	4 980.00
383.2	7 060.35	7 060.35
383.3	23 079.00	23 079.00
383.4	181 722.95	182 576.00
383.5	287 506.23	288 432.00
383.6	355 022.18	355 824.00
383.7	404 094.96	404 912.00
383.8	443 548.72	442 176.00
383.9	485 671.19	484 544.00
384.0	527 685.39	526 528.00
384.1	560 253.89	559 040.00
384.2	590 216.52	595 220.00
384.3	619 139.25	624 380.00
384.4	644 926.87	650 436.00
384.5	670 939.32	676 724.00
384.6	702 486.55	702 056.00
384.7	725 253.76	724 776.00
384.8	742 658.46	742 120.00
384.9	758 560.33	758 088.00
385.0	769 631.20	769 631.19
385.1	774 995.08	774 995.08
385.2	776 801.21	776 801.21
385.3	777 777.23	777 777.19
385.4	778 718.10	778 718.05
385.5	780 049.46	780 049.42
385.6	782 302.51	782 302.47

Nejvyšší nepřesnost vykazují rovnice pro úseky 1 (382.8-383.2) a 6 (384.2-384.6). Pro první úsek takováto chyba nepředstavuje problém pro samotnou bilanci. Úrovně této hladiny je v nádrži dosaženo pouze v jednotkách dnů při vypouštění z důvodu rybářského výlovu. Výlov se koná pravidelně 28.10. a v tomto ročním období už zpravidla hodnoty výparu nejsou příliš významné, a proto bilance nebude výrazně ovlivněna. Úsek 6 představuje maximální chybu přibližně 5 000 m², což je necelé 1 % plochy hladiny. Při předpokládaném maximální výparu 10 mm/den tato nepřesnost způsobí chybu v objemu 500 m³. Z hlediska celkového objemu nádrže, velikosti denních přítoků a odtoků a přesnosti jejich měření je tato chyba přijatelná a významně neovlivní výpočet bilance.

Podobně jako charakteristická čára plochy byla zpracována i charakteristická čára objemu. Čára objemu je také rozdělena na 10 úseků a pomocí přidání spojnice trendu byly hledány rovnice popisující jednotlivé úseky. Stejně jako u plochy se jedná o polynomické rovnice, pokud se nepovedlo najít vhodnou polynomickou rovnici zahrnující více bodů, byla pro dva sousední body použita lineární rovnice.

Tabulka 9: Rozdělení objemové čáry

Úsek	Počátek	Konec
1	382.8	382.9
2	382.9	383.3
3	383.3	383.4
4	383.4	383.8
5	383.8	384.2
6	384.2	384.6
7	384.6	385.0
8	385.0	385.3
9	385.3	385.6
10	385.6	386.0

Jednotlivé úseky jsou popsány následujícími rovnicemi na stejném principu jako rovnice popisující plochu.

Tabulka 10: Rovnice popisují čáru objemu

Úsek	Rovnice	Koeficient determinace R ²
1	$y = 1200.47069901406 * x - 459334.4911925$	1.0000000000
2	$y = 24662.1722551882 * x^3 - 28331864.3480299 * x^2 + 10849203078.809 * x - 1384839304040.25$	0.9996417682
3	$y = 104728.08456735 * x - 40139602.391707$	1.0000000000
4	$y = 553578.921211243 * x^4 - 849747820.135426 * x^3 + 489138697323.884 * x^2 - 125138702598267 * x + 12005568216761000$	1.0000000000
5	$y = -113737.044419289 * x^3 + 131210249.666242 * x^2 - 50455315485.4725 * x + 6467247313542.29$	0.9999999898
6	$y = 19558.0322642326 * x^3 - 22418992.4792292 * x^2 + 8566484420.89683 * x - 1091151312265.12$	0.9999998606

7	$y = -47169.9336862564 * x^3 + 54536687.0624824 * x^2 - 21017188088.674 * x + 2699746804906.96$	0.9999999984
8	$y = -34796.1937942504 * x^3 + 40216812.3901234 * x^2 - 15493177764.4509 * x + 1989438679127.97$	1.0000000000
9	$y = 10263.0392417907 * x^3 - 11860640.8684563 * x^2 + 4569755696.82479 * x - 586988549489.41$	1.0000000000
10	$y = 7200.68453407287 * x^3 - 8310195.23308926 * x^2 + 3197652241.17884 * x - 410235272079.316$	0.9999999996

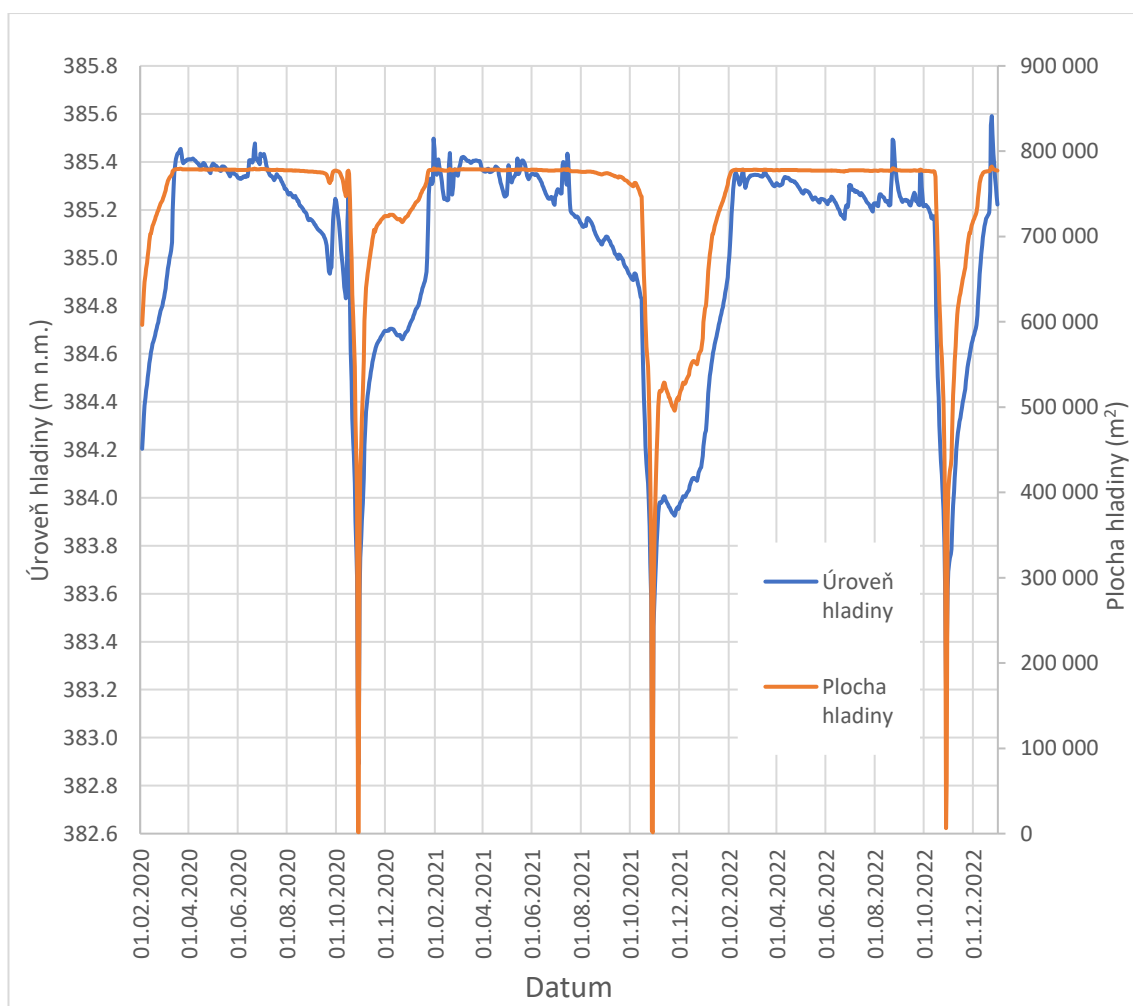
Tabulka 11: Kontrolní použití rovnic popisujících objemovou čáru

Úroveň hladiny	Tabulková hodnota objemu (m ³)	Vypočtená hodnota objemu (m ³)
382.800	205.69	205.692
382.900	325.74	321.407
383.000	594.15	610.958
383.100	1 025.42	999.940
383.200	1 619.51	1 636.327
383.300	2 672.42	2 672.423
383.400	13 145.23	13 084.000
383.500	37 071.21	37 016.000
383.600	69 412.48	69 364.000
383.700	107 486.80	107 436.000
383.800	149 940.53	149 938.579
383.900	196 318.41	196 326.435
384.000	247 112.14	247 100.212
384.100	301 569.44	301 577.474
384.200	359 077.75	359 068.634
384.300	419 578.19	419 614.623
384.400	482 804.54	482 749.869
384.500	548 555.29	548 591.722
384.600	617 266.64	617 265.522
384.700	688 705.51	688 710.029
384.800	762 118.63	762 111.868
384.900	837 183.50	837 188.020
385.000	913 656.58	913 656.601
385.100	990 923.92	990 923.937
385.200	1 068 526.65	1 068 526.669
385.300	1 146 256.00	1 146 255.994
385.400	1 224 077.89	1 224 077.883
385.500	1 302 009.49	1 302 009.476
385.600	1 380 112.36	1 380 112.945
385.700	1 458 517.87	1 458 515.523
385.800	1 537 348.92	1 537 352.438
385.900	1 616 669.24	1 616 666.894
386.000	1 696 501.51	1 696 502.095

Z výše uvedené tabulky je patrné, že rovnice popisují čáru v charakteristických bodech poměrně přesně. Největší nepřesnost je pro tabulkové hodnoty 383.4 a 384.4 a to maximálně 62 m³. Velikost této chyby nebude mít vzhledem k velikostem vstupních členů do bilance významný vliv na průběh bilance. Vliv této nepřesnosti na průběh bilance je lze prohlásit za přijatelný.

6.1.2.6 Úroveň hladiny

Úroveň vodní hladiny v nádrži byla zaznamenávána pomocí tlakových senzorů připojených k dataloggerům. Byla používána čidla s rozsahem 0 až 4 m. K dispozici je průběh hladiny v období 3.2.2020-30.4.2023. Úroveň hladiny je v denním kroku.

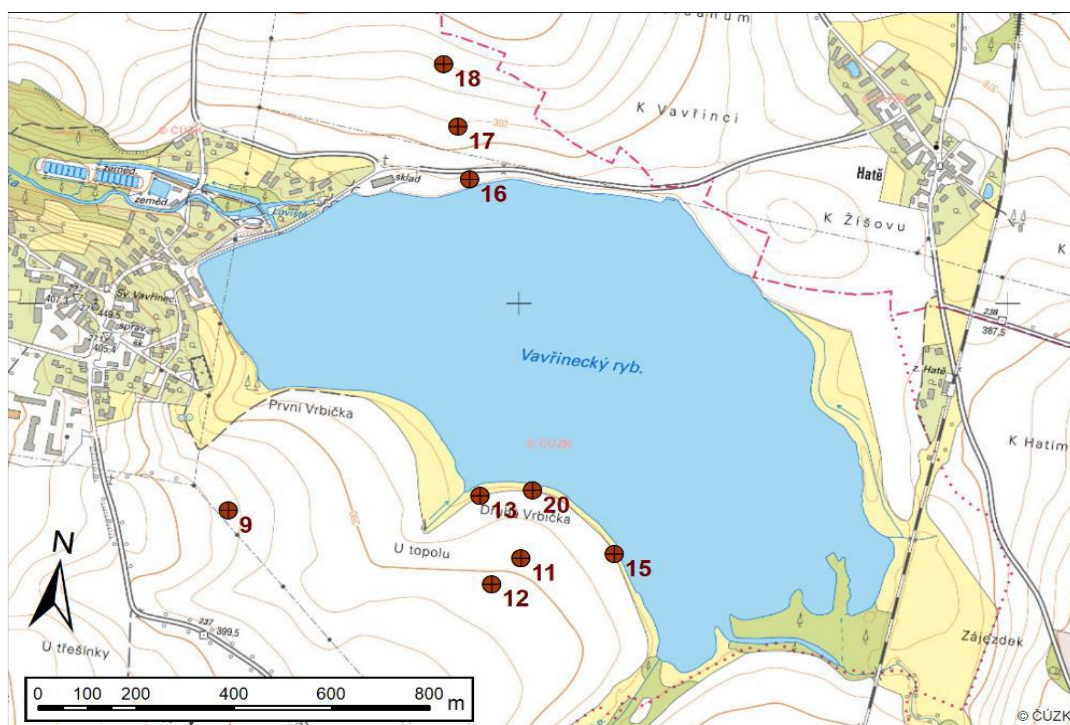


Obrázek 28: Průběh hladiny a plochy MVN Vavřinec

Z obrázku č.28 je patrné každoroční vypouštění rybníka z důvodu výlovu pravidelně konaném 28.10. Úroveň hladiny klesá k hodnotě 382,8 m n.m. a nejvýše dosahuje hodnoty 385,6 m n.m. Se změnou výšky hladiny se mění i plocha vodní hladiny. Tato změna je klíčová pro správné určení hodnoty výparu z volné hladiny a srážek dopadajících na volnou hladinu.

6.1.2.7 Podzemní voda

Pro sledování úrovně podzemní vody bylo v okolí rybníka realizováno celkem 9 monitorovacích vrtů. Vrtů o hloubce do 9 m a průměru 156 mm až 195 mm byly vystrojeny plastovým potrubím DN100 s perforací od úrovně cca 1.5 pod terémem až na dno. Potrubí bylo obsypáno kačirkem frakce 8/16 v celé délce perforace, horní část vrtu byla utěsněna jílovitým materiálem za účelem zabránění pronikání povrchové vody do vrtu. Nad zemí byly jednotlivé vrtů osazeny ocelovým zhlavím s krytem [52].



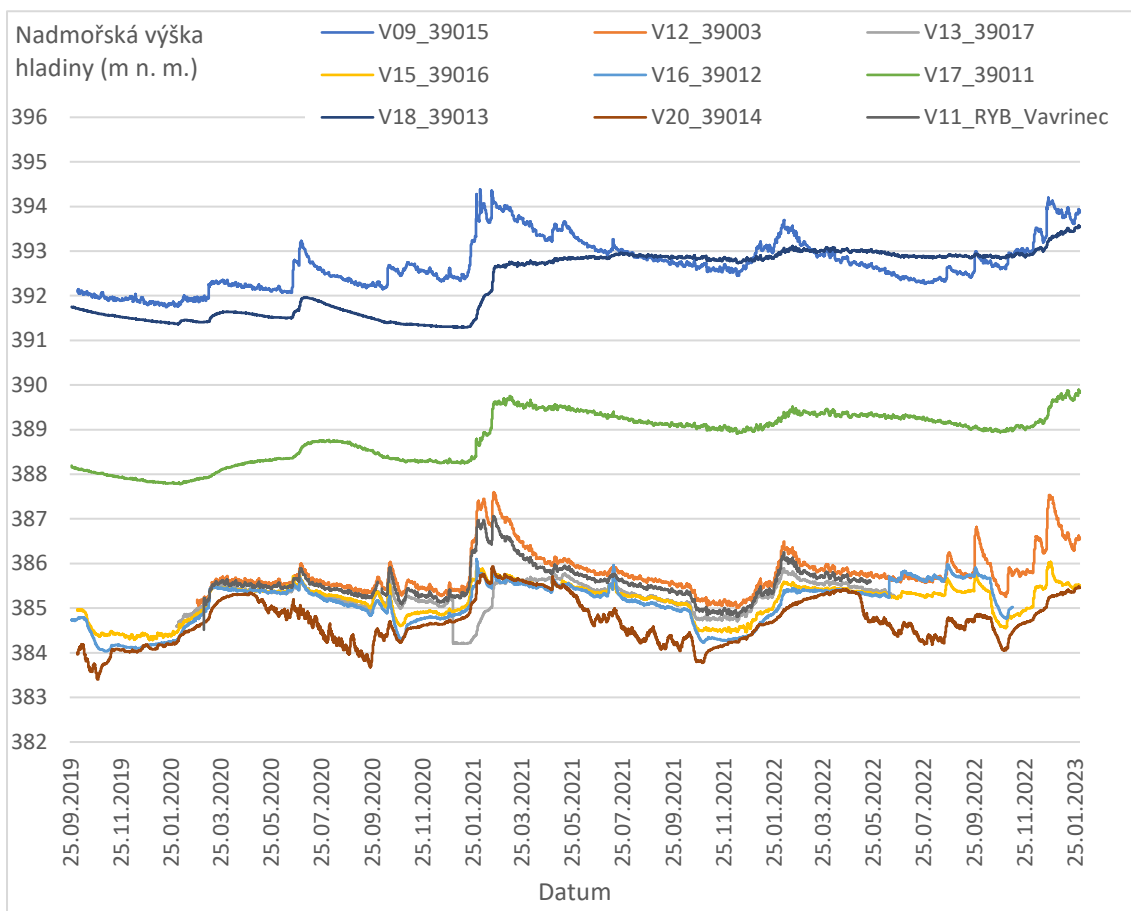
Obrázek 29: Umístění monitorovacích vrtů [52]

Tabulka 12: Seznam monitorovacích vrtů podzemní vody

Název vrtu	Číslo vrtu	X-JTSK	Y-JTSK	Z-terén
V09_39015	9	-701595.62	-1068453.57	396.94
V11_RYB_Vavrinec	11	-700997.57	-1068557.77	389.57
V12_39003	12	-701057.24	-1068614.67	390.62
V13_39017	13	-701081.33	-1068421.60	386.20
V15_39016	15	-700806.00	-1068548.71	385.91
V16_39012	16	-701102.16	-1067728.82	387.56
V17_39011	17	-701126.60	-1067612.53	391.72
V18_39013	18	-701155.86	-1067476.11	396.00
V20_39014	20	-700973.68	-1068409.25	386.01

Výška hladiny v jednotlivých vrtech je zaznamenávána v hodinovém kroku. Průběh hladiny v různých vrtech začíná v různý časový okamžik. První dostupné informace o úrovni podzemní vody jsou k dispozici ve vrtech 16, 17, 18 a to od 28.9.2019., zbylé pak v březnu 2020. Časové řady jsou přerušeny pouze ojediněle, přičemž důvodem je zpravidla výpadek měrné aparatury. Datové řady končí 31.12.2022.

Na následujícím obrázku je znázorněna úroveň hladiny podzemní vody v jednotlivých monitorovacích vrtech.



Obrázek 30: Průběh hladin v monitorovacích vrtech

6.1.3 Postup stanovení bilance

Hydrologická bilance MVN Vavřinec bude provedena pro období 3.2.2020-31.12.2022. K bilanci budou použita představená data v kapitole 6.1.2. Vzhledem k tomu, že informace o výparu jsou známy pouze z částí jednotlivých roků, je potřeba chybějící data doplnit. Pro určení výparu z volné hladiny je použit vztah představený v kapitole 5.1.4 Metoda dle Oudina. Koeficient korelace mezi hodnotami z výparoměru a Oudinovy metody je 0,52. Hodnota je nižší než předpokládaná. Oudinova metoda vychází pouze ze dvou proměnných, polohy Slunce a průměrné denní teploty vzduchu. U samotného měření výparoměru je proměnných násobně více, za zmínku stojí především rychlost větru. Korelační koeficient mezi teplotou a výparem je pro celou řadu 0,73. Použitím Oudinovy metody tedy vznikne chyba při určování velikosti výparu z volné hladiny. Oudinův vztah je použit pro období od listopadu do konce března, kdy očekávané hodnoty výparu jsou v porovnání s letními hodnotami nízké. Z tohoto důvodu nízký korelační koeficient nepředstavuje zásadní problém pro samotnou bilanci nádrže.

Hydrologická bilance nádrže vychází z rovnice představené v kapitole 5.2.

$$R = (U + S + P) - (O + I + H + A)$$

Vzhledem k povaze vstupních dat je rovnice upravena do tvaru:

$$R = (U + S) - (O + H) \pm X$$

Kde R je objem vody v nádrži, U je přítok, S srážky na hladinu, O odtok, H výpar z volné hladiny a X je hledaný člen, který představuje infiltraci do půdy, průsak hrází, přítok podzemní vody a další neměřené složky. Člen A je z rovnice odstraněn, z nádrže nejsou žádné odběry.

Bilancování nádrže spočívá v porovnání objemu na začátku a konci jednotlivých dnů. Počáteční objem R na začátku dne je určen převedením úrovně hladiny na hodnotu objemu. K počátečnímu objemu jsou přičteny nebo odečteny známé složky. Výsledkem je vypočítaný objem na konci dne. Rozdíl mezi vypočteným objemem na konci dne a počátečním objemem následující dne je vyjádřen právě hledaným členem X .

V okamžiku, kdy jsou známy hodnoty hledaného členu X , je použita korelační analýza pro hledání vazby mezi hledaným členem a ostatními členy, zároveň je pomocí korelační analýzy prověřována možnost vazby mezi vodou v nádrži a podzemní vodou v monitorovacích vrtech kolem nádrže. Průběh bilance je součástí příloh.

6.1.4 Výsledky bilance

Velikost hledaného členu X se pohybuje od minima $-79\,140\text{ m}^3$, do maxima $242\,143\text{ m}^3$. Záporná hodnota znamená, že objem na konci dne určený výpočtem je nižší než objem odpovídající úrovni hladiny na počátku následujícího dne. Jinými slovy lze konstatovat, že v nádrži je méně vody, než by mělo být. Pokud je hledaný člen kladný, znamená to jev opačný. V nádrži, dle výpočtu, je více vody, než by mělo být.

Tabulka 13: Korelační matice hledaného členu X

	Přítok	Hledaný člen X	V09	$\Delta V09$	V15	$\Delta V15$	V16	$\Delta V16$	V17	$\Delta V17$	V18	$\Delta V18$	V20	$\Delta V20$
Přítok	1.00													
Hledaný člen X	0.59	1.00												
V09_39015	0.33	0.11	1.00											
$\Delta V09$	0.51	0.27	0.03	1.00										
V15_39016	0.23	0.09	0.47	0.04	1.00									
$\Delta V15$	0.56	0.42	-0.02	0.64	0.04	1.00								
V16_39012	0.15	0.07	0.30	0.01	0.91	-0.03	1.00							
$\Delta V16$	0.53	0.48	0.00	0.52	0.06	0.73	0.02	1.00						
V17_39011	-0.01	0.01	0.69	-0.08	0.34	-0.09	0.37	-0.08	1.00					
$\Delta V17$	0.38	0.27	0.15	0.64	0.11	0.35	0.08	0.41	-0.02	1.00				
V18_39013	-0.08	0.00	0.49	-0.08	0.14	-0.09	0.24	-0.07	0.91	-0.06	1.00			
$\Delta V18$	0.39	0.17	0.26	0.46	0.20	0.22	0.16	0.28	0.03	0.74	-0.02	1.00		
V20_39014	0.24	0.04	0.57	0.01	0.73	0.02	-0.59	0.05	0.23	0.13	0.06	0.22	1.00	
$\Delta V20$	0.46	0.30	0.00	0.32	0.02	0.54	-0.03	0.56	-0.11	0.16	-0.09	0.13	0.04	1.00

Hodnoty v korelační matici jsou určeny pomocí Pearsonova korelačního koeficientu r . Koeficient detekuje lineární závislost mezi x a y , v našem případě mezi jednotlivými měřenými daty. Je-li $r > 0$, s rostoucím x roste i y , je-li $r < 0$, s rostoucím x naopak y klesá. Pro vhodnější hodnocení míry korelace byla v práci použita Evansova

příručka (1996), dle které je možné sílu korelace popsat slovně. Příručka rozděluje korelaci do těchto pěti skupin: velmi slabá (0,00 – 0,19), slabá (0,20 – 0,39), střední (0,40 – 0,59), silná (0,60 – 0,79) a velmi silná (0,80 – 1,00). (Evansova příručka, 1996)

Nejsilnější korelační vazbu, dle Evansovy příručky střední velikost, má hledaný člen s přítokem a změnami úrovně hladiny ve vrtech číslo V15 a V16. Korelační vazba se změnami hladiny v monitorovacích vrtech ukazuje na možné spojení mezi vodou v nádrži a vodou podzemní. Tento fakt podporuje také silná korelační vazba mezi úrovní hladiny v nádrži a úrovní hladin ve vrtech V15, V16, V20.

Tabulka 14: Korelační matice úrovní hladin

	Naměřená hladina	V09	V15	V16	V17	V18	V20
Naměřená hladina	1.00						
V09	0.22	1.00					
V15	0.92	0.47	1.00				
V16	0.85	0.30	0.91	1.00			
V17	0.21	0.69	0.34	0.37	1.00		
V18	0.04	0.49	0.14	0.24	0.91	1.00	
V20	0.60	0.57	0.73	0.59	0.23	0.06	1.00

Takto matematicky popsaná spjitost mezi vodou povrchovou a podzemní nemusí nutně znamenat jejich vzájemné ovlivnění. Důvodem můžou být například období sucha, kdy bude přirozeně docházet k poklesu vody v nádrži tak i poklesu úrovně podzemní vody. Při snížených objemem přítoků, zvýšenému výparu bude docházet k poklesu hladiny v nádrži, stejně tak nebude probíhat v dostatečné míře infiltrace srážek a nebude doplňována podzemní voda. V časových obdobích, kdy je nádrž vypouštěna z důvodu výlovu, klesá i hladina ve vrtech. Nejvýraznější je tato souvislost u vrtů, které se nádrži nachází nejbliže. Na základě těchto zjištění lze konstatovat, že hledaný člen X , z části závisí na pohybu podzemní vody. Z korelační matice je zřejmé, že silnější vazby má hladina v nádrži s vrty, které jsou nejbliže MVN. U vrtu V18, je vazba nejslabší, vrt je zároveň nejvzdálenější. Nižší korelační vazba může být způsobena zpožděním a vzdálenější vrty od MVN mohou na změnu hladiny v nádrži reagovat opožděně.

Jak už bylo zmíněno, významná korelační vazba je i mezi hledaným členem X a přítokem. Při podrobnějším studiu tohoto jevu bylo zjištěno, že síla korelace je tvořena převážně v dny, kdy je hledaný člen kladný. Pro soubor kladných hodnot hledaného členu je korelace s přítokem 0,86. Pro soubor se zápornými hodnotami pouze 0,11. Spojujícím faktorem jsou převážně nadprůměrně vysoké až extrémní hodnoty přítoku. V těchto dnech je hledaný člen zpravidla nadprůměrně kladný. Nepodařilo se přímo prokázat, kam přebytky vody určené výpočty mohou směřovat. Ověřováno bylo několik teorií. Lze předpokládat, i na základě analýzy spjitosti s podzemní vodou, že při vysokých přítocích, kterým často odpovídá i příslušný nárůst úrovně hladiny, část objemu bude dotována do podzemní vody. Existuje i předpoklad, který se nepodařilo

potvrdit ani vyvrátit, o tom, že část odtoku nemusí být zachycena měřením. Při vysokých přítocích, jsou úměrně zvyšovány i odtoky.



Obrázek 31: Detailní schéma odtoku z nádrže

Na výše uvedeném obrázku, je představena situace pod hrází nádrže. Ze společného prostoru, kde se střetávají veškeré odtoky z nádrže, vedou dva možné odtoky. Z pohledu na obrázek je měřen pouze spodní odtok. Existuje podezření, že při zvýšených přítocích a následně zvýšených odtocích může část objemu odcházet horním korytem. Závěrem lze konstatovat, že se nepodařilo plně vysvětlit a prokázat všechny příčiny, které způsobují extrémně vysoké kladné hodnoty hledaného členu X .

Existuje celá řada dalších možných ovlivnění velikosti hledaného členu X . Společným faktorem je způsob a přesnost měření jednotlivých vstupních členů. Při měření přítoku i odtoku lze počítat s chybou měření, stejně tak je tomu při měření výparu a srážek, u srážek by chyba vzhledem k povaze měření měla být nejnižší. Velikosti chyb nelze vyčíslit z důvodu nedostatku informací o přesných způsobech měření. Další chyba, která může mít pro některé dny svou velikostí větší význam, je způsobená převzetím hodnot srážek ze stanice Žišov. Stanice je vzdálená přibližně 2 km od nádrže. Lze tedy předpokládat, že velikost srážkových úhrnů se může v některých případech lišit. Další chyba, která ovlivňuje velikost hledaného členu, vychází ze způsobu určení výparu v období mimo provoz plovoucího výparoměru. Při použití hodnot z výparoměru může vznikat také chyba, kterou způsobuje fakt, že výparoměr je přibližně uprostřed vodní hladiny. Hodnoty z výparoměru nemusí být reprezentativní pro celou plochu hladiny. Nutné je také zmínit možné odběry vody z prostoru, kde se potkávají jednotlivé odtoky z nádrže pro provoz rybářských sádek v blízkosti nádrže. Předpoklad tohoto odběru vychází z manipulačního řádu nádrže, kde je tento odběr povolen. Při zpracování této práce nebyla známa četnost ani velikost možných odběrů, nelze tedy vyčíslit vliv na hledaný člen X . Určitá nepřesnost je také způsobena výpočtem zatopené plochy a objemu nádrže rybníka z úrovně hladiny převedením úrovně hladiny na plochy a objemy.

Závěrem lze konstatovat několik zjištění. Voda v nádrži a podzemní voda v okolí nádrže mají vzájemnou vazbu. Potvrzuje to zejména období, kdy dochází k umělému

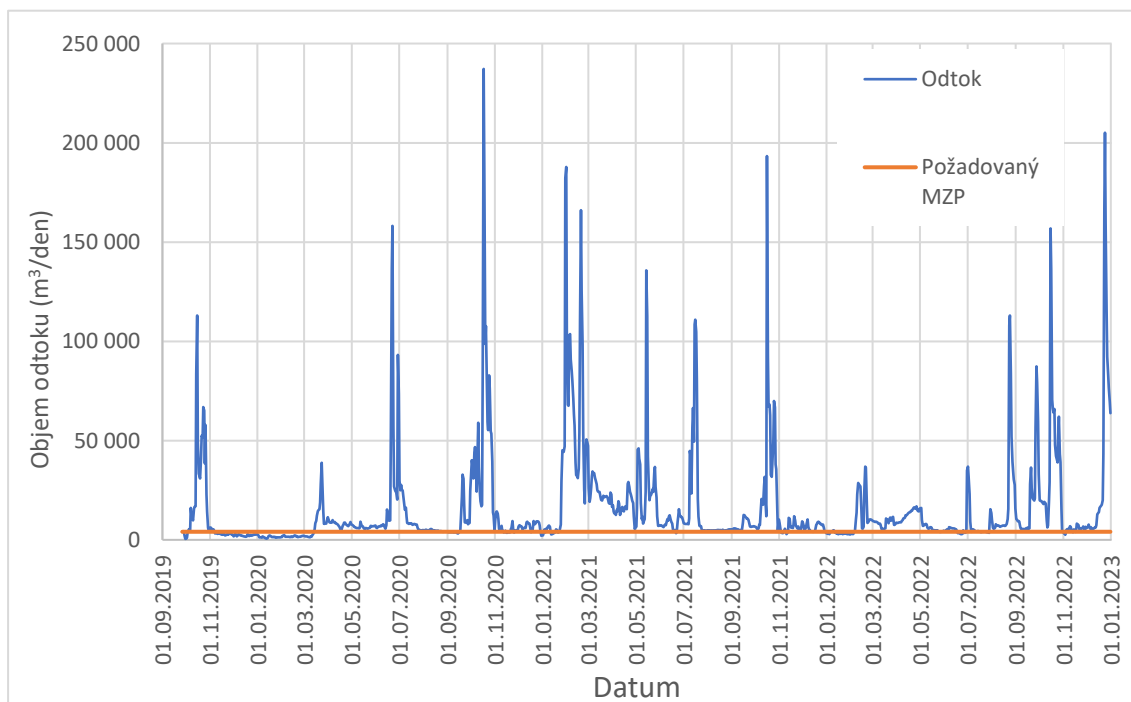
ovlivnění hladiny v nádrži. Dále lze konstatovat, že velikost hledaného členu X , který představuje nedostatky nebo přebytky vody v nádrži v porovnání s naměřenými úrovněmi hladiny má mnoho ovlivňujících faktorů. I přesto, že chyby jednotlivých faktorů jsou malé, kombinace jednotlivých chyb může mít vliv řádově na vyšší jednotky, až desítky tisíc m^3 velikosti hledaného členu X . Velikost hledaného členu může být také ovlivněna několika faktory, které nejsou přímo potvrzeny.

6.2 Zabezpečení MZP na odtoku

Zvýšená zabezpečení minimálního zůstatkového průtoku pod hrází by měla být jedna z hlavních funkcí vodní nádrže. V praxi může často docházet k přímému rozporu jednotlivých funkcí nádrže, kdy zajištění jedné může negativně ovlivňovat zabezpečení ostatních. Dalším faktorem ovlivňujícím zabezpečení MZP je schopnost manipulace s vypouštěcím zařízením nádrže. Dle údajů Povodí Labe [58] a také manipulačního řádu z roku 2006 činí hodnota průměrného dlouhodobého ročního průtoku (Q_a) na MVN Vavřinec $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, hodnota minimálního zůstatkového průtoku (Q_{330d}) je $0,047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což představuje $4060,8 \text{ m}^3/\text{den}$. Takto stanovená hodnota odpovídá současně platné metodice. Dle navrhovaného nového způsobu určení MZP se zahrnutím regionalizace a sezonality by hodnota MZP pro jarní sezonu byla $0,047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pro hlavní sezonu $0,045 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což představuje $3888,0 \text{ m}^3/\text{den}$.

6.2.1 Zabezpečení určená z měřených dat

K určení zabezpečení MZP pod MVN Vavřinec jsou použita data odtoků představená v kapitole 6.1.2 Vstupní data. V denním kroku je objemová hodnota MZP $4060,8 \text{ m}^3$. Prostým porovnáním hodnot MZP a naměřeného odtoku je určena zabezpečení MZP. Celkově je k dispozici 1193 hodnot denních odtoků v období 26.9.2019 až 31.12.2022.



Tabulka 15: Přehledová tabulka jednotlivých případů

	Současná metodika	Navrhovaná metodika
Celkový počet případů	1193	1193
Splněn požadavek MZP	953	971
Odpovídající zabezpečení	0.80	0.81
Přítok vyšší než MZP	847	863
Odpovídající zabezpečení	0.71	0.72
Odtok vyšší než přítok a zároveň splněn MZP	610	617
Případy, kdy není splněn požadavek MZP		
Celkový počet případů	240	222
Odtok vyšší než přítok	40	33
Přítok vyšší než MZP	132	123

Celkem v 953 případech z 1193 je hodnota odtoku vyšší než požadovaný MZP. Zabezpečení MZP je v takovém případě 0,8. Dle navrhované metodiky by je splněn požadavek v 971 případech, což odpovídá zabezpečení 0,81. Jednotlivé úseky, kdy nedochází k plnění MZP jsou uvedeny v Tabulce 14. Časové úseky, kdy není splněn požadavek na MZP mají podobný charakter. Nejčastěji se jedná o úseky po výlovu rybníka, který se pravidelně koná 28.10. V tomto období dochází k opětovnému napouštění nádrže, a tak jsou minimalizovány odtoky. Nejdelším takovým je úsek od 7.11.2019 do 13.3.2020. Z hlediska významnosti, jsou nejzajímavější i kratší úseky v letních měsících, například 18-24.6.2022, 26-28.6.2022, kdy nedochází k plnění požadavku, bez jednoho dne, v úseku jedenácti dnů v řadě. Vliv ročního období na významnost časových úseků je blíže popsán v dokumentu *Guidance Document No. 31, Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive*.

Tabulka 16: Časové úseky neplnění požadavku MZP dle současné metodiky

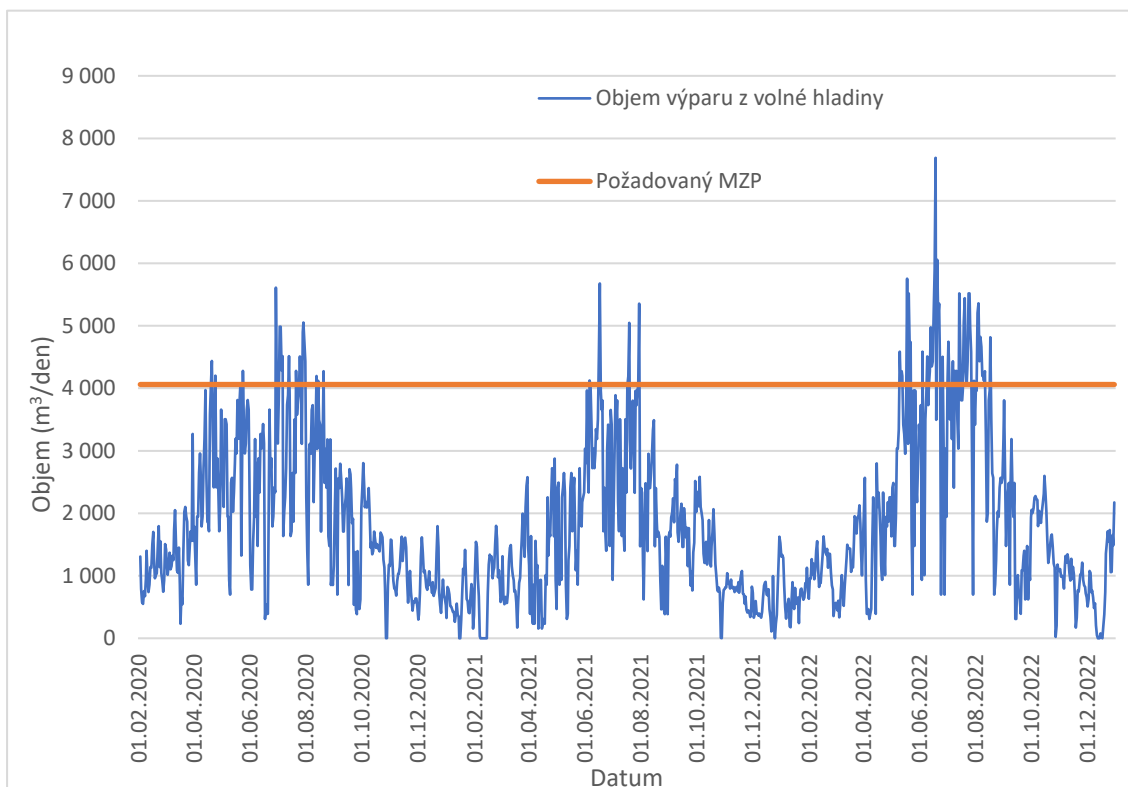
Úseky neplnění požadavku MZP dle současné metodiky	Počet dní v úseku	Úseky neplnění požadavku MZP dle současné metodiky	Počet dní v úseku
26.09.2019	1	10-12.11.2021	3
29.9.-3.10.2019	5	14.12.2021	1
07.11.2019	5	31.12.2021-5.1.2022	6
13.11.2019-13.3.2020	122	11.1.2022-5.2.2022	26
01-16.9.2020	16	26-27.5.2022	2
12-13.11.2020	2	18-24.6.2022	7
15-20.11.2020	6	26-28.6.2022	3
25.11.2020	1	05.07.2022	1
17.12.2020	1	17-18.7.2022	2
30.12.2020-5.1.2021	6	20.07.2022	1
12-17.1.2021	6	25-28.7.2022	4

20-21.1.2021	2	1-3.11.2022	3
21-22.2021	2	13.11.2022	1
3-6.11.2021	4	16.11.2022	1

V 847 případech je hodnota přítoku vyšší než požadovaný MZP, v takovém případě by zabezpečení MZP byla 0,71, pro navrhovanou metodiku je to 863 případů, čemuž odpovídá zabezpečení 0,72.

Z 240 případů, kdy není splněn požadovaný MZP, je v těchto 200 případech přítok do nádrže vyšší než odtok. To znamená, že ve sledovaném období pouze ve 40 případech, kdy nebyl splněn požadavek MZP, byl odtok z nádrže vyšší než přítok do ní a z hlediska bilance docházelo ke snižování zásoby vody v nádrži. Ve 132 případech z 200 byl zároveň přítok vyšší než požadovaný MZP, tudíž mohlo docházet ke splnění požadavku MZP bez potřeby snižovat úroveň hladiny v nádrži a hodnota zabezpečení by se zvýšila na 0,91.

Pro navrhovanou metodiku je situace následující. Požadavek není splněn pro 222 případů, z nichž pouze ve 33 případech byl odtok vyšší než přítok a docházelo ke snižování zásoby vody v nádrži. Ve 123 případech by mohlo docházet ke splnění požadavku MZP bez potřeby snižovat úroveň hladiny, zabezpečení by se zvýšila na 0,92.



Obrázek 33: Porovnání požadovaného MZP a velikosti výparu

V těchto 240 případech, kdy nedošlo ke splnění požadavku MZP, celkový požadovaný objem odtoku představoval 974 592 m³. Celkem odteklo 634 780 m³. Ke

splnění požadavku chybělo odpustit 339 812 m³. To je přibližně hodnota, která se vypařila z hladiny od 1.5.2020 do 31.8.2020.

V 650 případech z celkových 1193 je hodnota odtoku vyšší než přítoku. Z toho v 610 případech je splněn požadavek na MZP. V takovém případě se dá hovořit o tom, že vodní nádrž plní funkci nadlepšování průtoků v toku pod nádrží.

Nádrž zvýšila zabezpečení MZP přibližně o 9 %. O dalších 11 % by mohla vzrůst pouhou změnou manipulace s vypouštěcím zařízením bez snižování úrovně hladiny. MVN zároveň přibližně v polovině případů zvyšuje hodnoty odtoků oproti přítokům, a tak nadlepšuje velikost odtoku. Použití navrhované metodiky by při tomto sledovaném znamenalo zvýšení zabezpečení o 1 %.

6.2.2 Zabezpečení určená pomocí softwaru MAVONA

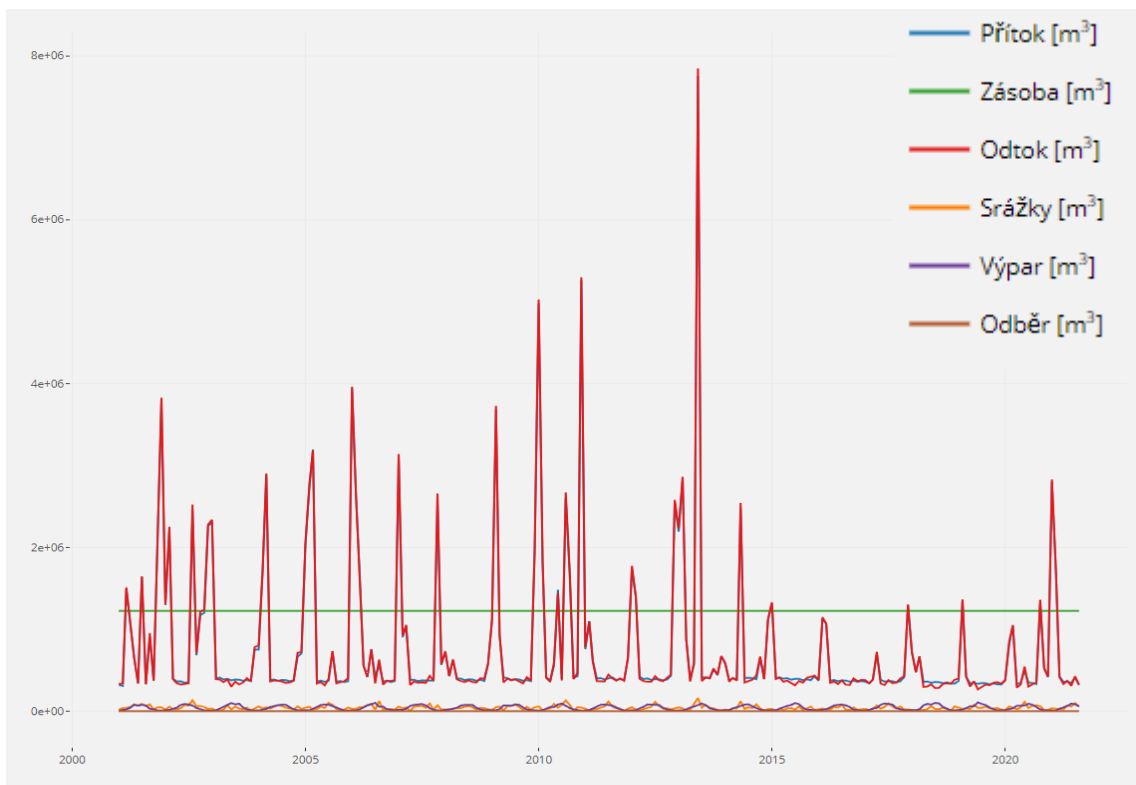
Simulační nástroj MAVONA je primárně podpůrným nástrojem pro navrhování nových MVN a posouzení jejich dopadu na odtokový režim. Lze jej použít i pro bilancování již vytvořené nádrže za účelem poznání jednotlivých složek hydrologické bilance v povodí. Simulace je prováděna s následujícími vstupními údaji: plocha povodí je vkládána ve formě shapefile, viz. Obrázek č.13, objem nádrže pro simulaci je 1 224 077 m³, plocha zátopy je 778 718 m². Tyto hodnoty odpovídají úrovni hladiny stálého nadržení 385,4 m n.m. Hodnota MZP je 0,047 m³.s⁻¹. Období pro simulaci je 01/2001-08/2021.

Výsledkem simulace je následující průběh jednotlivých veličin v měsíčním kroku a stanovení zabezpečení odběrů a MZP. Zabezpečení MZP (0,047 m³.s⁻¹) byla stanovena na hodnotu 1, což znamená, že po celou dobu provozu MVN by mělo být k dispozici dostatek vody pro zabezpečení MZP. Z obrázku je zřejmé, že zabezpečení MZP nemá vliv na změnu hladiny v nádrži. Úroveň zásoby vody je konstantní. Index aridity (poměr potenciální evapotranspirace a srážek) simulace stanovila na hodnotu 0.9919, což znamená, že v oblasti je téměř vyrovnaná roční potenciální evapotranspirace se srážkami. Tato hodnota je lehce podprůměrná v rámci ČR. Tento index je základem pro odhad dlouhodobé výšky odtoku.

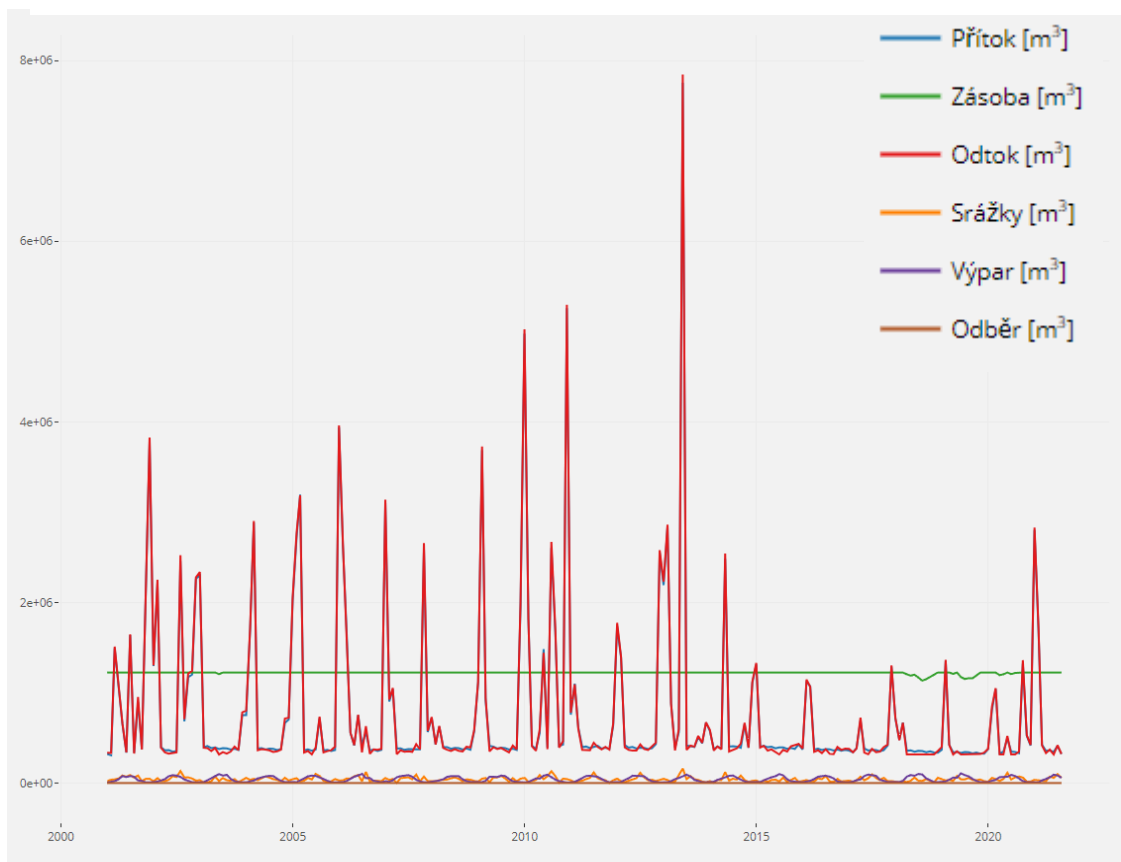
Při simulaci pro MZP=0,120 m³.s⁻¹ je zabezpečení stále na hodnotě 1, ale takto velký stálý odtok už začíná způsobovat změnu zásoby a tím i hladiny v nádrži.

Při simulaci pro MZP=0,165 m³.s⁻¹ se zabezpečení už nedostane na hodnotu 1. Při takto velkém odtoku by docházelo k úplnému vyprázdnění nádrže v některých časových periodách.

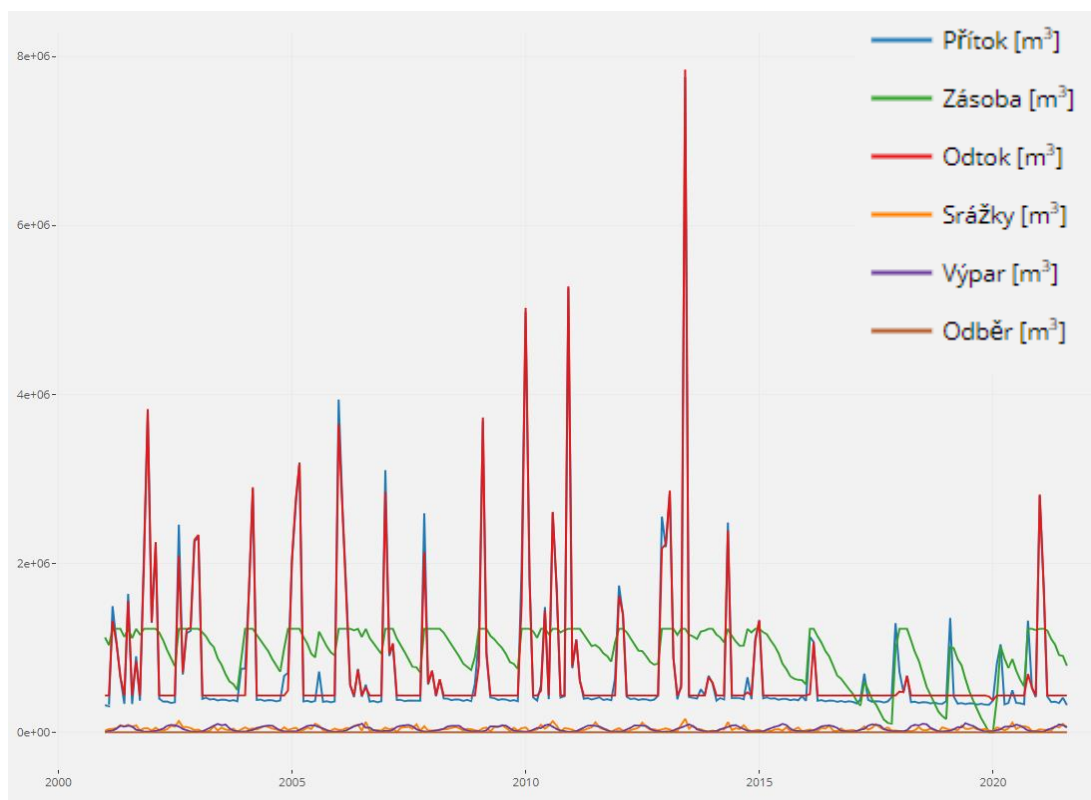
Pokud by hlavní a jedinou funkcí nádrže bylo co nejvíce zvýšit stálý odtok, dle simulací pomocí nástroje MAVONA by nádrž dokázala zajistit 0,120 m³.s⁻¹ bez větších změn hladiny, což je 2,5x více než MZP. V extrémním případě i 0,165m³.s⁻¹, kdy by docházelo k úplnému vyprázdnění nádrže.



Obrázek 34: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Obrázek 35: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Obrázek 36: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

6.2.3 Porovnání zabezpečení MZP

Absolutní porovnání by mělo vycházet ze stejného referenčního období, což v tomto případě není splněno. Dostupnost dat v aplikaci MAVONA je pouze do srpna 2021. Přesto vzhledem k rozdílným výsledkům lze vyvodit některé závěry.

Rozdíl v zabezpečení MZP na odtoku z nádrže může mít několik důvodů. Samotná aplikace MAVONA slouží primárně k prvotnímu posouzení nově navrhované nádrže a pracuje v měsíčním kroku. Ze simulací vyplývá, že povodí Vavříneckého rybníka je dostatečně vodné, aby byla zajištěna 100% objemová zabezpečení MZP pod hrází rybníka. Dále vyplývá, že nádrž o daných parametrech by byla schopna zabezpečit i přibližně 2,5x větší hodnotu MZP. Oproti tomu závěry vyplývající z reálně měřených dat ukazují, že objemový MZP v denním kroku není zajištěn po celé sledované období.

Hlavním důvodem je pravidelné vypouštění nádrže z důvodu rybářského výlovu a následné opětovné napouštění, kdy jsou odtoky snižovány na minimum. Další důvody pro neplnění požadavku MZP na odtoku nejsou přesně známy. Předpokládat se dá vliv technických možností manipulace s výpustním zařízením. Z dat je také zřejmé, že nádrž zlepšuje zabezpečení MZP o 9 % s vysokým potenciálem dalšího zvýšení a zároveň nadlepšuje jejich velikost přibližně v 50 % případů. Využití jiného přístupu k MZP pomocí navrhované metodiky nepřinese v tomto případě významné změny.

Důležitý je časový krok obou způsobů určení zabezpečení MZP. Při převedení denních hodnot na měsíční pro měřená data, se zabezpečení změní. Pro měsíce listopad 2019, prosinec 2019, leden 2020, únor 2020 nebude splněna objemová

podmínka MZP. Pro ostatní měsíce, i v kterých jsou dny kdy nedochází k plnění denních požadavků, bude požadavek splněn. Proto výsledky z aplikace MAVONA primárně naznačují vodnost povodí a objemové možnosti jednotlivých členů, ale zabezpečení nemá příliš vypovídající hodnotu.

6.3 Data z dálkového průzkumu Země ve vztahu k MVN

„Dálkový průzkum Země (DPZ) je rychle rozvíjejícím se oborem, který se uplatňuje v řadě odvětví. Zahrnuje jak data pořizovaná senzory umístěnými na satelitech, tak data pořizovaná pomocí leteckých prostředků pilotovaných i nepilotovaných. Každý z obou uvedených způsobů má své využití s tím, že rozdíl spočívá především v rozsahu území, které je posuzováno, a v potřebné podrobnosti a přesnosti dat“ [52].

6.3.1 Mikroklimatická funkce MVN

Jedna z mnoha funkcí MVN je mikroklimatická. Při výparu z hladiny dochází ke spotřebování energie na přeměnu skupenství vody z kapalného na plynné a tím může docházet k ochlazení vzduchu v okolí nádrže. K ověření tohoto předpokladu jsou vybrána volně dostupná data z dálkového průzkumu Země družice Landsat-8. Data jsou k dispozici volně ke stažení na webové adrese <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Z těchto dat budou vytvořeny mapy povrchových teplot pomocí softwaru ArcGIS Pro. Následující kapitoly 6.3.1.1 a 6.3.1.2 jsou převzaty z mé bakalářské práce [59], která se věnovala studiu teplotního efektu vodních útvarů v městských ostrovech tepla, kde byla použita stejná vstupní data.

6.3.1.1 Vstupní data

„Data z družice Landsat-8 jsou k dispozici každých 16 dní, tak dlouho trvá družici dostat se znovu na stejné místo během snímání celé Země. Na družici jsou připevněny senzory OLI (Operational land imager) a TIRS (Thermal infrared sensor). Tyto senzory snímají 11 spektrálních pásem. Senzor OLI v rozlišení 30x30m pro jeden pixel. Senzor TIRS v rozlišení 100x100m. Z důvodu lepší kompatibility jsou data ze senzoru TIRS převzorkována na rozlišení 30x30m pomocí metody kubické konvoluce. Tato metoda počítá s 16 nejbližšími pixely. Celý balíček dat je již poskytován převzorkovaný na rozlišení 30x30m pro jeden pixel. K tvorbě povrchových map byla použita data ze tří snímaných pásem. Pásmo 4 a 5 k výpočtu podílu vegetace a pásmo 10 pro jasovou teplotu. Přítomnost oblačnosti zakrývá zemský povrch, čidla připevněná na družici tak snímají emisivitu oblak, místo požadovaného zemského povrchu. Z tohoto důvodu pro tvorbu map povrchových teplot nelze využít veškerá dostupná data“ [59].

Band	Wavelength	Useful for mapping
Band 1 – coastal aerosol	0.43-0.45	coastal and aerosol studies
Band 2 – blue	0.45-0.51	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation and deciduous from coniferous vegetation
Band 3 - green	0.53-0.59	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
Band 4 - red	0.64-0.67	Discriminates vegetation slopes
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	Emphasizes biomass content and shorelines
Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1	1.57-1.65	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2	2.11-2.29	Improved moisture content of soil and vegetation and thin cloud penetration
Band 8 - Panchromatic	.50-.68	15 meter resolution, sharper image definition
Band 9 – Cirrus	1.36 -1.38	Improved detection of cirrus cloud contamination
Band 10 – TIRS 1	10.60 – 11.19	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil moisture
Band 11 – TIRS 2	11.5-12.51	100 meter resolution, Improved thermal mapping and estimated soil moisture

Obrázek 37: Spektrální pásma TIRS a OLI [60]

Pro prokázání teorie ochlazovacího účinku byly vybrána čtyři různé dny, tak aby se významně lišila teplota vzduchu a zároveň aby byly k dispozici satelitní snímky bez oblačného překrytí. Pro zimní mrazivé období není k dispozici požadovaná kombinace faktorů. Vybrány byly čtyři dny představené v následující tabulce.

Tabulka 17: Vybraná vstupní data

Družice	Datum pořízení snímku	Čas pořízení snímku	Rozlišení pixelu (m)	Teplota vzduchu v 10:00 (°C)
Landsat-8	9.4.2020	9:51	30x30	15.3
Landsat-8	14.7.2020	9:51	30x30	20.4
Landsat-8	6.11.2021	9:51	30x30	6.5
Landsat-8	20.7.2022	9:57	30x30	29.8

6.3.1.2 Tvorba map povrchových teplot pomocí ArcGIS

Postup tvorby map povrchových teplot byl převzat z vědeckého článku **Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data** [61]. Mapy byly vytvářeny pomocí softwaru ArcGIS Pro s využitím nástroje Raster Calculator.

6.3.1.2.1 Záření na okraji atmosféry (TOA)

$$L\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i$$

$L\lambda$ =spektrální záře na okraji atmosféry; M_L =multiplikační faktor změny měřítka specifický pro pásmo; Q_{cal} = pásmo 10; A_L =aditivní faktor změny měřítka specifický pro pásmo; O_i =korekce pro pásmo 10

Hodnoty konstant jsou součástí datového souboru ve složce s metadaty.

6.3.1.2.2 Převod záření na jasovou teplotu (BT)

$$BT = \frac{K_2}{\ln \left[\left(\frac{K_1}{L\lambda} \right) + 1 \right]} - 273,15$$

BT =jasová teplota; K_1 a K_2 jsou konstanty pro převod specifické pro každé pásmo. Pro práci ve stupnicích Celsia je radiční teplota revidována přidáním absolutní nuly.

6.3.1.2.3 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)

$$NDVI = \frac{NIR \text{ (pásmo 5)} - R \text{ (pásmo 4)}}{NIR \text{ (pásmo 5)} + R \text{ (pásmo 4)}}$$

6.3.1.2.4 Podíl vegetace (Pv)

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

Hodnoty $NDVI_{max}$ a $NDVI_{min}$ jsou zobrazeny ve vytvořené vrstvě NDVI.

6.3.1.2.5 Povrchová emisivita (LSE=E)

$$E = m * P_v + n$$

$$m = e_v - e_s - (1 - e_s) * F * e_v$$

$$n = e_s + (1 - e_s) * F * e_v$$

Kde m a n jsou koeficienty emisivity, e_v vyjadřuje emisivitu vegetace, e_s emisivitu holé půdy, F tvarový faktor. Jako hodnota emisivity vegetace byla autory zvolena hodnota 0,99, kterou považují za průměrnou. Podobně byla zvolena hodnota emisivity holé půdy $e_s=0,973$ a hodnota tvarového faktoru $F=0,55$. Po dopočtení jsou hodnoty koeficientů emisivity $m=0,004$ a $n= 0,986$.

6.3.1.2.6 Povrchová teplota ($T_s=LST$)

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\frac{\lambda * BT}{c2} \right) * \ln(E) \right)}$$

$$c2 = \left(\frac{h * c}{k} \right)$$

Kde λ vyjadřuje vlnovou délku pásma senzoru (pro pásmo 10; $\lambda = 10,895$), h je Planckova konstanta $6,626 * 10^{-34}$ J*s, c je rychlost světla rovna $2,998 * 10^8$ m/s, k je Boltzmannova konstanta rovna $1,38 * 10^{-23}$ J/K. Po dopočtení vyjde hodnota $c2=1,438 * 10^{-2}$ mK.

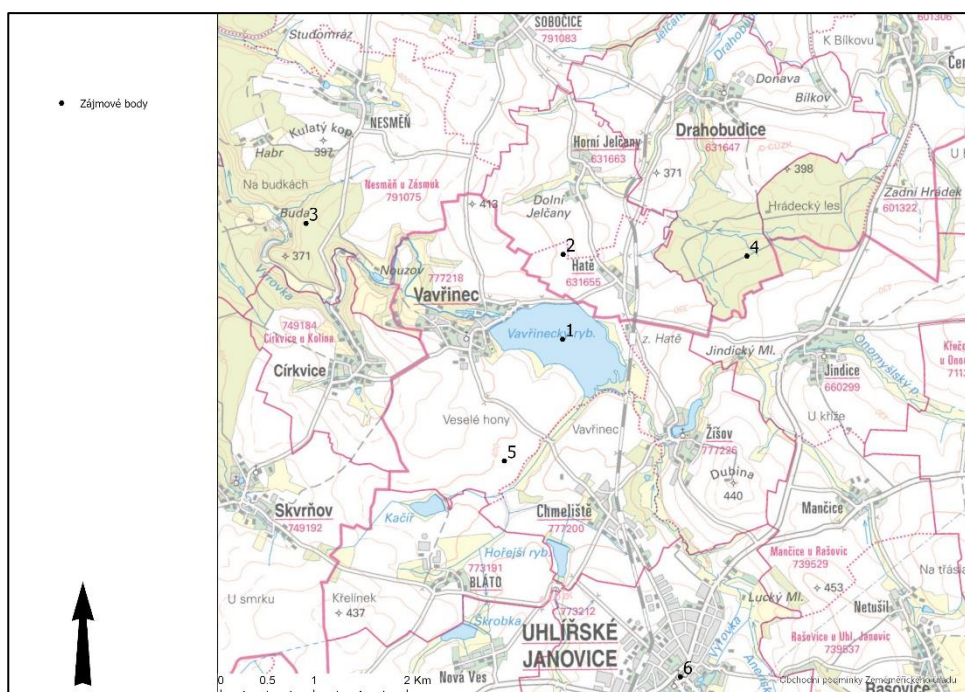
6.3.1.3 Ověření mikroklimatické funkce

Jak je známo z literatury, voda má velkou měrnou kapacitu. K ohřátí 1 kg vody o 1 °C při 15 °C je třeba dodat 4,186 kJ, k ohřátí téhož množství vzduchu pak 1,011 kJ. Tato vysoká měrná tepelná kapacita vody v porovnání se vzduchem znamená, že ohřáté vody v nádržích působí jako akumulátor tepla, které je opět uvolněno do okolního prostředí při ochlazení vzduchu. Voda se ohřívá v přírodě nejpomaleji na jaře, ale nejpomaleji vychládá na podzim. Voda má rovněž vysoké skupenské (latentní) teplo tuhnutí a varu. Pro přeměnu 1 kg vody v páru je nutno dodat 2255,5 kJ, pro přeměnu 1 kg ledu ve vodu je nutno dodat 333,7 kJ. Totéž množství tepelné energie se uvolní při kondenzaci, resp. zmrznutí 1 kg vody. Ochlazením vody o jeden stupeň tedy voda teoreticky ohřeje stejné hmotnostní množství vzduchu o cca 4 stupně, což je dáno podílem jejich měrných tepelných kapacit [62].

Na vytvořených mapách povrchových teplot bylo vybráno 6 zájmových bodů. Zájmové body (pixely), mimo plochu vodní hladiny, leží v různých vzdálenostech a na různých typech povrchů. Pro přehlednost práce jsou zde uvedeny mapy ukazující umístění bodů. Mapy povrchových teplot jsou součástí příloh na konci práce.

Tabulka 18: Zájmové body

Číslo bodu	Vzdálenost od břehu (m)	Typ povrchu	Povrchová teplota (°C)			
			9.4.2020	14.7.2020	6.11.2021	20.7.2022
1	0	Vodní hladina	10.9	17.0	2.2	21.1
2	500	Pole	26.5	18.1	5.1	26.7
3	2240	Les	14.4	16.8	3.2	25.9
4	1730	Les	14.2	16.8	3.4	26.1
5	1070	Pole	15.9	19.1	5.1	27.9
6	3170	Urbanizované území	22.4	28.0	5.4	33.7



Obrázek 38: Základní mapa ČR se zájmovými body



Obrázek 39: Ortofoto se zájmovými body

Z tabulky je patrné, že bod 1 ležící na vodní ploše je vždy nejchladnější. Dále je zřejmé, že rozdíly povrchových teplot mezi jednotlivými body se v různé roční období s různými teplotami vzduchu liší. Pro konkrétní body se teploty liší v závislosti na typu povrchu. 6.11.2021 je teplota všech bodů velmi blízká, největší teplotní rozdíly mezi body jsou 9.4.2020, kdy rozdíl mezi povrchovou teplotou vody a polem je přes 15 °C. Teplota polí je ovlivněna ročním obdobím, druhem plodiny nebo aktuálním druhem zemědělského obhospodaření.

Vzhledem k tomu, že DPZ byl prováděn před desátou hodinou dopoledne, teplotní rozdíly mezi vodou a ostatními povrchy nejsou maximální možné. I přes to je zřejmé, že voda je ohřívána pomaleji a její teplota je více stabilní. Tímto se potvrzuje teorie, dle které MVN plní mikroklimatickou funkci. Voda v nádrži odebírá více tepla než ostatní materiály a povrchy, tím dochází k většímu ochlazení vzduchu nad vodní hladinou, který se může pomoci větrného proudění dostávat do okolí.

Další varianta, která není zřejmá kvůli charakteristice snímků, je opačná. Teplo naakumulované ve vodě se může uvolňovat do okolí. K tomuto jevu bude docházet v okamžiku, kdy okolní teplota vzduchu klesne pod teplotu vody v nádrži. Tato situace může nastat hlavně v podzimním období, kdy je teplota vody stále vysoká, ale noční teploty vzduchu už klesají na nízké hodnoty. Příkladem by mohlo být 14.7.2020, kde povrchová teplota obou bodů v lesích je stále ještě nižší než teplota vodní hladiny.

Pro lepší popsání ochlazovacího, případně ohřívacího účinku MVN, je nutné mít k dispozici ideálně data z DPZ v dnech jdoucích po sobě, v různé časové okamžiky během jednoho dne a v různá roční období s různými teplotami vzduchu. Pro lepší výsledky může být vhodné znát teplotu vody v nádrži, relativní vlhkost vzduchu, případně další klimatické nebo meteorologické ukazatele.

6.3.2 Využití indexů odvozených ze satelitních dat

Další možnost využití dat z dálkového průzkumu Země představují snímky prostorových vrstev vybraných indexů. Konkrétně například NDVI (The Normalized Difference Vegetation Index), NDVI_{re} (Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), GLI (Green Chlorophyll Index). Využití těchto indexů spočívá v prověření hypotézy, podle které dojde v okolí MVN ke vzdušné hladině podzemní vody a ta bude více dostupná pro vegetaci v okolí nádrže a tím se zvýší vegetační indexy sledovaných ploch. K tomu je nutné, aby bylo delší období bez srážek a zároveň aby hladina podzemní vody nebyla příliš hluboko pod povrchem terénu [52].

6.4 Diskuse výsledků

Hlavním motivem této práce je zhodnotit možnosti využití MVN jako adaptačních opatření. Z provedené hydrologické bilance plyne několik poznání. MVN může být v úzké vazbě s podzemní vodou, může ovlivňovat úroveň její hladiny. Tento jev je ale podmíněn, velmi záleží na geologickém podloží okolí nádrže. MVN má schopnost akumulovat objemy vody, které lze využít k různým účelům. Hodnoty jednotlivých členů, které vstupují do bilance, jsou ovlivněny mnoha faktory. Velkou roli hraje umístění nádrže, ať už pohledu umístění v rámci České republiky, nebo umístění v dílčích povodích. Klíčovým faktorem jsou srážky, které tvoří primární část zdrojových členů. Jejich rozložení v čase a prostoru je různé, do budoucna je nutno počítat se změnami na základě klimatických scénářů. Změna klimatu může v budoucnu mít velký vliv také na výpar. Zkoumaná MVN Vavřinec je na poměry ČR velká, velikost výparu z volné hladiny zde nehraje významnou roli. Ztráty vlivem výparu v kombinaci s požadavky MZP pod hrází nádrží mohou být klíčovým faktorem, pročež některé, zejména menší, MVN nebudovat.

Z analýz MZP plyne, že MVN může zvyšovat zabezpečenost a zároveň velikost požadovaných odtoků. Nelze ale konstatovat, že to tak bude u každé nádrže. Samotná velikost MZP, velikost objemového prostoru nádrže, možnosti manipulace s výpustními zařízeními jsou natolik komplexní, na základě čehož tento fakt nelze generalizovat.

Mikroklimatická funkce MVN byla potvrzena. Avšak z dostupných zdrojů nelze vyvodit podrobné závěry, které by mohly být výstupem při větším množství kvalitnějších vstupních dat.

Celkově lze prohlásit, že MVN mohou mít pozitivní ale i negativní účinky na vodní bilanci krajiny. Mohou plnit různé funkce, z nichž některé mohou negativně ovlivňovat požadavky jiné. MVN mohou přispět k adaptaci na klimatickou změnu, je ale velmi důležité navrhované MVN posuzovat jednotlivě. Na základě složitosti a různých možností kombinace faktorů ovlivňujících provoz MVN nelze paušalizovat vhodnost MVN jako adaptačních opatření. Zejména v deficitních oblastech, kde se dá očekávat největší potřeba provádět adaptační opatření, mohou mít plánované MVN nejnižší

až negativní přínosy. Naopak v lokalitách, kde potřeba provádět adaptační opatření je nízká, by výstavba MVN mohla přinést výsledky, které ale v dané lokalitě nejsou potřeba.

7 Závěr

Malé vodní nádrže jsou jedním z mnoha diskutovaných adaptačních opatření na klimatickou změnu napříč vědeckou obcí. Plánovány a stavěny mohou být z důvodu plnění mnoha funkcí, které mohou být ve vzájemném rozporu. Větší významnosti mohou nabývat za určitých charakteristických stavů vodního režimu krajiny, jakým jsou například sucho nebo povodně.

Byla provedena hydrologická bilance MVN Vavřinec v období 2020-2022. Porovnáním rozdílu mezi vypočteným objemem z rovnice hydrologické bilance a objemem určeným převedením měřené úrovně pomocí charakteristických čar hladiny byl vyčíslen hledaný člen X . Tento člen reprezentuje velikost zásoby vody v nádrži, kterou nelze připsat známým vstupním faktorům. Potvrzena byla vazba členu X na proudění podzemní vody. Dále byla potvrzena provázanost mezi úrovní hladiny v nádrži a monitorovacích vrtech podzemní vody. Tento jev byl sledován zejména v nejbližších vrtech od břehů, s rostoucí vzdáleností tato vazba klesá. Diskutováno bylo mnoho dalších možných ovlivnění členu X , které se nepodařilo z různých důvodů kvantifikovat.

MVN Vavřinec zlepšuje zabezpečení MZP na odtoku pod hrází, zároveň v některých případech nadlepšuje jeho hodnotu. Potenciál nádrže v tomto ohledu není využit na maximum, primární funkcí nádrže je chov ryb a tato funkce výrazně ovlivňuje odtoky z nádrže. Simulace nástrojem MAVONA naznačují dostatek vody v povodí pro plné zabezpečení MZP pod hrází.

Pomocí dat z dálkového průzkumu země byl potvrzen mikroklimatický účinek MVN. Velká měrná kapacita vody způsobuje větší odejímá tepla z okolního vzduchu a tím dochází k jeho ochlazení v porovnání s jinými typy povrchů v okolí. Mapy povrchových teplot potvrzují teplotní stálost vody, která může za specifických podmínek namísto ochlazení, okolí ohřívat.

Z dostupných výsledků provedených analýz lze konstatovat, že malé vodní nádrže mohou být využity jako adaptační opatření při splnění konkrétních podmínek vázaných na funkce nádrže, lokalitu, povodí atd. Je ale velmi důležité provádět komplexní analýzy pro navrhované nádrže jednotlivě a nepaušalizovat závěry. Každá MVN má svá specifika, která nemusí platit pro nádrže jiné.

Použité zdroje:

[1] Adaptační strategie ČR. Online. Fakta o klimatu. 2020. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/adaptacni-strategie-cr>. [cit. 2023-09-29].

[2] Petr Štěpánek a kol. Očekávané klimatické podmínky v České republice část I. Změna základních parametrů [online]. Brno: Ústav výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, 2019 [cit. 2023-09-29]. ISBN 978-8-87902-28-8. Dostupné z: <https://www.czechglobe.cz/cs/vedci-z-czechglobe-predstavili-nejpresnejsi-model-klimatickych-zmen-pro-cesko/>

[3] BERAN, A., DAVID, V. a TYL, R. Přímý monitoring výparu z vodní hladiny Vavříneckého rybníka a jeho vliv na celkovou hydrologickou bilanci. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2023, roč. 65, č. 5, str. 4–8. ISSN 0322-8916.

[4] Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. MZP ČR [online] [cit. 2023-09-29]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/\\$FILE/OEOK_Narodni_adaptacni_strategie-aktualizace_20212610.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK_Narodni_adaptacni_strategie-aktualizace_20212610.pdf)

[5] MAGDALENA MRKVIČKOVÁ et al., Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2012. ISBN 978-80-87402-25-2.

[6] BALVÍN, P., TÁBOŘÍKOVÁ, V., PROCHÁZKA, J., HLOM, J. a ŠNEJDOVÁ, L. Adaptace měst a obcí na povodně a sucho. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2021, roč. 63, č. 2, str. 28–32. ISSN 0322-8916.

[7] HANEL, Martin; KAŠPÁREK, Ladislav a NESLÁDKOVÁ, Magdalena. Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2011. ISBN 978-80-87402-22-1.

[8] Starfos | Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/TITSMZP809>

[9] O projektu. Centrum Voda [online]. [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.centrum-voda.cz/o-projektu>

[10] O portálu. Sucho v krajině [online]. [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.suchovkrajine.cz/>

[11] Starfos | Řešení rybníků a malých vodních nádrží z hlediska možnosti dodržování MZP a bezpečnosti při povodních. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/projekty/SS03010230#project-main>

[12] Starfos | Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/projekty/DG16P02M036?query=rinaaacma4ea#project-main>

- [13] Starfos | Půdní a hydrologické sucho v měnícím se klimatu. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/projekty/GA16-16549S?query=32rqaackzqba#project-main>
- [14] Starfos | Potenciál rozvoje malých vodních ploch v krajině jako adaptačních opatření k eliminaci hydrometeorologických extrémů. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/projekty/QK21010328?query=vqfaaadapswa>
- [15] Starfos | Analýza adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu a urbanizace na vodní režim v oblasti vnější Prahy. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/projekty/UH0380>
- [16] PERUN - Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.perun-klima.cz/index.html#overview>
- [17] DZURÁKOVÁ, M., ŠTĚPÁNKOVÁ, P. a LEVITUS, V. Katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a jeho uplatnění ve webové mapové aplikaci pro veřejnost. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2018, roč. 60, č. 5, str. 6–11. ISSN 0322-8916. Dostupné z: https://www.suchovkrajine.cz/sites/default/files/vystup/p1_katalog_opatreni_0.pdf
- [18] DZURÁKOVÁ, M., OSIČKOVÁ, K., UHROVÁ, J., ROZKOŠNÝ, M., SMELÍK, L., NĚMEJCOVÁ, D., ZAHŘÁDKOVÁ, S., ŠTĚPÁNKOVÁ, P. a MACKŮ, J. Potenciál aplikace přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a zlepšení ekologického stavu vodních útvarů. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2017, roč. 59, č. 4, str. 25–32. ISSN 0322-8916.
- [19] BERAN, Adam, Adam VIZINA, Pavel TREML, Roman KOŽÍN a Josef V. DATEL. Metodický postup pro posouzení dopadů malých vodních nádrží na hydrologickou bilanci a vodní zdroje [online]. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://suchovkrajine.cz/vystupy/male-vodni-nadrze>
- [20] The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. Florence Habets, Jérôme Molénat et al. The Science of the total environment, 643, 12 2018.
- [21] ROZKOŠNÝ, M., ADÁMEK, Z., HUDCOVÁ, H., SEDLÁČEK, P., PAVELKOVÁ, R., DAVID, V. a DZURÁKOVÁ, M. Posouzení vztahu mezi kvalitou vody a funkcemi malých vodních nádrží. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2016, roč. 58, č. 1, str. 20–27. ISSN 0322-8916.
- [22] BERAN, Adam, Roman KOŽÍN a Irina GEORGIEVOVÁ. Manuál k aplikaci MAVONA. In: MAVONA [online]. 2022 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: https://shiny.vuv.cz/mvn/basic_version.Rmd#section-o-projektu
- [23] Bilan – Hydrologický model BILAN [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <http://bilan.vuv.cz/bilan/modely-pro-vypocet-hydrologivke-a-vodohospodarske-bilance/hydrologicky-model-bilan/>

- [24] Klimatická změna a vodní režim krajiny - Ekocentrum Koniklec [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <https://www.ekocentrumkoniklec.cz/klimaticka-zmena-a-vodni-rezim-krajiny/>
- [25] Sucho. Elektronický meteorologický slovník [online]. [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/fulltext/sucho>
- [26] TRNKA, Pavel, 2010. Možné důsledky déletrvajícího sucha v naší krajině a ve světě [online] aktualizováno 2010 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xvlcek1/rrc/sucho/TRNKA_1.pdf
- [27] Sucho. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice_sucha.html
- [28] Sucho socioekonomické. Elektronický meteorologický slovník [online]. [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3714>
- [29] DURČÁK, M., STRAKA, M., ZAHŘÁDKOVÁ, S., POLÁŠEK, M., NĚMEJCOVÁ, D., TUŠIL, P. a ŠAJER, J. Zhodnocení dopadů sucha v útvarech povrchových vod na vodní a vodu vázané organismy. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2017, roč. 59, č. 4, str. 33–36. ISSN 0322-8916.
- [30] BRÁZDIL, Rudolf a TRNKA, Miroslav. Historie počasí a podnebí v Českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Brno: Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, 2015. ISBN 978-80-87902-11-0.
- [31] Regionalizace území ČR podle míry ohrožení suchem [online]. [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=1da7a37afa3b47b391ee568e08ea6cab>
- [32] HRABÁNKOVÁ, Anna et al. Výzkumná zpráva: Projekt SS02030027 WP3 [online]. 2023
- [33] 254/2001 Sb. Vodní zákon. [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>
- [34] Věstník 5/98 - Metodický pokyn odboru ochrany vod MŽP ke stanovení hodnot minimálních zůstatkových průtoků ve vodních tocích [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/BB978B5BAEDF46C0C1256FC8003F1EB8/\\$file/metod.html](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/BB978B5BAEDF46C0C1256FC8003F1EB8/$file/metod.html)
- [35] BALVÍN, P., MRKVIČKOVÁ M. (2011): Stanovení minimálních zůstatkových průtoků, VTEI (Vodohospodářský technicko-ekonomické informace), ročník 53, vydání 4/2011, 24s: 1-3.
- [36] BALVÍN, P. a VIZINA, A. Stanovení hodnot minimálních zůstatkových průtoků v podmínkách ČR. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2018, roč. 60, č. 2, str. 8–13. ISSN 0322-8916.

- [37] Nařízení vlády ke způsobu a kritériím stanovení minimálního zůstatkového průtoku
Ing Pavel Balvín, Ing Adam Vizina et al. [cit. 2023-10-15]. Dostupné z:
https://www.povis.cz/pre/2016_vodopravni_urady/09_Narizeni_vlady_ke_zpusobu_a_kriteriim_stanoveni_minimalniho_zustatkoveho_prutoku.pdf
- [38] Vyhláška č. 431/2001 Sb. [cit. 2023-10-15]. Dostupné z:
<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-431#p1>
- [39] ŠRÁČEK, Ondřej a KUCHOVSKÝ, Tomáš. Základy hydrogeologie. Brno: Masarykova univerzita, 2003. ISBN 80-210-3146-8.
- [40] TYL, R., DAVID, V. a BERAN, A. Hydrologická bilance vybraných povodí ČR se zaměřením na suché období 2015–2019. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2021, roč. 63, č. 3, str. 20–27. ISSN 0322-8916.
- [41] KEMEL, Miroslav. Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01456-8.
- [42] EH, Chap. 01, Reading, Engineering Hydrology, Principles and Practices, Second Edition, Victor Miguel Ponce, San Diego State University [cit. 2023-10-17]. Dostupné z:
https://ponce.sdsu.edu/enghydro/engineering_hydrology_01.php
- [43] ŠILAR, Jan. Hydrologie v životním prostředí. Phare. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 80-7078-361-3.
- [44] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a FRAJER, Jindřich. Základy fyzické geografie 1: Hydrologie. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3843-6.
- [45] Odtokový proces. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2023-10-29]. Dostupné z:
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_1.4.0.htm
- [46] Rybníky a stavby na drobných vodních tocích (RSDT) Václav David [online]. [cit. 2023-10-29]. Dostupné z:
https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/RSDT/Predn_VD_04_VYpust1.pdf
- [47] Požeráky – KORA – VODOSTAVING s.r.o. [online]. [cit. 2023-10-29]. Dostupné z:
https://www.kora-vodostaving.cz/?page_id=158
- [48] Portál ČHMÚ: Historická data : Počasí : Mapy stanic [online]. [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mapy-stanic>
- [49] KAŠPÁREK, L. a PELÁKOVÁ, M. Budou průtoky ve vodních tocích v létě k horizontu roku 2060 o polovinu menší. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2023, roč. 65, č. 5, str. 34–38. ISSN 0322-8916.
- [50] ŠUHÁJKOVÁ, P., KOŽÍN, R., BERAN, A., MELIŠOVÁ, E., VIZINA, A. a HANEL, M. Aktualizace empirických vztahů pro výpočet výparu z vodní hladiny na základě

pozorování výparu ve stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2019, roč. 61, č. 4, str. 4–11. ISSN 0322-8916.

[51] DAVID, V., BERAN, A. a TYL, R. Výzkum vlivu rybníků na hydrologický režim. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2020, roč. 62, č. 1, str. 56–57. ISSN 0322-8916.

[52] Shrnutí posouzení vlivu malé vodní nádrže na složky hydrologické bilance malého povodí. Dostupné z: <https://suchovkrajine.cz/vystupy/male-vodni-nadrze>

[53] Adam Beran, Stanislav Horáček, Martin Hanel ZJEDNODUŠENÍ METODY VÝPOČTU POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE V NOVÉ VERZI MODELU BILAN Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2011, roč. 53, č.3

[54] Petr Máca, Adam Vizina et al. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ MODELU BILAN METODOU SCDE Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2013, roč. 55, č.4

[55] VOTRUBA, Ladislav a BROŽA, Vojtěch. Hospodaření s vodou v nádržích: vysokoškolská příručka. Řada stavební literatury. Praha: SNTL, 1966.

[56] MAPY.CZ. Online. Seznam.cz, 2023. <https://mapy.cz/zakladni?q=vav%C5%99ineck%C3%BD%20rybn%C3%ADk&source=base&id=2030839&ds=1&x=15.0466494&y=49.9125922&z=15> [cit. 2023-10-12].

[57] Vavřínecký rybník. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vav%C5%99ineck%C3%BD_rybn%C3%ADk. [cit. 2023-10-12].

[58] VD Vavřínecký rybník [cit. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://www.pla.cz/portal/isvs/uvu/cz/mereni.aspx?apl=uvu&id=9926&ob=la>

[59] MARTIN PILAŘ STUDIE TEPLOTNÍHO EFEKTU VODNÍCH ÚTVARŮ V MĚSTSKÝCH OSTROVECH TEPLA PRAHA 2022, [online]. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/102436>

[60] Landsat 8 OLI and TIRS and their uses | U.S. Geological Survey [online] [vid. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-oli-and-tirs-and-their-uses>

[61] AVDAN, Ugur a Gordana JOVANOVSKA, 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: doi:10.1155/2016/1480307

[62] Tepelné vlastnosti vody [online]. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/tep_vlast.htm

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Schéma modelu hydrologické bilance BILAN [23]	21
Obrázek 2: Regionalizace území ČR podle míry ohrožení suchem [31]	24
Obrázek 3: Deficitní oblasti ČR [32]	25
Obrázek 4: Regionalizace ČR dle K_{99} [36]	28
Obrázek 5: Vstupní členy hydrologické bilance [39]	31
Obrázek 6: Jednotlivé složky odtoku [45]	32
Obrázek 7: Spodní výpust-požerák [47]	33
Obrázek 8: Korekční koeficient $F(\lambda)$ pro Thornthwaitův vzorec	35
Obrázek 9: Nomogram pro orientační stanovení průměrné roční výšky výparu uvedený v normě ČSN 75 2410	38
Obrázek 10: Výběr vzorců a jejich hodnocení na základě MRE a KGE [50]	41
Obrázek 11: Maximální a minimální hodnoty veličin naměřené ve stanici Hlasivo (měsíční průměry)	42
Obrázek 12: Vavřínecký rybník [56]	45
Obrázek 13: Plocha povodí rybníku Vavřinec [ČÚZK Základní mapy]	46
Obrázek 14: Umístění monitorovacích zařízení	47
Obrázek 15: Monitoring přítoku ŽÍŠOV 1	47
Obrázek 16: Přítok Žišov 2	48
Obrázek 17: Průběh jednotlivých přítoků	48
Obrázek 18: Průběh celkového přítoku do rybníku Vavřinec	49
Obrázek 19: Odtok z Vavříneckého rybníka	49
Obrázek 20: Monitoring odtoku	50
Obrázek 21: Průměrné roční srážkové úhrny	51
Obrázek 22: Měsíční srážkové úhrny	52
Obrázek 23: Denní objem srážek na hladinu MVN Vavřinec	53
Obrázek 24: Plovoucí výparoměr při přepravě (Foto Ing. Petr Sklenář Ph.D.)	54
Obrázek 25: Průběh výparu z volné hladiny	54
Obrázek 26: Porovnání objemu výparu a přítoku	55
Obrázek 27: Charakteristické čáry MVN Vavřinec	56
Obrázek 28: Průběh hladiny a plochy MVN Vavřinec	61
Obrázek 29: Umístění monitorovacích vrtů [52]	62
Obrázek 30: Průběh hladin v monitorovacích vrtech	63
Obrázek 31: Detailní schéma odtoku z nádrže	66
Obrázek 32: Průběh odtoku a požadovaného MZP	67
Obrázek 33: Porovnávání požadovaného MZP a velikosti výparu	69
Obrázek 34: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	71
Obrázek 35: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	71
Obrázek 36: Průběh jednotlivých veličin v simulovaném období pro $MZP=0,165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	72
Obrázek 37: Spektrální pásma TIRS a OLI [60]	74

Obrázek 38: Základní mapa ČR se zájmovými body.....	76
Obrázek 39: Ortofoto se zájmovými body	77

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Stanovení směrné hodnoty minimálního zůstatkového průtoku dle současné metodiky [34]	26
Tabulka 2: Orientační rozdělení ročního výparu na jednotlivé měsíce dle ČSN 75 241037	
Tabulka 3: Srážkové úhrny v jednotlivých měsících	51
Tabulka 4: Porovnání výparných a srážkových výšek ve sledovaném období.....	55
Tabulka 5: Tabelární podoba charakteristických čar MVN Vavřinec	56
Tabulka 6: Rozdělení zátopové čáry	57
Tabulka 7: Rovnice popisující čáru zátopové plochy.....	57
Tabulka 8: Kontrolní použití rovnic popisujících čáru zátopových ploch.....	58
Tabulka 9: Rozdělení objemové čáry	59
Tabulka 10: Rovnice popisující čáru objemu	59
Tabulka 11: Kontrolní použití rovnic popisujících objemovou čáru.....	60
Tabulka 12: Seznam monitorovacích vrtů podzemní vody	62
Tabulka 13: Korelační matice hledaného členu X	64
Tabulka 14: Korelační matice úrovní hladin	65
Tabulka 15: Přehledová tabulka jednotlivých případů	68
Tabulka 16: Časové úseky neplnění požadavku MZP dle současné metodiky.....	68
Tabulka 17: Vybraná vstupní data.....	74
Tabulka 18: Zájmové body	76

Seznam příloh:

Příloha A