



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## NÁVRH VYBRANÝCH STROJNĚ TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ ČOV SE ZAMĚŘENÍM NA ZLEPŠENÍ HYDRAULICKÝCH ÚČINNOSTÍ

DESIGN OF SELECTED PARTS OF MACHINERY IN WWTP FOCUSED ON IMPROVING  
HYDRAULIC EFFICIENCY

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vojtěch Zejda

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2020



## ABSTRAKT

Proces čištění odpadních vod má zásadní vliv na kvalitu životního prostředí a představuje také potenciální alternativní zdroj potřebných a nedostatkových surovin, především fosforu. Výzkum technologie pro čištění odpadní vody je stále aktuálnější téma a přináší mnoho inovativních poznatků, které by měly být postupně implementovány do stávajících provozů. To však obnáší zvýšené investiční a často i provozní výdaje. Právě z tohoto důvodu se nyní stupňuje tlak na revizi energetické náročnosti a hydraulické účinnosti instalovaného strojně technologického zařízení, neboť správná optimalizace jejich provozních parametrů přináší významné úspory, které lze využít pro další investice.

V této práci je řešena problematika správného hodnocení instalovaného strojně-technologického zařízení, která souvisí s obtížným výběrem dotčených parametrů a adekvátního posouzení jejich významu. Technologie čištění odpadní vody je značně specifická pro různorodost skladby strojně-technologických zařízení a sledování nesprávných parametrů může vést k mylnému hodnocení účinnosti jednotlivých zařízení a nevhodným návrhům jejich inovací. Pro eliminaci těchto rizik je v práci navržen **analytický postup** pro výběr a hodnocení parametrů, jehož použití je demonstrováno na šesti strojně-technologických zařízeních. Pro ověření závěrů plynoucích z navrhovaného postupu byl proveden **modelový návrh zařízení**, na kterém byl posuzován vliv jednotlivých parametrů. Díky dostupným datům mohl být navržený postup validován a zpřesněn. Potřebná data pro provedení návrhu byla zajištěna experimentálním výzkumem a rozsáhlým testováním ve zkušebnách. Získané výsledky potvrdily přínos i praktickou použitelnost navrženého postupu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Čistírna odpadních vod, hydraulická účinnost, hodnocení parametrů, metodika, mamutová čerpadla, adsorpce fosforu, míchání vyhnívacích nádrží

## ABSTRACT

The wastewater treatment process is one of the most important processes which contributes to the protection of the environment. This process can also potentially recover necessary and scarce raw materials, such as phosphorus. Research of the wastewater treatment technology is an increasingly relevant topic and more innovative knowledge should be gradually implemented into existing plants. However, the implementation of such technology involves increased investment and often operating costs. This is, why there is a growing interest in improving the energy intensity and hydraulic efficiency of the installed wastewater plant machinery. The optimization of operating parameters in such machinery can also bring significant savings, which can be potentially re-invested into other technologies.

This work deals with the issue of proper evaluation of installed machinery for the selection of operating parameters and assessment of their significance. As the challenge, wastewater treatment technology is very sensitive towards the combination of technological equipment and incorrect operational parameters can lead to erroneous evaluation of the efficiency of individual equipment or inappropriate engineering proposals. To eliminate these risks, an **analytical procedure** for the selection and evaluation of parameters is proposed in this work. This procedure is demonstrated on six types of equipment. To verify the conclusions of the proposed procedure, a **model design of the equipment** was performed, in which the influence of individual parameters was concisely assessed. By using the data, the proposed procedure could be validated more specifically. In this work, the necessary data for the design was obtained by experimental research and extensive testing. The results confirm the practical applicability of the proposed procedure.

## KEYWORDS

Wastewater Treatment Plants, Hydraulic Efficiency, Evaluation of Parameters, Evaluation Methodology, Air-lift Pumps, Phosphorus Adsorption, Mixing of Anaerobic Digesters.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

ZEJDA, Vojtěch. *Návrh vybraných strojně technologických zařízení ČOV se zaměřením na zlepšení hydraulických účinností*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/130080>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená dizertační práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 30. září 2020

.....

podpis autora





## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému školiteli doc. Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za vedení a cenné připomínky, které přispěly k dokončení mé dizertační práce. Děkuji také svým odborným školitelům, že mi byli neustále nápomocni při experimentální činnosti, a také prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc. za technické a organizační zabezpečení mého studia. V neposlední řadě děkuji mé rodině za poskytovanou podporu, kterou mi pomáhali po celou dobu studia.



**OBSAH**

1	Úvod .....	1
2	Motivace inovování provozů ČOV .....	3
2.1	Zvyšování výkonnosti technologie ČOV .....	3
2.2	Zvyšování účinnosti technologie ČOV .....	7
3	Cíle dizertační práce a použité metody .....	9
4	Strojně-technologické zařízení ČOV .....	11
4.1	Mechanický stupeň ČOV .....	13
4.2	Biologický stupeň ČOV .....	16
4.3	Kalové hospodářství .....	18
4.4	Energetická náročnost strojních zařízení .....	20
5	Hodnocení účinnosti strojních zařízení .....	23
5.1	Problematika výběru klíčových parametrů .....	23
5.2	Výběr strojních zařízení ČOV a řešení jejich parametrů .....	24
5.2.1	Čerpací stanice na přítoku .....	24
5.2.2	Mamutová čerpadla .....	27
5.2.3	Usazovací nádrže .....	30
5.2.4	Aerace aktivačních nádrží .....	31
5.2.5	Míchání vyhnívací nádrže .....	33
5.2.6	Adsorpce fosforu .....	36
5.3	Hodnocení parametrů .....	38
5.3.1	Návrh analytického postupu výběru a hodnocení parametrů (metodika) .....	38
5.3.2	Analýza vybraných zařízení .....	40
5.3.3	Zhodnocení výsledků analýzy .....	44
6	Ověření výsledků analýzy a její upřesnění .....	47
6.1	Výběr zařízení pro experimentální měření .....	47
6.2	Návrh experimentů .....	48
6.2.1	Mamutová čerpadla pro čerpání písku .....	48
6.2.2	Adsorpční záchyt fosforu .....	49
7	Příprava a provedení experimentů .....	51
7.1	Měření čerpacích charakteristik mamutových čerpadel .....	51

---

7.1.1	Stanovení měřicího plánu .....	51
7.1.2	Návrh měřicího standu.....	52
7.1.3	Průběh měření.....	54
7.1.4	Stanovení čerpacích charakteristik .....	57
7.2	Získání sorpčních charakteristik .....	58
7.2.1	Plán měření .....	58
7.2.2	Zajištění technického vybavení .....	59
7.2.3	Průběh měření a vyhodnocení získaných dat .....	61
8	Validace výsledků analýzy se získanými daty .....	67
8.1	Mamutová čerpadla – vyhodnocení vlivu parametrů.....	67
8.1.1	Stanovení maximální efektivity.....	67
8.1.2	Vliv jednotlivých parametrů na maximální efektivitu.....	71
8.2	Adsorpční záchyt fosforu – vyhodnocení vlivu parametrů.....	73
8.2.1	Návrh adsorpční jednotky pro ČOV .....	73
8.2.2	Sledování vlivu jednotlivých parametrů.....	75
8.2.3	Zpřesnění analýzy adsorpce fosforu .....	78
9	Modelový návrh zařízení a posouzení přínosu .....	81
9.1	Návrh inovace mamutových čerpadel.....	81
9.2	Inovativní návrh adsorpční jednotky .....	82
10	Návrh dalšího výzkumu – míchání vyhnívacích nádrží .....	85
10.1	Problematika míchání vyhnívacích nádrží .....	85
10.2	Model vyhnívací nádrže .....	86
10.3	Validace navržené metody pomocí vizualizace .....	91
11	Závěr.....	95
	Použitá literatura.....	97
	Seznam použitých symbolů .....	111
	Publikační činnost autora .....	113

# 1 ÚVOD

Proces čištění odpadních vod se stal nepostradatelnou součástí dnešního životního standardu ve vyspělých zemích. Jeho vývoj započal už v 18. století v městských aglomeracích, kde masivní kontaminace zdrojů pitné vody a tím i šíření nemocí přiměla tamní obyvatele k zodpovědnějšímu nakládání s odpadními vodami [1]. Kvalita povrchových vod je odrazem kvality životního prostředí a úroveň čištění odpadních vod je ukazatelem vyspělosti obyvatelstva [2].

S rostoucím nedostatkem vody v krajině přestává být problematika čištění odpadních vod pouze otázkou ekologie, ale stává se zásadní pro udržitelnost současných životních podmínek [3]. Pro zachování tzv. vodního blahobytu je nezbytné zacházet s vodou maximálně šetrně, což ideálně znamená čistit všechny znečištěné odpadní vody před jejich vypuštěním do přírodního prostředí. Na tuto skutečnost už v minulosti poukázala směrnice Rady Evropské komise č. 91/271/EHS, která nařizovala všem členským státům výstavbu kanalizace a čištění odpadních vod pro všechny aglomerace velikostí nad 2000 EO [4]. V České republice (dále jen ČR) je v provozu 2731 čistíren odpadních vod (dále jen ČOV), které v roce 2019 zpracovaly denně průměrně 2171,6 tis. m<sup>3</sup> odpadní vody, což představovalo přibližně 97,7 % všech odpadních vod [5]. Ačkoliv lze předpokládat pokračování trendu zvyšování podílu čištěné odpadní vody, je prostor k výstavbě nových provozů ČOV v ČR téměř vyčerpán. Těžištěm dalšího rozvoje tak budou návrhy inovací stávajících provozů.

U provozovaných ČOV se zvyšují požadavky na kvalitu vyčištěné vody a ekonomickou stránku celého procesu, z čehož plynou nemalé nároky na strojně-technologické zařízení ČOV. Pro dosažení požadovaných parametrů se musí mnohdy přikročit k jeho inovaci nebo k výměně některých procesních jednotek, což pro provozovatele představuje značné výdaje. Z toho důvodu se málokdy inovuje celý provoz čistírny, ale identifikují se problémová zařízení, která se poté inovují [6].

Při návrhu vlastní inovace je nutné zvážit všechny technické aspekty a dobře definovat požadované hodnoty parametrů, kterých se má inovací dosáhnout. To však není jednoduché, neboť technologie čištění odpadní vody představuje komplexní proces zahrnující celou škálu mechanických, biologických a chemických dějů, které jsou spolu značně provázány [7]. Zkušenosti z praxe ukazují, že adekvátní posouzení všech dotčených parametrů při návrhu strojních zařízení ČOV bývá problematické a může vést i k nezdařeným inovacím, jejichž cíle byly naplněny až po opakovaných úpravách [8], [9]. Samotné posuzování skutečného stavu konkrétních provozů ČOV není snadné, neboť neexistuje univerzální nástroj pro komplexní hodnocení účinnosti [10].

Pro správné posouzení a návrh inovace je tak potřebná důkladná znalost řešených zařízení a jejich vazeb na celkovou technologii ČOV. Jedině znalostí všech dotčených parametrů a jejich adekvátním zohledněním při návrhu strojního zařízení lze inovovat technologie ČOV s maximálním přínosem a minimálními investičními náklady. V této práci je předložen návrh vlastní metodiky pro výběr a hodnocení parametrů strojně-technologických zařízení ČOV,

## ÚVOD

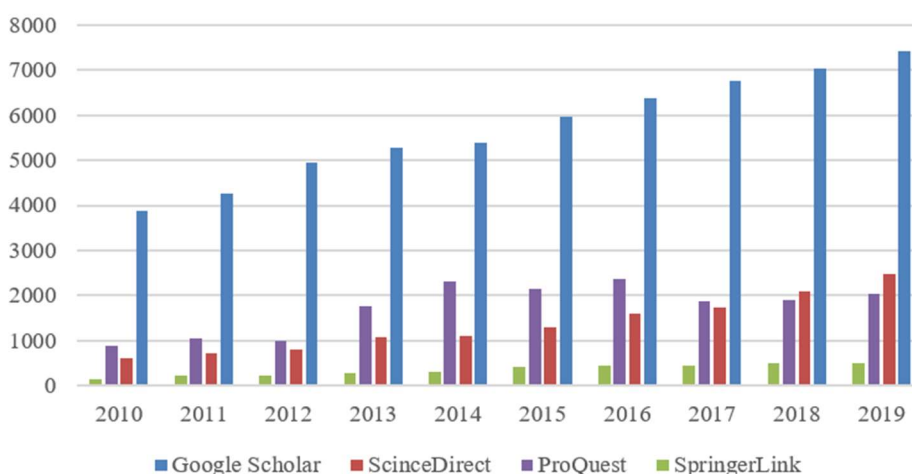
---

Analytický postup metodiky byl experimentálně validován na dvou vybraných zařízeních a následně upřesněn.

## 2 MOTIVACE INOVOVÁNÍ PROVOZŮ ČOV

V poslední době výrazně roste význam zvyšování účinnosti průmyslových procesů, což je zapříčiněno více důvody, jejichž společným jmenovatelem je všeobecný trend společnosti více revidovat svou činnost a její dopady. Tento trend vyústil v nový způsob hodnocení jednotlivých procesů, ve kterém už je nestačí posuzovat pouze podle jejich produktivity, ale hlavně podle jejich dlouhodobé udržitelnosti. Zformováním získaných poznatků z tohoto přístupu byl vytvořen koncept tzv. cirkulární ekonomiky [11].

Jak dokládá Graf 1, narůstající význam ČOV se odráží i v narůstajícím zájmu vědecké obce, která zkoumá proces čištění odpadní vody z mnoha pohledů. Jak už bylo zmíněno, technologie ČOV v sobě zahrnuje poznatky z mnoha vědních oborů, a tak lze na stejný proces nahlížet různou perspektivou.



Graf 1 Vývoj počtu publikovaných vědeckých prací na téma čistírny odpadních vod v různých vědeckých databázích.

V odborné literatuře se v rámci různorodých výzkumných cílů prolínají dvě zásadní motivace:

1. zvyšování výkonnosti technologie,
2. zvyšování účinnosti technologie.

První cíl vede k novým a výkonnějším strojním zařízením, která umožňují dosáhnout vyšší kvality vyčištěné vody i dokonalejšího zpracování zachycených látek. Sledování tohoto cíle však vede k vyšší energetické náročnosti celé technologie, což je v přímém rozporu s druhým výzkumným cílem. Jeho snahou je dosažení požadovaných parametrů technologie s co nejnižšími provozními náklady. Pro správný návrh zamýšlených inovací je třeba nalézt přijatelnou rovnováhu.

### 2.1 ZVYŠOVÁNÍ VÝKONNOSTI TECHNOLOGIE ČOV

Základním kritériem pro hodnocení provozů ČOV je právě jejich schopnost odstranit z vody látky, které jsou pro životní prostředí nežádoucí a škodlivé [2]. Tab. 1 uvádí výčet základních

znečišťujících látek obsažených v odpadní vodě. Jejich množství se stanovuje měřením specifických parametrů, které zahrnují danou skupinu znečišťujících látek. Přípustné hodnoty těchto souhrnných parametrů jsou stanoveny legislativně (v ČR nařízení vlády č. 401/2015 Sb.) podle velikosti ČOV (viz Tab. 2). Velikost ČOV je zde posuzována podle tzv. ekvivalentních obyvatel (dále jen EO), což je výpočetní převod skutečného znečištění na přítoku do čistírny [12].

Tab. 1 Výčet znečišťujících látek v odpadní vodě. Převzato z [13].

Znečišťující látky		Příklady
Rozpuštěné - organické	biologicky rozložitelné	cukry, mastné kys.
	biologicky nerozložitelné	azobarviva
Rozpuštěné - anorganické		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Nerozpuštěné - organické	biologicky rozložitelné	škrob, bakterie
	biologicky nerozložitelné	papír, plasty
	usaditelné	celulóza
	neusaditelné koloidní	bakterie
	neusaditelné plovoucí	papír
Nerozpuštěné - anorganické	usaditelné	písek, hlína
	neusaditelné	brusný prach

Tab. 2 Přípustné množství znečišťujících látek na odtoku ČOV [mg/l] [12].

Kategorie ČOV (EO) <sup>1)</sup>	CHSK <sub>Cr</sub>		BSK <sub>5</sub>		NL		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N <sub>celk</sub> (2),8)		P <sub>celk</sub>	
	p <sup>1)</sup>	m <sup>1)</sup>	p <sup>1)</sup>	m <sup>1)</sup>	p <sup>1)</sup>	m <sup>1)</sup>	průměr <sup>1)</sup>	m <sup>1)</sup> , <sup>2)</sup>	průměr <sup>1)</sup>	m <sup>1)</sup> , <sup>2)</sup>	průměr <sup>2)</sup>	m <sup>1)</sup>
< 500 <sup>1)</sup>	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500 - 2 000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2 001 - 10 000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3 <sup>2)</sup>	8 <sup>2)</sup>
10 001 - 100 000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100 000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

V odpadní vodě se však mohou vyskytovat i jiné látky, které nejsou běžně prováděným měřením zjistitelné. Ve druhé polovině minulého století byly v Anglii zjištěny podivné deformace pohlaví u ryb. Řadou provedených výzkumů se zjistilo, že k těmto deformacím dochází až v průběhu života ryb důsledkem kontaminace vody účinnými látkami z hormonálních antikoncepcí [14]. Na základě těchto poznatků se začaly zkoumat obsahy různých léčiv ve vodních tocích a možné dopady na životní prostředí.

Obsah léčiv v odpadní vodě a zkoumání vhodné technologie pro jejich odstranění je nyní velkým tématem. Bylo provedeno mnoho výzkumů na přítomnost farmaceutických látek v povrchové i podzemní vodě. Na území ČR provedl Státní zdravotní ústav v letech 2009 až



2011 měření obsahu pěti vybraných léčivých látek, které představovaly nejpravděpodobnější indikaci znečištění. Výsledkem výzkumu bylo, že v používaných zdrojích pitné vody se tyto látky většinou nevyskytují, popř. se objevují ve stopovém množství, představující řádově tisíce limitu přípustné denní dávky [15]. Na tento výzkum navázal státní podnik Povodí Vltavy, který v letech 2011 až 2014 provedl měření vzorků odebraných na odtocích z ČOV a povrchových vod na větší škálu léčiv. Výsledky měření prokázaly plošnou přítomnost léčiv ve všech povrchových vodách a to i ve významných koncentracích [16]. Obdobné studie, jako u nás se prováděly v mnoha dalších zemích prakticky po celém světě. Jako příklad lze uvést výzkum v povodí řeky Ebry ve Španělsku, kde se sledoval jak výskyt léčiv v samotné řece, tak se i hodnotila míra kontaminace z odtoků ČOV a jejich samotná účinnost [17]. Ve světě pak stojí za pozornost provedené měření v Indii u města Haidarábád, ve kterém se nachází přibližně 90 farmaceutických továren. Měření se vztahovalo na městskou ČOV a jí ovlivněné povodí, dále na neovlivněná jezera u města a několik studní. Naměřené hodnoty prokázaly kontaminaci všech odebraných vzorků a vysoké hodnoty naměřené v ČOV byly dokonce označeny jako bezprecedentní [18].

Na prokázanou přítomnost léčiv v povrchových vodách navazovaly další výzkumy, které sledovaly dopady na životní prostředí. Jak již bylo zmíněno, jako první byly pozorovány deformace pohlavních orgánů ryb [14]. V současné době se kromě jiného zkoumají jak možné dopady různých látek, jako třeba nesteroidních léčiv [19], tak i reakce různých orgánů ryb, jako třeba jater [20] a mozku [21]. Všechny průzkumy docházejí ke stejnému závěru, a to že problematika přítomnosti léčiv v odpadní vodě se musí řešit co nejrychleji.

Obsah léčiv v povrchových vodách je značný a dopady na životní prostředí jsou markantní. Pro lidské zdraví není situace ještě natolik závažná, aby se nemohly využívat povrchové vody jako zdroj pro úpravny pitné vody, avšak stále déletrvající období sucha, které způsobuje vysychání podzemních zdrojů pitné vody, predikuje nutností většího využívání povrchových zdrojů vody, což by spolu se zvyšující se kontaminací léčiv mohlo způsobit závažné problémy. Vliv současné standardní technologie ČOV na přítomnost léčiv v odpadní vodě je považován celkově za pozitivní. Už v průběhu monitorování vody se při vyhodnocování dat zjistily zvýšené koncentrace léčiv v dobách odstávek ČOV, což poukazovalo na pozitivní přínos současné technologie [22]. Další výzkumy sledující účinnost ČOV tento závěr potvrdily, avšak zároveň se při nich ukázalo, že některá léčiva (jako jsou např. antibiotika, hormonální přípravky, léky na epilepsii apod.) nedokáží stávající technologie ČOV odstranit v dostatečné míře [23], [24], [25]. Ukázalo se také, že biologické látky obsažené v léčivech mohou spolu reagovat a modifikovat se v nové sloučeniny, které mohou být pro životní prostředí více nebezpečné než jednotlivé komponenty, ze kterých vznikly [26]. Ze studií vyplývá závěr, že jedno z možných řešení odstraňování farmaceutik z odpadních vod je modifikace stávající technologie ČOV doplňujícím zařízením, které bude schopno zachytit i takové látky, které jsou vůči biologickému stupni imunní [27].

Problematika léčiv odhalila slabinu současného systému posuzování kvality odpadní vody a ukázala, že se objevují nové látky, které představují hrozbu pro životní prostředí. Tento fakt dal vzniknout tzv. seznamu látek vzbuzujících mimořádné obavy, který vede a průběžně aktualizuje agentura Evropské unie ECHA (European Chemicals Agency). Díky němu by se

mělo zabránit dosažení takových koncentrací nebezpečných látek, ve kterých by mohly poznamenat životní prostředí, jako se to stalo u farmaceutik [28].

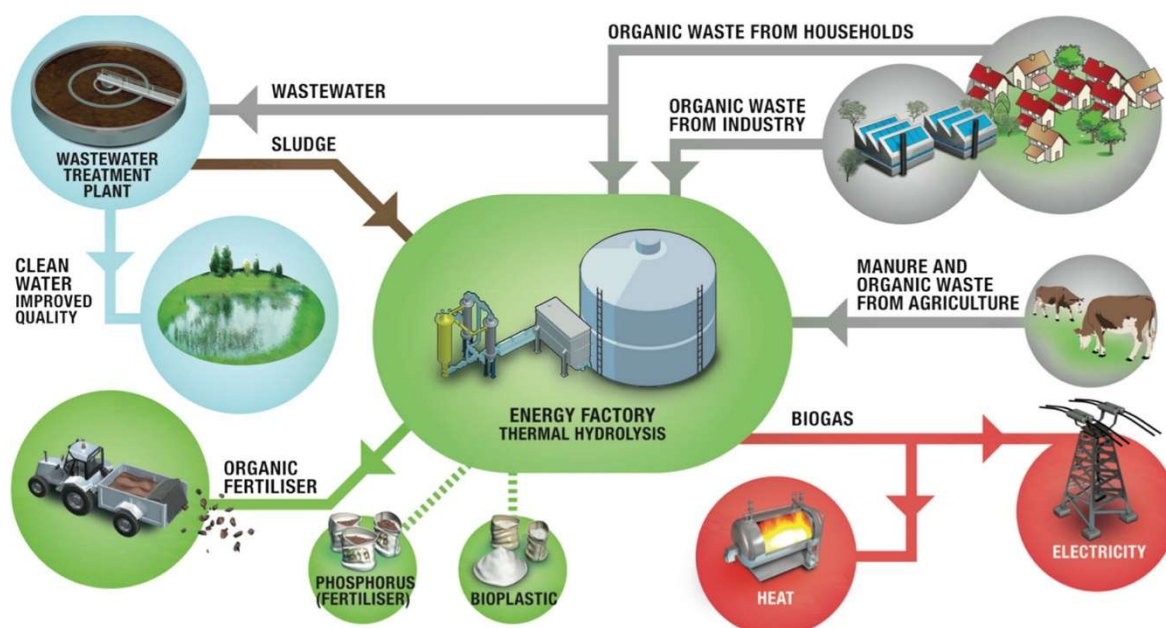
Mnoho vědeckých výzkumů tak sleduje účinnost technologie ČOV v odbourávání identifikovaných nebezpečných látek. Příkladem může být měření účinnosti odstraňování triclosanu, což je organická látka obsažená v široké škále výrobků denní spotřeby [29]. Do odpadních vod se dostává především při použití čistících a dezinfekčních prostředků, které jej obsahují. Provedená studie sledovala tok této látky v procesu čištění odpadních vod a porovnávala účinnost různých technologií čištění. Naměřené hodnoty prokázaly, že ČOV dokáže tuto látku dostatečně odstranit a nehrozí tak kontaminace životního prostředí [30].

Další motivace, proč zvyšovat výkonnost technologie ČOV, vychází ze současného trendu revidování stávajících procesů z hlediska dlouhodobé udržitelnosti, což je následek dosaženého technického pokroku druhé poloviny minulého století. Tento pokrok dosáhl již takové úrovně, kdy přestalo být problém „cokoliv“ vyrobit, ale nastaly problémy s vedlejšími dopady této výroby. To vedlo ke změně přístupu hodnocení výrobních procesů, kde už hlavní otázka nestojí na produkci, ale na šetrnosti k životnímu prostředí. Způsoby implementace tohoto přístupu myšlení popsali sofistikovaněji autoři William McDonough a Michael Braungart v publikaci „*Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*“ (v překladu: „*Od kolébky ke kolébce: změna způsobu, jak vyrábět věci*“), jejímž vydáním v roce 2002 prakticky položili základy koncepce tzv. cirkulární ekonomiky [11]. Ústřední myšlenkou je vnímat odpad jako zdroj a pro mnoho průmyslových oblastí tento postoj představuje nové výzvy. Ve světle tohoto přístupu se odpadní voda, které je všude velké množství, jeví jako perspektivní a stabilní zdroj – ať už energie nebo surovin.

Definované cíle cirkulární ekonomiky částečně pokryly i dřívější snahy o lepší využití odpadních produktů z procesu čištění odpadních vod, a proto je prakticky nemožné určit, odkdy se začaly provádět výzkumy motivované myšlenkami udržitelného rozvoje. Ve vědeckých publikacích došlo k prvním propojení pojmů cirkulární ekonomika a čištění odpadních vod v Číně, které se díky tamnímu masivnímu rozvoji industrializace dotýkají otázky udržitelnosti nejpalčivěji. Už v roce 2006 tam vznikla studie zabývající se nakládáním s kaly v kontextu zásad cirkulární ekonomiky [31]. V současnosti probíhá řada výzkumů porovnávajících dosažené výsledky inovací v ČOV [32], [33]. Další výzkumy se snaží nalézt optimální způsob řešení konkrétních problémů právě z pohledu cirkulární ekonomiky, např. výzkum porovnáující různé metody zpracování kalů [34] nebo výzkum sledující možnosti nakládání s dusíkem v procesu ČOV [35]. Koncepčně zaměřené studie se věnují hledání nových možností a případných překážek pro implementaci cirkulární ekonomiky v procesu čištění odpadních vod [36], další pak hledají možnosti, jak tyto principy rozvíjet i v zaostalých částech světa [37]. Jak by výsledek aplikace principů cirkulární ekonomiky na proces čištění odpadních vod mohl vypadat, znázorňuje Obr. 1.

Cíle cirkulární ekonomiky pro čištění odpadních vod se částečně překrývají i se snahou dosáhnout vyšší efektivity ČOV, takže v ideálním případě by inovace ve smyslu cirkulární ekonomiky měly být dobré nejen pro životní prostředí a společnost obecně, ale i pro samotné

provozovatele čistíren. Z tohoto důvodu lze očekávat zásadní inovace technologie ČOV včetně jejího rozšiřování o další zařízení.



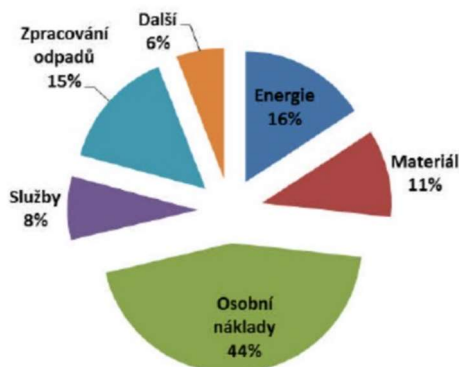
Obr. 1 Možný materiálový tok surovin a produktů při čištění odpadních vod při aplikování cirkulární ekonomiky [38] Překlad pojmů: Organic waste from households – Organický odpad z domácností, Organic waste from industry – Organický odpad z průmyslu, Manure and organic waste from agriculture – Hnůj a organický odpad ze zemědělství, Wastewater – Odpadní voda, Wastewater treatment plant – Čistírna odpadních vod, Sludge – Kal, Clean water improved quality – Čistá voda zlepšuje kvalitu (prostředí), Energy factory, Thermal hydrolysis – Produkce energie, Termální hydrolyza, Organic fertiliser – Organická hnojiva, Phosphorus fertiliser – Fosforečná hnojiva, Bioplastic – Bioplast, Biogas – Bioplyn, Heat – Teplo, Electricity - Elektrina.

## 2.2 ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI TECHNOLOGIE ČOV

Čištění odpadních vod je energeticky náročný proces, který v současnosti negeneruje žádný ekonomicky hodnotný produkt, takže provoz ČOV musí být finančně dotován. Logickou snahou je dosáhnout co nejefektivnějšího provozu, aby náklady na čištění vody byly co nejnižší. Výčet položek provozních nákladů ČOV a jejich zastoupení uvádí Graf 2. Technologickou efektivitu strojního zařízení vyjadřuje spotřeba elektrické energie. Její podíl je nepřímo úměrný velikosti provozu a může na menších čistírnách představovat až 30 - 40 % z celkových nákladů [8].

Měrná spotřeba elektrické energie na vyčištění 1 m<sup>3</sup> odpadní vody se v různých zemích značně liší (viz např. [40], [41]). Je to dáno rozdílnou úrovní strojního vybavení ČOV, jejich velikostí a také mírou znečištění odpadních vod. Analýza slovenských ČOV z roku 2013 uvádí průměrnou spotřebu 51 největších ČOV 0,485 kWh.m<sup>-3</sup> [42]. Jelikož technologická stavba i stáří čistíren na Slovensku jsou podobné jako v ČR, lze tuto hodnotu vztáhnout i pro hodnocení českých ČOV. Za den se tak v ČR spotřebuje 988 132 kWh energie a za rok

360 668,3 MWh elektrické energie, což představuje 80 % produkce přečerpávací vodní elektrárny Dalešice (nebo celou produkci vodní elektrárny Orlík) [43]. Ve skutečnosti bude tato hodnota ještě vyšší, neboť menší provozy ČOV dosahují vyšší měrné spotřeby elektriny, např. na Slovensku až  $0,915 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  [42]. Energie vynaložená na čištění odpadní vody představuje přibližně 1 % celkové spotřeby států (v ČR cca 0,5 %), avšak součet elektrické spotřeby všech evropských ČOV dosahuje 27 TWh/rok, což se rovná roční spotřebě celého státu Srbska [44].



Graf 2 Průměrné podíly provozních nákladů z 98 rakouských ČOV [39].

Spotřeba elektrické energie na konkrétních provozech závisí na mnoha faktorech. Jedním z nich je i výkon instalovaných strojních zařízení, které však většinou neodpovídají skutečným požadavkům. V České republice je v provozu 2677 čistíren odpadních vod, do kterých denně přitéká průměrně 2037,4 tis.  $\text{m}^3$  odpadní vody, což představuje přibližně 47,7 % jejich instalované kapacity [5]. Rovněž úroveň řízení provozu bývá mnohdy nedostatečná, přitom zavedení sofistikovaného systému řízení umožňuje dosáhnout značných úspor energie [45]. Studie prokázaly, že prakticky na každém provozu ČOV lze dosáhnout až 40 % úspory elektrické energie [46]. Z těchto důvodů je tak stále zapotřebí hledat možné zdroje úspor energie.

### 3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A POUŽITÉ METODY

Technologie čištění odpadní vody je složena z různých hydraulických zařízení, jejichž provoz má rozdílný dopad na celkovou účinnost technologie. Vhodnost navrhovaných strojů je obvykle posuzována podle jejich hydraulické účinnosti. Teoreticky nejvyšší účinnost jednotlivých zařízení vede k nejvyšší účinnosti celku, což však vzhledem k povaze technologie ČOV neplatí. Posuzování účinnosti strojů bez uvážení vzájemné technologické interakce tak může vést k nevhodným návrhům inovací.

V současné době lze ve vyspělých regionech jako je Evropa nebo Severní Amerika očekávat inovace stávajících provozů ČOV, pro které je z finančního hlediska důležité v maximální míře využít již vybudovanou technologii. Správné vyhodnocení jednotlivých strojně-technologických zařízení je pro návrh inovací zásadní. Avšak značná variabilita technologického vybavení i provozních podmínek provozů ČOV komplikuje už samotný výběr klíčových parametrů potřebných pro toto hodnocení.

Cílem této práce je provést návrh vybraných strojně-technologických zařízení ČOV, ve kterých bude zohledněn výběr správných parametrů a jejich dopadů. Pro tento účel byla navržena metodika, která napomáhá výběru všech dotčených parametrů a analyticky hodnotí jejich použitelnost pro zlepšení hydraulické účinnosti. Tato metodika by měla být využitelná pro hodnocení parametrů všech strojně-technologických zařízení na ČOV, což je doloženo její aplikací na šest vybraných zařízení.

Ověření metodiky bylo provedeno na modelovém návrhu vybraných zařízení, kde byly posuzovány vlivy identifikovaných parametrů a sledovány jejich dopady na hydraulickou účinnost těchto zařízení, což bylo využito i pro upřesnění navržené metodiky. Data potřebná pro modelové návrhy zařízení a pro hodnocení vlivu parametrů byla získána experimentálním měřením. Experimentálním výzkumem jsou v této práci řešena dvě strojně-technologické zařízení, a to mamutová čerpadla pro čerpání štěrku a písku a adsorpční záchyt fosforu. Získaná data z experimentů jsou použita pro validaci a upřesnění výsledků získaných z analýzy a jsou aplikována na návrhy těchto zařízení. Přínos navržených inovací je posuzován a diskutován.

Naplnění výzkumného cíle této práce představuje dosažení řady dílčích cílů, které jsou uvedeny v Tab. 3 v předpokládané posloupnosti. Podle stanovených cílů je práce dále strukturována následovně:

1. představení strojně-technologických zařízení ČOV (kap. 4),
2. problematika hodnocení účinnosti zařízení a popis navržené metodiky pro výběr a hodnocení klíčových parametrů (kap. 5),
3. volba způsobu ověření navržené analýzy a naplánování experimentů (kap. 6),
4. popis provedených experimentů (kap. 7),
5. upřesnění navržené metodiky a validace jejích výsledků (kap. 8),
6. posouzení přínosu metodiky na modelovém návrhu zařízení (kap. 9).

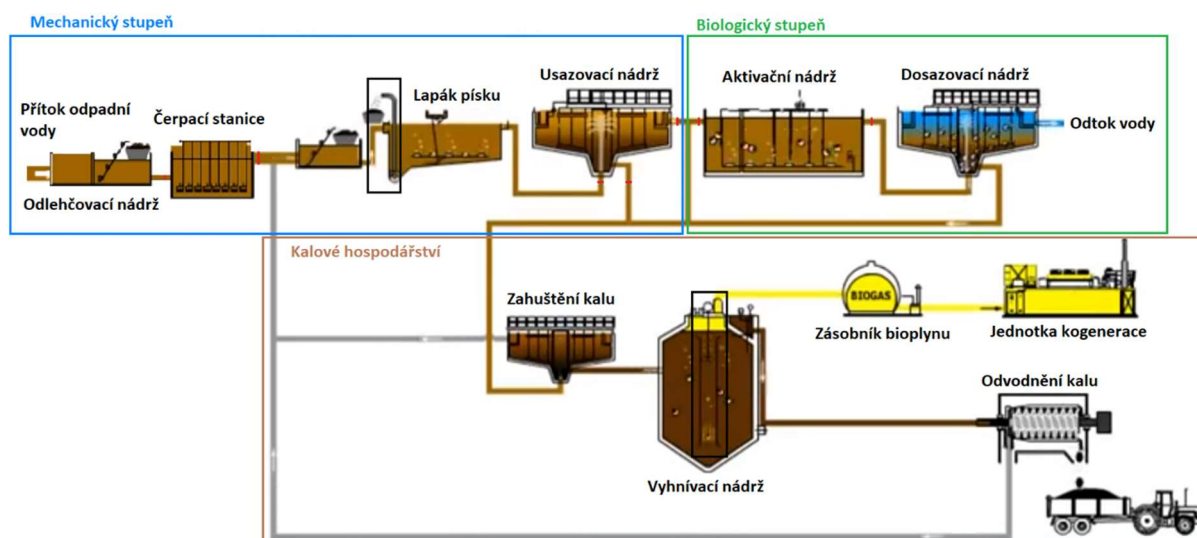
## CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A POUŽITÉ METODY

Tab. 3 Stanovené dílčí cíle výzkumu.

Pořadí	Dílčí cíl	Splnění cíle	
		Čerpání písku mamutovými čerpadly	Terciální odstranění fosforu adsorpcí
1	Analýza zařízení	✓	✓
2	Stanovení potřebných parametrů	✓	✓
3	Návrh experimentů	✓	✓
4	Příprava a provedení experimentů	✓	✓
5	Zpracování získaných dat	✓	✓
6	Validace výsledků analýzy	✓	✓
7	Návrh zařízení	✓	✓

## 4 STROJNĚ-TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ ČOV

Ve světě, potažmo i v ČR je nejvíce rozšířená tzv. mechanicko-biologická technologie čištění odpadní vody [47]. Tato technologie se skládá z řady procesů, během kterých se postupně odstraňují jednotlivé typy znečišťujících látek. Jak už název technologie napovídá, lze procesy čištění rozdělit na mechanické a biologické, prakticky se hovoří o mechanickém a biologickém stupni čištění odpadní vody. Celá technologie je pak ještě doplněna o tzv. kalové hospodářství, jehož úroveň a technické vybavení závisí na velikosti provozu čistírny [2]. Obr. 2 představuje celkové schéma řešené technologie ČOV. Zařízení jednotlivých provozních částí bude blíže popsáno v následujících kapitolách.



Obr. 2 Celkové technologické schéma mechanicko-biologické ČOV [48].

Provoz této technologie je podmíněna činností různých hydraulických dějů, které si vyžadují konkrétní strojní zařízení. Ta jsou poháněna převážně elektromotory, jejichž energetická spotřeba dosahuje až 80 % celkové elektrické spotřeby ČOV [49]. Efektivita hydraulických dějů je do značné míry limitována výkonnostními parametry instalovaných strojů, jejichž účinnost spolu s provozní spolehlivostí má zásadní dopad na celkové provozní náklady provozu [9]. Hydraulické děje definuje nauka o hydraulických pochodech, podle které se v mechanicko-biologické technologii ČOV vyskytují následující děje [50]:

- čerpání,
- usazování,
- míchání,
- aerace (provzdušňování),
- filtrace,
- tok porézní přepážkou.

Tab. 4 uvádí technologickou specifikaci uvedených hydraulických dějů a jejich zařazení v technologii ČOV. Konkrétní podoba strojního vybavení ČOV je závislá na mnoha faktorech a prakticky každý provoz je v tomto ohledu originální (viz Obr. 3) [51]. Funkce uvedených

strojních zařízení jsou proto v následujících podkapitolách popsány v kontextu modelového provozu městské ČOV.



a

b

Obr. 3 Pohled na stejnou technologii ČOV o kapacitě 3000 EO (a – ČOV Vnorovy [52]) a kapacitě 600 000 EO (b – ČOV Brno Modřice [53]).

Tab. 4 Výčet hydraulických dějů probíhajících v technologii ČOV.

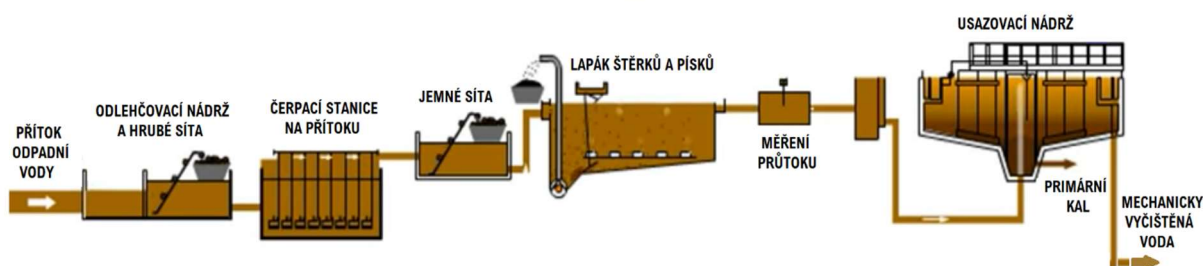
Hydraulický děj	Technologická specifikace	Umístění na ČOV
Čerpání	Čerpání odpadní vody	Mechanický stupeň Biologický stupeň Terciální stupeň
	Čerpání štěrků a písků	Mechanický stupeň
	Čerpání kalu	Mechanický stupeň Biologický stupeň Kalové hospodářství
Míchání	Aktivační nádrže	Biologický stupeň
	Vyhnívací nádrže	Kalové hospodářství
Usazování	Štěrků a písků	Mechanický stupeň
	Primárního kalu	Mechanický stupeň
	Sekundárního kalu	Biologický stupeň
Aerace	Aktivační nádrže	Biologický stupeň
Filtrace	Zahuštění aktivovaného kalu	Biologický stupeň
	Zahuštění odpadního kalu	Kalové hospodářství
	Odpadní vody na odtoku	Terciální stupeň
Tok porézní přepážkou	Záchyt fosforu	Terciální stupeň
	Záchyt léčiv	Terciální stupeň



Zařízení využívající tok porézní přepážkou v současné době nejsou do technologie ČOV standardně zařazena a vyskytují se ojediněle jako pokusná a pilotní zařízení [54]. Probíhající výzkum inovací společně s všeobecným trendem zpříšňování ekologických limitů napovídá, že v blízké budoucnosti budou tato zařízení na velkých ČOV běžná. Správné vyhodnocení možností jejich uplatnění na konkrétních provozech hraje klíčovou roli pro jejich další rozvoj.

#### 4.1 MECHANICKÝ STUPEŇ ČOV

V mechanickém stupni se z přitékající odpadní vody postupně oddělí pevné mechanické nečistoty, od různých pevných předmětů (dřevo, hadry, cihly, kameny apod.), přes šterky a písky až po nerozpuštěné organické nečistoty. Mechanický stupeň tak kromě samotného čištění vody zajišťuje ochranu dalšího strojního zařízení před poškozením a nadměrným opotřebením [55]. Obr. 4 znázorňuje běžné schéma řazení strojního zařízení v mechanickém stupni, které je stejné u všech ČOV bez ohledu na jejich velikost.



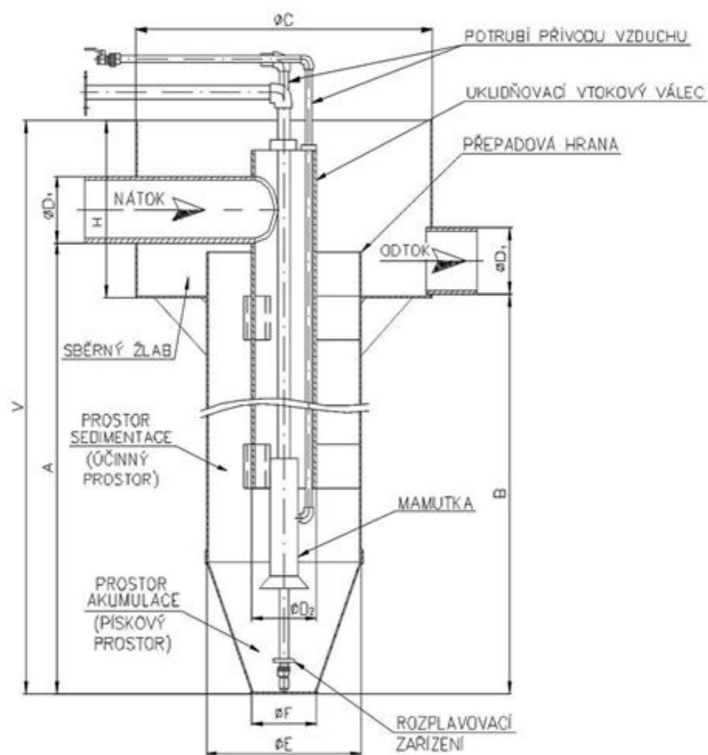
Obr. 4 Schéma mechanického stupně ČOV [48].

Výškový profil kanalizace obvykle neposkytuje odpadní vodě dostatečné množství kinetické energie na průtok celou technologií ČOV, a tak je nutné do technologie zařadit čerpací stanici. Pokud je to alespoň trochu možné, doporučuje se instalovat čerpadla až za mechanický stupeň, kde je voda již zbavena všech nerozpuštěných látek [56]. Riziko poškození a nadměrného opotřebávání čerpadel je zde minimální, což umožňuje využít klasická odstředivá čerpadla, která mají nejvyšší účinnost. V opačném případě je nutné zařadit čerpací stanici hned na přítoku surové vody za odlehčovací nádrž a hrubé předčištění. Zde jsou obvykle použita čerpadla s Archimédovým šroubem, která nejsou citlivá na plovoucí nečistoty a poradí si i s velkými kusy (viz Obr. 5) [2].

Usazování se využívá pro zachycení jemných nerozpuštěných nečistot. Ty jsou tvořeny látkami organického a anorganického původu a pro jejich další zpracování je žádoucí, aby byly z odpadní vody odseparovány odděleně. To umožňuje jejich odlišná usazovací rychlost. Anorganické nečistoty tvoří především písek, který je zachycován v tzv. lapácích písku, jehož typickou konstrukci znázorňuje Obr. 6. Organické nečistoty se pak gravitačně usazují v usazovacích nádržích (viz Obr. 7) a jsou čerpány kalovými čerpadly do kalového hospodářství [2].



Obr. 5 Čerpadla s Archimédovými šrouby na přítoku odpadní vody do ČOV [57].

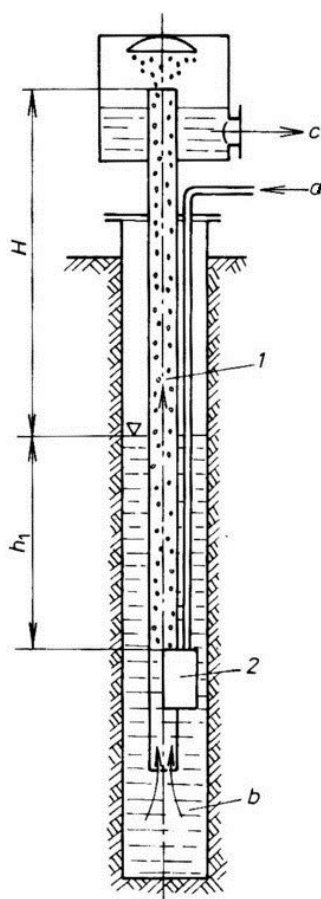


Obr. 6 Schématický náčrt lapáku písku [58]

Ze dna lapáků písku se usazený písek a jemný štěrk obvykle čerpá tzv. mamutovými čerpadly (nebo též mamutkami) [60]. Jedná se o specifická proudová čerpadla, které se vyznačují především absencí pohyblivých částí, což je zvyhodňuje pro čerpání abrasivních látek, jako je písek. Nosičem energie je zde tlakový vzduch, se kterým se v čerpadle vytváří 3fázová směs (vzduch, voda a pevné látky – písek) o menší hustotě, než je hustota okolní směsi vody s pískem. Rozdíl hustot pak způsobuje vlastní pohyb čerpané směsi. Hlavní výhodou mamutových čerpadel je jednoduchá konstrukce (viz Obr. 8) a bezúdržbový provoz, což je vykoupeno nízkou účinností (cca 35–55 %) [61].



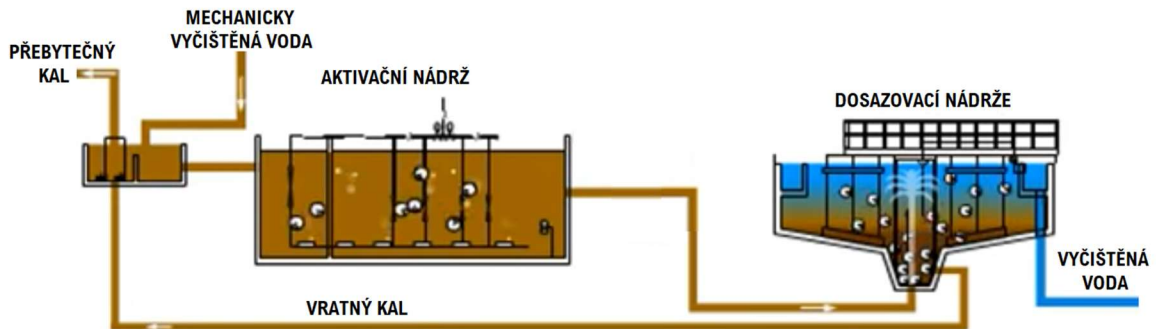
Obr. 7 Pohled na konstrukci usazovací nádrže [59].



Obr. 8 Nákres mamutového čerpadla. Legenda: 1 – výtlačné potrubí, 2 – směšovací komora, a – přívod tlakového vzduchu, b – čerpaná kapalina, c – odvod vyčerpané kapaliny,  $H$  – výtlačná výška,  $h_1$  – hloubka ponoru [62].

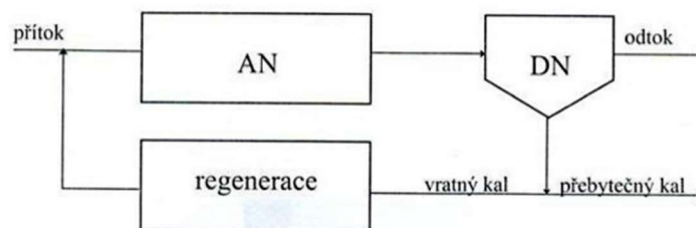
## 4.2 BIOLOGICKÝ STUPEŇ ČOV

V biologickém stupni se působením mikroorganismů odstraňují v tzv. aktivačních nádržích rozpuštěné organické nečistoty, které jsou sledovány podle obsahu dusíkatých sloučenin a podle biologické spotřeby kyslíku. Základní schéma biologického stupně je oproti mechanickému stupni více závislé na velikosti technologie. Obr. 9 zobrazuje schéma biologického stupně rozsáhlejší technologie odpovídající městské ČOV.



Obr. 9 Schéma řazení strojních zařízení biologického stupně na městské ČOV [48].

Aktivační nádrž je rozdělena na nitrifikační (provzdušňovanou) a denitrifikační (anoxickou) sekci. Mechanicky vyčištěná voda se na začátku míchá s částí sekundárního kalu (označovaný jako vratný kal) a přitéká do nitrifikační sekce, kde se provzdušněním dostává do vody kyslík potřebný pro rozvoj mikroorganismů. V denitrifikační sekci dochází k odstranění dusíku, který je převáděn bakteriemi z amoniakální formy přes dusitany a dusičnany na plynný dusík unikající do atmosféry. Po dostatečně dlouhé době kontaktu odpadní vody s mikroorganismy je aktivační směs vedena do dosazovacích nádrží, kde se opět usazováním oddělí sekundární kal. Ten se dělí na kal vratný, který se přivádí zpět k nátoku do aktivační nádrže, a na kal přebytečný, který je odváděn do kalového hospodářství. Pro intenzifikaci procesu byly vyvinuty další typy technologií aktivace, např. postupně zatěžovaná aktivace, dvoustupňová aktivace atd. [63].



Obr. 10. Schéma klasické aktivace s regenerací vratného kalu (AN – aktivační nádrž, DN – dosazovací nádrž) [63].

Čistící kapacita biologického stupně limituje rychlost rozvoje mikroorganismů v aktivační nádrži. Samovolný rozvoj je příliš pomalý a čistící kapacita by tak byla nedostatečná. Proto se instalují do nitrifikační sekce aerátory (viz Obr. 11) a do denitrifikační sekce míchadla (viz Obr. 12), čímž se zajistí dostatečné množství kyslíku a rovnoměrný přísun potravy mikroorganismům, čímž se urychlí jejich rozvoj a zvýší se tak čistící kapacita.



*Obr. 11 Instalované aerátory v nitrifikační sekci [57].*



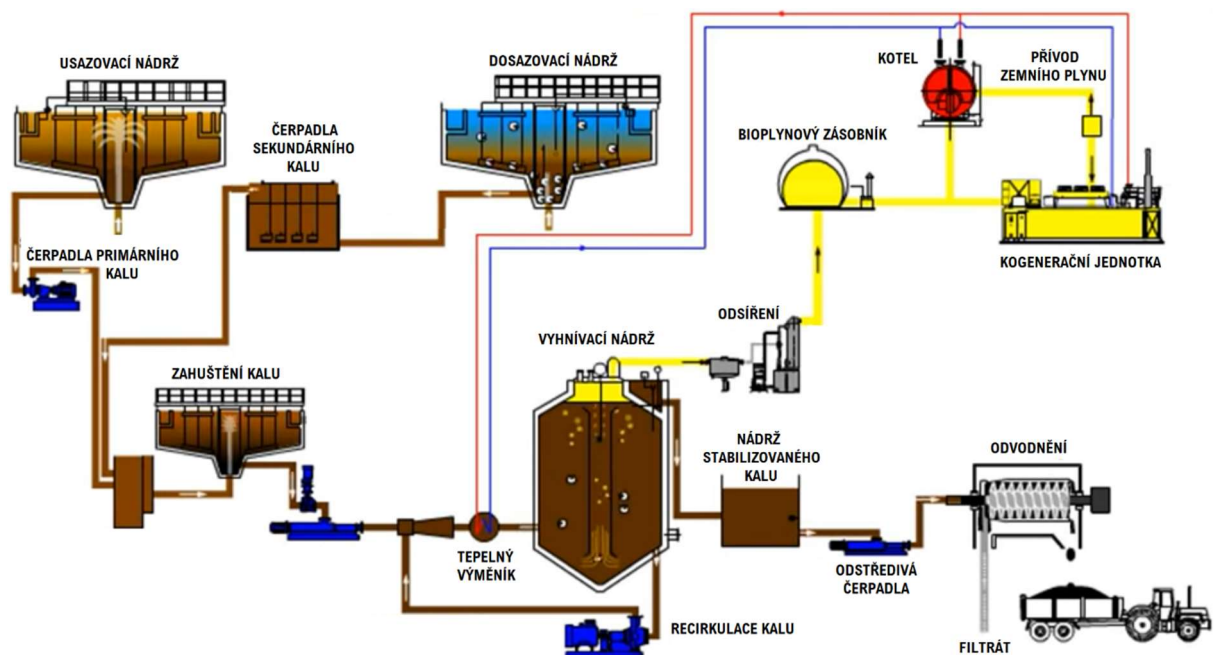
*Obr. 12 Instalovaná míchadla v denitrifikační sekci [63].*

Odpadní vody obsahují často nezanedbatelné množství fosforečných sloučenin, které je třeba rovněž odstranit. Mikroorganismy v biologickém stupni dovedou odstranit malé koncentrace fosforu, v takovém případě se jedná o biologické srážení fosforu. Při vyšších koncentracích je třeba přidávat do vody chemické látky (obvykle soli železa), které na sebe fosfor navážou, čímž nastává tzv. chemické srážení fosforu. Srážedlo lze dávkovat v různých místech technologie čištění, obvykle se tak děje na začátku biologického stupně, v případě velkého obsahu fosforu se doporučuje dávkování už v mechanickém stupni kvůli prodloužení reakční doby. V obou

případech je zachycený fosfor usazen spolu s aktivovaným kalem a odveden do kalového hospodářství [2].

### 4.3 KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Čistírenský kal zachycený v mechanickém a biologickém stupni ČOV je považován podle vyhlášky č. 376/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů za nebezpečný odpad a musí být dále zpracován [64]. To se děje v tzv. kalovém hospodářství. Možností zpracování kalu je mnoho, avšak z hlediska ekonomiky i ekologie je výhodné používat takovou technologii, která umožňuje vytěžit z kalu maximální množství energie, kterou obsahuje [65]. V ČR je nejvíce rozšířená anaerobní stabilizace kalu (viz Obr. 13), což je fermentační proces, při kterém působením mikroorganismů dochází k přeměně organických látek na majoritní plyny metan a oxid uhličitý, který spolu s minoritními složkami (především  $H_2S$ ) tvoří tzv. bioplyn [66]. Spalováním vzniklého bioplynu v kogeneračních jednotkách se získává tepelná a elektrická energie. Tento proces je v současnosti objektivně považován za nejvhodnější pro technologie ČOV [67]. Z hlediska druhotného využití odpadů představuje kal cennou surovinu, a tak probíhají výzkumy dalších alternativ technologií pro zpracování čistírenského kalu (např. spalování, zplyňování), které by se v budoucnu mohly uplatnit na prozovech ČOV [68].



Obr. 13 Schéma řazení strojních zařízení kalového hospodářství s anaerobní stabilizací kalu [48].

Jádrum kalového hospodářství je vyhnivací nádrž (viz Obr. 14), ve které proces anaerobní fermentace probíhá. Aby probíhal správně a množství vyprodukovaného bioplynu bylo maximální, je nutné dodržet celou řadu parametrů, které podmiňují život a rozvoj speciálních mikroorganismů nezbytných pro fermentaci. Jedná se především o zajištění anaerobního prostředí (tj. nepřístupnost kyslíku), stabilní teploty (na ČOV obvykle  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), stabilního pH a v neposlední řadě i o homogenitu substrátu, kvůli čemuž je nutné řešit míchání vyhnivací nádrže.

To musí být navrženo tak, aby splňovalo následující cíle [69–72]:

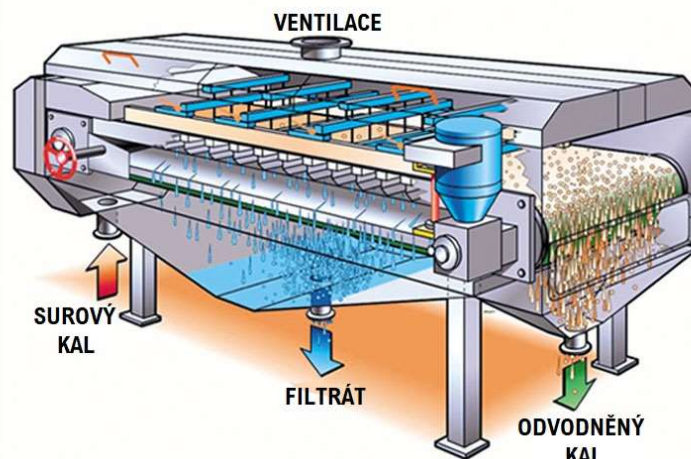
- zajistit optimální kontakt mezi aktivní biomasou a přítokem nového substrátu,
- zajistit rovnoměrnou distribuci čerstvého substrátu do celého objemu nádrže,
- zajistit fyzikální, chemickou a biologickou homogenitu v celém objemu nádrže (zamezit místnímu přetížení),
- zamezit stratifikaci (vzájemné segregaci jednotlivých vrstev na kapalnou a pevnou),
- eliminovat teplotní gradienty a zajistit dynamickou stabilitu celého systému,
- minimalizovat tvorbu kalového stropu a usazování částic na dně nádrže,
- zamezit tvorbě bioplynových kapes a umožnit únik vzniklého bioplynu ze suspenze do plynojemu,
- eliminovat vliv vysokých koncentrací toxických látek,
- snížit frekvenci údržby fermentoru.

Míchání vyhnívacích nádrží spolu s jejich ohřevem tvoří energeticky nejnáročnější strojní zařízení kalového hospodářství [73]. Tepelná energie získaná z bioplynu tak v podstatě pokryje vlastní spotřebu procesu, avšak získaná elektrická energie může v ideálním případě pokrýt celou spotřebu ČOV [67].



*Obr. 14 Vyhnívací nádrže na provozu ČOV [74].*

Zahuštěním kalu se zvýší podíl sušiny a tím i jeho energetická hodnota pro následné zpracování. Na menších provozech se využívá pouze gravitačního odvodnění kalu, které je nejméně nákladné, avšak na velkých městských ČOV s velkým množstvím zachyceného kalu se už vyplatí instalovat mechanické kontinuální lisy a kal filtrovat [71]. Obr. 15 vyobrazuje kontinuální lis čistírenského kalu.



Obr. 15 Pásový lis na čistírenský kal [75].

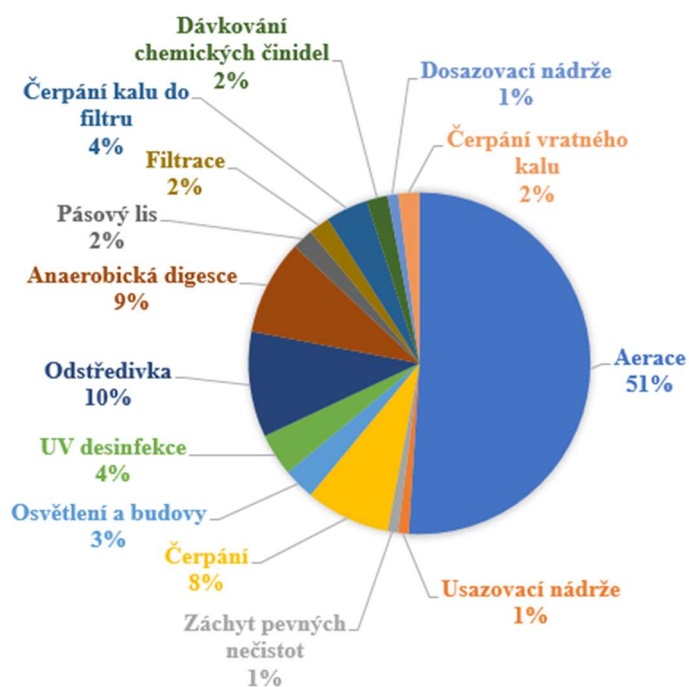
#### 4.4 ENERGETICKÁ NÁROČNOST STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Prakticky všechna výše uvedená strojní zařízení využívají pro svou činnost práci elektromotorů a jsou tak přímými nebo nepřímými spotřebiteli elektrické energie. Z celkové elektrické spotřeby ČOV připadá cca 80 % na práci elektromotorů [49]. Z tohoto důvodu bývá právě spotřeba elektrické energie na objem vyčištěné vody jedním z hlavních hodnotících parametrů celkové technologie ČOV a bývá porovnávána s obdobnými provozy – viz energetický audit například rakouských, britských nebo slovenských ČOV [41], [76], [77].

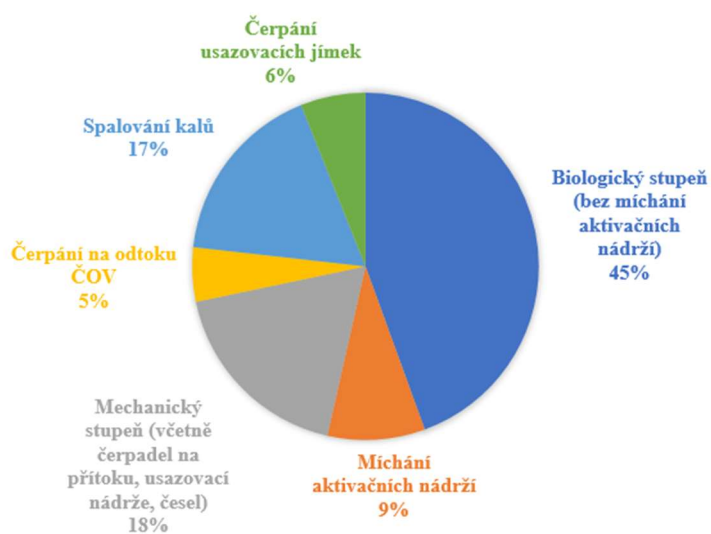
Podrobnější spotřeby energií jednotlivých strojních zařízení jsou v odborné literatuře zveřejňovány ojediněle [78]. Uváděné hodnoty se navíc značně rozcházejí, což je dáno mnoha faktory, zejména celkovou velikostí technologie ČOV, velikostí a konstrukcí daného zařízení, stavem zařízení atd. Proto nelze tyto hodnoty bez dalšího výzkumu blíže porovnávat. Pro získání představy o zastoupení jednotlivých strojních zařízení z hlediska jejich energetické náročnosti jsou však dostačující.

Následující grafy ukazují výběr nejkompexnějších analýz spotřeb v ČOV, které byly nalezeny v odborné literatuře. Graf 3, který prezentuje průměrné spotřeby jednotlivých zařízení na poslkých ČOV, je svým rozsahem vyjímecný. Méně podrobnou formou představuje strukturu spotřeb Graf 4 a Graf 5. Uvedené grafy shodně ukazují na největšího spotřebitele elektrické energie na ČOV, kterým je biologický stupeň, respektive aerace aktivačních nádrží. Dále je vysoce energeticky náročné kalové hospodářství a poté energie spotřebovaná čerpadly. V následujících kapitolách budou podrobněji zkoumána vybraná strojní zařízení, u kterých bude uvedena i podrobnější rešerše jejich energetické náročnosti.





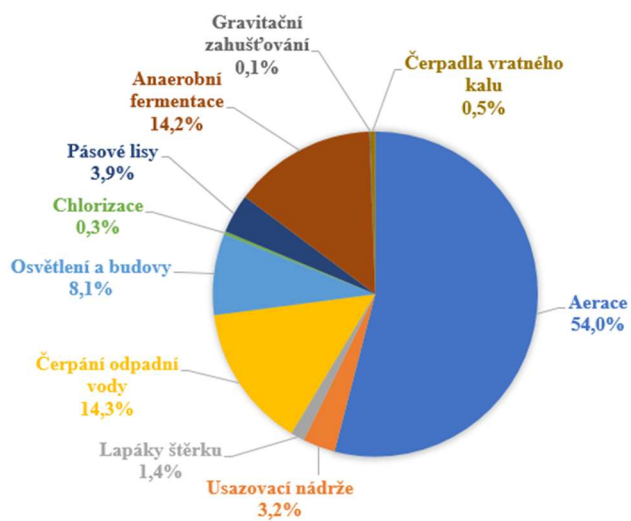
Graf 3 Podíly spotřeb jednotlivých zařízení polských ČOV. Převzato z [79].



Graf 4 Podíly spotřeb jednotlivých zařízení na ČOV v Avedoere. Převzato z [80].

## STROJNĚ-TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ ČOV

---



Graf 5 Podíly spotřeb jednotlivých zařízení ČOV v USA. Převzato z [81].

## 5 HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Rozsáhlá pozornost věnovaná technologii čištění odpadní vody vytváří nové požadavky kladené na provozy ČOV. Náročnost těchto požadavků je často za hranicemi možností instalovaného strojně-technologického zařízení ČOV, které tak zastarává stále rychleji. Pro jejich implementaci je třeba neustále vyhodnocovat současné technologie ČOV (viz např. [76], [40]) a podle toho pak podniknout potřebné kroky. Optimalizace současných zařízení představuje jednu z možností, jak současné technologie adaptovat na nové požadavky, zefektivnit jejich provoz, či ušetřit náklady.

Pro vysokou míru odlišnosti strojně-technologického vybavení jednotlivých provozů je optimalizace zařízení ČOV velmi problematická. Řada výzkumů se zaměřuje na možnosti optimalizace technologií ČOV. Byly posuzovány možnosti jednoúčelových optimalizací zaměřených například na zkrácení zdržné doby v aktivačních nádržích [82] nebo více kriteriálních optimalizací, které hledají nejlepší kompromis mezi vybranými provozními parametry technologie, například výkonem aktivačních nádrží a s ním spojenými provozními náklady [83]. Možnosti optimalizace jsou ve studiích řešeny na skutečných i simulovaných (modelových) provozech ČOV [84], [47].

### 5.1 PROBLEMATIKA VÝBĚRU KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ

Úspěšnost každé optimalizace závisí na správném definování cílů a identifikaci všech parametrů, které má optimalizace postihnout. Pro tento prvotní krok však neexistuje jednotný postup, a tak je identifikace důležitých parametrů náročná [7]. Častým cílem optimalizace je zvýšení efektivity zařízení a tím snížení provozních nákladů.

Elektrická energie představuje přibližně 30 – 50 % celkových provozních nákladů na ČOV, v závislosti na její velikosti [85]. Z tohoto objemu pak 80 % energie pohání přes elektromotory různá zařízení (čerpadla, kompresory, míchadla, atd.) [49]. Energetické audity ukazují, že prakticky každá ČOV může spotřebu elektrické energie snížit o 20 - 40 % [46]. To ukazuje na rezervy v efektivitě provozovaných zařízení a možnostech zvýšit jejich účinnost.

Standardně se účinnost strojních zařízení vyjadřuje jako poměr výkonu k příkonu, respektive ke spotřebě elektrické energie. Výkon daného stroje je definován podle jeho základních návrhových parametrů, které bývají uváděny na výrobním štítku [86]. Optimalizace zařízení, která by byla zaměřena pouze na zlepšení těchto parametrů, může nepříznivě ovlivnit provoz ostatní technologie, takže výsledný dopad na celkové provozní náklady bude negativní.

Účinnost zařízení ČOV je nutné vždy hodnotit s ohledem na provázanost s další technologií. K tomu je potřeba posoudit i jiné parametry než pouze štítkové. Pro prokázání tohoto tvrzení byla provedena rešerše klíčových parametrů pro vybrané strojní zařízení ČOV. Tato rešerše je provedena v kapitole 5.2. Byly identifikovány parametry, které jsou buď potřebné pro návrh samotného zařízení, nebo byly nějakým způsobem využity jako stavové proměnné při optimalizaci těchto zařízení v provozech ČOV. Pro lepší přehlednost je v závěru rešerše vždy uvedena tabulka s nalezenými parametry. V těchto tabulkách je také pro každý parametr

uvedeno, zda je využitelný pro návrh a pro optimalizaci. Jeho využitelnost je označena symbolem „✓“, naopak nevyužitelnost symbolem „X“. Dále je v tabulce stejnou filozofií označena variabilita parametru. Variabilní parametr může měnit svou hodnotu za provozu bez nutnosti odstavení zařízení z provozu. V opačném případě je takový parametr považován za pevný.

## 5.2 VÝBĚR STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ ČOV A REŠERŠE JEJICH PARAMETRŮ

Pro rešerši byla vybrána následující zařízení (v závorce je uvedeno jeho zařazení v technologii ČOV):

1. čerpací stanice na přítoku (mechanický stupeň), viz kap. 5.2.1,
2. mamutová čerpadla (mechanický stupeň), viz kap. 5.2.2,
3. usazovací nádrže (mechanický stupeň), viz kap. 5.2.3,
4. aerace aktivačních nádrží (biologický stupeň), viz kap. 5.2.4,
5. míchání vyhnívacích nádrží (kalové hospodářství), viz kap. 5.2.5,
6. adsorpční záchyt fosforu (terciální stupeň), viz kap. 5.2.6,

Tento výběr obsahuje pět typických hydraulických strojních zařízení, která jsou v současnosti často zastoupena v českých ČOV, a jedno inovativní, které dosud v ČR není běžně provozováno. S ohledem na další výzkum se vybírala zařízení tak, aby byly pokryty všechny části (stupně) technologie. Vybraná zařízení jsou různě energeticky náročná a mají odlišný ohlas v základním i aplikovaném výzkumu. Jak už bylo popsáno v kapitole 3.4, energeticky nejnáročnější je proces aerace aktivačních nádrží, který je proto na provezech ČOV nejčastěji řešen. Naopak provoz mamutových čerpadel bývá pro svá specifika na pokraji zájmu provozovatelů, což ale neznamená, že vědecká rešerše nepřináší zajímavé poznatky.

Proces adsorpčního záchytu fosforu z odpadní vody je progresivní technologie pro terciální stupeň čištění vody, čímž se liší od ostatních vybraných zařízení. V současné době je fosfor z odpadní vody odstraňován z ekologických důvodů, neboť jeho vysoké koncentrace v povrchových vodách mají negativní dopady na životní prostředí. Poslední výzkumy však ukazují, že v blízké budoucnosti bude potřeba „těžit“ fosfor z odpadní vody pro jeho další využití.

Adsorpce fosforu z odpadní vody je možnost, jak dosáhnout koncentrovaného roztoku, ze kterého je možné separovat fosfor pro další využití. Tato technologie zároveň umožňuje řešit problém zpřísňujících se limitů obsahu fosforu na odtoku ČOV bez potřeby náročných úprav technologie současných provozů [87]. Právě pro tyto přínosy předpokládáme budoucí uplatnění této technologie a je proto vybrána k dalšímu výzkumu.

### 5.2.1 ČERPACÍ STANICE NA PŘÍTOKU

Čerpání je nejvíce rozšířeným procesem v technologii ČOV, avšak skutečná míra jeho zastoupení je značně variabilní podle geografického profilu konkrétní ČOV. Pokud to výškový

profil provozu umožňuje, umisťují se čerpadla až za mechanický stupeň čistírny, kde je voda již zbavena všech nerozpuštěných látek [51]. Riziko poškození a nadměrného opotřebování čerpadel je zde minimální, což umožňuje využít klasická odstředivá čerpadla, která mají nejvyšší účinnost. Pokud energie surové vody na přítoku do ČOV není dostatečně velká, je nutné hned za odlehčovací nádrží její energii čerpadly zvýšit. Obvykle jsou zde použita čerpadla s Archimédovým šroubem, která nejsou citlivá na plovoucí nečistoty a mohou čerpat i velké kusy [2].

Spotřeba elektrické energie čerpadly se obvykle pohybuje mezi 10 a 25 % z celkové spotřeby. Na třetí největší ČOV v Dánsku (Avedoere) představuje spotřeba čerpadel na odtoku a v jímkách 11 %, ke kterým je třeba přidat ještě čerpadla na přítoku, která jsou však v této studii zahrnuta do spotřeby celého mechanického stupně čištění (18 %) [80]. V Polsku je poměr spotřeby připadající na čerpadla 18 % [79], v USA je to 14,8 % [81], v kanadském Ontariu 21,1 % [88], a v Číně 17,8 % [89].

Nejčastěji se pro čerpání vody v provozech ČOV využívají rotační čerpadla, která jsou poháněna elektromotory. Pro základní návrh výkonu rotačních čerpadel je potřeba znát:

- hustotu čerpané kapaliny,
- požadovaný průtok,
- požadovanou výtlačnou výšku.

Požadovaná výtlačná výška představuje součet geodetické dopravní výšky, rozdílu kinetické energie proudu kapaliny a tlakových ztrát v potrubí, což jsou proměnné faktory lišící se provoz od provozu. Na základě těchto parametrů s pomocí gravitačního zrychlení lze vypočítat potřebný výkon čerpadla. Příkon elektromotoru pro pohon čerpadla musí být kvůli různým energetickým ztrátám čerpadla vyšší. Podíl těchto energií představuje celkovou účinnost čerpadla. Tato účinnost zahrnuje účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou (účinnost elektromotoru), účinnost mechanického přenosu energie z elektromotoru na čerpadlo a hydraulickou účinnost čerpadla [90].

Skutečná účinnost čerpadla je ovlivňována aktuálními provozními parametry, jako je skutečný průtok a skutečné tlakové ztráty. Do nich se promítá zanášení potrubí a mechanické opotřebování činných ploch čerpadla. Obvyklá celková účinnost čerpadel tak v technologii bývá ČOV 0,32. Při účinnosti 0,8 se čerpadlo považuje za vysoce efektivní [2].

Skutečný průtok se od návrhového také liší a dochází tak buď k přetížení čerpadla, nebo pouze k částečnému zatížení čerpadla. Oba tyto stavy mají negativní dopady na hydraulickou účinnost a tím i na spotřebu elektrické energie [91]. Výkyvy průtoku způsobuje nepravidelnost přítoku odpadní vody do čistírny, a to jak v průběhu dne, ve kterém se obvykle projevují ranní a večerní špičky, tak i v průběhu roku. V případě jednotné kanalizace, u které je dešťová voda odváděna společně se splaškovou vodou, se do průtoku výrazně projevuje vliv počasí. U menších provozů lze tento problém do značné míry eliminovat odlehčovací nádrží s dostatečnou kapacitou, avšak u velkých ČOV s rozsáhlou kanalizační sítí by takové řešení bylo nedostatečné. Tento problém byl předmětem několika výzkumů. Van Heeringen (2016) řešil optimalizaci čerpacích stanic stokového systému městské aglomerace v Holandsku pro zajištění ustáleného přítoku na ČOV

v reálném čase [92]. Matematický nástroj pro řízení přítoku vody do ČOV vyvinutý kolektivem Stefana Krolla (2016) dokonce zahrnoval i snímače srážek rozmístěné v plánu stokové sítě, čímž může lépe reagovat na vlivy počasí. Zajištění rovnoměrného přítoku vody do ČOV má vliv i na další technologická zařízení [93].

Otázkami vlastního řízení čerpadel v provozech ČOV se zabývalo několik studií. Kusiak a kol. (2013) řešil vhodný nástroj pro optimalizaci čerpací stanice a vhodný způsob sběru dat. Pro optimalizaci sledoval následující parametry:

- průtok vody za stanicí,
- otáčky čerpadel,
- výšku hladiny v nádrži,
- elektrickou spotřebu.

Data byla sbírána v intervalech po 5 minutách a po 15 minutách byla průměrována. Pro daný případ nasimuloval 27 scénářů a pomocí 5 různých matematických modelů vyhodnocoval na aktuálním průtoku a spotřebě energie nejvýhodnější variantu a nejvýhodnější matematický model [77]. Rovněž nástroj pro nejefektivnější řízení čerpacích stanic ČOV, který v USA vyvíjel Zhang a kol. (2012), vychází ze stejných údajů [94]. Skutečnou spotřebu elektrické energie čerpadla a reálné průtoky sleduje i simulační nástroj STOAT, který na základě těchto údajů vyhodnocuje skutečnou účinnost čerpadla, kterou porovnává s referenčními hodnotami. Díky tomu může obsluha včas odhalit možné závady na čerpadle [91]. Také studie Berga a kol. (2014) zabývající se monitoringem čerpací stanice odpadních vod v Norsku a vytvořením nástroje pro včasnou detekci poruch sleduje aktuální průtoky vody a spotřeby energie [95].

Parametry vztahující se k provozu čerpadel jsou uvedeny v Tab. 5. Výkon rotačních čerpadel lze regulovat pouze změnou otáček, v případě čerpací stanice pak ještě počtem zapojených čerpadel. Optimální hodnotu požadovaného výkonu lze regulovat podle skutečného průtoku a tlakových ztrát.

Tab. 5 Identifikované parametry čerpací stanice na přítoku.

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Čerpací stanice na přítoku	Hustota kapaliny	✓	✗	✗
	Dopravní výška	✓	✗	✗
	Objem vody v odlehčovací nádrži	✗	✓	✓
	Nárůst spotřeby energie	✗	✓	✓
	Množství přitékající vody	✗	✓	✓
	Teplota čerpadel	✗	✓	✓
	Hydraulické ztráty	✗	✓	✗
	Průtok vody čerpadlem	✓	✓	✓
	Otáčky čerpadla	✓	✓	✓
	Spotřeba energie	✗	✓	✓
Počet zapojených čerpadel	✓	✓	✓	

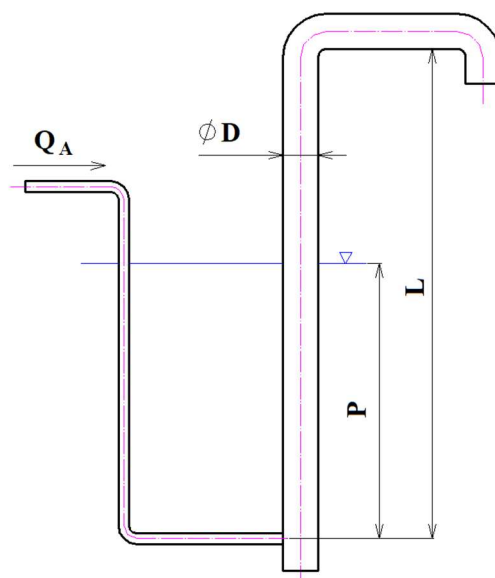
Online monitorování těchto parametrů je tak pro zajištění maximálně efektivního provozu nezbytné. Pro potřeby ČOV byly vyvinuty pokročilejší řídicí systémy, které na základě měření přírodních parametrů (množství vody ve vyrovnávací nádrži, průtok odpadní vody ve stokové síti, množství srážkové vody) dovedou predikovat množství přitékající vody. Podle toho regulují čerpadla na přítoku do ČOV a zabraňují tak výkyvům hydraulického zatížení provozu ČOV, což má pozitivní dopad na další technologická zařízení. Měření teploty a výkyvů ve spotřebě elektrické energie konkrétních čerpadel lze včas odhalit potenciální závady, což umožňuje minimalizovat náklady na údržbu.

### 5.2.2 MAMUTOVÁ ČERPADLA

Ze dna lapáků písků se usazený písek a jemný štěrk obvykle čerpá vzduchovými čerpadly [2]. Tato čerpadla se od předchozích liší, neboť se jedná o proudový typ čerpadel, která se vyznačují především absencí pohyblivých částí. Nosičem energie je zde tlakový vzduch, který vytváří třífázovou směs (vzduch, voda a pevné látky – písek) o menší hustotě, než je hustota okolní směsi vody s pískem a způsobuje tak vlastní pohyb čerpané směsi. Hlavní výhodou mamutových čerpadel je jednoduchá konstrukce a bezúdržbový provoz, což je vykoupeno nízkou účinností (cca 35 - 55 %) [61]. Jejich skutečná energetická náročnost na provozech ČOV však není nikde specifikována. Ojedinele se uvádí poměr spotřeby energie pro odstranění štěrku (1 – 2 %), avšak bez bližšího specifikování zahrnutých zařízení [81].

Níže jsou uvedeny základní parametry, které se u mamutových čerpadel uvádějí. Pro lepší názornost jsou vyznačeny na schematickém náčrtku (viz Obr. 16):

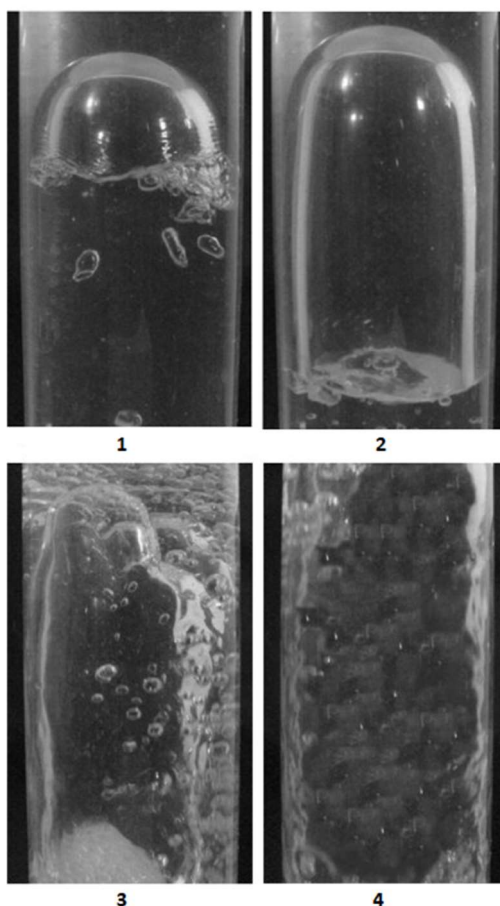
- průtok tlakového vzduchu ( $Q_A$ ),
- hloubka ponoření ( $P$ ),
- délka výtlačného potrubí ( $L$ ),
- průměr výtlačného potrubí ( $D$ ).



Obr. 16 Návrh mamutového čerpadla se základními parametry.

Vliv technického provedení přívodu vzduchu má rovněž vliv na následnou podobu proudění a tím i na dosažený čerpací výkon [96]. Byl prováděn také výzkum vlivu nasměrování přiváděného vzduchu do výtlačného potrubí. Nejlepších výsledků bylo dosaženo kombinací axiálního a radiálního přívodu vzduchu. Při tomto výzkumu se zkoumal i vliv pulzního přívodu vzduchu a experimentální testy ukázaly, že čerpací výkon mamutky se při pulzním přívodu vzduchu zvýšil až o 60 % oproti kontinuálnímu přívodu [97]. Byl zkoumán i vliv teploty na výkon čerpadla, kde experimentální studie dokázala, že při provozních teplotách vyšších než 45°C nelze tento faktor zanedbat [98].

Všechny studie uvádějí, že uvedené základní parametry mají vliv na podobu dvoufázového proudění, které má přímý vliv na čerpací výkon. Vývoj dvoufázového proudění je vyobrazen na Obr. 17. Technický popis jednotlivých podob proudění není v českém jazyce pevně definován, a proto jsou v závorce uvedeny originální anglické názvy. Studie shodně uvádějí, že nejvyššího výkonu se dosahuje těsně před změnou podoby proudění z tzv. dlouhých vzduchových kapes na vířivé bubliny. Pro účely modelování dvoufázového proudění bylo provedeno mnoho výzkumů, jejichž analýzu uvádí Morgada ve svém článku [99].



Obr. 17 Vývoj dvoufázového proudění v sestavě voda – vzduch. 1) krátké vzduchové kapsy (small slug), 2) dlouhé vzduchové kapsy (large slug), 3) vířivé bubliny (churn flow), 4) prstencový tok (annular flow) [100].



V procesu čištění odpadních vod jsou mamutová čerpadla používána pro čerpání písku, tedy režim provozu v tří fázovém proudění. I pro tuto oblast byly provedeny různé výzkumy. Kassab a kol. (2007) vytvořil matematický model pro predikci čerpacích výkonů třífázového proudění, kterou experimentálně ověřil. Zkoumal v ní čerpací schopnost mamutových čerpadel pro pevné částice různých velikostí a potvrdil, že rostoucí velikost částic má negativní vliv na čerpací výkon [101]. Deendarlianto a kol. (2019) šel ve své studii ještě dál a experimentálně zjišťoval vliv úhlu trysek pro přívod vzduchu na čerpání tuhých částic o různých průměrech. Zjistil, že rozvíření usazených tuhých částic se velmi pozitivně projeví na účinnosti čerpání. Větší velikost pevných částic má pak na čerpací charakteristiku vliv negativní [102].

Část výzkumů se zabývala stanovením účinnosti mamutových čerpadel, pro jejichž výpočet se nejčastěji používá jednoduchý vztah, který vychází z předpokladů izometrického děje [103]. Ten je široce používán navzdory studii z roku 1986, která tento vztah považuje za nedokonalý pro návrh mamutových čerpadel kvůli zanedbání tlakových ztrát. Uvádí vlastní, značně sofistikovanější, rovnici, která už tyto ztráty zahrnuje a lze z ní určit optimální průměr potrubí, průtok vzduchu nebo poměr ponorů [61]. Kromě základních koeficientů pro dvoufázové proudění a výše uvedených parametrů počítá i s tlaky vzduchu na trysce a na výtlačku mamutky. Tato rovnice byla experimentálně ověřena jak na provozních datech instalovaných čerpadel, tak i laboratorním experimentálním měření.

Aby bylo možné porovnat vhodnost použití mamutových čerpadel pro dané aplikace, navrhuje Hanafizadeh a kol. zavést bezrozměrná kritéria, která vychází ze známých základních parametrů. Tato kritéria (kapacitní koeficient a povrchový poměr skluzu) svými průběhy odpovídají výkonovým a účinnostním kritériím odstředivých čerpadel a mohou tak být spolu porovnávána [104].

Tab. 6 uvádí identifikované dotčené parametry. Z rešerše vyplývá, že výkon mamutových čerpadel je velmi ovlivněn pevnými parametry, tedy jak vlastní geometrií, tak geometrií umístění v nádrži. V provozu je tak možno regulovat pouze spotřebu tlakového vzduchu. Rešerše dále ukázala, že chybí komplexní výzkum provozu mamutových čerpadel na provozech ČOV.

Tab. 6 Identifikované parametry mamutových čerpadel.

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Mamutová čerpadla	Hloubka ponoru	✓	✓	✗
	Výška výtlačku	✓	✓	✗
	Průměr výtlačného potrubí	✓	✓	✗
	Geometrie přívodu vzduchu	✓	✓	✗
	Velikost pevných částic	✓	✓	✓
	Teplota kapaliny	✗	✗	✓
	Průtok vody	✓	✓	✓
	Tlak vzduchu	✓	✓	✓
	Hmotnostní průtok pevných látek	✓	✓	✓
	Průtok vzduchu	✓	✓	✓

### 5.2.3 USAZOVACÍ NÁDRŽE

Usazovací nádrže využívají pro separaci nerozpuštěných organických nečistot gravitačního usazování pevných částic. Stejného principu se využívá i v biologickém stupni ČOV, kde je z vody sedimentačně odstraňován biologický kal. Zachycené organické nečistoty jsou odváděny do kalového hospodářství k dalšímu zpracování. Při jejich stoprocentní účinnosti předchozích zařízení mechanického stupně by se do usazovací nádrže už neměly dostat žádné anorganické pevné látky [2]. Podíl spotřeby energie na usazovací nádrže patří k těm méně náročným. Studie z Kanady jim přisuzuje podíl 6,8 % [88], v USA je to 3,2 % [81], podle studie z Polska dokonce jen 2 % [79].

Pro návrh usazovacích nádrží se vychází z usazovací rychlosti požadovaných pevných látek v daném prostředí. Tu lze stanovit matematicky, pokud jsou známy další parametry částic, jako je charakteristický rozměr a hustota, což bývá v případě znečištění odpadní vody dost problematické. V takových případech se doporučuje stanovení usazovací rychlosti experimentálně [17]. Pro dimenzování usazovacích nádrží je potřeba znát následující hodnoty:

- průtok směsi kapaliny a kalu,
- objemové zastoupení množství kalu v kapalině,
- usazovací rychlost částic.

Velikost usazených částic není tedy závislá na hloubce nádrže a na zádržné době [105]. Vlastní geometrický návrh usazovacích nádrží vychází částečně i z empirických vztahů, které vznikly ze zkušeností z provozování těchto zařízení. Pro geometrický návrh se využívá následujících kritérií:

- povrchový průtok (udávaný v jednotkách [ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{den}^{-1}$ ]),
- průtok na odtokové hraně (udávaný v jednotkách [ $\text{m}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{den}^{-1}$ ]),
- zádržná doba

Návrh rozměrů usazovacích nádrží je obvykle výsledkem ekonomické rozvahy investičních nákladů. Určení vhodného povrchového zatížení vychází z různých kritérií (např. hustotní Freudovo kritérium), která závisí na dalších vlastnostech separovaného kalu [106].

Účinnost usazovacích nádrží lze vyjádřit poměrem hmotnosti usazených pevných částic k celkové hmotnosti pevných částic na přítoku. Skutečná účinnost je ovlivněna správnou distribucí přítoku do nádrže, lokálními změnami proudění v nádrži (např. v rozích), teplotou vody atd. [107].

Studie ukazuje, že účinnost usazovacích nádrží v mechanickém stupni může výrazně ovlivnit ekonomiku celého následného procesu. Při maximální účinnosti usazování se oddělí veškerý uhlík obsažený v organickém kalu, čímž se při anaerobním zpracování kalu maximalizuje výtěžnost bioplynu. Avšak uhlík je potřebný i pro rychlé odstranění dusíku v aktivačních nádržích. Pokud je účinnost usazování primárního kalu vysoká, budou i vysoké energetické náklady denitrifikace. Pro zvolení nejvhodnější účinnosti usazovacích nádrží je tak třeba zahrnout i množství dusíkatých a organických látek v odpadní vodě [47]. Tím se liší od

usazovacích nádrží v biologickém stupni, kde je důležité zajistit jejich maximální účinnost pro splnění limitů obsahu pevných částic na odtoku [2].

B. Narayanan a kol. (2000) ve své studii zjišťuje, že standardní výkonová kritéria, jako je povrchový průtok a průtokové zatížení přepadové hrany, nedostatečně reflektují skutečnou účinnost reálných nádrží. Dokazuje to porovnáváním geometricky rozdílných nádrží, které tyto parametry mají sice stejné, ale jejich účinnost se liší. Navrhuje tak sledovat vznosnou odtokovou rychlost proudění, která má přímý vliv na usazování pevných částic do odtoku a tím i větší vypovídající hodnotu o skutečné účinnosti dané nádrže [108].

Identifikované parametry jsou uvedeny v Tab. 7. Rešerše poukázala na nutné zohlednění látkového znečištění vody, které sice pro vlastní účinnost zařízení není nijak důležité, avšak má velký dopad na chod kalového hospodářství a biologického stupně. Nastavení požadované účinnosti by tak mělo tyto dva parametry zohlednit.

Tab. 7 Identifikované parametry usazovací nádrže.

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Usazovací nádrže	Povrchový průtok	✓	✗	✗
	Průtok na odtokové hraně	✓	✗	✗
	Objem vody a pevných částic na přítoku	✓	✓	✓
	Podíl pevných částic	✓	✓	✓
	Usazovací rychlost	✓	✓	✗
	Vznosná odtoková rychlost	✗	✓	✓
	Objem rozpuštěných organických nečistot	✗	✓	✓
	Objem rozpuštěných dusíkových nečistot	✗	✓	✓
	Zdržná doba	✓	✓	✓
	Objem pevných látek na odtoku	✓	✓	✓
Objem vody na odtoku	✓	✓	✓	

#### 5.2.4 AERACE AKTIVAČNÍCH NÁDRŽÍ

Rozpuštěné nečistoty jsou z vody odstraňovány působením mikroorganismů v biologických nádržích. Ty musí být provzdušňovány, aby mikroorganismy měly dostatek kyslíku [2]. Jak už bylo uvedeno, aerace je všeobecně považována za nejnáročnější proces z celé technologie ČOV. Obvykle uváděný podíl energie vynaložený na aeraci dosahuje nadpoloviční spotřeby celého provozu. V Polsku je to průměrně 51 % [79], v Portugalsku 53 % [46], v USA 54,1 % [81], v Číně je podíl 51,6 % [89] a v kanadském Ontariu dosahuje 54,8 % [88]. S velikostí provozu se tento podíl snižuje, jak dokazuje analýza dánské čistírny, kde podíl na aeraci představuje 44 % [80]. Z tohoto důvodu je dostupných mnoho studií zaměřených právě na snížení energetické náročnosti aerace.

Rešerše z roku 2008 shrnující tehdejší výzkum aerace posuzuje hned několik faktorů. Jako nejdůležitější parametr na účinnost aerace je zde považována střední doba retence buněk (v originále mean cell retention time), ze které vychází požadované množství kyslíku ve vodě.

Tento parametr vychází z biologického znečištění vody a obsahu uhlíku, který umožňuje rychlejší rozložení povrchově aktivních látek, a tak snižuje i nároky na množství obsahu kyslíku. Konstrukce difuzoru zase ovlivňuje velikost bublin. Velké bubliny mají malý poměr povrchové plochy k objemu vzduchu a přenos kyslíku do kapaliny je tak nižší. Hloubka ponoření difuzoru zase ovlivňuje čas pro přenos kyslíku. Jemnobublinové areátory jsou však náchylnější k zanášení, což se projevuje větší tlakovou ztrátou a sníženou účinností. Míra zanášení difuzoru závisí na typu znečištění vody. Všechny tyto faktory ovlivňují skutečnou rychlost přenosu kyslíku do vody. Odchytku skutečné rychlosti od ideální lze vyjádřit korekčním koeficientem. Závěr studie konstatuje, že volba typu difuzoru závisí na velikosti korekčního koeficientu [109].

Množství kyslíku schopného rozpustit se ve vodě byla experimentálně zkoumána s ohledem na typ difuzoru a vlastnosti aktivního kalu. Velký vliv na skutečný přenos kyslíku má i uspořádání aktivačních nádrží a střídání nitrifikační a denitrifikační zóny. Vlastnosti a stáří aktivovaného kalu jsou limitními faktory pro možné energetické úspory [110]. Neméně důležité omezení je nutnost dodržet patřičnou kvalitu vody na odtoku z aktivačních nádrží. Podle tohoto faktoru byly porovnávány různé matematické modely pro predikci potřebného množství vzduchu. Vstupní hodnoty představovaly parametry znečištění vody na přítoku, především biologická spotřeba kyslíku a rozpuštěné tuhé látky [111].

Výsledky studie od Drewnowski a kol. z roku 2019 jsou v zásadě totožné se závěry z výše uvedené rešerše z roku 2008. I ona poukazuje na možnosti velkých úspor optimalizováním aerace, ale klade důraz, že před vlastní optimalizací by se měl provoz vybavit patřičným měřicím zařízením schopným stálého monitoringu množství rozpuštěného kyslíku a znečištění vody na přítoku a odtoku (senzory na dusíkaté a fosforové sloučeniny). Je konstatováno, že instalace kvalitních difuzorů je sama o sobě neefektivní bez pokročilého systému řízení. Dále poukazuje na vhodnost regulace doby zdržení v jednotlivých zónách nitrifikace a denitrifikace, čímž by se daly dosáhnout značné úspory na aeraci, avšak tato regulace není na současných provozech ČOV proveditelná [79]. Také další praktické výzkumy zaměřené na optimalizaci aerace dosahují značných úspor energie zavedením vhodného systému řízení reagujícího dle aktuálních parametrů vody. Energetická úspora se pohybuje v desítkách procent [112], [113], [114]. Úspora rovněž záleží na provozovaných dmychadlech, jejich stavu a účinnosti. Instalací moderních turbodmychadel lze také dosáhnout významných úspor [115], [116].

Identifikované parametry jsou uvedeny v Tab. 8. Díky širokému zájmu o tento proces je k dispozici mnoho detailních studií. Všechny nalezené parametry jsou využitelné pro optimalizaci, avšak všechny studie se shodují na skutečnosti, že bez jejich patřičného monitorování nelze dosáhnout uspokojivých výsledků optimalizace.

Tab. 8 Identifikované parametry aerace aktivační nádrže.

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Aerace aktivačních nádrží	Geometrie difuzorů	✓	✓	✗
	Plocha pokrytí difuzorů	✓	✓	✗
	Hloubka difuzorů	✓	✓	✗
	Skutečná rychlost přenosu kyslíku	✗	✓	✓
	Tlak vzduchu	✓	✓	✓
	Objem vody na přítoku	✓	✓	✓
	Objem a složení rozpuštěného znečištění	✓	✓	✓
	Zdržná doba	✓	✓	✓
	Množství rozpuštěného kyslíku	✓	✓	✓
	Zanesení difuzorů	✗	✓	✓
	Spotřeba vzduchu	✓	✓	✓
	Přípustné množství znečišťujících látek na odtoku	✓	✓	✓

### 5.2.5 MÍCHÁNÍ VYHNÍVACÍ NÁDRŽE

Míchání je pro technologii ČOV jeden z klíčových procesů. V biologickém stupni se míchá čištěná voda v biologických nádržích, v kalovém stupni se míchají vyhnívací nádrže. V obou případech se tak činí za účelem správného rozvoje biologických organismů. Pro analýzu bylo vybráno míchání vyhnívacích nádrží jako zástupce hydraulického procesu v kalovém hospodářství.

Náklady na míchání vyhnívacích nádrží na ČOV nebývají zpravidla uváděny. Lze vyhledat energetickou náročnost na provoz vyhnívacích nádrží, např. polská studie (9 %) [79] nebo studie z USA (14,2 %) [81], avšak v nich není blíže specifikováno, která zařízení jsou do této sumy zahrnuta. Pozoruhodnou informací však je, že podíl spotřeby energie na míchání vyhnívacích nádrží v bioplynových stanicích, které jsou technologicky v zásadě totožné s kalovým hospodářstvím ČOV, dosahuje až 54 % [73].

Důležitost míchání vyhnívacích nádrží pro biologický proces anaerobní fermentace už byla popsána dříve v kapitole 4.3. Pro připomenutí uvedme hlavní cíle, kterých by se mělo mícháním dosáhnout:

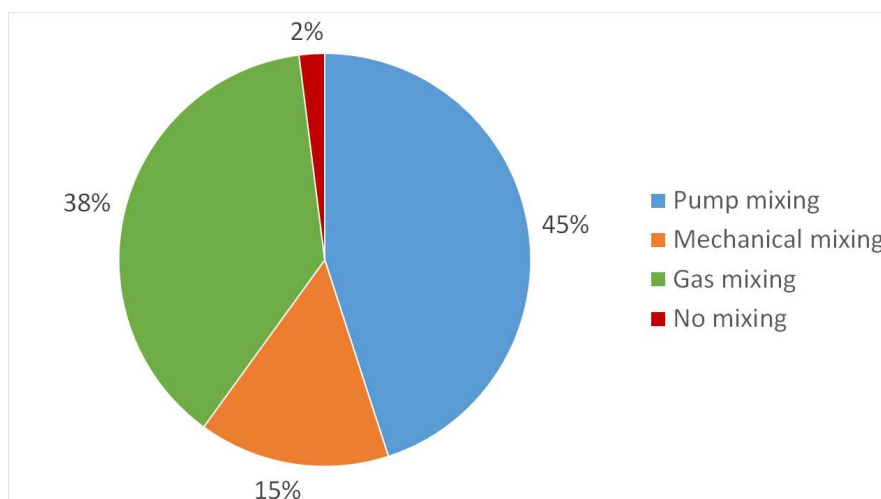
- zajištění fyzikální, chemické a biologické homogenity substrátu, což představuje distribuci čerstvého substrátu do celého objemu nádrže, zamezení místního přetížení, což se projevuje stabilitou procesu,
- zajištění průběžného uvolňování bioplynu ze suspenze a eliminování vzniku plynových kapes,
- prevence sedimentace pevných částic a tvorba kalového stropu, čímž nedochází ke zmenšení užitého objemu nádrže a nutnosti častého čištění nádrže.

Splněním těchto cílů je dosaženo maximální výtěžnosti bioplynu a tedy i plného využití energetického potenciálu zpracovávaného substrátu [117]. Efektivní zařízení je takové, které dokáže splnit uvedené cíle při nejmenších energetických nákladech. Poznání skutečné míry dosažení tohoto ideálního stavu je však značně obtížné.

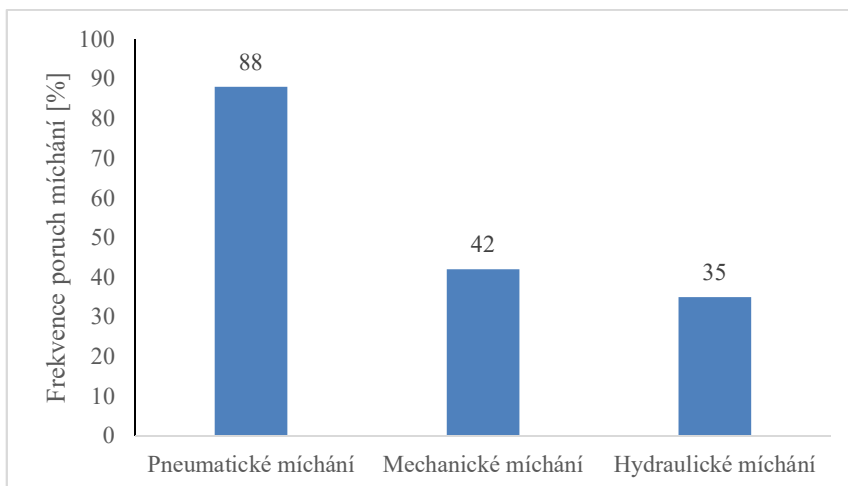
Míchání je značně náročný proces, který ovlivňuje mnoho parametrů. Neexistuje univerzální způsob výběru ideální technologie míchání. Při návrhu se do značné míry vychází z empirických vztahů a praktických zkušeností [86]. Obecně je třeba se při návrhu míchání zaměřit na:

- tvar proudnic,
- stanovení energetické náročnosti,
- geometrické uspořádání nádrže.

Technicky lze vyhnívací nádrže míchat mechanicky, hydraulicky, pneumaticky, popř. kombinací těchto systémů. Graf 6 ukazuje zastoupení jednotlivých druhů míchání fermentorů v provozech podle dat získaných z 90 ČOV různých provozovatelů. Stejná studie analyzovala i frekvenci poruch jednotlivých způsobů míchání, kterou uvádí Graf 7. Z něj je patrné, že nejčastěji vznikají problémy při pneumatickém míchání, kde se za nejčastější příčiny označují selhání kompresorů, netěsnosti potrubí a úniky bioplynu, pěnění ve fermentoru a nedokonalé míchání. U mechanických systémů nastávají problémy se zanášením míchadel vláknitými látkami a s nadměrnými vibracemi. Četnost problémů hydraulického míchání je nejmenší a souvisí nejčastěji s pěněním fermentoru a zanášením čerpadel [118]. Uvádí se, že až 44 % všech závad při provozu fermentorů je zapříčiněno míchacím mechanismem [119].



Graf 6 Zastoupení způsobů míchání fermentorů na ČOV. Převzato z [118].



Graf 7 Frekvence poruchovosti jednotlivých metod míchání. Převzato z [118].

Pozornost výzkumu míchání vyhnívacích nádrží souvisí s rozvojem výstavby bioplynových stanic, které využívají stejného procesu anaerobní fermentace pro energetické zhodnocení organických odpadních surovin z potravinářské a zemědělské výroby. Získané poznatky lze aplikovat i v kalovém hospodářství ČOV. Experimentálně se ukazuje, že z hlediska pění není pneumatické míchání příliš vhodné a v porovnání s mechanickým mícháním vykazuje i menší produkci bioplynu [120]. Negativní vliv pneumatického míchání na produkci bioplynu potvrdila i další studie [121]. V rozporu s tímto tvrzením jsou závěry nedávného výzkumu, který porovnával průběh fermentace v nemíchaném, mechanicky míchaném a pneumaticky míchaném laboratorním fermentoru. Z hlediska produkce bioplynu i energetické náročnosti je doporučeno právě pneumatické míchání [122]. Uvedený rozpor potvrzuje i praktickou zkušenost, že chování náplně vyhnívacích nádrží je proměnné dle lokality a parametrů čistírenského kalu.

Studie zaměřené na snižování energetické náročnosti dokazují, že vhodným režimem přerušovaného míchání lze dosáhnout znatelné energetické úspory, aniž by byla ovlivněna celková produkce bioplynu [73]. Tyto závěry potvrzuje i nedávná studie, která porovnávala různé režimy míchání s nemíchaným reaktorem [123]. Celkový vliv energie vnesené mícháním do fermentoru byl rovněž testován užitím různých výkonů čerpadel pro hydraulické míchání. Experimenty prokazovaly negativní dopady na průběh fermentace při nedostatečném, ale i přílišném míchání [124]. Stejně doporučení dává i obsáhlá rešerše, která porovnávala výsledky výzkumů optimálních módů míchání. V tomto článku jsou také analyzovány praktické dopady míchání pro anaerobní fermentaci, které potvrzují nezbytnost míchání fermentorů [125]. Z hlediska mechanických míchadel jsou pro stanovení potřebného energetického vnosu významné mimo jiné i reologické vlastnosti kalu [126].

Výsledky uvedených studií (a mnoha dalších) obsáhle shrnuje nedávná rešerše, která se zaměřila na porovnání různých parametrů ovlivňujících celkovou účinnost míchání. Porovnávala výsledky jak laboratorních, tak i provozních výzkumů z hlediska použitých mechanismů míchadel a jejich instalovaného výkonu, intervalů a rychlostí míchání, spotřeb elektrické energie, velikosti mrtvých zón a míry pění. Souhrn všech parametrů, které byly pro hodnocení účinnosti míchadel v této studii využity, bude uveden níže. Studie dokazuje, že

problematika hodnocení účinnosti míchání fermentorů je značně komplikovaná a neexistuje jediné jednoznačné kritérium [119]. Díky velké variabilitě pevných i operačních parametrů, která ovlivňuje míchání, se zde masivně využívá počítačového modelování proudění, avšak jeho výsledky je značně obtížné plně validovat [127], [128].

Tab. 9 uvádí výčet a třídění nalezených parametrů. Z rešerše vyplynulo několik parametrů, které se pro samotný návrh míchadla nevyužívají, avšak mají vliv na průběh míchání (např. reologie kalu během fermentace). Jejich využitím pro optimalizaci míchání by mohlo být dosaženo významných energetických úspor.

Tab. 9 Identifikované parametry míchání vyhnívací nádrže.

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Míchání vyhnívacích nádrží	Tvar vyhnívací nádrže	✓	✗	✗
	Geometrie míchadla	✓	✓	✗
	Objemová spotřeba energie	✗	✓	✓
	Hustota kalu	✓	✓	✓
	Reologie kalu během procesu fermentace	✗	✓	✓
	Smykové napětí kalu	✗	✓	✓
	Množství organických látek	✓	✓	✓
	Podíl anorganických pevných látek	✗	✓	✓
	Objem kalu na přítoku	✓	✓	✓
	Rychlost kalu v nádrži	✓	✓	✓
	Pěnění	✓	✓	✓
	Produkce bioplynu	✓	✓	✓
	Spotřeba elektrické energie	✓	✓	✓
	Zdržná doba	✓	✓	✓

### 5.2.6 ADSORPCE FOSFORU

Tempo spotřeby fosforu ve světě narůstá a vzhledem k jeho nepostradatelnosti v zemědělství a potravinářském průmyslu (spotřebují 89 % vytěženého fosforu) se z něj stává strategická surovina. Přírodní naleziště fosforu však nejsou neomezená, jejich kvalita se stále snižuje a reálně hrozí jejich vyčerpání. Navíc nejsou tato naleziště ve světě rovnoměrně rozmístěna, a tak dostupnost fosforu může významně ovlivnit geopolitická situace v klíčových regionech. Z těchto důvodů se dnes usilovně hledají alternativní zdroje fosforu, které by byly snadno dostupné, stabilní a ekologické [129], [130].

Odpadní voda tato kritéria splňuje a má tak velký potenciál stát se novým zdrojem fosforu. Lze předpokládat, že v budoucnu bude většina ČOV doplněna technologií pro zachycení fosforu v takové formě, která umožňuje jeho opětovné hodnotné využití [131]. Existuje řada způsobů pro získání fosforu v provozu ČOV. Velká pozornost se věnuje kalovému hospodářství, které kromě těžby samotného fosforu řeší i další výzvy pro nakládání s čistírenským kalem. Technologie spalování kalu a následného zpracování popelu dosahují vysoké míry účinnosti těžby fosforu a jeví se tak jako nejperspektivnější [129]. Množství fosforu v čistírenském kalu



však závisí na účinnosti jeho srážení v biologickém stupni a může představovat necelou polovinu obsahu fosforu v odpadní vodě [132]. Technologie zachycující fosfor přímo z odpadní vody tento hendikep eliminují. Všechny uvedené literární zdroje se však shodují, že v současném stupni poznání nelze jednoznačně určit nejvýhodnější technologii pro zachycení fosforu.

Pro zemědělské aplikace se nabízí recyklace fosforu ve formě struvitu, který lze získat vysrážením z roztoku o vysoké koncentraci fosforu (100 – 200 mg/l). Tato technologie je už v praxi poměrně známá a aplikovaná [133]. Hlavní výhodou této technologie je vyloučení rizika kontaminace těžkými kovy, která je problémová právě při termickém zpracování čistírenských kalů [132]. Hlavní úskalí této technologie je získání dostatečně silně koncentrovaného roztoku, neboť na běžných ČOV jsou koncentrace fosforu v odpadní vodě přibližně desetinásobně menší. Adsorpcí fosforu lze získat roztok o dostatečné koncentraci pro srážení struvitu.

Adsorpce je proces, při kterém dochází k hromadění molekul jedné látky na povrchu (fázovém rozhraní) pevné látky působením mezipovrchových přitažlivých sil. Adsorpce může probíhat v důsledku působení Van der Waalsových přitažlivých sil (tzv. fyzikální adsorpce) nebo v důsledku působení chemických vazeb (tzv. chemisorpce) [134]. Běžná technologie ČOV tento proces nevyužívá, avšak ve specifických aplikacích čištění a úpravy vody je tento proces běžně zastoupen [135]. Zkoumají se také možnosti využití tohoto procesu pro odstranění léčiv z odpadní vody [136].

Adsorpce probíhá ve dvou fázích. V první fázi dochází k adsorpci, tedy k sycení sorbentu zachytávanou látkou. Nasycení sorbentu se projeví zvyšující se koncentrací zachytávané látky na výstupu z kolony (dojde k tzv. bodu průrazu), což je v praxi obvykle nežádoucí jev. Proto je třeba adsorpci zastavit před dosažením bodu průrazu a zahájit desorpci. Při desorpci dochází k uvolňování zachycené látky ze sorpčního lože, čímž se opět obnoví jeho sorpční kapacita. Pro kontinuální provoz adsorpce jsou nutné minimálně dvě kolony se sorbentem [134].

Základní parametry jsou dány vlastnostmi sorbentu. Pro účely zachytávání fosforu v odpadní vodě bylo zkoumáno mnoho materiálů (dolomity, zeolity, vysokopecní strusky a jiné). Přírodní materiály se však ukázaly jako nevhodné pro průmyslové použití [137]. Z praktického hlediska jsou důležité parametry sorpční kapacity sorbentu a procento regenerace, které by ideálně měly být konstantní a neměly by se měnit s počtem adsorpčních cyklů. Podle druhu sorbentu se rovněž odvíjí požadavky na desorpci, tedy na rychlost toku při desorpci a složení regeneračního činidla, jeho potřebný objem pro regenerační cyklus a tím i výsledný objem roztoku z desorpce, tzv. recyklátu. Snahou je, aby proces regenerace byl co možná nejlevnější a nejrychlejší [138].

Petruzzelli a kol. (2004) zkoumal možnosti adsorpce fosforu z odpadní vody na speciálně vyvinutém sorbentu na bázi pryskyřice. Uvedeným klíčovým parametrem je objem adsorpčního lože (v angličtině „bath volume“). K tomuto parametru byly vztaženy další parametry: objem recyklátu a rychlost toku při adsorpci a desorpci. Dále sledoval reálné množství zachyceného fosforu, koncentraci fosforu v recyklátu a další parametry [87]. Stejně parametry sledovaly i obdobné studie zkoumající účinnost adsorpce fosforu z odpadní vody na různé sorbenty, např. na nanočástice hydratovaného vlákna aktivovaného uhlíku [137] nebo na amorfni hydroxid zirkoničitý [139].

Nalezené parametry jsou uvedeny v Tab. 10. Většina identifikovaných parametrů je závislá na sorpční charakteristice použitého sorbentu, který tyto parametry pro provoz pevně stanoví. Pro případnou provozní optimalizaci tak bude možné využít pouze omezené množství variabilních parametrů. V této fázi poznání jsou všechny parametry návrhové a rovněž využitelné pro optimalizaci.

*Tab. 10 Identifikované parametry adsorpčního záchytu fosforu.*

Zařízení	Parametr	Návrhový	Optimalizační	Variabilní
Adsorpce fosforu	Koncentrace P na přítoku	✓	✓	✓
	Koncentrace P na odtoku	✓	✓	✓
	Průtok OV na přítoku	✓	✓	✓
	Regenerační poměr	✓	✓	X
	Koncentrace P v recyklátu	✓	✓	X
	Zdržná doba adsorpce	✓	✓	X
	Tlaková ztráta lože	✓	✓	X
	Doba provozního cyklu	✓	✓	✓
	Složení regeneračního činidla	✓	✓	X
	Objem recyklátu	✓	✓	X
	Zdržná doba desorpce	✓	✓	X
	Množství zachyceného P	✓	✓	✓
	Objem sorpčního lože (=1BV)	✓	✓	X
	Sorpční kapacita sorbentu	✓	✓	X
	Výška sorpčního lože	✓	✓	X
Průměr sorpčního lože	✓	✓	X	

### 5.3 HODNOCENÍ PARAMETRŮ

Předchozí část poskytla pro každé studované zařízení seznam všech důležitých parametrů, které je třeba zohlednit při hodnocení hydraulické účinnosti a při návrhu inovací a úspor energie na ČOV. Potvrdil se předpoklad, že samotné štítkové parametry jednotlivých zařízení nestačí k vyhodnocení jejich interakce s ostatním strojně-technologickým zařízením.

Identifikované parametry však mají odlišný stupeň významnosti z hlediska vlastní účinnosti zařízení i z hlediska interakce. Kromě toho je pro možnou optimalizaci nutné volit opravdu klíčové parametry, podle kterých bude optimalizace provedena a hodnocena. Z těchto důvodů autor v následující části navrhuje **nový analytický postup**, pomocí kterého lze identifikované parametry vyhodnotit.

#### 5.3.1 NÁVRH ANALYTICKÉHO POSTUPU VÝBĚRU A HODNOCENÍ PARAMETRŮ (METODIKA)

Navržený postup je založen na posouzení významu jednotlivých parametrů, které mají vliv na hodnocení účinnosti. Tu lze definovat jako poměr dosažených výsledků (např. množství

přečerpané vody) k vynaloženým nákladům (např. elektrické energie). Analýza zařízení podle navrhovaného postupu se sestává z následujících kroků:

1. Výběr dotčených parametrů konkrétního zařízení ČOV.
2. Klasifikace parametrů pro analýzu a zúžení výběru
3. Rozdělení na vstupní a výstupní parametry.
4. Bodování jednotlivých parametrů z hlediska měřitelnosti / regulovatelnosti, časové závislosti a interakce. Stanovení tzv. *Faktoru využitelnosti*.
5. Celkové posouzení potenciálu pro zvýšení účinnosti zařízení pomocí *Inovační náročnosti* a *Faktoru interakce*.

První dva kroky analýzy byly prakticky provedeny v kapitole 5.2, avšak pro úplnost popisu metodiky jsou znovu popsány: prvním krokem analýzy je výběr všech možných parametrů, které souvisí s hodnoceným zařízením. Ty jsou získány na základě literární rešerše a doplněny o místní parametry podle konkrétní ČOV. Vodítkem pro výběr parametrů je jejich nezbytnost pro návrhový výpočet a jejich použití pro optimalizaci daného zařízení na provozech ČOV. Druhým krokem je rozřazení získaného souboru parametrů podle tří kritérií. První kritérium definuje, zda je daný parametr návrhový, tedy zda je využíván pro standardní výpočet účinnosti. Obvykle takový parametr bývá uváděn ve výrobní specifikaci strojního zařízení. Druhé kritérium rozlišuje parametry podle využití pro vlastní optimalizaci zařízení, což je posuzováno na základě dostupné literatury. Třetí kritérium rozlišuje, zda je zkoumaný parametr v provozu variabilní. Pokud by změna parametru vyžadovala zastavení provozu, pak je takový parametr považován za pevný, v opačném případě je variabilní. Další analýza pracuje pouze s parametry, které splňují druhé a třetí kritérium, tedy jsou použitelné pro optimalizaci a jsou variabilní. Vychází se z předpokladu, že pevný parametr nemůže ovlivnit účinnost jiných zařízení.

Třetím krokem analýzy je rozdělení vybraných parametrů na vstupní a výsledné. Vstupní parametry jsou takové, které přímo ovlivňují chod procesu. Ty vychází jak z vnitřních limitů daných pevnými parametry zařízení (např. geometrie čerpadla, objem nádrže apod.), tak i z vnějšího okolí zařízení, kde se mohou projevit vlivy nezávislé na zkoumaném zařízení. Výstupní parametry prezentují výsledný efekt procesu. Mohou být procesem přímo regulované nebo vznikají jako vedlejší důsledek. Jejich dopad může být jen lokální v rámci řešeného zařízení, ale může mít i návaznost na další technologie. Takto rozdělené parametry jsou poté hodnoceny podle kritérií uvedených v Tab. 11.

U vstupních parametrů se hodnotí možnost kvantifikace v provozu ČOV, což je důležité pro vyhodnocení adekvátní míry reakce. Pro výstupní parametry je podstatné, zda je lze řízením procesu ovlivnit, jak rychle se projeví reakce na provedenou změnu a zda výstupní parametr může ovlivnit provozní parametry jiných zařízení. Dále se posuzuje časová závislost parametru a míra interakce s chodem jiných zařízení ČOV. Podle povahy parametru je každé kritérium obodováno. Při posuzování a bodování parametrů je třeba vyjít ze znalosti místních poměrů na řešené ČOV. Součet bodů z kritérií měřitelnosti / regulovatelnosti a časové závislosti představuje *Faktor využitelnosti* daného parametru. Čím vyšší je jeho hodnota, tím náročnější je využití parametru jako stavové proměnné pro proces optimalizace.

Tab. 11 Tabulka hodnotících kritérií.

Parametr	Kritérium	1	2	3	4
Vstupní	Možnost kvantifikace na ČOV	Běžně měřená	Lze změřit přímo, neměří se	Zjistitelná nepřímým měřením	Nezjistitelná
	Časová proměnlivost	Pouze náhodné změny	Plynulé změny	Dynamické ve známém rozsahu	Dynamické v neomezeném rozsahu
	Interakce	Nezávislý	Dílčí závislost	Značná závislost	Zcela závislý
Výstupní	Možnost regulace	Přímá bez závislosti	Přímá s ohledem na jiné parametry	Přímá v kombinaci s jinými parametry	Nepřímá jinými parametry
	Časová odezva na regulaci	Okamžitá	Pozvolná	Pozvolná s prodlevou	Dlouhodobá
	Interakce	Bez dopadu	Nezávažný dopad	Závažný dopad	Přímá návaznost na další technologie

Posledním krokem analýzy je celkové posouzení potenciálu zařízení pro zlepšení jeho účinnosti. Aritmetický průměr *Faktoru využitelnosti* všech parametrů představuje tzv. *Inovační náročnost*. Vysoká hodnota označuje velkou složitost aplikování inovací z hlediska celkové účinnosti technologie a také komplikované možnosti objektivního hodnocení vlastní účinnosti. *Faktor interakce* se stanovuje zvláště pro vstupní parametry a pro výsledné vypočtení aritmetického průměru bodů interakce. Porovnáním těchto dvou hodnot lze poté posoudit míru ovlivnění a dopadů provozu zařízení na celkovou účinnost technologie.

Takto provedená analýza identifikuje všechny významné parametry, stanoví jejich náročnost a umožní vyhodnotit vazby analyzovaného zařízení. Tyto výsledky umožní provozovateli ČOV lépe posuzovat dopady optimalizace jednotlivých zařízení pro optimalizaci a získá představu o její složitosti. Podle identifikovaných parametrů také může lépe zmapovat nedostatky v monitoringu provozu.

### 5.3.2 ANALÝZA VYBRANÝCH ZAŘÍZENÍ

Podle navrženého postupu byly vyhodnoceny identifikované parametry vybraných zařízení. Výstupy ze selekce parametrů, jejich rozdělení a bodování (kroky 2, 3 a 4 analýzy) jsou uvedeny v samostatných tabulkách pro každé řešené zařízení. Bodování jednotlivých parametrů vychází z vlastních zkušeností získaných na provozech ČOV a na odborných konferencích. Poslední krok analýzy, tedy celkové posouzení potenciálu pro zvýšení účinnosti, je provedeno v souhrnné tabulce (viz Tab. 18). Získané poznatky v tabulkách jsou stručně popsány.

## HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

Tab. 12 ukazuje body hodnocených parametrů pro vstupní čerpací stanici a jejich *Faktor využitelnosti*. Podle tohoto faktoru je nejdůležitějším parametrem pro energetickou účinnost ČOV objem vody v odlehčovací nádrži. Nastavení výkonu čerpací stanice s ohledem na tento parametr má potenciál pozitivního dopadu na účinnost dalších zařízení ČOV. Provedení optimalizace pouze podle vlastní spotřeby energie nese riziko negativního dopadu na celkovou účinnost technologie.

*Tab. 12 Vyhodnocení parametrů pro čerpací stanici na přítoku.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
<b>Čerpací stanice na přítoku</b>	Objem vody v odlehčovací nádrži		2	3	1	5
	Nárůst spotřeby energie	<b>Vstupní</b>	2	2	1	4
	Množství přitékající vody		1	3	1	4
	Teplota čerpadla		2	2	1	4
	Průtok vody čerpadlem	<b>Výstupní</b>	2	1	4	3
	Otáčky čerpadla		2	1	3	3
	Spotřeba energie		4	1	1	5
	Počet zapojených čerpadel		2	1	3	3

Jednotlivá kritéria analyzovaných parametrů pro mamutová čerpadla uvádí Tab. 13. Omezené množství variabilních parametrů značně limituje možnosti optimalizace mamutových čerpadel na provozech ČOV. Podle *Faktoru využitelnosti* má největší potenciál pro optimalizaci spotřeba vzduchu. Z hlediska interakce s ostatní technologií ČOV bylo identifikováno pouze dílčí ovlivnění účinností mechanického stupně čištění na velikost pevných částic. Nedostatečný průtok pevných částic čerpadlem by se mohl negativně projevit na hydraulické účinnosti usazovací nádrže.

*Tab. 13 Vyhodnocení parametrů mamutových čerpadel.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
<b>Mamutová čerpadla</b>	Tlak vzduchu	<b>Vstupní</b>	2	1	1	3
	Velikost pevných částic		4	1	2	5
	Průtok vody	<b>Výstupní</b>	4	1	1	5
	Hmotnostní průtok pevných látek		4	1	2	5
	Průtok vzduchu		1	1	1	2

Zjištěné parametry pro hodnocení usazovacích nádrží jsou uvedeny v Tab. 14. Vysoké hodnoty *Faktoru využitelnosti* u většiny parametrů vypovídají o vysoké náročnosti provádění optimalizačních zásahů při provozu. Rovněž vysoké hodnoty interakce výsledných parametrů upozorňují na skutečnost, že posuzování účinnosti usazovacích nádrží bez jejich náležitého zohlednění může vést k mylným závěrům.

## HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

*Tab. 14 Vyhodnocení parametrů usazovacích nádrží.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
Usazovací nádrže	Objem vody a pevných částic na přítoku	Vstupní	1	3	2	4
	Podíl pevných částic		3	3	2	6
	Objem rozpuštěných organických nečistot		2	3	1	5
	Objem rozpuštěných dusíkových nečistot		2	3	1	5
	Vznosná odtoková rychlost	Výstupní	4	2	1	6
	Zdržná doba		3	2	4	5
	Objem pevných látek na odtoku		3	2	4	5
	Objem vody na odtoku		3	2	4	5

Vyhodnocení parametrů aerace aktivačních nádrží je uvedeno v Tab. 15. Nejnáročnějším vstupním parametrem je skutečná účinnost přenosu kyslíku (která koreluje s mnoha dílčími parametry). Vysoké hodnoty *Faktoru využitelnosti* u dalších parametrů jsou dány značnou závislostí na jiných technologiích (což se také odráží v hodnotě interakce) a nedostatečným měřením.

*Tab. 15 Vyhodnocení parametrů aerace aktivačních nádrží.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
Aerace aktivačních nádrží	Skutečná rychlost přenosu kyslíku	Vstupní	3	3	3	6
	Tlak vzduchu		2	2	1	4
	Objem vody na přítoku		1	2	2	3
	Objem a složení rozpuštěného znečištění		2	3	2	5
	Zdržná doba	Výstupní	2	2	2	4
	Množství rozpuštěného kyslíku		1	2	1	3
	Zanesení difuzorů		4	2	1	6
	Spotřeba vzduchu		2	1	1	3
	Přípustné množství znečišťujících látek na odtoku		3	3	2	6

Tab. 16 uvádí hodnocení parametrů pro míchání vyhnívacích nádrží. Z analýzy vyplývá, že případná optimalizace míchání je náročná především pro omezené možnosti měřitelnosti vstupních parametrů a náročnou regulaci výsledných parametrů. Produkce bioplynu je pro optimalizaci míchání nejnáročněji využitelný parametr. Při navrhování inovačních úprav je třeba brát ohled na možné pění, které může přerušit celý proces. Získat maximální možné

## HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

informace o změnách reologických vlastností kalu při procesu je pro vlastní optimalizaci velmi přínosné.

*Tab. 16 Vyhodnocení parametrů míchání vyhnívacích nádrží.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti	
<b>Míchání vyhnívacích nádrží</b>	Objemová spotřeba energie	<b>Vstupní</b>	3	3	1	6	
	Hustota kalu		3	2	3	5	
	Reologie kalu během procesu fermentace		4	2	2	6	
	Smykové napětí kalu		4	1	1	5	
	Množství organických látek		3	2	2	5	
	Podíl anorganických pevných látek		3	1	3	4	
	Objem kalu na přítoku		1	3	2	4	
	Rychlost kalu v nádrži		<b>Výstupní</b>	3	2	1	5
	Pěnění			4	3	1	7
	Produkce bioplynu			4	4	1	8
Spotřeba elektrické energie	2	1		1	3		
Zdržná doba		2	1	2	3		

Pro adsorpční záchyt fosforu byl sice identifikován rozsáhlý soubor parametrů, ale většina z nich reprezentuje charakteristické parametry sorbentu a předpokládá se, že budou při provozu konstatní. V Tab. 17 jsou hodnoceny nalezené variabilní parametry. Množství zachyceného fosforu je klíčový parametr pro navazující zařízení určené pro zhodnocení zachyceného fosforu, jako je třeba srážení struvitu. Průtok odpadní vody je zcela závislý na výkonových parametrech prakticky všech strojně-technologických zařízení ČOV. Koncentrace fosforu v odpadní vodě je závislá na míře biologického odstranění fosforu v aktivačních nádržích. V případě instalace tohoto zařízení by bylo třeba tento proces v biologickém stupni v maximální míře potlačit, aby množství přitékajícího fosforu do terciálního stupně bylo co nejvíce.

Poslední krok analýzy, tedy celkové posouzení zařízení stanovením *Inovační náročnosti* a *Faktoru interakce*, je provedeno v souhrnné tabulce (viz Tab. 18). V celkovém hodnocení zařízení vychází vysoká *Inovační náročnost* pro adsorpci fosforu, dále pro usazovací nádrže a míchání vyhnívacích nádrží. Naopak čerpacím stanicím na přítoku a mamutovým čerpadlům analýza přisuzuje možnost snadných inovačních zásahů pro zvýšení hydraulické účinnosti.

## HODNOCENÍ ÚČINNOSTI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ

*Tab. 17 Vyhodnocení parametrů adsorpce fosforu.*

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
<b>Adsorpce fosforu</b>	Koncentrace P na přítoku	<b>Vstupní</b>	1	3	3	4
	Průtok OV na přítoku		1	3	4	4
	Množství zachyceného P	<b>Výstupní</b>	4	4	4	8
	Koncentrace P na odtoku		4	3	2	7
	Doba provozního cyklu		3	1	1	4

*Tab. 18 Celkové posouzení náročnosti analyzovaných zařízení.*

Zařízení	Inovační náročnost	Faktor interakce	
		Vstupní	Výsledná
Čerpací stanice na přítoku	3.88	1.00	2.75
Mamutová čerpadla	4.00	1.50	1.33
Usazovací nádrže	5.13	1.50	3.25
Aerace aktivačních nádrží	4.44	2.00	1.40
Míchání vyhnívacích nádrží	5.08	2.00	1.20
Adsorpce fosforu	5.40	3,50	2.33

*Faktor interakce*, (který je získán aritmetickým průměrem bodů interakce jednotlivých parametrů) umožňuje posoudit vazby zařízení na ostatní technologii ČOV. Z posuzovaných zařízení vychází jako nejvíce ovlivněná adsorpce fosforu, u které však vychází i vysoká míra dopadu na provoz dalších zařízení. Dále je vysoce ovlivněna aerace aktivačních nádrží a míchání vyhnívacích nádrží. Na jejich účinnosti se podle tohoto hodnocení značně projevuje účinnost ostatních zařízení ČOV, je proto výhodnější před návrhem vlastních inovačních zásahů důkladně vyhodnotit účinnost technologicky předřazených strojů. Pro usazovací nádrže a čerpací stanici na přítoku vychází nejvyšší míra dopadu vlastního provozu na chod další technologie. Významný dopad je přisuzován i procesu adsorpce fosforu, ačkoliv ten je řazen téměř na konec technologie. Návrh optimalizačních nebo inovačních zásahů do těchto zařízení by měl brát ohled na technologické limity navazujících strojů, neboť je zde velké riziko, že zvýšení vlastní účinnosti se negativně projeví na celkové účinnosti provozu ČOV.

### 5.3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY

Z analýzy vyplynuly zajímavé poznatky, které potvrzují náročnost výběru vhodných parametrů pro hodnocení účinnosti zařízení. Například pro řízení výkonu čerpadel na přítoku je žádoucí brát ohled na potřeby technologie ČOV a výkon regulovat podle aktuálního a očekávaného přítoku. Vlastní spotřeba elektrické energie zde tvoří až druhotný (podřízený) parametr.

Usazovací nádrže, které z hlediska energetické náročnosti představují nevýznamné zařízení, mají velký vliv na provoz a energetickou náročnost navazujících procesů. Nalezení optimální



účinnosti usazovacích nádrží není jednoduché a je třeba vycházet ze skutečného obsahu organických látek v odpadní vodě a z provozních parametrů navazujících zařízení.

Optimalizace míchání vyhnívacích nádrží je závislá na mnoha proměnných parametrech, která však nejsou v současnosti na provozech ČOV monitorovány. Vlastní možnosti měření jsou rovněž značně omezené. Jako nejobtížnější parametry k optimalizaci určila analýza množství bioplynu a pění kalu.

Získané závěry potvrzují hypotézu, že hodnocení účinnosti pouze podle základních parametrů zařízení není správné. Štítkové parametry zařízení mají na stanovení požadovaného výkonu pouze dílčí vliv. To potvrzuje předpoklad, že hodnocení účinnosti pouze podle základních parametrů zařízení je nedostatečné. Analýza dále umožňuje vytipovat parametry, jejichž znalost je pro zvyšování hydraulické účinnosti nezbytná, což umožňuje posoudit stav zberu dat na provozu a doplnit měření pro pokrytí chybějících údajů. Díky tomu lze lépe volit návrh případných inovací a minimalizovat riziko negativních dopadů. Výsledky analyzovaných zařízení potvrzují riziko špatného hodnocení účinnosti zařízení, pokud nejsou brány v potaz vazby na technologii ČOV a z nich vyplývající parametry. Navržená metodika výběru a hodnocení parametrů byla spolu s příklady aplikací na vybraných strojních zařízeních ČOV publikována [140].

V budoucnu by tato metodika mohla umožnit provozovatelům provádět vlastní průběžné hodnocení strojně-technologického zařízení, díky čemuž by mohli lépe volit investiční strategii a zaměřit se na nejproblémovější zařízení. Pro každé zařízení by měli k dispozici seznam všech dotčených parametrů a podle reálného stavu by prováděli jejich třídění a hodnocení. Tím by se zabránilo opomenutí klíčových parametrů a z toho plynoucího nesprávného hodnocení zařízení.



## 6 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY A JEJÍ UPŘESNĚNÍ

Analýzou vybraných zařízení byly definovány klíčové parametry pro hodnocení hydraulické účinnosti a byl získán celkový vhled do problematiky hodnocení účinnosti a inovačního potenciálu těchto zařízení. Navržená metodika tak napomáhá správnému výběru všech dotčených parametrů a umožňuje vyhodnotit míru jejich důležitosti z hlediska interakce a využitelnosti pro zvyšování hydraulické účinnosti. Při praktickém použití by eliminovala nesprávné posuzování řešených zařízení a přispěla k adekvátnějšímu návrhu hydraulických zařízení a optimalizačních zásahů.

Aby bylo metodiku možné aplikovat v praxi podle zamýšleného způsobu, je nutné ověřit, zda soubor identifikovaných parametrů je dostatečný a jejich hodnocení odpovídá skutečnému přínosu. K tomu je zapotřebí provést validaci získaných výsledků z analýzy. Vzhledem k odbornému zázemí a nadstandardní technické vybavenosti laboratoří Ústavu procesního inženýrství (dále jen ÚPI) bylo rozhodnuto, že potřebná data pro validaci metody budou získána experimentálním měřením.

### 6.1 VÝBĚR ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro dosažení výsledků s vysokou vypovídající hodnotou byla experimentální práce zaměřena na dvojici vybraných zařízení. Při jejich výběru se přihlíželo na následující faktory:

- Dostupnost teoretických poznatků o zařízení v odborné literatuře.
- Dostupnost praktických znalostí z provozu zařízení.
- Zkušenosti výzkumného týmu.
- Možnost spolupráce s odborníky z praxe.
- Možnosti provádění terénního výzkumu.
- Možnosti provádění laboratorního výzkumu.
- Časová náročnost výzkumu.
- Finanční náročnost výzkumu.
- Technické možnosti dostupných laboratoří.
- Komplikovanost terénního výzkumu.

S ohledem na tyto faktory bylo rozhodnuto, že experimentální část výzkumu bude zaměřena na:

1. mamutová čerpadla,
2. adsorpci fosforu

U těchto zařízení analýza identifikovala velký soubor dotčených parametrů, z nichž však byla malá část variabilních. Následné vyhodnocení *Inovační náročnosti a Faktoru interakce* vychází z malého objemu dat, což zvyšuje význam variabilních parametrů jejich využití pro zvýšení hydraulické účinnosti. Důkladné poznání vazeb těchto parametrů je proto u těchto zařízení zásadní.

Ve prospěch laboratorního výzkumu vybraných zařízení svědčí také skutečnost, že jejich výzkum pouze na provozech ČOV je buď velmi obtížný, nebo přímo neproveditelný.

Specializovaný experimentální výzkum v laboratořích je tak pro hlubší poznání těchto zařízení nezbytný.

### 6.2 NÁVRH EXPERIMENTŮ

Pro vybrané zařízení byly na základě analýzy stanoveny dílčí cíle experimentálních výzkumů, přičemž hlavní cíl sledoval ověřit a popřípadně i upřesnit výsledky navržené metodiky. V následujících podkapitolách budou představeny dílčí cíle pro jednotlivá zařízení.

#### 6.2.1 MAMUTOVÁ ČERPADLA PRO ČERPÁNÍ PÍSKU

Z provedené analýzy mamutových čerpadel vyplynul jako nejlépe využitelný parametr pro zvýšení hydraulické účinnosti průtok tlakového vzduchu. Tento parametr má přímý vliv na čerpací charakteristiku čerpadla. Provedená rešerše však ukazuje, že čerpací charakteristika je značně ovlivněna i pevnými geometrickými parametry, které analýza rovněž identifikovala. Vliv těchto parametrů se pravděpodobně promítá i do průtoku tlakového vzduchu.

Dosud provedené výzkumy většinou probíhaly na rozměrově menších mamutových čerpadlech s odlišnou geometrií, než jaká je používána na mamutových čerpadlech instalovaných na provozech ČOV. Zjištění reálných čerpacích charakteristik pro provozní čerpadla přináší největší vypovídající hodnotu. Dostupná literatura dále naznačuje, že hydraulická účinnost mamutových čerpadlech přímo na provozech ČOV není příliš řešena, a protože jejich nízký podíl na celkové energetické náročnosti provozu ČOV svědčí o malém přínosu jejich inovace, nebyl tento dosud vyhodnocen. Posouzení vlivu jednotlivých parametrů na hydraulickou účinnost mamutových čerpadel tak umožní nejen validovat navrženou metodiku, ale také provést návrh vhodné inovace a vyhodnotit její celkový přínos.

Za tímto účelem je nutno získat čerpací charakteristiky, které musí jednoznačně pokrývat vliv všech klíčových parametrů, tedy:

- výšku výtlačku,
- hloubku ponoření,
- průměr výtlačného potrubí,
- průtok vzduchu.

Všechny tyto parametry mají vliv na výkon čerpadla, který představuje množství vyčerpané vody. Je proto třeba získat závislosti pro různé konfigurace čerpadla. To však na provozech ČOV není možné, a proto bylo rozhodnuto o vytvoření vlastního měřicího standu, na kterém budou proměřeny čerpací charakteristiky různých průměrů.

Na základě tohoto rozhodnutí byly specifikovány dílčí cíle experimentu:

1. Vytvoření měřicího plánu.
2. Stanovení technických požadavků na měřicí stand.
3. Sestavení standu a provedení měření.
4. Vyhodnocení vlivu parametrů.

5. Návrh inovace mamutových čerpadel.

Podle těchto dílčích cílů bylo dále postupováno.

### 6.2.2 ADSORPČNÍ ZÁCHYT FOSFORU

Jak už bylo zmíněno, odstraňování fosforu z odpadní vody pomocí adsorpce je nadějnou technologií pro terciální stupeň. Kromě zlepšení kvalitativních parametrů vyčištěné vody je zde velký potenciál v možnosti recyklace zachyceného fosforu. Provozy ČOV by tak získaly hodnotný vedlejší produkt, který by, podobně jako bioplyn, umožnil vylepšit ekonomickou bilanci procesu. Tato problematika byla řešena v rámci aplikovaného výzkumu Získávání nutrientů z odpadních vod IV, TA04020217-2017V006, program Alfa TA04020217: Inovativní způsob čištění odpadních vod se zaměřením na získání nutrientů v čisté formě. Autor práce byl součástí řešitelského týmu tohoto projektu.

Pro případné rozšíření této technologie bude potřeba provést technickoekonomické rozvahy, které posoudí vhodnost její implementace do konkrétních provozů. Na výsledcích modelových scénářů technickoekonomických studií se projeví i vliv jednotlivých parametrů, které byly nalezeny navrženou metodikou. Pro validaci metodiky je tak třeba provést návrh modelové jednotky pro adsorpci fosforu, pro kterou budou počítány různé scénáře a umožní se tak provést hodnocení identifikovaných parametrů.

Provedená analýza adsorpce fosforu sice identifikovala rozsáhlý soubor parametrů, ale většina z nich reprezentuje charakteristické parametry sorbentu, u kterého předpokládá, že budou při provozu konstatní. Odborná literatura však naznačuje, že na sorpční schopnosti mají vliv i ty parametry, které jsou v provozu variabilní. Je otázkou, zda je vliv těchto parametrů natolik významný, aby bylo nutné překlasifikovat charakteristické parametry sorbentu na variabilní a pokud ano, tak které z nich budou mít největší vliv na hydraulickou účinnost zařízení.

Za tímto účelem bylo rozhodnuto o experimentálním získání sorpčních charakteristik zvoleného sorpčního materiálu, na kterých bude pozorováno ovlivnění jinými parametry a posuzována jejich provozní stabilita. Podle získaných výsledků bude upřesněna již provedená analýza. Za tímto účelem bylo možno zformulovat dílčí cíle, které se dále následovaly:

1. Vytvoření měřicího plánu.
2. Zajištění technického vybavení.
3. Změření parametrů sorbentu.
4. Vyhodnocení vlivu parametrů na sorpční charakteristiky.
5. Návrh adsorpční jednotky pro ČOV.
6. Vyhodnocení vlivu parametrů na technologii adsorpční jednotky.



## 7 PŘÍPRAVA A PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ

Naplánovaná experimentální činnost byla provedena výlučně v laboratořích ÚPI v koordinaci s dalšími výzkumnými aktivitami. Jednotlivé experimenty probíhaly postupně a vždy ve spolupráci s ostatními vědeckými pracovníky ÚPI a s externími odborníky z praxe. Autor této práce se podílel na návrhu a realizaci všech uvedených experimentů. Pro měření mamutových čerpadel se podílel při návrhu konceptu měřicího standu a vytvářel jeho technickou specifikaci, podle níž byl navrhnutý stand vyroben. V průběhu experimentu měření prováděl montážní úpravy standu podle měřicího plánu a sbíral naměřená data, která dále vyhodnocoval. Pro měření adsorpce fosforu navrhnul a sestavil adsorpční kolony s technickým příslušenstvím. Při měření se podílel na odběru a měření vzorků a vyhodnocení získaných dat.

### 7.1 MĚŘENÍ ČERPACÍCH CHARAKTERISTIK MAMUTOVÝCH ČERPADEL

Cílem experimentu je získání čerpacích charakteristik pro různé konfigurace geometrických parametrů. K tomuto účelu bylo zapotřebí navrhnout a postavit speciální měřicí stand, který by umožnil získání všech dat podle měřicího plánu.

#### 7.1.1 STANOVENÍ MĚŘICÍHO PLÁNU

Jak už bylo zmíněno, čerpací charakteristika mamutových čerpadel je závislá na čtyřech parametrech. Aby tak bylo možné stanovit vliv jednotlivých parametrů na čerpací výkon, musí konstrukce měřicího standu umožňovat jejich variabilitu. Proto byly nejprve stanoveny rozsahy jednotlivých parametrů, ve kterých probíhalo vlastní měření.

Výrobce dodal k proměření pět mamutových čerpadel o průměrech DN 65, DN 80, DN 100, DN 125 a DN 150, která bývají instalována na provozech ČOV. Všechna tato čerpadla byla geometricky stejné konstrukce, lišila se pouze v průměru výtlačného potrubí, což je jeden z klíčových parametrů. S ohledem na reálné umístění mamutových čerpadel v technologii ČOV byl stanoven rozsah dalších klíčových parametrů, tedy hloubka ponoření od 1 do 4 metrů a výška výtlačku od 0,5 do 4,5 metru. Poslední parametr, průtok vzduchu, byl dán v rozsahu od 0 do 280 Nm<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, což je maximální množství, které mohlo poskytnout technické zázemí laboratoře ÚPI.

Dle stanovených rozsahů byl vytvořen měřicí plán hloubek ponoru a výšek výtlačku měřených pro každé čerpadlo (viz Tab. 19). Jak je patrné, hloubka ponoru je měřena po jednom metru, výška výtlačku po půl metru. V takto nastavených jednotlivých konfiguracích bude postupně zvyšován průtok vzduchu a zaznamenáván nárůst průtoku čerpané kapaliny. Měření konfigurace bude ukončeno v okamžiku, kdy buď bude dosaženo maximálního průtoku vody, nebo dojde k maximálnímu průtoku vzduchu. Tento plán počítá s úplným proměření 28 konfigurací, což se při pěti čerpadlech jeví jako časově příliš náročné. Proto bylo rozhodnuto, že podle plného měřicího plánu bude změřeno jen jedno čerpadlo a ostatní budou proměřena podle redukovaného měřicího plánu, který je uveden v Tab. 20.

Tab. 19 Plný měřicí plán.

		Výtlačná výška $H$ [m]								
Hloubka ponoru $P$ [m]	1,0	0,5	1,0	1,5	–	–	–	–	–	–
	1,5	0,5	1,0	1,5	2,0	–	–	–	–	–
	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	–	–	–	–
	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	–	–
	4,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5

Tab. 20 Redukovaný měřicí plán.

		Výtlačná výška $H$ [m]								
Hloubka ponoru $P$ [m]	1,0	0,5	1,0	1,5	–	–	–	–	–	–
	1,5	0,5	1,0	1,5	2,0	–	–	–	–	–
	2,0	0,5	–	1,5	–	2,5	–	–	–	–
	3,0	0,5	–	1,5	–	2,5	–	3,5	–	–
	4,0	0,5	–	1,5	–	2,5	–	3,5	–	4,5

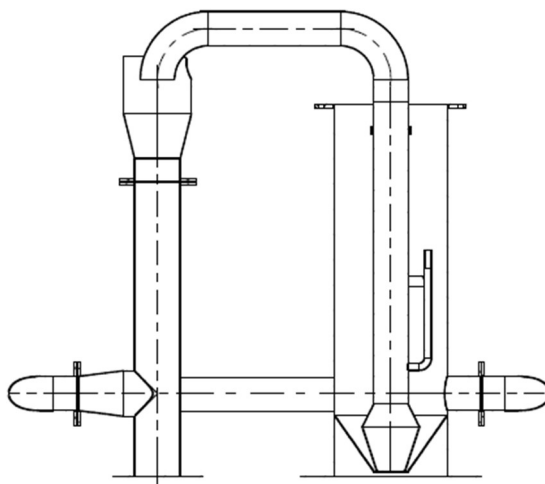
Tím byly stanoveny všechny požadavky nezbytné pro vlastní návrh měřicího standu.

### 7.1.2 NÁVRH MĚŘICÍHO STANDU

Měřicí stand musí být dostatečně univerzální, aby umožnil proměření všech stanovených pracovních bodů pro pět rozměrových řad mamutových čerpadel. Dále musí zajistit, aby měření výstupního parametru, tedy průtoku čerpané vody, zaručovalo dosažení maximální možné přesnosti. S ohledem na tyto požadavky byla navržena koncepce přečerpávání vody ve dvou spojených nádobách, kde měření průtoku bude probíhat na vratném a již nezavzdušněném potrubí spojující obě nádoby (viz Obr. 18). Mamutové čerpadlo tak bude v jedné nádobě ponořeno do požadované hloubky a výtlačné potrubí bude postaveno do požadované výšky. Mamutka tak čerpá kapalinu do vedlejší nádoby, ve které dochází k odvzdušnění vyčerpávané směsi. Vlivem spojených nádob se vratným potrubím vrací k mamutce stejné množství kapaliny, které bylo vyčerpáno.

Jako pracovní kapalina se zvolila čistá voda. Pro měření průtoku byl použit ultrazvukový průtokoměr, jehož senzory byly upevněny z vnější strany vratného potrubí. Průměr vratného potrubí byl stanoven s ohledem na dodržení doporučených délek uklidňovacích úseků před a za průtokoměrem.





Obr. 18 Konceptní náčrt měřicího standu.

Hlavní nádrž, ve které je umístěné mamutové čerpadlo, má průměr 500 milimetrů a skládá se ze základny a 4 nastavovacích dílů, z nichž dva mají délku 0,5 metru a dva mají délku 1 metr. U dna hlavní nádrže je vyvedeno hrdlo pro napouštění a vypouštění vody z nádrže a hrdlo s připevněnou transparentní hadicí z PVC, která slouží jako vodoznak. Vratná nádrž má průměr 200 milimetrů a sestává se opět ze základny, 14 nastavovacích dílů o délce 0,5 metru a trychtýře. Všechny tyto díly se spojují šrouby pomocí přírub. Obě nádrže jsou spojeny vratným potrubím o průměru 150 milimetrů, které je připojeno rovněž pomocí přírub. Všechny díly zařízení jsou vyrobeny z nerezové oceli.

Mamutová čerpadla jsou v hlavní nádrži upevněna pomocí konzolí a objímek. Uchycení konzolí je nastavitelné podle velikosti mamutového čerpadla. Ke každé rozměrové řadě mamutky přísluší 14 kusů výtlačného potrubí o délce 0,5 metru. To je vzájemně spojováno pomocí trubních spojek Normaconnect Flex. Těch je vždy ke každé rozměrové řadě 15. Jejich výhodou je menší montážní náročnost na prostor a čas.

Vzhledem k celkové výšce zařízení je vedle hlavní nádrže umístěn kotevní sloup o průměru 150 milimetrů. Ten je ve výšce 4,6 metru připevněn k pevné konstrukci v laboratoři. K tomuto sloupu je pomocí příslušných konzolí a objímek upevněn každý díl hlavní nádrže a výtlačné potrubí. Díly vratné nádrže jsou pomocí dalších konzolí upevněny k hlavní nádrži a k výtlačnému potrubí.

Tlakový vzduch byl do mamutky přiváděn gumopryžovou hadicí o rozměru 1" a jeho průtok byl měřen hmotnostním průtokoměrem z příslušenství laboratorní zkušebny hořáků ÚPI.

Celé zařízení bylo kvůli záchytu případných úniků vody postaveno na bezpečnostní záchytné jímce pro IBC kontejnery. Z bezpečnostních důvodů se vždy po měření ze zařízení vypouštěla většina vody. Aby se tato voda nemusela znovu dodávat z vodovodního řadu, což by bylo neekonomické, tak se vypouštěná voda zachytávala v IBC kontejneru, odkud se před měřením znovu přečerpala do měřicího standu.

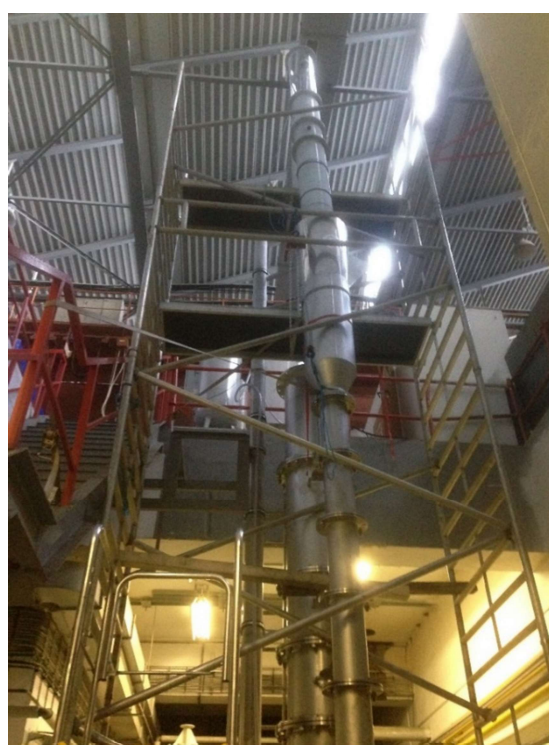
Základní parametry měřicího standu jsou uvedeny v Tab. 21, na Obr. 19 je vyobrazeno sestavené měřicí zařízení pro měření krajních rozsahů pracovních bodů.

Tab. 21 Přehled charakteristických rozměrů měřicího standu.

Parametr	Údaj
Maximální výška x šířka x délka	9,064 x 1,15 x 2,6 m
Průměr hlavní nádrže	500 mm
Průměr vratné nádrže	200 mm
Průměr vratného potrubí	150 mm
Maximální objem nádrže	1,7 m <sup>3</sup>
Hmotnost experimentálního zařízení	1041 kg



1



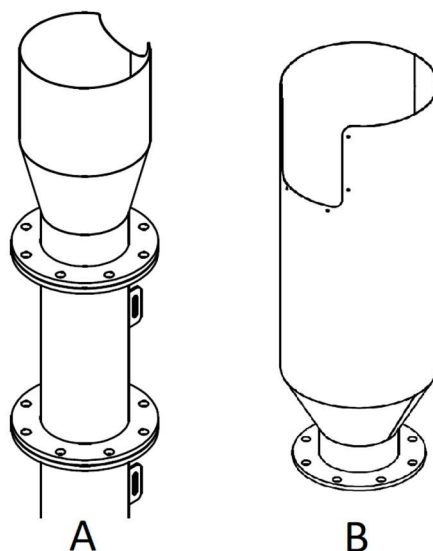
2

Obr. 19 Zařízení při měření nejmenšího (1) a největšího (2) ponoru a výtlačku.

### 7.1.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Jako první bylo podle plného měřicího plánu proměřeno mamutové čerpadlo DN 100, které je v praxi nejvíce používáno. Ostatní čerpadla byla měřena podle redukovaného měřicího plánu. V průběhu měření se na původním návrhu měřicího standu vyskytly nedostatky, které se musely operativně vyřešit. Prvním nedostatek, který se projevil, bylo vystřikování a přetékaní vody z trychtýře vratné nádrže při větších průtocích vody a vzduchu. Zvednutí hladiny ve vratné nádrži navíc způsobilo ponoření výtlačného potrubí a vytvoření protitlaku na výtlačku. Čerpadlo

tak nevytlačovalo kapalinu do volného prostředí, což vedlo ke zkreslení měřených dat. Příčinou tohoto jevu byl příliš malý trychtýř na vratné nádrži, ve kterém nebylo dostatek prostoru na oddělení bublin vzduchu od vody a docházelo tak ke vzkypění vody ve vratné nádrži. Proto byl navržen nový trychtýř (viz Obr. 20), kterým byl ten původní nahrazen, kromě případu měření nejmenšího ponoření a nejmenší výšky výtlaku, kde se nový trychtýř pro své větší rozměry nemohl namontovat.



Obr. 20 Úprava trychtýře vratného potrubí. A) původní trychtýř, B) nový trychtýř.

Další problém nastal při měření výšky výtlaku 2,5 metru a vyšších. Při těchto výškách docházelo k velmi nevyrovnanému toku kapaliny mezi nádržemi, což se projevilo značným kolísáním hladiny v nádržích. Za tohoto stavu se nemohly z ultrazvukového průtokoměru odečítat hodnoty a celé měření muselo být zastaveno. Příčinou tohoto jevu je příliš úzká vratná nádrž. Vlivem nerovnoměrnému chodu mamutového čerpadla, který je dán principem jeho činnosti, docházelo k nárazovému zahlcení vratné nádrže. Kinetická energie dopadající vody je navíc zvětšena výškou hrdla výtlačného potrubí nad hladinou. Vratným potrubím pak nestíhají nárazové objemy vody protéct a dochází k výše popsanému jevu nepravidelného průtoku a kolísání hladiny. Aby se zabránilo tomuto jevu, bylo nutné proud padající vody z výtlačného potrubí rozrážet. K tomu se využilo plastové potrubí s regulační klapou, které bylo ve vybavení laboratoře. Vratná nádrž s trychtýřem se tak montovala pouze do výšky hlavní nádrže. Na výtlačné potrubí se pak zavěsilo plastové potrubí s klapou, jehož dolní konec ústil do trychtýře vratné nádrže (viz Obr. 21). Jak se zvyšovala výška výtlačného potrubí, tak se postupně prodlužovalo plastové potrubí (viz Obr. 22). Tato úprava zcela splnila svůj účel, navíc rozbíjením proudu vody docházelo k dokonalejšímu odvodu vzduchu a v neposlední řadě se tím i zrychlila montáž zařízení. Ostatní čerpadla byla měřena podle redukovaného měřicího plánu.



*Obr. 21 Zavěšené plastové potrubí.*



*Obr. 22 Plastové potrubí při maximální výšce výtlačku.*

## 7.1.4 STANOVENÍ ČERPACÍCH CHARAKTERISTIK

Z naměřených dat bylo nutné vytvořit čerpací charakteristiky, což vyžadovalo změřené hodnoty jednotlivých pracovních bodů interpolovat vhodnou funkcí, díky které mohl být vytvořen kompletní průběh čerpací charakteristiky.

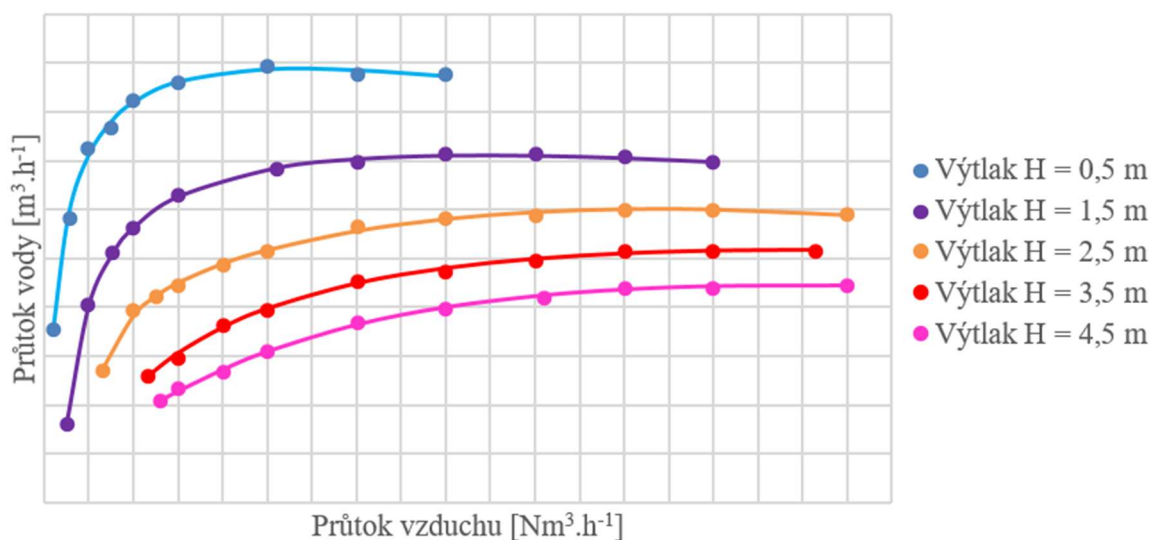
Užitím regresní analýzy byla data proložena křivkami podle rovnice:

$$Q_{V,n} = a + b \cdot \ln(Q_{A,n}) + c \cdot \ln^2(Q_{A,n}) + d \cdot \ln^3(Q_{A,n}) + e \cdot \ln^4(Q_{A,n}) + f \cdot \ln^5(Q_{A,n}) \quad (10-3)$$

Kde:

- $Q_V$  - průtok vody [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ],
- $Q_A$  - průtok vzduchu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ],
- a, b, c, d, e, f - regresní koeficienty modelu [-],
- index n - hodnota konkrétního bodu [-].

Regresní koeficienty se pro každou křivku čerpací charakteristiky liší. Tím byly vytvořeny kompletní čerpací charakteristiky, které byly následně graficky zpracovány. Pro ilustraci výsledné podoby grafů je uveden Graf 8. Vyznačené body ukazují reálně změřené hodnoty pracovních bodů, kterými byla proložena funkce 10-3.



Graf 8 Ukázka podoby získaných čerpacích charakteristik.

Změřením čerpacích charakteristik pro různé geometrické konfigurace pěti různých mamutových čerpadel byl získán rozsáhlý soubor dat pro vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů. Výše uvedený průběh měření čerpacích charakteristik mamutových čerpadel byl prezentován na konferenci TVIP – Odpadové fórum 2018 v Hustopečích [141].

## 7.2 ZÍSKÁNÍ SORPČNÍCH CHARAKTERISTIK

Hlavním cílem experimentální činnosti spojené s návrhem adsorpční jednotky bylo získání křivek mapujících průběh procesu adsorpce a desorpce. Tyto křivky popisují závislost nasycení sorbentu na objemu protečené kapaliny. Pro řešenou adsorpci fosforu je nutné měřit objem protečené vody a průběžně sledovat koncentraci fosforu ve vodě na výstupu z adsorpční kolony. V průběhu adsorpce sorpční lože zachytává veškeré fosforečné látky rozpuštěné ve vodě a koncentrace fosforu na výstupu z kolony je tak nulová. V okamžiku, kdy se část fosforečnanů dostane až do odtoku z kolony, dojde k tzv. průrazu sorpčního lože, a od této chvíle už koncentrace fosforu na odtoku kolony stoupá až na hodnotu jeho koncentrace na vstupu. V ten moment dojde k úplnému nasycení sorpčního lože. Křivka znázorňující průběh adsorpce je proto označována jako průrazová.

Při regeneraci se opět sleduje závislost koncentrace fosforu v recyklátu na jeho protečeném objemu, která má logicky opačný průběh. Jak ubývá množství zachyceného fosforu v sorpčním loži, klesá i koncentrace fosforu v recyklátu. Po protečení určitého objemu recyklátu se přestane zachycený fosfor uvolňovat a proces desorpce se ukončí. V ideálním případě by množství fosforu v recyklátu mělo představovat 100 % zachyceného fosforu při adsorpci. V praxi však určité množství fosforu v sorbentu zůstává, což vyjadřuje regenerační poměr.

Průběh křivek adsorpce a desorpce je ovlivněn nejen vlastnostmi samotného sorbentu, ale i dalšími parametry celého procesu. Aby bylo možné sledovat jejich vliv, byl vypracován následující plán měření.

### 7.2.1 PLÁN MĚŘENÍ

Při stanovování plánu měření bylo nutné vzít kromě zkoumaných parametrů v potaz celkovou časovou náročnost experimentu. Provedení jednoho cyklu adsorpce a desorpce představuje časově poměrně dlouhý úsek, během kterého je nutno provádět neustálé vzorkování a spotřebuje se při něm nemalé množství vody. Odebrané vzorky se musí rovněž průběžně vyhodnocovat. Navíc je třeba pro zjištění časové stability regeneračního poměru provést alespoň dva kompletní cykly. Podcenění časové náročnosti experimentu by způsobila jeho nezvládnutí a znehodnocení dosažených výsledků. Z tohoto důvodu bylo nutno zkoumat vliv pouze u vybraných parametrů.

Klíčovým prvkem experimentu je náplň sorpčního lože. Pro experiment byla použita ion-výměnná pryskyřice Lewatit® FO 36, která se běžně používá k odstranění rozpuštěných látek z kapalin. Úprava vody je největší oblastí použití iontoměničových pryskyřic. Lewatit® FO 36 je makroporézní monodisperzní pryskyřice na bázi polystyrenu pro selektivní adsorpci oxoaniontů. Jedná se o slabě zásaditou iontoměničovou pryskyřici, která je dopovaná nanočásticovým filmem oxidu železa pokrývající vnitřní povrchy pórů polymerového lože. Oxoanionty jsou vázány specifickou, reverzibilní reakcí zahrnující hydroxidové skupiny na povrchu oxidu železa. Pryskyřice váže kromě  $\text{HPO}_4^{2-}$  také další oxoanionty a ionty (např.  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{HSbO}_4^{2-}$ ,  $\text{HVO}_4^{2-}$ ,  $\text{SCN}^-$  apod.), tj. není plně selektivní k  $\text{HPO}_4^{2-}$  [142].

Výhody iontoměničů dopovaných oxidem železitým na báze polymerní pryskyřice ve srovnání se standardními anorganickými adsorbenty jsou zejména:

- vysoká míra regenerovatelnosti
- vysoká provozní kapacita
- žádné ztráty jemných částic oxidu železa
- vysoká mechanická pevnost, která umožňuje snadné zpětné čištění nebo čerpaní v suspenzi
- žádné blokování vrstvy pryskyřice v důsledku tvorby jemných částic
- rychlá kinetika díky vysokému specifickému povrchu a optimalizované struktuře pórů

Po důkladných úvahách bylo rozhodnuto, že experiment bude probíhat v pěti laboratorních kolonách. Pro měření byly zvoleny dva objemy sorpčního lože, a to 100 ml a 30 ml. Vzhledem k nutné spotřebě vody i regeneračních činidel byl větší objem použit pouze v jedné koloně. Od těchto parametrů byly zvoleny vstupní parametry pro první cyklus adsorpce, které jsou pro větší přehlednost uvedeny až v následující kapitole spolu s vyhodnocením získaných výsledků. Složení recyklačního činidla vycházelo z doporučení výrobce sorbentu. Tento sorbent však nikdy nebyl použit pro tuto aplikaci, a tak výrobce nemohl poskytnout relevantní doporučení pro koncentraci regenerátu, který normálně představuje roztok 2 % hydroxidu sodného (NaOH) a 2 % chloridu sodného (NaCl). Do plánu měření proto bylo zahrnuto i změření jiných koncentrací. Na základě získaných výsledků měření z prvního cyklu byly poté voleny parametry do druhého cyklu.

Během adsorpce i desorpce bude v pravidelných časových intervalech probíhat vzorkování, u kterého se změří protečený objem a koncentrace vody nebo regenerátu na výstupu. Z těchto údajů se pak dopočtou následné parametry:

- skutečný průtok,
- množství zachyceného fosforu,
- množství regenerovaného fosforu,
- regenerační poměr

Podle stanoveného plánu měření bylo nutno zajistit veškeré technické vybavení a příslušenství.

### 7.2.2 ZAJIŠTĚNÍ TECHNICKÉHO VYBAVENÍ

Pro kolony Z, A, B a C bylo použito potrubí z průhledného plastu o vnitřním průměru 21 mm. Na ně byly vyřezány závity a našroubovány průmyslové tvarovky, které umožňovaly připojení laboratorních silikonových hadiček o průměru 6 mm. Sestavené kolony jsou vyobrazeny na Obr. 23. Pro kolonu K 100 byl upraven laboratorní válec o vnitřním průměru 50 mm vyrobený rovněž průhledného plastu. V jeho dně byl vyroben otvor se závitem, do kterého byla opět našroubována tvarovka pro uchycení silikonové hadičky. Obr. 24 zobrazuje kolonu K 100 v průběhu experimentu. Nosným elementem pro sorpční lože bylo vyrobeno z molitanu, u kterého bylo před samotným experimentem ověřeno, že dokáže zabránit odplavování částic sorbentu do odtoku kolony.



*Obr. 23 Kolony Z, A, B a C.*



*Obr. 24 Kolona K100.*



Pro čerpání vody při adsorpci byly použity laboratorní dávkovací čerpadla Grundfos, která umožňuje regulovat průtok v rozsahu  $0,006 - 6 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ . Při desorpci bylo regenerační činidlo do kolon dávkováno manuálně a průtok recyklátu byl omezen zaškrcením silikonové hadičky, které bylo předem nastaveno.

Pro co největší přiblížení se reálným podmínkám byla místo syntetického namíchání vody z jednotlivých složek a simulování jejího složení použita přímo odpadní voda z ČOV. Z důvodu neúměrného časového fondu testování v případě použití odpadní vody v původní kvalitě, byla dále voda dotována fosforečnany na úroveň stanovenou podle plánu měření. Jako zdroj odpadní vody byla použita voda z ČOV Bystrovany s parametry shrnutými v Tab. 22.

Tab. 22 Parametry zdroje odpadní vody z ČOV Bystrovany

Ukazatel	Hodnota	Jednotka
vápník	65,87	mg/l
hořčík	9,91	mg/l
fosfor ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )	1,58	mg/l
amoniakální dusík	0,81	mg/l
$\text{CHSK}_{\text{Cr}}$	28	mg/l

Měření koncentrací fosforu probíhalo fotometricky buď metodou stanovení fosfomolybdenové modře (metoda analogická s EPA 365.2+3, US 4500-P E, ISO 6878/1 a EN 1189) nebo molybdovanadofosforečné kyseliny (metoda analogická s APHA 4500-P C). Kvůli omezenému měřitelnému rozsahu uvedených metod byly vzorky podle očekávané koncentrace příslušně ředěny.

### 7.2.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

Experiment začal namícháním požadované koncentrace fosforu v dovezené odpadní vodě. Po nastavení průtoku na dávkovacích čerpadlech bylo zahájeno sycení sorpčního lože. V pravidelných intervalech byly odebírány vzorky na odtoku z kolon a provedlo se změření protečeného objemu. Takto se pokračovalo až do získání kompletní průrazové křivky pro všechny kolony.

Během měření se ukázalo, že průtok vody sorpčním ložem není stabilní. Pravděpodobnou příčinou bylo proměnlivá sací výška dávkovacích čerpadel podle ubývání vody v zásobní nádrži. Protože lze předpokládat, že v reálném provozu bude průtok odpadní vody adsorpční kolonou rovněž kolísat, rozhodlo se o neodstranění této příčiny, a naopak sledovat její vliv na výsledné parametry. Při desorpci průtok regenerátu rovněž kolísal vlivem nepřesností manuálního dávkování, avšak tento vliv na výsledky regenerace nebyl sledován.

Po ukončení procesu adsorpce byla neprodleně zahájena desorpce kolon. V pravidelných intervalech byl opět měřen proteklý objem regenerátu a koncentrace fosforu. Pro omezený

měřicí rozsah použité fotometrické metody bylo nutné jednotlivé vzorky patřičně rozředit. Proces regenerace byl zastaven při poklesu koncentrace fosforu pod  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . Navržené vstupní parametry uvádí Tab. 23, skutečné vstupní parametry pro první cyklus adsorpce a desorpce uvádí Tab. 24.

Tab. 23 Vstupní parametry pro první cyklus adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Objem soprčního lože (= 1 BV) [ml]	30	30	30	30	100
Poměr výšky k průměru kolony	4	4	4	4	1
Průtok vody [ $\text{BV}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	10	10	10	13	16
Koncentrace P na vstupu [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	20	16	16	20	5
Složení regeneračního činidla (NaOH/NaCl) [%]	0,5/3	0,5/6	2/6	0/6	0,25/1
Průtok regenerátu [ $\text{BV}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	4	4	4	4	0,55

Tab. 24 Skutečné vstupní parametry pro první cyklus adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Objem soprčního lože (= 1 BV) [ml]	30	30	30	30	100
Poměr výšky lože k jeho průměru	4	4	4	4	1
Složení regeneračního činidla (NaOH/NaCl) [%]	0,5/3	0,5/6	2/6	0/6	0,25/1
Skutečný průměrný průtok vody [ $\text{BV}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	11,15	10,99	11,48	13,34	16,21
Směrodatná odchylka průtoku vody	3,963	4,254	4,143	3,71	2,451
Skutečný průměrný průtok regenerátu [ $\text{BV}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	3,823	4,029	3,993	3,884	0,551
Průměrná zdržná doba při adsorpci [min]	5,38	5,46	5,23	4,50	3,70
Průměrná zdržná doba při desorpci [min]	15,69	14,89	15,03	15,45	108,89

Ze získaných výsledků byly dopočítány další výsledné parametry, které jsou uvedeny v Tab. 25. Z nich vyplývá, že na proces adsorpce má největší vliv zdržná doba, jejíž vyšší hodnota pro kolony A, B, C a Z se projevila ve vyšších sorpčních kapacitách. Menší kolísání průtoku kolony Z se patrně projevilo rovnoměrnějším sycením lože a dosažením tak vyšší sorpční kapacity do bodu průrazu, který byl stanoven při překročení koncentrace fosforu na

výstupu 1 mg/l, který byl zvolen na základě limitů přípustných koncentrací fosforu v odpadní vodě na odtoku ČOV. Větší koncentrace fosforu na vstupu koreluje s vyššími hodnotami dosažené sorpční kapacity.

Na proces desorpce má největší vliv složení regeneračního činidla. Volba složení činidla pro kolonu Z (0 % NaOH, 6 % NaCl) se ukázala jako zcela nevhodná a proces desorpce byl proto zastaven. Zvyšováním obsahu NaOH vedlo k získání menšího objemu regenerátu s vyšší koncentrací fosforu. Koncentrace NaCl a zdržná doba pro desorpci se projevila na regeneračním poměru, avšak ze získaných výsledků prvního cyklu nelze jednoznačně určit, který z těchto dvou vstupních parametrů má převládající vliv.

Tab. 25 Výstupní parametry prvního cyklu adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Koncentrace regenerátu [mg·l <sup>-1</sup> ]	228,1	328,9	610,8	69,8	181,9
Celkový objem regenerátu [BV]	15,02	10,37	7,07	3,18	22,11
Regenerační poměr [%]	50,6	58,7	61,9	5,9	86,5
Sorpční kapacita do bodu průrazu [mg·ml <sup>-1</sup> ]	5,33	5,00	5,33	5,83	3,50
Celková sorpční kapacita [mg·ml <sup>-1</sup> ]	7,21	7,17	7,45	7,38	4,97

Provedená analýza identifikovala sorpční kapacitu sorbentu jako jeden z důležitých parametrů. Obvykle se pod tímto parametrem skrývá celková sorpční kapacita do úplného nasycení sorpčního lože, což však z hlediska praktického návrhu adsorpční jednotky popisuje už nepřijatelný stav. Pro zachování přípustných limitů koncentrace fosforu na odtoku odpadní vody je třeba proces adsorpce zastavit už při dosažení bodu průrazu. V této práci byl bod průrazu stanoven při dosažení koncentrace na výstupu 1 mg/l. Tato hodnota vychází z nejmenšího přípustného množství fosforu ve vodě na odtoku, což je podmínka pro velké provozy ČOV (nad 100 000 EO) [12]. Pro menší provozy by bylo možné stanovit bod průrazu na vyšší koncentrace, avšak tím by se zmenšil zachycený objem fosforu, který je zásadní pro ekonomickou bilanci této technologie. Z tohoto důvodu je pro modelový návrh použit nejpřísnější limit koncentrace na výstupu. Lze očekávat, že kvůli maximalizaci ekonomických zisků budou provozovatelé ČOV vyžadovat ještě menší koncentrace.

Pro druhý cyklus experimentu navržené vstupní parametry doznaly určitých změn (viz Tab. 26). Pro druhý cyklus byly zvýšením průtoku vody pro adsorpci a snížením průtoku regenerátu při desorpci změněny zdržné doby, aby bylo možno sledovat jejich vlivy. Dále byly upravené koncentrace regeneračního činidla a pro kolony s BV 30 ml byla zvýšena vstupní koncentrace fosforu.

Tab. 26 Návrhové parametry pro druhý cyklus adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Objem soprčního lože (= 1 BV) [ml]	30	30	30	30	100
Průtok vody [BV·h <sup>-1</sup> ]	24	24	24	24	12
Koncentrace P na vstupu [mg·l <sup>-1</sup> ]	18	18	18	18	5
Složení regeneračního činidla (NaOH/NaCl) [%]	0,25/6	0,5/6	2/6	1/6	0,5/3
Průtok regenerátu [BV·h <sup>-1</sup> ]	1	2	2	4	0,55

Postup měření zůstal nezměněn. V průběhu měření došlo k neočekávatelnému výpadku v dodávce odpadní vody z ČOV, kvůli kterému byl přerušen proces adsorpce u menších kolon na několik dní. Po obnovení procesu došlo ke skokovému zvýšení množství zachyceného fosforu, což se ve výsledku projevilo na vyšší celkové sorpční kapacitě. Skutečné parametry druhého cyklu jsou uvedeny v Tab. 27.

Tab. 27 Skutečné vstupní parametry pro druhý cyklus adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Objem soprčního lože (= 1 BV) [ml]	30	30	30	30	100
Poměr výšky lože k jeho průměru	4	4	4	4	1
Složení regeneračního činidla (NaOH/NaCl) [%]	0,25/6	0,5/6	2/6	1/6	0,5/3
Skutečný průměrný průtok vody [BV·h <sup>-1</sup> ]	23,44	23,02	24,47	24,31	12,23
Směrodatná odchylka průtoku	2,812	3,626	6,214	5,423	2,182
Skutečný průměrný průtok regenerátu [BV·h <sup>-1</sup> ]	0,916	1,746	0,877	3,434	0,555
Průměrná zdržná doba při adsorpci [min]	2,56	2,61	2,45	2,47	4,91
Průměrná zdržná doba při desorpci [min]	65,50	34,36	68,42	17,47	108,11

Výsledné parametry druhého cyklu uvádí Tab. 28. Vlivem nedokončené desorpce kolony Z nebylo možné stanovit sorpční kapacitu do bodu průrazu a ani úbytek regeneračního poměru. Druhé měření potvrdilo sledované trendy složení regeneračního činidla a vyvrátilo hypotézu vlivu zdržné doby desorpce na velikost regeneračního poměru. Lze opět sledovat korelaci vstupní koncentrace fosforu na dosažené hodnoty sorpční kapacity, avšak vlivy ostatních parametrů na průběh adsorpce sledovaných u prvního cyklu výsledky druhého cyklu

nepotvrzují, ale ani zcela nevyvrací. Všechny kolony vykazují úbytek regeneračního poměru. Nejmenší úbytek vykazuje největší objem sorpčního lože.

Tab. 28 Výstupní parametry prvního cyklu adsorpce a desorpce.

Parametr	Označení kolony				
	A	B	C	Z	K100
Koncentrace regenerátu [mg·l <sup>-1</sup> ]	127,9	166,1	314,7	273,2	307,8
Celkový objem regenerátu [BV]	22,18	14,18	9,83	13,9	7,72
Regenerační poměr [%]	16,7	15,9	16,1	27,5	73,5
Sorpční kapacita do bodu průrazu [mg·ml <sup>-1</sup> ]	2,33	3,00	3,33	N/A	1,10
Celková sorpční kapacita [mg·ml <sup>-1</sup> ]	14,18	15,32	15,80	14,21	3,23
Úbytek regeneračního poměru [%]	67,00	72,91	73,99	N/A	15,03

Za účelem stanovení sorpčních charakteristik pro zvolený sorpční materiál byla provedeny dvě sady měření pro různé vstupní parametry. Vyhodnocením dosažených výsledků vyšlo najevo, že zvolený sorpční materiál není pro praktické použití na provozech ČOV příliš vhodný, což je dáno poměrně nízkou sorpční kapacitou, malým regeneračním poměrem, a především velkým úbytkem regeneračního poměru při opakování desorpčního cyklu. Hlavním cílem však bylo získání potřebných charakteristik pro návrh modelové adsorpční jednotky, což se podařilo. Výsledky provedeného experimentu byly prezentovány na konferenci EcoSTP IWA 2018 [143].

Nejdůležitějším výsledkem experimentu je vyvrácení hypotézy, že charakteristické parametry sorbentu jsou v provozu konstatní. Při použití tohoto sorbentu by hydraulickou účinnost adsorpční jednotky ovlivňovalo více parametrů, než kolik jich identifikovala provedená analýza.

Na výsledcích prvního cyklu byla pozorován vliv zdržné doby a její kolísání na dosaženou sorpční kapacitu. Koncentrace fosforu na vstupu korelovala s hodnotami sorpční kapacity. Výsledky druhého cyklu adsorpce byly poznamenány buceným přerušením experimentu a nelze je použít pro ověření nebo vyvrácení sledovaných vlivů parametrů z prvního cyklu měření. Pro další návrh modelové jednotky budou použity nejlepší dosažené výsledky z prvního cyklu.

Při regeneraci byl prokázán vliv složení regeneračního činidla na koncentraci regenerátu a tím i jeho nutný objem pro regeneraci sorpčního lože. Společně se zdržnou dobou desorpce byl sledován jejich dopad na velikost regeneračního poměru, kde se však nepodařilo zcela potvrdit sledované trendy. Praktický dopad těchto hodnot bude dále přezkoumán při návrhu modelové adsorpční jednotky.

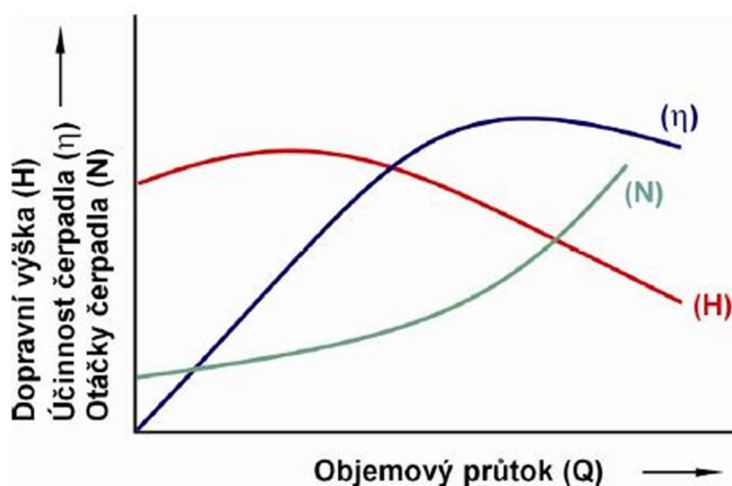


## 8 VALIDACE VÝSLEDKŮ ANALÝZY SE ZÍSKANÝMI DATY

Získáním konkrétních hodnot klíčových parametrů řešených zařízení lze vyhodnotit vliv těchto parametrů na hydraulickou účinnost těchto zařízení a validovat výsledky získaných provedenou analýzou.

### 8.1 MAMUTOVÁ ČERPADLA – VYHODNOCENÍ VLIVU PARAMETRŮ

Pro návrh běžného čerpadla je nutné stanovit požadovaný průtok a dopravní výšku, ve které jsou zahrnuty místní tlakové ztráty potrubní trasy. Tyto podmínky definují tzv. pracovní bod čerpadla. Správně zvolené čerpadlo dosahuje v pracovním bodu nejvyšší účinnosti. Pro jeho výběr je tak třeba znát jeho čerpací charakteristiku, jejíž podoba pro nejběžnější odstředivá čerpadla vyobrazuje Graf 9.



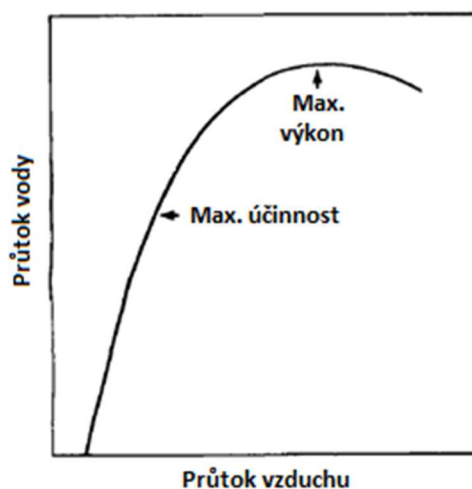
Graf 9 Čerpací charakteristika odstředivých čerpadel [144].

Experimentálně získané čerpací charakteristiky mamutových čerpadel popisují závislost objemu vyčerpané vody na objemu dodávaného vzduchu pro zadanou geometrickou konfiguraci. Pro výběr optimálního mamutového čerpadla je nutné zjistit jeho účinnost. Ta bude ovlivněna kromě průtoku vzduchu i geometrickými parametry, jejichž vliv je třeba poznat. Na základě získaných účinností je pak možné provést modelový návrh mamutového čerpadla.

#### 8.1.1 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITY

Z naměřených čerpacích charakteristik pro jednotlivé geometrické konfigurace bylo patrné, že průtok čerpané vody roste s průtokem vzduchu až do svého maximálního výkonu. Další nárůst průtoku vzduchu je už kontraproduktivní a snižuje objem čerpané kapaliny. Z průběhu čerpací charakteristiky však nelze nijak vypožorovat, ve kterém okamžiku dochází k největšímu využití energie tlakového vzduchu a tím i k nejvyšší účinnosti.

Různé vědecké publikace uvádí, že maximální účinnosti mamutová čerpadla dosahují při nižších čerpacích výkonech, jak je znázorněno na Obr. 25 [61], [145].



Obr. 25 Bod maximální účinnosti mamutových čerpadel [61].

Stanovením účinnosti mamutových čerpadel se okrajově zabývalo několik studií uvedených v rešerši (kapitola 5.2.2), které pro její výpočet nejčastěji používaly následující vztah vycházející z předpokladu izometrického děje [103]:

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_V \cdot H}{P_a \cdot Q_A \cdot \ln\left(\frac{P_{in}}{P_{Atm}}\right)} \quad (9-1)$$

kde:

- $\eta$  - účinnost [-]
- $Q_V$  - průtok vody mamutového čerpadla [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $Q_A$  - průtok tlakového vzduchu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]
- $P_{in}$  - přívodní tlak vzduchu [Pa]
- $P_{Atm}$  - atmosférický tlak [Pa]
- $\rho$  - hustota kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $H$  - výška výtlaku mamutového čerpadla [m]
- $g$  - gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

Tento vztah je široce používán navzdory studii z roku 1986, která tento vztah považuje za nedokonalý kvůli zanedbání tlakových ztrát a uvádí vlastní, značně sofistikovanější rovnici, která už tyto ztráty zahrnuje a lze z ní určit optimální průměr potrubí, průtok vzduchu nebo poměr ponorů. Kromě základních koeficientů pro dvoufázové proudění a výše uvedených parametrů počítá i s tlak vzduchu na trysce a na výtlaku mamutky. Tato rovnice byla experimentálně ověřena jak na provozních datech instalovaných čerpadel, tak i laboratorním experimentálním měření [61].



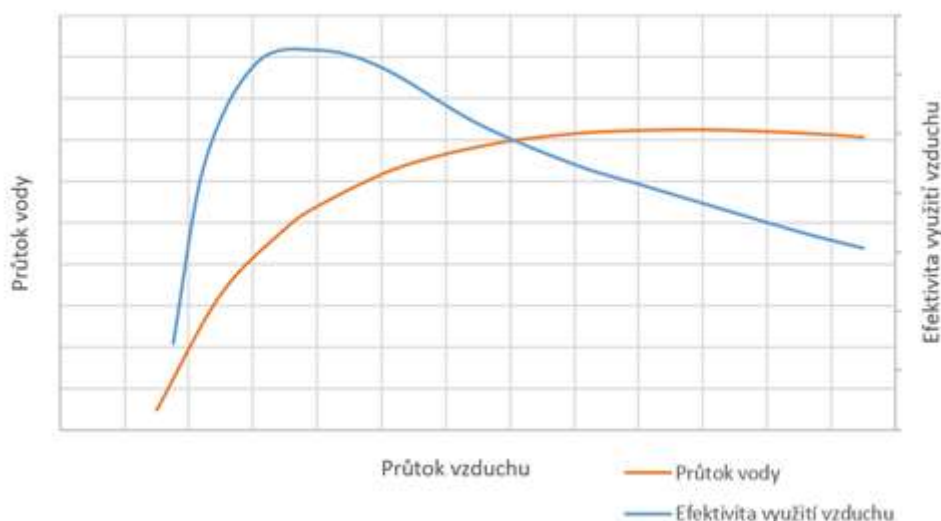
Vypočtené hodnoty účinností podle uvedených rovnic by se však nedaly nijak validovat s experimentálně získanými daty. Proto je v této práci posuzována účinnost přímo z naměřených dat a vychází z porovnání úměrnosti nárůstu průtoku vody a nárůstu průtoku vzduchu. Tuto hodnotu nelze považovat za absolutní účinnost čerpadla, ale za míru efektivity využití přiváděného vzduchu, která byla vypočtena následovně:

$$E_f = \frac{Q_V \cdot 0,06}{Q_A} \quad (9-2)$$

Kde:

- $E_f$  - efektivita využití vzduchu [-]
- $Q_V$  - průtok vody [ $l \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- $Q_A$  - průtok vzduchu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]

Průběh efektivity v závislosti na průtoku vzduchu spolu s průběhem průtoku vody uvádí Graf 10. Jak je vidět, Efektivita využití vzduchu kopíruje udávaný trend účinnosti a dosahuje maximální efektivity při nižších průtocích vzduchu než při maximálním výkonu.



Graf 10 Průběh efektivity využití vzduchu a průtoku vody.

Nyní lze stanovit body maximálního výkonu  $Q_{V-\text{Max}}$  a maximální efektivity  $E_{f-\text{Max}}$  pro každou konfiguraci čerpadla. Tyto body však nejsou prakticky využitelné, neboť provozování čerpadla při maximálním průtoku bude příliš nákladné a při maximální efektivitě bude mít velmi nízký výkon. Je třeba stanovit optimální pracovní bod čerpadla, kdy bude dosaženo přijatelného kompromisu.

Proto byla pro každý změřený bod vypočtena poměrná efektivita  $E_{f-\text{Rel}}$  a poměrný průtok  $Q_{V-\text{Rel}}$ . Jsou vypočteny jako procentuální vyjádření dané hodnoty vůči maximální dosažené hodnotě. Jejich výpočty pro každý změřený bod  $n$  představují následující vztahy:

$$E_{f-\text{Rel},n} = \frac{E_{f,n} \cdot 100}{E_{f-\text{Max}}} \quad (9-3)$$

$$Q_{V-Rel,n} = \frac{Q_{V,n} \cdot 100}{Q_{V-Max}} \quad (9-4)$$

Kde:

- $E_{f-Rel}$  - poměrná efektivita využití vzduchu [-]
- $E_{f-Max}$  - poměrná maximální efektivita při dané konfiguraci [-]
- $Q_{V-Rel}$  - poměrný průtok vody [ $l \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- $Q_{V-Max}$  - poměrný maximální průtok vody při dané konfiguraci [ $l \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- index n - hodnoty pro konkrétní změřený bod

Získané hodnoty byly zaneseny do grafů. Průnik křivek představuje stav, pro který platí rovnost poměrné efektivity a poměrného průtoku (viz rovnici 9-5) a který bude dále uváděn jako pracovní bod.

$$E_{f-Rel} = Q_{V-Rel} \quad (9-5)$$

Přesné stanovení pracovního bodu by bylo možné matematicky pomocí interpolace vypočtených hodnot obou poměrných parametrů vhodnými funkcemi, avšak pro účely této práce je dostačující odečet průtoku vzduchu pracovního bodu z vytvořených grafů, kde byly jednotlivé body lineárně aproximovány (viz. Graf 11). Hodnoty  $E_{f-Opt}$  a  $Q_{V-Opt}$  pro pracovní bod je možné podle úměrnosti vypočítat ze sousedních změřených bodů:

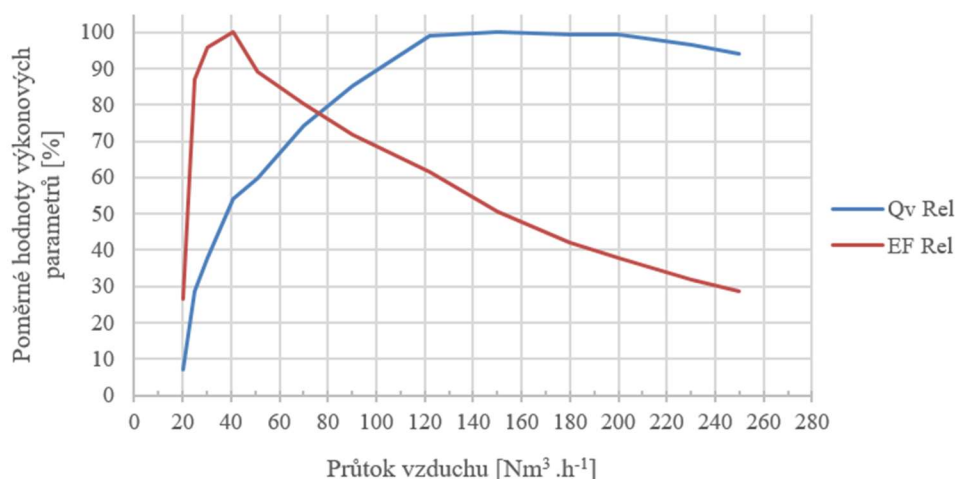
$$Q_{V-Opt} = \left[ \frac{(Q_{A-Opt} - Q_{A,1})}{(Q_{A,2} - Q_{A,1})} \cdot (Q_{V,2} - Q_{V,1}) \right] + Q_{V,1} \quad (9-6)$$

$$E_{f-Opt} = E_{f,1} - \left[ \frac{(Q_{A-Opt} - Q_{A,1})}{(Q_{A,2} - Q_{A,1})} \cdot (E_{f,1} - E_{f,2}) \right] \quad (9-7)$$

Kde:

- $E_{f-Opt}$  - efektivita využití vzduchu pracovního bodu [-]
- $Q_{V-Opt}$  - průtok vody pracovního bodu [ $l \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- $Q_{A-Opt}$  - průtok vzduchu pracovního bodu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]
- index 1,2 - hodnoty pro vedlejší změřené body

Takto jsou vypočtené hodnoty pracovních bodů pro každou konfiguraci čerpadla. Průtok vzduchu tedy má přímý a největší vliv na průtok čerpané vody a je to jediný parametr, kterým lze za provozu měnit čerpací výkon mamutových čerpadel.

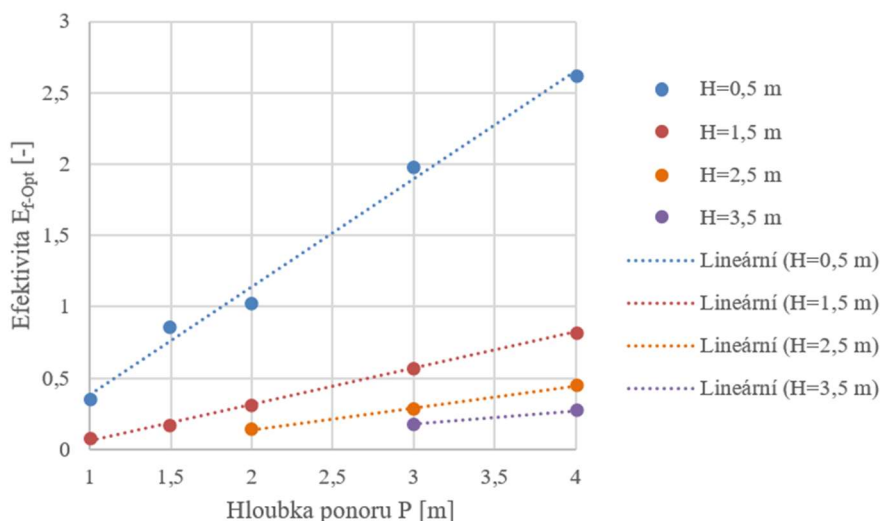


Graf 11 Poměrné výkonové křivky čerpadla.

### 8.1.2 VLIV JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ NA MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITU

Vypočtená efektivita umožnila získat pracovní body pro jednotlivé geometrické konfigurace. Pro návrh vhodné konfigurace je třeba zjistit vliv geometrických (pevných) parametrů na maximální efektivitu pracovních bodů.

Zásadními jsou hloubka ponoru (P) a výška výtlačku (H). Jejich vliv je dobře znázorňuje Graf 12.



Graf 12 Vliv geometrických parametrů na čerpací efektivitu.

Efektivita pracovních bodů se lineárně zvyšuje s rostoucí hloubkou ponoření. Naopak rostoucí výška výtlačku způsobuje nižší efektivitu. Z grafu je patrné, že tato závislost už nemá lineární průběh a rozdíl úbytku efektivit se s rostoucí výškou zmenšuje.

V literatuře je vliv těchto dvou parametrů hodnocen souhrnným parametrem označovaným jako tzv. poměrné ponoření, (angl. Submergence ratio), který se vypočte podle následujícího vztahu [145]:

$$S_R = \frac{P}{(P+L)} \quad (9-8)$$

Kde:

- $S_R$  - poměrné ponoření [-]
- $P$  - hloubka ponoření mamutového čerpadla [m]
- $L$  - délka výtlačného potrubí [m]

Vliv tohoto parametru zkoumal Tighzert a kol. experimentálně na mamutovém čerpadle o průměru 33 milimetrů, celkové výšce 3,1 metru a rozsahu  $S_R$  od 0,22 do 0,94 [145]. Výsledkem bylo zjištění, že nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při  $S_R = 0,75$  a optimální provozní režim mamutových čerpadel se pohybuje v intervalu  $S_R = (0,4 - 0,75)$ .

Experiment provedený v této práci měl měřicí plán stanoven na základě reálných konfigurací instalovaných čerpadel. V Tab. 29 je uvedena již známá tabulka plánu měření, ve které jsou však doplněny vypočtené hodnoty poměrného ponoření.

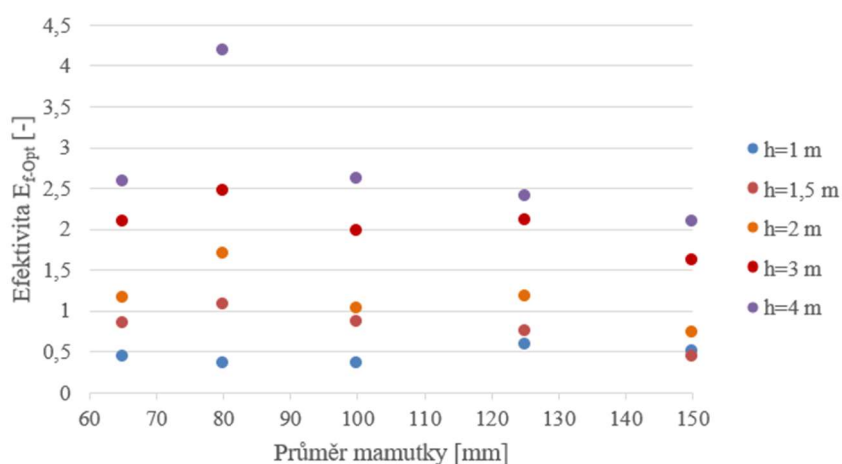
Tab. 29 Vypočtené  $S_R$  pro měřicí plán.

Poměrné ponoření $S_R$		Výtlačná výška H [m]								
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Hloubka ponoru P [m]	1	0,667	0,500	0,400	-	-	-	-	-	-
	1,5	0,750	0,600	0,500	0,429	-	-	-	-	-
	2	0,800	0,667	0,571	0,500	0,444	-	-	-	-
	3	0,857	0,750	0,667	0,600	0,545	0,500	0,462	-	-
	4	0,889	0,800	0,727	0,667	0,615	0,571	0,533	0,500	0,471

Experiment pokrýval interval  $S_R$  od 0,4 do 0,889 a některé hodnoty  $S_R$  obsahoval vícekrát. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo pro  $S_R = 0,889$ , což je mimo uváděný interval pro optimální provozní režim.

Posledním pevným parametrem ovlivňujícím čerpací charakteristiky čerpadel a tedy i hodnoty efektivity pracovních bodů je geometrie směšovací komory. Při experimentu se změna tato geometrie projevovala změnou průměru výtlačného potrubí. Vliv této změny na dosažené efektivity pracovních bodů uvádí Graf 13.

Z grafu je patrné, že geometrie přívodu vzduchu mamutových čerpadel má značný dopad na efektivitu pracovních bodů. Ze zkoumaných mamutek má nejvýhodnější geometrii průměr výtlačného potrubí DN 80, které od hloubek ponoru nad 1,5 metru vykazuje nejvyšší hodnoty efektivity.



Graf 13 Vliv průměru mamutového čerpadla na čerpací efektivitu.

Vyhodnocení vlivu potvrdilo závěr analýzy, která vyhodnotila průtok vzduchu jako nejlépe využitelný pro zvýšení hydraulické účinnosti. Provedený experiment umožnil vyhodnotit vliv jednotlivých pevných parametrů čerpací charakteristiky mamutových čerpadel, což umožní jejich lepší zohlednění pro inovační návrhy.

## 8.2 ADSORPČNÍ ZÁCHYT FOSFORU – VYHODNOCENÍ Vlivu PARAMETRŮ

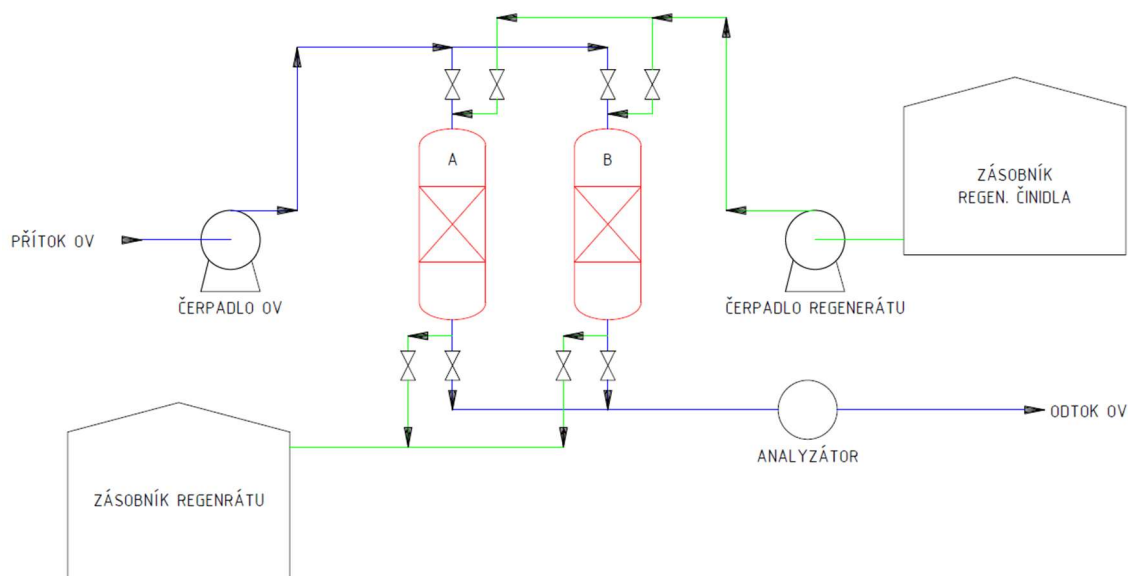
Závěry získané z vyhodnocení experimentálně získaných charakteristických parametrů sorbentu si požadují revizi klasifikace variability identifikovaných parametrů. Tyto parametry jsou však společně úzce provázané a jejich vliv na hydraulickou účinnost se částečně překrývá. Variabilita sorpční charakteristiky se projeví pouze prostřednictvím několika parametrů, které bude třeba zahrnout do analytického hodnocení parametrů. Pro zjištění dopadu jednotlivých parametrů je navržena modelová jednotka pro adsorpci fosforu v podmínkách reálné ČOV. Na tomto modelu pak bude možno sledovat dopady změn jednotlivých parametrů na provoz zařízení a jeho účinnost.

Pro modelový návrh byla využita provozní data ČOV Vsetín získaná od vedoucích pracovníků společnosti Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., která tuto čistírnu provozuje. Tato čistírna disponuje kompletní technologií odpovídající standardním provozům v ČR této velikosti. Její kapacita je 49 667 EO. Modelová jednotka by byla umístěna na odtoku odpadní vody z biologického stupně a tvořila by tak terciální stupeň čištění. V současné době je odstraňování fosforu z odpadní vody zvyšováno přidáváním síranu železitého v biologickém stupni.

### 8.2.1 NÁVRH ADSORPČNÍ JEDNOTKY PRO ČOV

Technologické schéma jednotky adsorpce je znázorněna na Obr. 26. Pro názornější vyhodnocení sledovaných parametrů je zvolena nejjednodušší podoba technologie. Ta se skládá ze dvou kolon, ve kterých se střídají jednotlivé cykly adsorpce a desorpce. Pro cyklus desorpce jsou zapotřebí další dvě nádrže pro regenerační činidlo a pro regenerát. Jejich objem je závislý

na nutném objemu regeneračního činidla pro proces desorpce a na časových možnostech jejich doplňování a vyprazdňování. Protože voda na odtoku z ČOV má obvykle malou energii, je nutné před jednotkou instalovat čerpadlo. Další čerpadlo musí být instalována pro čerpání regeneračního činidla. Přepínání provozních cyklů kolon se řídí automaticky podle maximální dovolené koncentrace fosforu na výstupu z odpadní vody. Pro tento účel je třeba na odtoku z jednotky instalovat analyzátor.



Obr. 26 Technologické schéma modelové adsorpční jednotky pro ČOV.

Klíčovým parametrem, od kterého se odvíjí ostatní parametry, je objem sorpčního lože. Pro jeho výpočet je možné vyjít buď ze zdržné doby adsorpce, ze které vyjde maximální rychlost toku odpadní vody (dále jen OV) a následně průtok. Tento přístup je vhodný pro prvotní orientační výpočet.

Praktičtější je stanovit si podle místních podmínek ideální dobu cyklu adsorpce a podle ní dopočítat ostatní parametry. Dalším voleným parametrem je plocha adsorpčního lože. Pro případovou studii se volily standardní válcové kolony o průměru 2 m. Potřebné parametry sorbentu jsou použity z experimentálního měření.

Závěrem je nutné stanovit průtok OV a její fosforové zatížení, který není konstatní. Pro návrh kolony jsou použity průměrné hodnoty. Tab. 30 uvádí všechny hodnoty všech vstupních parametrů, Tab. 31 dopočítané výsledné hodnoty.

Protože návrh vycházel ze stanovené doby cyklu adsorpce, je uvedený parametr zdržné doby vhodný pouze pro kontrolu návrhu. Skutečná zdržná doba by měla být vždy větší. Pro navržené technologické schéma a dvoudenní cyklus adsorpce jsou zapotřebí dvě adsorpční kolony o průměru 2 m a výšky lože 10,176 m, což není málo. Z praktického hlediska by bylo výhodné mít v záloze ještě jednu kolonu pro zajištění nepřetržitého provozu pro údržbu a výměnu sorpčního lože.

Tab. 30 Hodnoty vstupních parametrů pro návrh adsorpční jednotky.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměrný průtok odpadní vody	352	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Koncentrace P na přítoku (průměr)	11,07	mg·l <sup>-1</sup>
Zdržná doba adsorpce	4,5	min
Průměr kolony	2	m
Sorpční kapacita do průrazu	5,83	g·l <sup>-1</sup>
Zdržná doba desorpce	108,9	min
Nutný objem regenerátu	22,11	BV
Doba nasycení	48	h

Tab. 31 Výsledné parametry modelové adsorpční jednotky.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Objem vyčištěné vody za jeden cyklus	16 897	m <sup>3</sup>
Objem zachyceného P	186,3	kg
Nutné BV	31,953	m <sup>3</sup>
Rychlost toku odpadní vody	1,87	m·min <sup>-1</sup>
Výška lože	10,176	m
Skutečná zdržná doba	5,45	min

Výsledné parametry regeneračního cyklu navržené kolony uvádí Tab. 32. Pro proces je klíčová doba regenerace, která musí být vždy kratší, než je doba adsorpce.

Tab. 32 Výsledné parametry regenerace modelové adsorpční jednotky.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Objem regeneračního činidla	706,5	m <sup>3</sup>
Rychlost toku regenerátu	0,093	m·min <sup>-1</sup>
Průtok regenerátu	0,293	m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>
Doba regenerace	40,13	h

## 8.2.2 SLEDOVÁNÍ VLIVU JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ

Na výše navržené modelové jednotce byl sledován vybrané parametry. Velikost jednotky se odvíjí od průtoku odpadní vody a její zatížení fosforem. Jejich hodnoty však nejsou při provozu konstantní a jednotka adsorpce fosforu musí být schopna za každých podmínek zajistit dodržení

přípustné koncentrace fosforu na odtoku. Na modelové studii budou použita reálná data z ČOV Vsetín a bude sledován jejich dopad na provoz jednotky, především na dobu adsorpčního cyklu.

Měsíční průtok vody za rok 2017 kolísal od minima 204 625 m<sup>3</sup> v červenci do maxima 313 668 m<sup>3</sup> dosaženého v dubnu. Koncentrace fosforu v OV přitékající do čistírny se pohybovala v rozsahu od 2,46 mg·l<sup>-1</sup> až po 40,35 mg·l<sup>-1</sup>.

Pro tyto extrémní stavy jsou vypočteny časy jednoho cyklu adsorpce, které jsou uvedeny v Tab. 33. Doba regenerace není závislá na těchto vstupních parametrech a lze ji považovat za konstantní. Červeně jsou podbarveny stavy, kdy je cyklus adsorpce rychlejší, což znamená nedostatek času k desorpci lože.

Tab. 33 Změna doby cyklu adsorpce pro krajní stavy průtoku OV a koncentrace P.

Parametr		Doba cyklu adsorpce [h]		
		<i>min</i>	<i>průměr</i>	<i>max</i>
Fofor [mg·l <sup>-1</sup> ]		2,46	11,07	40,35
Průtok odpadní vody [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]				
<i>min</i>	275	276,46	61,44	16,86
<i>průměr</i>	352	216	48	13,17
<i>max</i>	435,7	174,54	38,79	10,64

Z výsledků vyplývá, že na dobu adsorpce má výraznější vliv koncentrace fosforu v OV. Ten navíc snižuje účinnost zachytu sorpčního lože, což znamená větší ztráty na celkové výtěžnosti fosforu. Průtok odpadní vody přináší méně razantní změny. Nejnepríznivější stav nejvyššího průtoku a nejvyšší koncentrace, který na ČOV Vsetín v dubnu skutečně nastal, vede ke zkrácení adsorpčního cyklu na méně než čtvrtinu, což by vedlo k nutnému odstavení jednotky.

Z výsledku experimentu vyplynulo, že velikost sorpční kapacity sorbentu ovlivňuje zdržná doba adsorpce a její kolísání. Skutečná zdržná doba vychází z geometrického tvaru sorpčního lože a skutečného průtoku odpadní vody, který je nutný regulovat. Experimentální měření naznačilo, že příliš velký rozptyl průtoku odpadní vody a tedy i zdržné doby může vést ke zmenšení sorpční kapacity a je proto třeba průtok odpadní vody regulovat. Na zdržnou dobu se projeví také změna tlakové ztráty sorpčního lože.

Při experimentálním měření byl sledován vliv složení regeneračního činidla a zdržné doby desorpce na nutný objem recyklátu a regenerační poměr. Návrh modelové jednotky vycházel z maximálního regeneračního poměru, při kterém sice dochází k nejmenšímu vyčerpávání sorpční kapacity lože, avšak vede k dlouhé době regenerace a velkým objemům regeneračního činidla. Následující tabulka (viz Tab. 34) ukazuje výsledné parametry procesu regenerace při použití kratší zdržné doby vedle parametrů modelové jednotky.

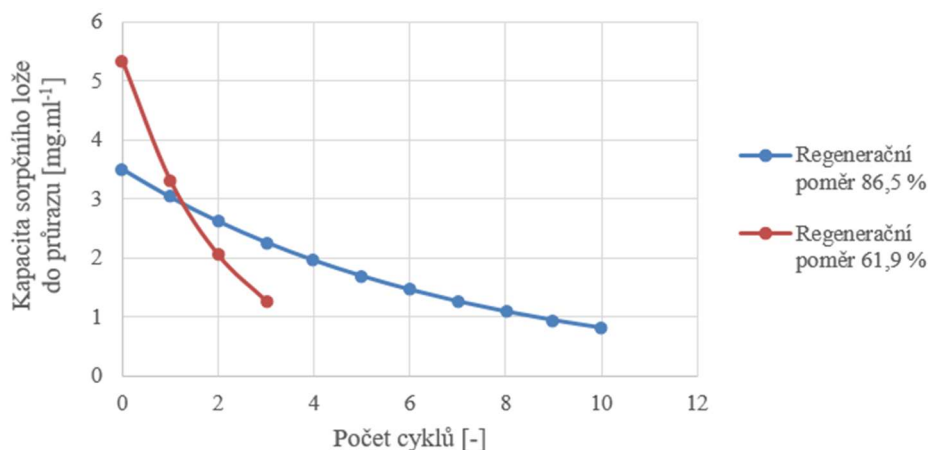


Tab. 34 Dopad výchozích parametrů na proces regenerace.

Výchozí parametry	A	B	Jednotka
Zdržná doba	108,9	15,03	min
Regenerační poměr	86,5	61,9	%
Nutný objem recyklátu	22,11	7,07	BV
Kapacita sorpčního lože do průrazu	3,5	5,33	mg·ml <sup>-1</sup>
Výsledné parametry			
Objem regeneračního činidla	706,47	225,9	m <sup>3</sup>
Rychlost toku regenerátu	0,093	0,677	m·min <sup>-1</sup>
Průtok recyklátu	0,293	2,126	m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>
Doba regenerace	40,13	1,77	h

Z těchto výsledků je zřejmé, že při zmenšení regeneračního poměru o 24,6 % dojde ke zmenšení objemu regenerátu o téměř 68 %, zvýšení průtoku čerpadla regenerátu přes 86 % a zkrácení doby desorpce o 95 %.

Graf 14 ukazuje srovnání počtu cyklů, kdy dojde k vyčerpání 75 % sorpční kapacity lože. Jak je vidět, při vyšším regeneračním poměru dojde k vyčerpání při 10 cyklu, při nižším regeneračním poměru až při třetím cyklu. V tomto výpočtu je regenerační poměr považován za konstantní hodnotu. V reálu by se musel ještě připočítat cyklický úbytek regeneračního poměru.



Graf 14 Rychlost vyčerpání sorpční kapacity lože.

Výsledky naznačují, že proces regenerace při menším regeneračním poměru vede k menší pořizovací ceně zařízení díky výrazně menším zásobníkům na regenerační činidlo a regenerát, avšak k větším provozním výdajům kvůli vyššímu výkonu čerpadla a častější výměně sorpčního lože. Je otázkou, do jaké míry by vyšší provozní náklady kompenzovala výrazně

kratší doba regenerace, díky které by nebylo nutné řešit výkyvy průtoku odpadní vody a koncentrace fosforu.

### 8.2.3 ZPŘESNĚNÍ ANALÝZY ADSORPCE FOSFORU

Navržená metodika provedla správné identifikování všech dotčených parametrů, ale stanovením nesprávné hypotézy došlo k špatné klasifikaci nalezených parametrů. Jednou změnou je upřesnění definice sorpční kapacity sorbentu, která je obvykle v literatuře chápána jako poměrná hodnota zachyceného fosforu na objem sorbentu při jeho úplném nasycení. Pro návrh adsorpční jednotky pro technologii ČOV je kvůli stanoveným přípustným limitům koncentrace fosforu na odtoku nutné počítat s hodnotou sorpční kapacity do bodu průrazu, tedy maximálně do dosažení přípustné koncentrace.

Vyhodnocení provedeného experimentu umožnilo identifikovat parametry, které mají významný vliv na hydraulickou účinnost zařízení a je tedy třeba je překlasifikovat na variabilní a zahrnout je do dalšího postupu analýzy. Tab. 35 už zahrnuje správně klasifikované parametry adsorpce fosforu a jejich hodnocení.

Tab. 35 Zpřesněná tabulka vyhodnocení parametrů adsorpce fosforu.

Zařízení	Parameter	Typ parametru	Možnost kvant./regul.	Čas	Interakce	Faktor využitelnosti
Adsorpce fosforu	Koncentrace P na přítoku	Vstupní	1	3	3	4
	Průtok OV na přítoku		1	3	4	4
	Sorpční kapacita do bodu průrazu		3	3	2	6
	Složení regeneračního činidla		2	1	1	3
	Regenerační poměr		3	2	1	5
	Množství zachyceného P		Výstupní	4	4	4
	Koncentrace P na odtoku	4		3	2	7
	Koncentrace P v recyklátu	3		2	3	5
	Zdržná doba adsorpce	2		1	2	3
	Zdržná doba desorpce	2		1	2	3
	Objem recyklátu	3		1	3	4
	Doba provozního cyklu	1	1	1	2	

Variabilita sorpčních charakteristik rozšiřuje možnosti regulace celkové doby provozního cyklu, takže bylo nutno změnit jeho bodové hodnocení. Podle nového vyhodnocení parametrů je třeba znovu stanovit *Inovační náročnost* a *Faktory interakce*. *Inovační náročnost* se snížila z 5,4 na 4,5, což je způsobeno skutečností, že přidáním parametrů lze zařízení lépe regulovat. *Faktor interakce* na vstupu je nyní 2,2 namísto původních 3,5 a *Faktor interakce* na výstupu se změnil z 2,33 na 2,43. Nové hodnoty více reflektují důležitost adsorpce fosforu na navazující zařízení, které bude zachycený fosfor dále zpracovávat. Ze vstupních parametrů má sorpční

kapacita do bodu průrazu nejvyšší *Faktor využitelnosti*, což zcela odpovídá experimentálním výsledkům.

Modelový návrh jednotky pro adsorpci fosforu potvrdil závěry analýzy, že hlavní vliv na hydraulickou účinnost zařízení mají především provozní parametry vyplývající z provozu konkrétní ČOV. Průtok odpadní vody a její zatížením fosforem mají přímý dopad na dobu jednoho cyklu adsorpce. K těmto parametrům je přidána sorpční kapacita do bodu průrazu, která se bude měnit podle provozního stavu. Rozptyl hodnot těchto parametrů může vést až k několikanásobnému zkrácení adsorpční doby, což může způsobit vynucení nouzového odstavení technologie. Získané výsledky ukazují, že špičkové koncentrace fosforu v odpadní vodě jsou z provozního hlediska závažnější, než špičkové průtoky odpadní vody. Navržená analýza u obou parametrů vyhodnotila nejvyšší *Faktor využitelnosti*, což koresponduje s dosaženými výsledky.

Průtok odpadní vody je zcela závislý na výkonových parametrech prakticky všech strojně-technologických zařízení ČOV. Jejich schopnost vyrovnávat špičkové průtoky vody se projeví na míře kolísání průtoku adsorpční jednotky. Koncentrace fosforu v odpadní vodě bude závislá na tom, do jaké míry bude potlačeno biologický záchyt fosforu v aktivačních nádržích.

Složení regeneračního činidla a regenerační poměr mají hlavní dopad na množství recyklátu, jeho koncentraci a zdržnou dobu desorpce, která se poté projeví i v celkové době provozního cyklu. Regulací vstupních parametrů lze všechny výstupní parametry výrazně ovlivnit, což může zajistit provozní stabilitu zařízení.



## 9 MODELOVÝ NÁVRH ZAŘÍZENÍ A POSOUZENÍ PŘÍNOSU

Validace výsledků dosažených analýzou přinesla definované klíčové parametry a popsala jejich vzájemné vazby. Využití těchto znalostí umožňuje provádět návrhy inovací těchto zařízení, které povedou k maximalizaci hydraulické účinnosti.

### 9.1 NÁVRH INOVACE MAMUTOVÝCH ČERPADEL

Jak už bylo zmíněno, v provozech ČOV se mamutová čerpadla instalují do lapáků štěrku a písků. S ohledem na maximální efektivitu mamutových čerpadel by tyto lapáky měly být co možná nejhlubší a výška čerpaného písku nad hladinou lapáku co možná nejnižší. Podle požadovaného průtoku a podle stanovených pracovních bodů lze zvolit nejvhodnější rozměr mamutového čerpadla.

Přínos tohoto přístupu lze doložit na modelovém návrhu čerpání štěrku a písků. Předpokládejme lapák štěrku s ideální geometrií pro instalaci mamutového čerpadla, tedy s hloubkou ponoření 4 metry a výškou výtlačku jen 0,5 metru. Je požadováno dosažení co největšího čerpaného objemu.

Návrh vycházející pouze z čerpací charakteristiky by volil mamutové čerpadlo DN 150, jenž pro zadanou konfiguraci dokáže vyčerpávat až  $1\,260\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  při spotřebě  $41\text{ Nm}^3$  vzduchu za hodinu. Při efektivním režimu je dosahováno průtoku vody  $1\,088\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  při hodinové spotřebě  $33\text{ Nm}^3$  vzduchu.

Při uvážení vlivu průměru výtlačného potrubí se však nabízí volit mamutové čerpadlo DN 80, které dosahuje nejvyšší efektivity pracovních bodů. Pro zadanou geometrickou konfiguraci dokáže efektivně čerpat  $330\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ , tedy pro dosažení maximálního průtoku čerpadla DN 150 je nutná instalace 4 čerpadel DN 80. V takovém případě by bylo dosaženo průtoku  $1\,320\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ , avšak při spotřebě vzduchu pouze  $20\text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Úspora vzduchu instalací 4 efektivnějších čerpadel DN 80 namísto jednoho čerpadla DN 150 by tak přinesla více jak poloviční úsporu energetických nákladů.

Pro modelový návrh je uvažováno použití jednostupňových dmychadel INW od společnosti IN-ECO, která jsou přímo určena pro aplikaci v provozech ČOV [146]. V případě instalace čerpadla DN 150 by bylo zapotřebí dmychadlo INW 31 H06 o příkonu 0,55 kW, pro provoz čtyř čerpadel DN 80 postačuje menší dmychadlo INW 31 H06 s příkonem 0,25 kW.

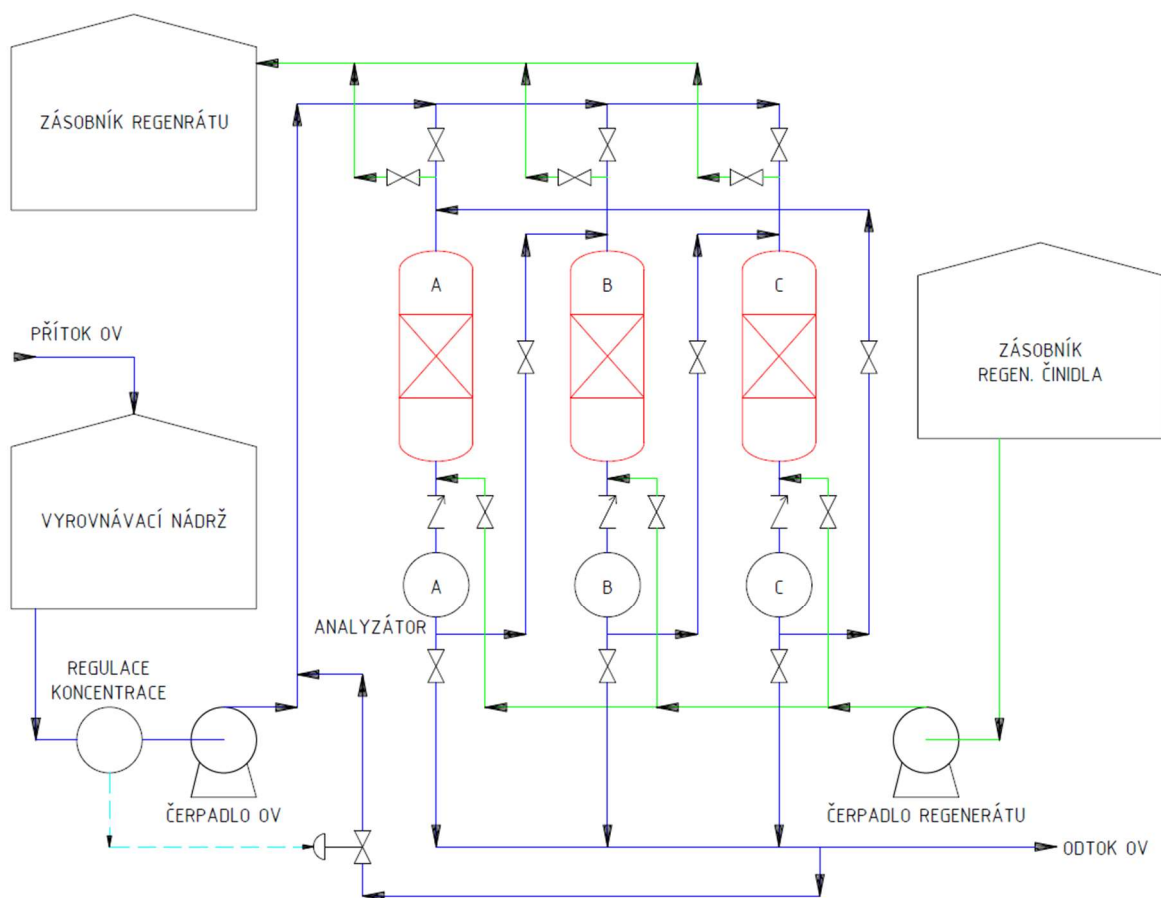
Množství zachyceného písku není obvykle takové množství, aby byl nutný nepřetržitý provoz čerpadla. V této studii je tak uvažována činnost čerpadla 12 hodin denně. Při tomto režimu by byla roční spotřeba mamutového čerpadla DN 150  $2\,409\text{ kWh}$ , pro provoz čtyř čerpadel DN 80 je zapotřebí  $1\,095\text{ kWh}$ , tedy o 54,5 % méně. Celková roční úspora elektrické energie tak činí  $1\,314\text{ kWh}$ , což při průměrné ceně ve 3. čtvrtletí roku 2020 ( $4,34\text{ Kč/kWh}$ ) představuje roční úsporu  $5\,702,76\text{ Kč}$ .

Podíl úspory elektrické energie inovací mamutových čerpadel z hlediska celkové spotřeby elektrické energie čistírny závisí na její velikosti. Pro malou ČOV o kapacitě 7 000 EO se uvádí

roční spotřeba 270 000 kWh, pro městskou ČOV o kapacitě 40 000 EO spotřeba začíná na 1 100 MWh [147]. Získaná úspora tak představuje 0,48 %, respektive 0,12 % celkové spotřeby elektrické energie. Tyto nízké hodnoty je třeba považovat za orientační. Pro přesnější vyhodnocení je zapotřebí provést vyhodnocení přínosu inovace na konkrétních provozech. Přínos takto cílené inovace se zdá být poměrně malý, ale v kontextu celkové úpravy lapáku písku je na místě se zamýšlet i nad inovací mamutových čerpadel a získané poznatky využít pro takové nastavení parametrů technologie, aby při provozu bylo dosaženo jejich maximální efektivity.

## 9.2 INOVATIVNÍ NÁVRH ADSORPČNÍ JEDNOTKY

Na základě zjištěných vlivů je na Obr. 27 představen návrh pokročilejší podoby jednotky adsorpce fosforu pro technologie ČOV. Její hlavní výhodou je umožnění průběhu cyklu adsorpce ve dvou kolonách zařazených do série, což umožňuje jednak zmenšení nutného objemu sorpčního lože v koloně, jednak umožňuje dosažení delšího cyklu adsorpce a tím i větší využití sorpční kapacity. Po jeho nasycení první kolony se cyklus adsorpce posune na druhou a třetí kolonu, zatímco na první koloně by probíhala regenerace.



Obr. 27 Technologické schéma adsorpční jednotky eliminující negativní vlivy parametrů.

Ta je navržena protiproudě pro vymytí případných nečistot zachycených v sorpčním loži. Nutno podotknout, že pro nedostatek relevantních dat nebyla v této studii zohledněna tlaková

ztráta sorpčního lože. Její vliv by se projevil na volbě geometrických rozměrů sorpčního lože. Pro zachování co nejnižší tlakové ztráty musí být zabráněno vniknutí částic aktivovaného kalu z biologického stupně. To znamená maximalizovat účinnost dosazovacích nádrží, v případě nutnosti zařazení vhodného filtru před jednotku adsorpce, což však představuje další investiční a provozní náklady.

Pro zachycení špičkových průtoků OV a snížení rozptylu koncentrace fosforu je před jednotku adsorpce zařazena vyrovnávací nádrž. Její vhodnou geometrií by se navíc mohlo výrazně minimalizovat riziko zanesení nečistot do sorpčního lože. Při návrhu potřebné dimenze vyrovnávací nádrže je potřeba zohlednit vliv předcházejících zařízení na skutečnou velikost průtoku. Mnoho městských ČOV se v současnosti potýká s problémem výrazně nižších průtoků odpadní vody, než na jaké byly dimenzovány a stavěny, což se odráží i na vyčerpání usazovacích a dosazovacích nádrží [5]. Na některých ČOV je dokonce část nádrží trvale vyřazena z provozu pro nadbytečnost. Intenzifikace provozu těchto nádrží by umožnila využít nadbytečné nádrže jako vyrovnávací pro adsorpční jednotku a snížit tak náklady na výstavbu.

Aby se předešlo fosforovému zahlcení jednotky, je na přítoku odpadní vody zařazen analyzátor, který umožňuje vysoké koncentrace fosforu rozředit na přijatelnou mez. Pro zamezení vnosu nečistot je pro ředění odebírána voda z odtoku jednotky adsorpce namísto vyrovnávací nádrže.

Takto navržená jednotka minimalizuje zjištěné negativní vlivy jednotlivých parametrů. Její přesnější návrh vyžaduje další studie, do kterých je nutné kromě uvedených parametrů zahrnout tlakové ztráty a náklady na sorbent a regenerační činidlo. Přijatelnou výši nákladů určí parametry technologie zpracovávající zachycený fosfor v regenerátu.

Jak už bylo řečeno, hlavní motivací pro implementování této technologie je předpokládané zhodnocení zachyceného fosforu ve struvitu. V současné době je hlavním limitem technologie výroby struvitu požadované pH fosforového koncentráту, které by mělo být v rozmezí od 8 do 10. Pro ověření možnosti využití vlastního regenerátu pro výrobu struvitu bylo nad rámec stanovených parametrů měřeno i pH zachytávaného regenerátu. U všech vzorků regenerátu byly naměřeny vysoké hodnoty pH (přes 12), tedy zachycený regenerát je pro srážení struvitu příliš zásaditý a při současném stavu poznání není možné na adsorpci fosforu navázat touto technologií. Tento parametr však nijak neovlivňuje samotný proces adsorpce a proto nefiguroval v analýze identifikovaných parametrech.





## 10 NÁVRH DALŠÍHO VÝZKUMU – MÍCHÁNÍ VYHNÍVACÍCH NÁDRŽÍ

Přínos provedených experimentů je nanahraditelný a výhody laboratorního výzkumu jsou značné. Umožnily důkladné proměření všech potřebných parametrů, díky kterým mohly být validovány výsledky dosažené navrženou metodikou. Aby mohlo dojít k uplatnění navržené metodiky v praxi, je třeba provést validaci jejích výsledků pro ostatní zařízení. Literární řešerše ukazuje lepší možnosti výzkumu ostatních analyzovaných zařízení přímo na provozech ČOV.

Dosažené výsledky z laboratorních experimentů však svědčí ve prospěch tohoto způsobu validace navržené metodiky, autor práce proto doporučuje před validací na reálných provozech provést vyhodnocení vlivu klíčových parametrů na laboratorním zařízení, které umožňuje různé nastavení kombinací vstupních parametrů. Kapitola ukazuje tento přístup na experimentu, který byl proveden za účelem měření čerpacích charakteristik míchadla. Uvedená případová studie také demonstruje možnosti laboratorního výzkumu míchání vyhnívacích nádrží.

### 10.1 PROBLEMATIKA MÍCHÁNÍ VYHNÍVACÍCH NÁDRŽÍ

Z analýzy parametrů vyplynulo, že pro hodnocení hydraulické účinnosti míchání je zapotřebí vzít v potaz parametry, které nejsou na provozech ČOV běžně dostupné. Jedná se především o reologické vlastnosti vstupního kalu a znalost hydraulického toku uvnitř vyhnívací nádrže. Pro získání informací o reologii kalu by bylo zapotřebí provádět průběžné vzorkování a měření na specializovaných laboratorních přístrojích, což je sice technicky proveditelné, ale z ekonomických důvodů se tak v současnosti neděje. Se znalostí tohoto parametrů je možné adekvátněji stanovit potřebný energetický vnos míchadla a zvýšit tak hydraulickou účinnost míchání.

Aby byl však stanovený energetický vnos dostatečný, je nezbytné znát skutečné hydraulické poměry v nádrži a mít zajištěno promíchávání skutečně celého objemu nádrže. Měření hydraulického toku při provozu vyhnívací nádrže je prakticky nemožné. Je to dáno především povahou provozu vyhnívacích nádrží, který neumožňuje provedení dlouhodobější odstávky nádrže pro výzkumné účely a zároveň pro přítomnost bioplynu je z bezpečnostních důvodů znemožněno provádět výzkum při provozu.

Díky bioplynu je nutné považovat vnitřní prostor nádrže za prostředí s rizikem výbuchu. Případná instalace měřicí techniky tak vyžaduje dodržení všech požadavků na elektrické a strojní zařízení, které musí splňovat patřičné požadavky (tzv. provedení ATEX) pro instalaci v prostředí s nebezpečím výbuchu, což je velmi nákladné. Že nelze toto riziko podceňovat, dokládají nehody na bioplynových stanicích a následné studie pojednávající o bezpečnosti těchto provozů [148], [149].

Dosud se tedy veškerý výzkum účinnosti míchacích systémů vyhnívacích nádrží omezil buď na jednoduchou optimalizaci za provozu, nebo na počítačové simulace proudění, které umožňuje získat lepší představu o hydraulických poměrech uvnitř nádrže a odhalit místa, kde dochází k nedostatečnému promíchávání. Věrohodnost výpočtových simulací však nemusí být

vždy dostatečná a vypočtené modely je třeba validovat se skutečnými daty, která jsou obtížně získatelná.

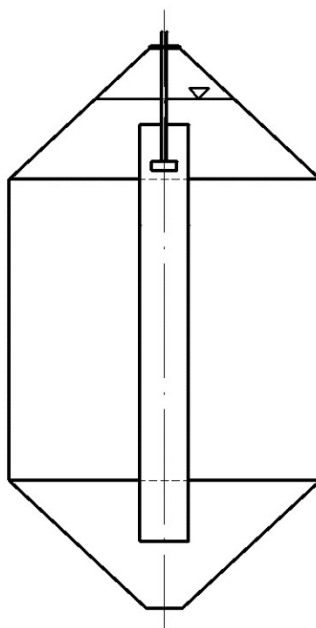
S ohledem na výše uvedená fakta je vhodné zaměřit se na experimentální výzkum reálných hydraulických poměrů uvnitř vyhnívací nádrže. Cílem experimentu by tedy bylo získat data z vyhnívací nádrže, která by jednak měla dostatečnou vypovídající hodnotu o různých způsobech míchání, jednak by se mohla dále použít pro validaci počítačových modelů. Tohoto cíle lze dosáhnout na experimentálním modelu skutečné vyhnívací nádrže, která bude splňovat všechna hydraulická kritéria.

Pro měření čerpacích charakteristik vrtulového míchadla byla v laboratořích ČOV taková experimentální nádrž postavena. Autor této práce úzce spolupracoval na tomto měření a vytvářel technickou specifikaci experimentální nádrže, která je pro názornost dále popsána.

## 10.2 MODEL VYHNÍVACÍ NÁDRŽE

Pro vytvoření modelu byla vybrána standardní vyhnívací nádrž železobetonové konstrukce o vnitřním průměru 10 metrů a celkové výšce 17 metrů, ke které byla k dispozici výkresová dokumentace. Maximální objem kalů v nádrži je 960 m<sup>3</sup>. Spodní i vrchní část nádrže má kuželový tvar. Dolní kvůli spádování odtoku stabilizovaného kalu, horní kvůli odběru bioplynu. Tato konstrukce patří k rozšířeným typům vyhnívacích nádrží.

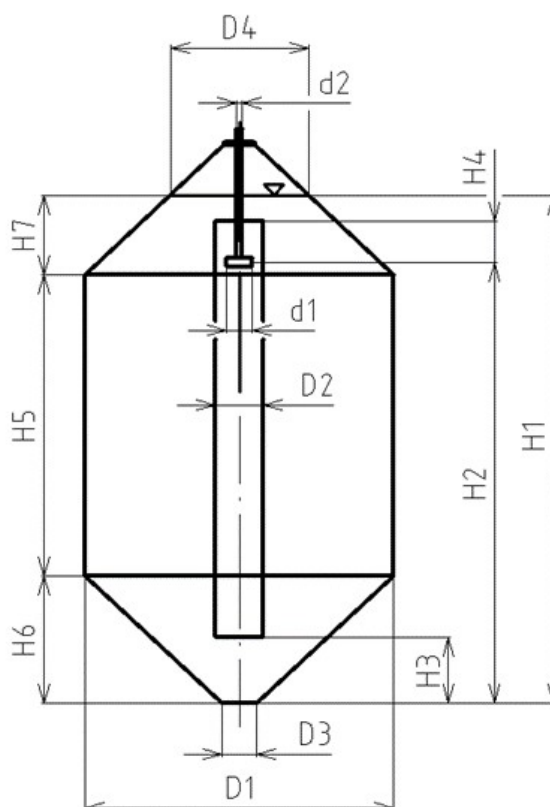
Vzorová nádrž je míchána mechanicky axiálním míchadlem umístěným v centrální rouři o světlosti DN 400, která je umístěna v ose nádrže. Míchadlo vytváří v centrální rouři tok kalu, kterým je následně rozpoříván celý objem nádrže. Změna směru otáček míchadla umožňuje obrátit směr toku kalu v centrální rouři a vlastní míchání nádrže tak může probíhat ve dvou režimech. Tvar nádrže s použitým způsobem míchání je znázorněn na Obr. 28.



Obr. 28 Náčrt principu míchání nádrže s centrální trubkou.

Při návrhu vhodného míchadla do velké nádrže se postupuje tak, že se postaví podle zvoleného měřítka model nádrže, ve kterém se pak odzkouší zamýšlené typy míchadel. Při stavbě modelu musí být dodržena celá řada geometrických simplexů, které jsou počítány z rozměrů skutečné nádrže (viz Obr. 29). Jmenovitě to jsou:

$$\begin{array}{ll} H_1/D_1 = 1,6 & D_1/d_2 = 4,6 \\ H_2/D_1 = 1,5 & H_5/D_1 = 1,0 \\ H_3/D_1 = 0,2 & H_6/D_1 = 0,4 \\ H_4/D_1 = 0,1 & H_7/D_1 = 0,2 \\ D_1/d_1 = 28,4 & D_1/D_3 = 8,9 \\ D_2/d_1 = 1,1 & D_1/D_4 = 1,8 \end{array}$$



Obr. 29 Nákres nádrže s okótovanými charakteristickými rozměry.

V tomto případě se muselo postupovat opačně, tedy ze známého míchadla dopočítat jeho model. Pro jeho návrh byl použit přístup konstantního specifického příkonu (tedy poměr výkonu míchadla k objemu nádrže) pro skutečnou nádrž i model [7]. Z toho poté vyplynuly provozní charakteristiky modelového míchadla.

Poměr zmenšení řešeného míchadla byl stanoven na základě možnosti využití komponentů laboratoře ÚPI, které měly stejné konstrukční parametry. Ze stanoveného poměru zmenšení se přes uvedené geometrické simplexity stanovily hlavní rozměry modelu nádrže, které uvádí Tab. 36.

Tab. 36 Stanovené základní rozměry modelové nádrže.

Parametr	Údaj
Výška x šířka x délka	3,1 x 1,5 x 1,5 m
Průměr nádrže	1,3 m
Maximální výška hladiny	2,134 m
Průměr centrální trubky	53,1 mm
Maximální objem nádrže	2,3 m <sup>3</sup>

Pro návrh odpovídajícího výkonu modelového míchadla byl použit přístup konstantního specifického příkonu míchadla pro model i pro velkou nádrž. Na základě doporučených hodnot z literatury byl určen charakteristický příkon vrtulového míchadla  $P_M$ . Příkonové kritérium popisuje následující rovnice:

$$K_p = \frac{P_M}{\rho \cdot n^3 \cdot d_1^5} \quad (10-1)$$

kde  $K_p$  příkonové kritérium (-)  
 $P_M$  příkon míchadla (W)  
 $\rho$  hustota kapaliny (kg.m<sup>-3</sup>)  
 $n$  otáčky míchadla (s<sup>-1</sup>)  
 $d_1$  průměr míchadla (m)

Pro výpočet příkonového kritéria však neznáme přesné otáčky míchadla, protože v praxi zkoumané míchadlo pracuje v určitém rozsahu otáček. Pro jeho výpočet je tak nutné použít následující empirický vztah:

$$K_p = Q \cdot Re_M^{q_1} \cdot Fr_M^{q_2} \cdot \Gamma_1^{q_3} \Gamma_2^{q_4} \Gamma_3^{q_5} \dots \Gamma_8^{q_8} \quad (10-2)$$

kde  $Q$  konstanta (-)  
 $q_{0...8}$  exponenty (-)  
 $Re_M$  Reynoldsovo kritérium pro míchání (-)  
 $Fr_M$  Froudovo kritérium pro míchání (-)  
 $\Gamma_{1...8}$  geometrické simplex ( -)

Při tomto způsobu určování hodnoty příkonového kritéria se vychází z vhodných geometrických simplexů, které jsou pro daný způsob míchání charakteristické. Konstanta a exponenty byly zjištěny experimentálně a jsou v literatuře zaneseny v tabulkách nebo v grafech. Z nich se tak určuje hodnota příkonového kritéria a úpravou vztahu (10-1) tak lze dopočítat specifické otáčky pro model míchadla [50].

Protože laboratorní míchadla využívají pro svůj provoz otáčky nižší, bylo nutné je pomocí převodu zvýšit. Mezi míchadlo a elektromotor (který jinak pohání míchadlo přímo) byla navržena řemenová převodovka s převodovým poměrem 3,94. Tím mohl být pro experiment využit původní elektromotor s frekvenčním měničem, který umožňoval měnit rozsah otáček míchadla.

Pro možnost instalace centrální trubky a jiných potřebných zařízení musela nádrž umožňovat dostatečný přístup do jejího vnitř. Vzhledem k jejím rozměrům se jako nejschůdnější řešení zvolila rozebíratelná nádrž na jednotlivé části. Proto je konstrukčně nádrž složena ze tří celků, tedy kuželového dna, válcového pláště a kuželového víka, které jsou spojeny přírubami. Tvar nádrže modelu je geometricky totožný s nádrží díla, včetně způsobu uchycení centrální trubky.

Technické provedení nádrže bylo navrženo tak, aby umožnilo vizualizaci hydraulického proudění uvnitř nádrže. Původní idea byla postavit celý model z průhledného plastu, což by nabízelo široké možnosti pro vizualizace proudění. Záhy se ale ukázalo, že vzhledem k rozměrům modelu nádrže je tato myšlenka neproveditelná. Proto se do modelu začlenila na vhodných místech průhledítka. Aby uvnitř nádrže bylo co nejvíce světla, byla snaha vyrobit co nejvíce dílů nádrže z tzv. mléčného plastu, který je průsvitný. Toto bylo možné jen u válcového pláště a kuželového víka. Kuželové dno nádrže muselo být vyrobeno z oceli kvůli dosažení stejného vrcholového úhlu. Na Obr. 30 je model výsledné podoby nádrže.



Obr. 30 Model experimentálního modelu vyhnívací nádrže s centrální trubkou.

V úrovni spodního konce centrální trubky je umístěno průhledítko. Další průhledítko je umístěno ve válcové části. Ta už je spolu s horním kuželem vyrobena z mléčného plastu. V horním kuželu jsou nad hladinou 4 příruby, které plní jak funkci průhledítek, tak obslužných otvorů. V ose kuželu je pak příruba pro upevnění míchadla. Centrální trubka je z oceli a v nádobě je uchycena pomocí ocelových lan s napínáky (viz Obr. 31). Míchadlo je k nádrži propojeno přírubou, jeho hmotnost je ale přenášena pomocnou konstrukcí, která je vytvořena z ocelových montážních nosníků. Celá sestava nádrže pro experimentální měření je zobrazena na Obr. 32.



*Obr. 31 Uchycení centrální trubky v nádrži.*



*Obr. 32 Sestava modelu nádrže pro experiment.*

Pro měření čerpacích charakteristik řešeného míchadla byla na centrální trubku osazena čidla ultrazvukového průtokoměru Dynasonics TFX Ultra. Délka centrální trubky poskytuje dostatečně dlouhé uklidňovací úseky před a za průtokoměrem, které jsou výrobcem průtokoměru stanovené na desetinásobek průměru trubky, takže bylo předpokládáno dodržení uváděné přesnosti průtokoměru.

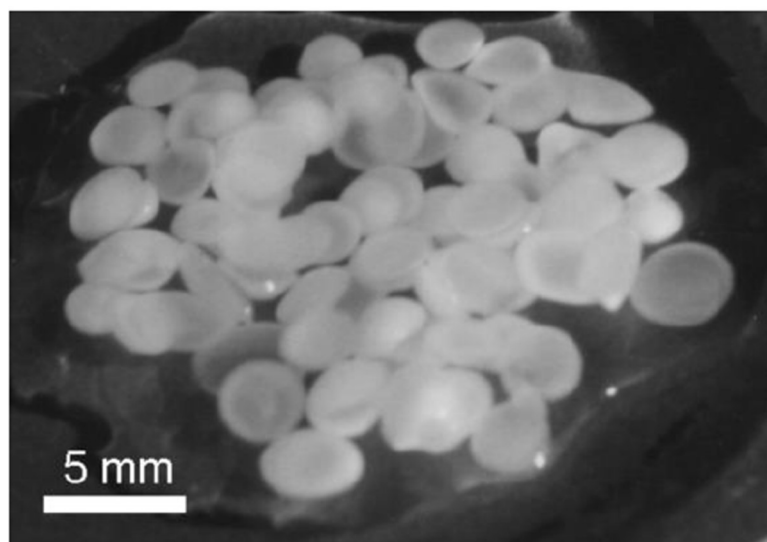
Naměřené parametry čerpací charakteristik modelového míchadla se shodovaly s parametry reálného míchadla, což potvrdilo správný návrh a provedení modelu nádrže, který byl prezentován na konferenci TVIP – Odpadové fórum 2017 v Hustopečích [150].

### 10.3 VALIDACE NAVRŽENÉ METODY POMOCÍ VIZUALIZACE

Postavený model experimentální nádrže se nabízí pro zkoumání vlivu jednotlivých parametrů míchání na hydraulické poměry vyhnívací nádrže, které jsou pro celkovou hydraulickou účinnost míchání zásadní. Vyhodnocením těchto vlivů lze provést validaci závěrů dosažených navrženou metodikou. Model nádrže umožňuje posuzovat dopady jednotlivých parametrů pomocí vhodné vizualizace proudění.

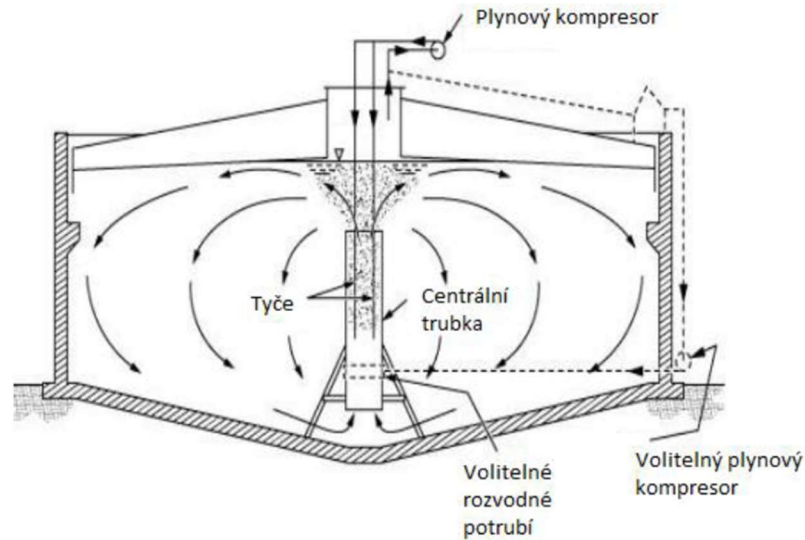
Při měření čerpacích charakteristik vrtulového míchadla byla provedena pokusná vizualizace proudění pomocí drobných hliníkových třísek. Pro účely tohoto experimentu byly tyto částice dostačující, avšak byla nutná jejich důkladné čištění, jinak docházelo k zakalení vody a znečištění objemu nádrže.

Pro další výzkum se naskytla možnost provádět sofistikovanější vizualizaci proudění pomocí suspence vody a imobilizované biomasy technologie od firmy LentiKat's. Jak je patrné z Obr. 33, jedná se o malé vločky, které svými vlastnostmi umožňují simulovat vločky kalu. Vizualizace proudění pomocí těchto částic se reálně používá při návrhu konstrukce míchání aktivačních nádrží. Podrobnější popis imobilizované biomasy lze nalézt v diplomové práci Antonína Bradáče, který toto navrhnul její použití pro model experimentální nádrže [151].



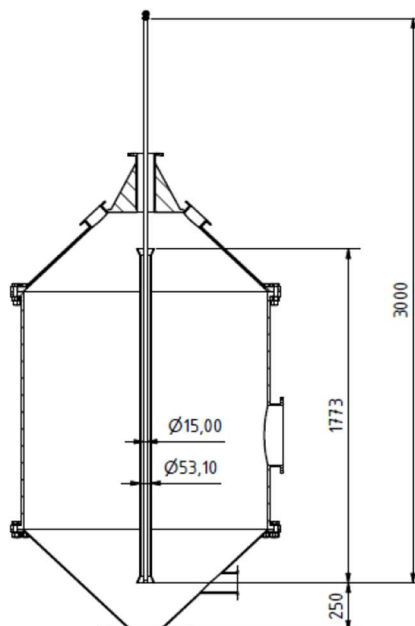
Obr. 33 Imobilizovaná biomasa LentiKat's [151].

Pro ověření použitelnosti navrhovaného způsobu vizualizace byl připraven jednoduchý experiment pneumatického míchání vyhnívací nádrže, které je znázorněno na Obr. 34. Spočívá v přívodu tlakového plynu (v praxi bioplynu) do centrální trubky vyhnívací nádrže, čímž vzniká podobný čerpací efekt jako u mamutového čerpadla.



Obr. 34 Míchání vyhnívací nádrže pomocí recirkulace bioplynu vháněného do centrálního potrubí.  
Převzato z [70].

Výhodou tohoto způsobu míchání byla možnost snadného využití vytvořeného modelu vyhnívací nádrže, kterou by nebylo nutno nijak upravovat. Nákres provedené konstrukce pneumatického míchání v nádrži je uvedena na Obr. 35. Tlakovým plynem pro míchání byl využit stlačený vzduch z centrálního rozvodu laboratoře, který byl opatřen pouze redukčním ventilem s manometrem. Uchycení přívodní trubky bylo provedeno tak, aby umožňovalo libovolné nastavení výšky ústí přívodu vzduchu.



Obr. 35 Konstrukce pneumatického míchání modelové nádrže [151].



Experiment prokázal očekávaný potenciál zvoleného způsobu vizualizace proudění. Změnou výšky ústí přívodu vzduchu i změnou jeho průtoku byly simulovány různé režimy proudění, jejichž projevy na hydraulické poměry v nádrži byly okamžitě patrné.

Vytvořením hydraulicky přesného modelu reálné vyhnívací nádrže se získal jedinečný nástroj, díky kterému lze důkladně zkoumat různé metody míchání těchto nádrží a pomocí vizualizace proudění stanovovat optimální provozní režimy a příslušné parametry. Ukázalo se, že tímto postupem je možné velmi dobře validovat data získaná počítačovým modelováním. Výsledkem je nový postup zjišťování vlivu jednotlivých parametrů míchání vyhnívacích nádrží a možnost porovnání s výsledky analýzy (viz kap. 5.3.2).



## 11 ZÁVĚR

Navržená metodika pro výběr a hodnocení parametrů se ukázala jako perspektivní a použitelná pro hodnocení strojně-technologického zařízení ČOV. Provozovatelům umožňuje vybrat adekvátní parametry pro hodnocení celkové hydraulické účinnosti jednotlivých zařízení. Mohou díky ní také posoudit jejich potenciál pro využití k inovačním návrhům zařízení. S ohledem na toto hodnocení může provozovatel posoudit dostatečnost monitoringu klíčových parametrů a zaměřit se na získání chybějících údajů. Díky tomu lze lépe volit investiční strategii. Výsledky analyzovaných zařízení potvrzují riziko špatného hodnocení účinnosti zařízení, pokud nejsou brány v potaz vazby na ostatní technologii ČOV a z nich vyplývající parametry.

Pro ověření získaných poznatků byly vybrány technologie mamutových čerpadel a adsorpce fosforu, která byla podrobena podrobnějšímu výzkumu. Jeho podstatou bylo získání patřičných dat pro posouzení skutečného vlivu identifikovaných parametrů a ověření výsledků dosažených navrženou metodikou. Tato část výzkumu zahrnovala plánování experimentu, návrh a stavbu měřicích zařízení, realizaci experimentů a následné zpracování naměřených dat.

U mamutových čerpadel byly detailně zkoumáno ovlivnění čerpací charakteristiky jednotlivými geometrickými parametry. Hlavní parametr, průtok tlakového vzduchu, byl vyhodnocen v poměru k dosaženým čerpacím výkonům a byly stanoveny pracovní body pro dosažení jeho nejefektivnějšího využití. Vyhodnocení přínosu pro provoz ČOV bylo provedeno porovnáním dvou návrhů pro modelovou situaci. Ačkoliv rozdíl spotřeby elektrické energie byl více jak 50 %, podíl této úspory na celkové spotřebě ČOV nedosahuje ani jednoho procenta. Tento výsledek tak potvrdil předpoklad malého přínosu samotné optimalizace mamutových čerpadel, avšak položil základy pro komplexní návrhy inovací technologie zachytu písku na ČOV, pro které je znalost vlivu parametrů mamutových čerpadel klíčová.

Při hodnocení parametrů pro adsorpci fosforu se vycházelo z předpokladu, že při provozu budou sorpční charakteristiky sorbentu konstantní a nebudou ovlivněny variabilitou vstupních parametrů. Provedený experiment však tento předpoklad vyvrátil. Vyhodnocení vlivu nalezených parametrů bylo provedeno na modelu adsorpční jednotky pro reálnou ČOV, který umožnil simulovat dopady změn různých parametrů. Po vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů byly nalezené parametry překlasifikovány a metodika byla zpřeněna. Získané poznatky tak umožnily vytvoření sofistikovanějšího návrhu technologie, která umožňuje eliminovat negativní dopady na spolehlivost provozu a jeho energetickou náročnost.

Provedená práce položila slibné základy pro další výzkum metodického přístupu k hodnocení účinnosti zařízení ČOV. Pro další validaci a vývoj navržené metodiky je zásadní laboratorní experimentální činnost, jejíž podstatu práce představila. V poslední kapitole byla navržena cesta dalšího výzkumu. Prováděním laboratorních experimentů ve spolupráci s reálnými provozovými ČOV by bylo umožněno vytvořit seznamy klíčových parametrů, které jsou pro hodnocení účinnosti konkrétních zařízení typově a velikostně podobných provozů ČOV potřeba. Tyto seznamy by pak usnadňovaly provozovatelům vyhodnocení parametrů bez

## ZÁVĚR

---

náročné rešerše a bez rizika opomenutí důležitých parametrů, čímž by byly naplněny všechny podmínky a bylo možno zhodnotit výsledky této práce.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] WANNER, Jiří. Z historie odvádění a čištění odpadních vod. In: Slideshare. [online]. [cit. 2019-11-4] Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~pecenkam/Stokov%C3%A1n%C3%AD/Historie%20stokov%C3%A1n%C3%AD%20a%20%C4%8COV.pdf>
- [2] SPELLMAN, Frank R. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. 2nd Edition. London, UK: Taylor & Francis Inc, 2008. ISBN 978-1-4200-7530-4.
- [3] Intenzita sucha. *Intersucho* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.intersucho.cz/cz/?from=2020-04-12&to=2020-05-10&current=2020-05-03>
- [4] KOMÁRKOVÁ L., Stav čištění odpadních vod v aglomeracích ve světle reportingu podle Směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod. Ministerstvo životního prostředí, [online], [cit. 2019-11-3], Dostupné z: [povis.cz/pre/2016\\_vodopravni\\_urady/13\\_Stav\\_cistení\\_odpadnich\\_vod\\_v\\_aglomeracích.pdf](http://povis.cz/pre/2016_vodopravni_urady/13_Stav_cistení_odpadnich_vod_v_aglomeracích.pdf)
- [5] Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2018. *Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2018* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018>
- [6] DOMINGUEZ, Damian a Willi GUJER. Evolution of a wastewater treatment plant challenges traditional design concepts. *Water Research* [online]. 2006, **40**(7), 1389–1396. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2006.01.034
- [7] HREIZ, Rainier, M. A. LATIFI a Nicolas ROCHE. Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2015, **281**, 900–920. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2015.06.125
- [8] PLOTĚNÝ, Karel. Intenzifikace čistíren odpadních vod - energetický pohled. *Profesní informační systém ČKAIT* [online]. 2012, vol. 1 [cit. 2020-06-04]. ISSN 1805-6032. Dostupné z: <https://www.profesis.cz/parser/go/4c7a692f314e32397039544859474d5658687458636f7962425475674a664a4f55483576535148343877576d7474372b5a647530397a6c4b41655549452f5857>
- [9] FIALA, M. Optimalizace provozu malých ČOV. In: *Praktické poznatky z optimalizací provozů komunálních ČOV*. Praha: Asociace pro vodu ČR, 2017.
- [10] LONGO, Stefano, Benedetto Mirko D'ANTONI, Michael BONGARDS, Antonio CHAPARRO, Andreas CRONRATH, Francesco FATONE, Juan M. LEMA, Miguel MAURICIO-IGLESIAS, Ana SOARES a Almudena HOSPIDO. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy* [online]. 2016, **179**, 1251–1268. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.043

- [11] Cradle to Cradle. *William McDonough* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mcdonough.com/cradle-to-cradle/>
- [12] ČESKO. Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod. *Zákony pro lidi* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-401>
- [13] PIVOKONSKÝ, Martin. Odpadní vody a jejich složení. In: *Slideshare* [online]. 2016 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [http://www.pivokonsky.wz.cz/ZOV16-17/znecestovani\\_ochrana\\_vod\\_4.pdf](http://www.pivokonsky.wz.cz/ZOV16-17/znecestovani_ochrana_vod_4.pdf)
- [14] VLČKOVÁ, Tereza. *Environmentální souvislosti užívání hormonální antikoncepce* [online]. B.m., 2013 [cit. 2019-11-12]. Masarykova univerzita, Fakulta sociálních studií. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/323268/fss\\_b\\_b1/](https://is.muni.cz/th/323268/fss_b_b1/)
- [15] *Výskyt a zdravotní rizika zbytků humánních léčiv v pitných vodách, SZÚ* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/centrum-hygieny-zivotniho-prostredi/vyskyt-a-zdravotni-rizika-zbytku-humannich-leciv-v-pitnych>
- [16] LIŠKA, Marek. Farmaka našich vod. In: *Vodní nádrže 2015: Vodohospodářská konference*. Brno: Povodí Moravy, 2015.
- [17] GROS, Meritxell, Mira PETROVIĆ a Damià BARCELÓ. Wastewater treatment plants as a pathway for aquatic contamination by pharmaceuticals in the Ebro river basin (Northeast Spain). *Environmental Toxicology and Chemistry* [online]. 2007, **26**(8), 1553–1562. ISSN 1552-8618. Dostupné z: doi:10.1897/06-495R.1
- [18] FICK, Jerker, Hanna SÖDERSTRÖM, Richard H. LINDBERG, Chau PHAN, Mats TYSKLIND a D. G. Joakim LARSSON. Contamination of surface, ground, and drinking water from pharmaceutical production. *Environmental Toxicology and Chemistry* [online]. 2009, **28**(12), 2522–2527. ISSN 1552-8618. Dostupné z: doi:10.1897/09-073.1
- [19] KWAK, Kyunghee, Kyunghee JI, Younglim KHO, Pilje KIM, Jaean LEE, Jisung RYU a Kyungho CHOI. Chronic toxicity and endocrine disruption of naproxen in freshwater waterfleas and fish, and steroidogenic alteration using H295R cell assay. *Chemosphere* [online]. 2018, **204**, 156–162. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2018.04.035
- [20] MADUREIRA, Tânia Vieira, Maria João ROCHA, Catarina CRUZEIRO, Iolanda RODRIGUES, Rogério A. F. MONTEIRO a Eduardo ROCHA. The toxicity potential of pharmaceuticals found in the Douro River estuary (Portugal): Evaluation of impacts on fish liver, by histopathology, stereology, vitellogenin and CYP1A immunohistochemistry, after sub-acute exposures of the zebrafish model. *Environmental Toxicology and Pharmacology* [online]. 2012, **34**(1), 34–45. ISSN 1382-6689. Dostupné z: doi:10.1016/j.etap.2012.02.007
- [21] DAVID, Arthur, Anke LANGE, Charles R. TYLER a Elizabeth M. HILL. Concentrating mixtures of neuroactive pharmaceuticals and altered neurotransmitter levels in the brain of fish exposed to a wastewater effluent. *Science of The Total Environment* [online]. 2018, **621**, 782–790. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.265

- [22] URMINSKÁ, B. *Toxicita odpadních vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 42 s. Vedúci bakalárskej práce MVDr. Helena Zlámalová Gargošová, Ph.D.
- [23] BEHERA, Shishir Kumar, Hyeong Woo KIM, Jeong-Eun OH a Hung-Suck PARK. Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea. *Science of The Total Environment* [online]. 2011, **409**(20), 4351–4360. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2011.07.015
- [24] ANGELES, Luisa F., Rachel A. MULLEN, Irvin J. HUANG, Christopher WILSON, Wendell KHUNJAR, Howard I. SIROTKIN, Anne E. MCELROY a Diana S. AGA. Assessing pharmaceutical removal and reduction in toxicity provided by advanced wastewater treatment systems. *Environmental Science: Water Research & Technology* [online]. 2019 [vid. 2019-11-12]. ISSN 2053-1419. Dostupné z: doi:10.1039/C9EW00559E
- [25] THOMAS, Paul M. a Gregory D. FOSTER. Tracking acidic pharmaceuticals, caffeine, and triclosan through the wastewater treatment process. *Environmental Toxicology and Chemistry* [online]. 2005, **24**(1), 25–30. ISSN 1552-8618. Dostupné z: doi:10.1897/04-144R.1
- [26] ORIAS, Frédéric a Yves PERRODIN. Characterisation of the ecotoxicity of hospital effluents: A review. *Science of The Total Environment* [online]. 2013, **454–455**, 250–276. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.02.064
- [27] GADIPELLY, Chandrakanth, Antía PÉREZ-GONZÁLEZ, Ganapati D. YADAV, Inmaculada ORTIZ, Raquel IBÁÑEZ, Virendra K. RATHOD a Kumudini V. MARATHE. Pharmaceutical Industry Wastewater: Review of the Technologies for Water Treatment and Reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2014, **53**(29), 11571–11592. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie501210j
- [28] Seznam látek vzbuzujících mimořádné obavy podléhajících povolení. *European Chemicals Agency* [online]. Helsinky: Agentura Evropské unie [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/candidate-list-table>
- [29] Triclosan. *Arnika* [online]. Praha: Arnika, ©2014 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://arnika.org/triclosan>
- [30] MCAVOY, Drew C., Bert SCHATOWITZ, Martin JACOB, Armin HAUK a William S. ECKHOFF. Measurement of triclosan in wastewater treatment systems. *Environmental Toxicology and Chemistry* [online]. 2002, **21**(7), 1323–1329. ISSN 1552-8618. Dostupné z: doi:10.1002/etc.5620210701
- [31] XUEJING, Meng, et al. Strategies for Sludge Treatment and Disposal under the Frame of Circular Economy. *Journal of Beijing Institute of Education (Natural Science)*, 2006, 4: 1.
- [32] SFEZ, Sophie, Steven DE MEESTER, Siegfried E. VLAEMINCK a Jo DEWULF. Improving the resource footprint evaluation of products recovered from wastewater: A discussion on appropriate allocation in the context of circular economy. *Resources*,

- Conservation and Recycling* [online]. 2019, **148**, 132–144. ISSN 0921-3449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2019.03.029
- [33] BIANCO, Massimiliano. Circular Economy and WWTPs: Water Reuse and Biogas Production. In: Andrea GILARDONI, ed. *The Italian Water Industry: Cases of Excellence* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2019-03-07], s. 237–257. ISBN 978-3-319-71336-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-71336-6\_17
- [34] GHERGHEL, Andreea, Carmen TEODOSIU a Sabino DE GISI. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **228**, 244–263. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.240
- [35] LIN, Yanzi, Miao GUO, Nilay SHAH a David C. STUCKEY. Economic and environmental evaluation of nitrogen removal and recovery methods from wastewater. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **215**, Waste Biorefinery - Advocating Circular Economy, 227–238. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2016.03.064
- [36] NECZAJ, Ewa a Anna GROSSER. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. *Proceedings* [online]. 2018, **2**(11), 614. Dostupné z: doi:10.3390/proceedings2110614
- [37] GHOSH, Sadhan Kumar a Tirthankar MUKHERJEE. Circular Economy Through Treatment and Management of Industrial Wastewater. In: Sadhan Kumar GHOSH, ed. *Waste Water Recycling and Management* [online]. Singapore: Springer, 2019, s. 1–13. ISBN 9789811326196. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-13-2619-6\_1
- [38] Resource Recovery for the Future. *Fremtidens Renseanlæg - Billund BioRefinery* [online]. Grindsted: Billund BioRefinery [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <http://www.billundbiorefinery.dk/en/>
- [39] ERTL, T., F. KRETSCHMER, H. PLIHAL a N. WEISSENBACHER. Critical review and feasibility study: Energy recovery in the area of wastewater collection and treatment. *Víden*. 2011.
- [40] KRAMPE, J. Energy benchmarking of South Australian WWTPs. *Water Science and Technology* [online]. 2013, **67**(9), 2059–2066. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2013.090
- [41] *Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: benchmarking results of the last 10 years | Water Science and Technology | IWA Publishing* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/74/11/2620/18952/Operating-costs-and-energy-demand-of-wastewater?redirectedFrom=fulltext>
- [42] BODÍK, I. a M. KUBASKÁ. Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering*. 2013, (Vol. 39, nr 2), 15–24. ISSN 0324-8828.
- [43] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2018*. Praha: Energetický regulační úřad, 2019. Dostupné také z:



- [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c)
- [44] TORREGROSSA, D., G. SCHUTZ, A. CORNELISSEN, F. HERNÁNDEZ-SANCHO a J. HANSEN. Energy saving in WWTP: Daily benchmarking under uncertainty and data availability limitations. *Environmental Research* [online]. 2016, **148**, 330–337. ISSN 0013-9351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2016.04.010
- [45] DREWNOWSKI, Jakub. Advanced Supervisory Control System Implemented at Full-Scale WWTP—A Case Study of Optimization and Energy Balance Improvement. *Water* [online]. 2019, **11**(6), 1218. Dostupné z: doi:10.3390/w11061218
- [46] HENRIQUES, João a Justina CATARINO. Sustainable value – An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **142**, Cleaner production towards a sustainable transition, 323–330. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.173
- [47] DESCOINS, N., S. DELERIS, R. LESTIENNE, E. TROUVÉ a F. MARÉCHAL. Energy efficiency in waste water treatments plants: Optimization of activated sludge process coupled with anaerobic digestion. *Energy* [online]. 2012, **41**(1), 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2010, 153–164. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2011.03.078
- [48] KONYAKOSKI. *Konya Wastewater Treatment Plant Flow Diagram 1/3* [online]. 2009 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iLAWIXqktJ0>
- [49] GOLDSTEIN, R a W SMITH. *Water and Sustainability: U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment—The Next Half Century*. B.m.: EPRI. 2002
- [50] MEDEK J., *Hydraulické pochody*. 4. vydání, Brno: Akademické nakladatelství Cerm s.r.o., 2004, 339 s. ISBN 80-214-2640-3.
- [51] KARIA, G. L. a R. A. CHRISTIAN. *WASTEWATER TREATMENT: Concepts and Design Approach*. B.m.: PHI Learning Pvt. Ltd., 2013. 2. ISBN 978-81-203-4735-9.
- [52] ČOV v obci Vnorovy. *Projekční kancelář Centroprojekt* [online]. Zlín: Centroprojekt ©2020. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://centroprojekt.cz/reference/cov-v-obci-vnorovy/>
- [53] ČOV Brno - Modřice. *Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.* [online]. Brno: Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. ©2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz/ospolecnosti/odvadeni-a-cistení-odpadnich-vod/cov-brno-modrice/>
- [54] HOLBA, Marek. Vhodné technologie recyklace fosforu z povrchových a odpadních vod. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2020-09-07]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/7128-vhodne-technologie-recyklace-fosforu-z-povrchovych-a-odpadnich-vod>

- [55] SANDELL, Neil. Grit removal: the importance of protecting downstream equipment. *WWT* [online]. 2017 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://wwtonline.co.uk/Blog/grit-removal-the-importance-of-protecting-downstream-equipment>
- [56] SHI, Cao Ye. *Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants*. B.m.: IWA Publishing, 2011. ISBN 978-1-84339-382-5.
- [57] Rekonstrukce a rozšíření ČOV Brno - Modřice. *Arko Brno* [online]. Brno: Arko Technology, a.s. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://arko-brno.cz/cs/reference/cistirny-odpadnich-vod-a-kanalizace/rekonstrukce-a-rozsireni-cov-brno-modrice>
- [58] Technologická zařízení: Lapáky písku VPL. *Ekosystem: Produkty v oblasti ekologie a vodního hospodářství* [online]. Praha: Ekosystem.cz, ©2012 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.ekosystem.cz/uprava-a-cistenivod/technologicka-zarizeni>
- [59] Kruhové usazovací a dosazovací nádrže. *VHZ-DIS, spol s.r.o.* [online]. Brno: VHZ-DIS, spol, ©2014 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.vhzdis.eu/?product=kruhove-usazovaci-a-dosazovaci-nadrze&lang=cs>
- [60] DOHÁNYOS, M.; KOLLER, J.; STRNADOVÁ, N. Čištění odpadních vod. Praha: VŠCHT, 2007, 177 s. ISBN: 978-80-7080-619-7.
- [61] CLARK, N. N. a R. J. DABOLT. A general design equation for air lift pumps operating in slug flow. *AIChE Journal* [online]. 1986, **32**(1), 56–64. ISSN 1547-5905. Dostupné z: [doi:10.1002/aic.690320107](https://doi.org/10.1002/aic.690320107)
- [62] KRATOCHVÍL M., Dopravní zařízení. *Eluc* [online], 2015 [cit. 13. 11. 2017], dostupné z: [eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1927](http://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1927)
- [63] HALASOVÁ, P. *Čištění odpadních vod: Odborná příručka*. 2. vyd. B.m.: Centroprojekt Group, a.s., 2016.
- [64] Vyhláška č. 94/2016 Sb. o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů. *Zákony pro lidi* [online]. Praha:AION CS, s.r.o. ©2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-94>
- [65] ZHOU, Yan, Dong Qing ZHANG, Minh Tuyet LE, Aik Num PUAH a Wun Jern NG. Energy utilization in sewage treatment – a review with comparisons. *Journal of Water and Climate Change* [online]. 2013, **4**(1), 1–10. ISSN 2040-2244, 2408-9354. Dostupné z: [doi:10.2166/wcc.2013.117](https://doi.org/10.2166/wcc.2013.117)
- [66] STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. 2. rozš. a dopl. vyd. Praha: Gas, 2006. ISBN 80-7328-090-6.
- [67] GU, Yifan, Yue LI, Xuyao LI, Pengzhou LUO, Hongtao WANG, Xin WANG, Jiang WU a Fengting LI. Energy Self-sufficient Wastewater Treatment Plants: Feasibilities and Challenges. *Energy Procedia* [online]. 2017, **105**, 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China, 3741–3751. ISSN 1876-6102. Dostupné z: [doi:10.1016/j.egypro.2017.03.868](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.868)

- [68] TABOADA-SANTOS, Anton, Juan M. LEMA a Marta CARBALLA. Energetic and economic assessment of sludge thermal hydrolysis in novel wastewater treatment plant configurations. *Waste Management* [online]. 2019, **92**, 30–38. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2019.05.003
- [69] DOHÁNYOS, Michal et al. *Anaerobní čistírenské technologie*. Brno: NOEL, 2000. ISBN 80-86020-19-3.
- [70] Anaerobic digester mixing system: Anaerobic Biotechnology for Bio-energy Production. In: Marmara university enviromental biotechnology group (MEBIG) [online]. Istanbul: MEBIG, ©2011 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://mebig.marmara.edu.tr/Enve737/Chapter1-Mixing.pdf>
- [71] ABEDEEN, Zaki. Sludge treatment in watewater: Aerobic and anaerobic digestion. In: Slideshare: Share and Discover knowledge [online]. Reyerson university: Reyerson university, 2010 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/zakiabedeem/anaerobic-aerobic-digestion>. nedatováno.
- [72] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-861-6721-6
- [73] KOWALCZYK, Alexandra, Eva HARNISCH, Sebastian SCHWEDE, Mandy GERBER a Roland SPAN. Different mixing modes for biogas plants using energy crops. *Applied Energy* [online]. 2013, **112**, 465–472. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2013.03.065
- [74] Ústřední čistírna odpadních vod. *Ostravské vodárny a kanalizace a.s.* [online]. Ostrava: Ostravské vodárny a kanalizace a.s. ©2019 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: [https://www.ovak.cz/index.php?lang=1&name=foto\\_gallery2](https://www.ovak.cz/index.php?lang=1&name=foto_gallery2)
- [75] Sludge Thickener. *Filmedia Home* [online]. Pudong: Filmedia [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://www.best-filter.com/product/sludge-thickener/>
- [76] BELLOIR, C., C. STANFORD a A. SOARES. Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout. *Environmental Technology* [online]. 2015, **36**(2), 260–269. ISSN 0959-3330. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2014.951403
- [77] KUSIAK, Andrew, Yaohui ZENG a Zijun ZHANG. Modeling and analysis of pumps in a wastewater treatment plant: A data-mining approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* [online]. 2013, **26**(7), 1643–1651. ISSN 0952-1976. Dostupné z: doi:10.1016/j.engappai.2013.04.001
- [78] ZHENHUA, Li, Zou ZHIHONG a Wang LIPING. Analysis and Forecasting of the Energy Consumption in Wastewater Treatment Plant. *Mathematical Problems in Engineering; New York* [online]. 2019, 8. Dostupné z: doi:10.1155/2019/8690898
- [79] DREWNOWSKI, Jakub, Anna REMISZEWSKA-SKWAREK, Sylwia DUDA a Grzegorz ŁAGÓD. Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization. *Processes* [online]. 2019, **7**(5), 311. Dostupné z: doi:10.3390/pr7050311

- [80] SHARMA, A. K., T. GUILDAL, H. R. THOMSEN a B. N. JACOBSEN. Energy savings by reduced mixing in aeration tanks: results from a full scale investigation and long term implementation at Avedoere wastewater treatment plant. *Water Science and Technology* [online]. 2011, **64**(5), 1089–1095. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2011.546
- [81] GUDE, Veera Gnaneswar. Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **45**, 52–68. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.01.055
- [82] COELHO, M. A. Z., C. RUSSO a O. Q. F. ARAÚJO. Optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal. *Water Research* [online]. 2000, **34**(10), 2809–2817. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(00)00010-5
- [83] EGEA, Jose A. a Isabel GRACIA. Dynamic Multiobjective Global Optimization of a Waste Water Treatment Plant for Nitrogen Removal. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2012, **45**(2), 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 374–379. ISSN 1474-6670. Dostupné z: doi:10.3182/20120215-3-AT-3016.00066
- [84] HREIZ, Rainier, Nicolas ROCHE, Brahim BENYAHIA a M. A. LATIFI. Multi-objective optimal control of small-size wastewater treatment plants. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2015, **102**, 345–353. ISSN 0263-8762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2015.06.039
- [85] SINGH, Pratima, Cynthia CARLIELL-MARQUET a Arun KANSAL. Energy pattern analysis of a wastewater treatment plant. *Applied Water Science* [online]. 2012, **2**(3), 221–226. ISSN 2190-5495. Dostupné z: doi:10.1007/s13201-012-0040-7
- [86] SOARES, Claire. *Process engineering equipment handbook*. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 978-0-07-059614-6.
- [87] PETRUZZELLI, D, A DELL'ERBA, L LIBERTI, M NOTARNICOLA a A. K SENGUPTA. A phosphate-selective sorbent for the REM NUT® process: field experience at Massafra Wastewater Treatment Plant. *Reactive and Functional Polymers* [online]. 2004, **60**, Special Issue in honor of Michael Streat, 195–202. ISSN 1381-5148. Dostupné z: doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2004.02.023
- [88] EVANS, B. a P. LAUGHTON. Emerging Trends in Electrical Energy Usage at Canadian (ontario) Municipal Wastewater Treatment Facilities and Strategies for Improving Energy Efficiency. *Water Science and Technology; London*. 1994, **30**(4), 17–23. ISSN 02731223.
- [89] TAO, Xie a Wang CHENGWEN. Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China. In: *World Congress on Water, Climate and Energy: World Congress on Water, Climate and Energy* [online]. 2012, s. 6 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.1228.9285
- [90] GÜLICH, Johann Friedrich. Pump hydraulics and physical concepts. In: Johann Friedrich GÜLICH, ed. *Centrifugal Pumps* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010 [cit. 2020-02-19], s. 69–144. ISBN 978-3-642-12824-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12824-0\_3

- [91] TORREGROSSA, Dario, Ulrich LEOPOLD, Francesc HERNÁNDEZ-SANCHO, Joachim HANSEN, Alex CORNELISSEN a Georges SCHUTZ. A Tool for Energy Management and Cost Assessment of Pumps in Waste Water Treatment Plants. In: Isabelle LINDEN, Shaofeng LIU a Christian COLOT, ed. *Decision Support Systems VII. Data, Information and Knowledge Visualization in Decision Support Systems* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 148–161. Lecture Notes in Business Information Processing. ISBN 978-3-319-57487-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-57487-5\_11
- [92] VAN HEERINGEN, Klaas-Jan, Ronald VAN NOOIJEN, Kees KOOIJ a Bokke POSTMA. Real-time Control of sewer pumps by using ControlNEXT to smooth inflow at Waste Water Treatment Plant Garmerwolde. In: *EGU General Assembly Conference* [online]. Vienna Austria: EGU General Assembly, 2016, s. EPSC2016-1412 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..18.1412V>
- [93] KROLL, Stefan, Geert DIRCKX, Brecht M. R. DONCKELS, Mieke VAN DORPE, Marjoleine WEEMAES a Patrick WILLEMS. Modelling real-time control of WWTP influent flow under data scarcity. *Water Science and Technology* [online]. 2016, **73**(7), 1637–1643. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2015.641
- [94] ZHANG, Zijun, Yaohui ZENG a Andrew KUSIAK. Minimizing pump energy in a wastewater processing plant. *Energy* [online]. 2012, **47**(1), Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011, 505–514. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.08.048
- [95] BERGE, Svein, Berit LUND a Rita UGARELLI. Condition Monitoring for Early Failure Detection. Frognerparken Pumping Station as Case Study. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **70**, 162–171. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.02.019
- [96] PARKER, G. J. The effect of footpiece design on the performance of a small air lift pump. *International Journal of Heat and Fluid Flow* [online]. 1980, **2**(4), 245–252. ISSN 0142-727X. Dostupné z: doi:10.1016/0142-727X(80)90018-1
- [97] AHMED, W. H., A. M. AMAN, H. M. BADR a A. M. AL-QUTUB. Air injection methods: The key to a better performance of airlift pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, **70**, 354–365. ISSN 0894-1777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.09.022
- [98] OUESLATI, Adel a Adel MEGRICHE. The effect of liquid temperature on the performance of an airlift pump. *Energy Procedia* [online]. 2017, **119**, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon, 693–701. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.07.096
- [99] MORGADO, A. O., J. M. MIRANDA, J. D. P. ARAÚJO a J. B. L. M. CAMPOS. Review on vertical gas–liquid slug flow. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2016, **85**, 348–368. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.002

- [100] HANAFIZADEH, Pedram, Soheil GHANBARZADEH a Mohammad Hassan SAIDI. Visual technique for detection of gas–liquid two-phase flow regime in the airlift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [online]. 2011, **75**(3), 327–335. ISSN 0920-4105. Dostupné z: doi:10.1016/j.petrol.2010.11.028
- [101] KASSAB, S. Z., H. A. KANDIL, H. A. WARDA a W. H. AHMED. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2007, **131**(1), 273–281. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2006.12.009
- [102] DEENDARLIANTO, Intan SUPRABA, Akmal Irfan MAJID, Muhammad Reza PRADECTA, INDARTO a Adhika WIDYAPARAGA. Experimental investigation on the flow behavior during the solid particles lifting in a micro-bubble generator type airlift pump system. *Case Studies in Thermal Engineering* [online]. 2019, **13**, 100386. ISSN 2214-157X. Dostupné z: doi:10.1016/j.csite.2018.100386
- [103] NICKLIN, D J. The air-lift pump theory and optimization. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1963, **41**, 29–39.
- [104] HANAFIZADEH, Pedram, Amir Hossein RAFFIEE a Mohammad Hassan SAIDI. Experimental investigation of characteristic curve for gas-lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [online]. 2014, **116**, 19–27. ISSN 0920-4105. Dostupné z: doi:10.1016/j.petrol.2014.02.011
- [105] BRANDT, Malcolm J., K. Michael JOHNSON, Andrew J. ELPHINSTON a Don D. RATNAYAKA. Chapter 8 - Storage, Clarification and Chemical Treatment. In: Malcolm J. BRANDT, K. Michael JOHNSON, Andrew J. ELPHINSTON a Don D. RATNAYAKA, ed. *Twort's Water Supply (Seventh Edition)* [online]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2017 [cit. 2020-02-24], s. 323–366. ISBN 978-0-08-100025-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100025-0.00008-9
- [106] MCCORQUODALE, John A. a Siping ZHOU. Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance. *Journal of Hydraulic Research* [online]. 1993, **31**(4), 461–478. ISSN 0022-1686. Dostupné z: doi:10.1080/00221689309498870
- [107] SCHOLZ, Miklas. Chapter 6 - Primary Treatment. In: Miklas SCHOLZ, ed. *Wetlands for Water Pollution Control (Second Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2016 [cit. 2020-02-17], s. 27–35. ISBN 978-0-444-63607-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63607-2.00006-X
- [108] NARAYANAN, B., S. G. HOUGH a R. J. OOTEN. New Hypothesis for Secondary Clarifier Performance Under Hydraulically Limited Conditions. *Water Environment Research* [online]. 2000, **72**(1), 116–126. ISSN 1554-7531. Dostupné z: doi:10.2175/106143000X137185
- [109] ROSSO, Diego, Lory E. LARSON a Michael K. STENSTROM. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. *Water Science and Technology: London* [online]. 2008, **57**(7), 973–978. ISSN 02731223. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.2166/wst.2008.218

- [110] FAN, Haitao, Lu QI, Guoqiang LIU, Yuankai ZHANG, Qiang FAN a Hongchen WANG. Aeration optimization through operation at low dissolved oxygen concentrations: Evaluation of oxygen mass transfer dynamics in different activated sludge systems. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2017, **55**, 224–235. ISSN 1001-0742. Dostupné z: doi:10.1016/j.jes.2016.08.008
- [111] ASADI, Ali, Anoop VERMA, Kai YANG a Ben MEJABI. Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **203**, Waste Management with emphasis on municipal waste, biowaste and industrial waste, 630–639. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2016.07.047
- [112] PANEPINTO, Deborah, Silvia FIORE, Mariantonia ZAPPONE, Giuseppe GENON a Lorenza MEUCCI. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy* [online]. 2016, **161**, 404–411. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.027
- [113] BERTANZA, G., L. MENONI a P. BARONI. Energy saving for air supply in a real WWTP: application of a fuzzy logic controller. *Water Science and Technology* [online]. 2020 [vid. 2020-03-18]. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2020.084
- [114] KHATRI, Narendra, Kamal Kishore KHATRI a Abhishek SHARMA. Enhanced Energy Saving in Wastewater Treatment Plant using Dissolved Oxygen Control and Hydrocyclone. *Environmental Technology & Innovation* [online]. 2020, **18**, 100678. ISSN 2352-1864. Dostupné z: doi:10.1016/j.eti.2020.100678
- [115] BELL, K. Y. a S. ABEL. Optimization of WWTP aeration process upgrades for energy efficiency. *Water Practice and Technology* [online]. 2011, **6**(2) [vid. 2020-03-18]. Dostupné z: doi:10.2166/wpt.2011.024
- [116] MACINTOSH, C., S. ASTALS, C. SEMBERA, A. ERTL, J. E. DREWES, P. D. JENSEN a K. KOCH. Successful strategies for increasing energy self-sufficiency at Grüneck wastewater treatment plant in Germany by food waste co-digestion and improved aeration. *Applied Energy* [online]. 2019, **242**, 797–808. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.126
- [117] LIU, Yu a Joo-Hwa TAY. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Water Research* [online]. 2002, **36**(7), 1653–1665. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(01)00379-7
- [118] DAUGHERTY, Becky a Brian HEMPHILL. Current Trends in Digester Mixing Technologies. In: *Pacific Northwest Pollution Control Association Conference: Pacific Northwest Pollution Control Association Conference*. 2006, s. 60.
- [119] SINGH, Buta, Zoltán SZAMOSI a Zoltán SIMÉNFALVI. State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review. *Renewable Energy* [online]. 2019, **141**, 922–936. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.04.072
- [120] PAGILLA, Krishna R., Kent C. CRANEY a Wendell H. KIDO. Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. *Water Science and Technology* [online]. 1997,

- 36(6)**, Anaerobic Digestion VIII, 463–470. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.1016/S0273-1223(97)00556-8
- [121] KARIM, Khursheed, K. THOMAS KLASSON, Rebecca HOFFMANN, Sadie R. DRESCHER, David W. DEPAOLI a M. H. AL-DAHMAN. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. *Bioresource Technology* [online]. 2005, **96(14)**, 1607–1612. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2004.12.021
- [122] LATHA, K., R. VELRAJ, P. SHANMUGAM a S. SIVANESAN. Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **210**, 388–400. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.219
- [123] WANG, Hui, Rebecca A. LARSON, Mark BORCHARDT a Susan SPENCER. Effect of mixing duration on biogas production and methanogen distribution in an anaerobic digester. *Environmental Technology* [online]. 2019, **0(0)**, 1–7. ISSN 0959-3330. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2019.1621951
- [124] MCLEOD, James, Maazusa Z. OTHMAN a Rajarathinam PARTHASARATHY. Quantitative investigation of hydraulic mixing energy input during batch mode anaerobic digestion and its impact on performance. *Bioresource Technology* [online]. 2018, **263**, 583–590. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2018.05.038
- [125] KARIYAMA, Ibrahim Denka, Xiaodong ZHAI a Binxin WU. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. *Water Research* [online]. 2018, **143**, 503–517. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2018.06.065
- [126] LOW S. C., PARTHASARATHY R., SLATTER P. a ESHTIAGHI N. Hydrodynamics study of sludge in anaerobic digesters. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2012, **29**, 1321–1326. Dostupné z: doi:10.3303/CET1229221
- [127] YU, Liang, Jingwei MA, Craig FREAR, Quanbao ZHAO, Robert DILLON, Xiujin LI a Shulin CHEN. Multiphase modeling of settling and suspension in anaerobic digester. *Applied Energy* [online]. 2013, **111**, 28–39. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2013.04.073
- [128] ZHANG, Yuan, Guangren YU, Liang YU, Muhammad Abdul Hanan SIDDHU, Mengjiao GAO, Ahmed A. ABDELTAWAB, Salem S. AL-DEYAB a Xiaochun CHEN. Computational fluid dynamics study on mixing mode and power consumption in anaerobic mono- and co-digestion. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **203**, 166–172. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2015.12.023
- [129] CIEŚLIK, Bartłomiej a Piotr KONIECZKA. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **142**, 1728–1740. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.116



- [130] OZOLA, Ruta, Maris KLAUVINS a Artis ROBALDS. Phosphorus sorption and recovery: major challenges to close the phosphorus cycle. *Linnaeus Eco-Tech.* 2018, 209–209. ISSN 2002-8008.
- [131] EGGLE, L., H. RECHBERGER, J. KRAMPE a M. ZESSNER. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of The Total Environment* [online]. 2016, **571**, 522–542. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.019
- [132] MELIA, Patrick M., Andrew B. CUNDY, Saran P. SOHI, Peter S. HOODA a Rosa BUSQUETS. Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater. *Chemosphere* [online]. 2017, **186**, 381–395. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2017.07.089
- [133] RITTMANN, Bruce E., Brooke MAYER, Paul WESTERHOFF a Mark EDWARDS. Capturing the lost phosphorus. *Chemosphere* [online]. 2011, **84**(6), The Phosphorus Cycle, 846–853. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2011.02.001
- [134] KUBÁČEK, Pavel. Adsorpce. *Základy fyzikální chemie* [online]. 2011, 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, [cit. 2020-09-10]. ISSN 1802-128X. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz\\_chem/web/povrchy/adsorpce.htm](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/povrchy/adsorpce.htm)
- [135] CRINI, Grégorio a Pierre-Marie BADOT. *Sorption processes and pollution: Conventional and non-conventional sorbents for pollutant removal from wastewaters*. B.m.: Presses Univ. Franche-Comté, 2011. ISBN 978-2-84867-304-2.
- [136] LUCAS, D., F. CASTELLET-ROVIRA, M. VILLAGRASA, M. BADIA-FABREGAT, D. BARCELÓ, T. VICENT, G. CAMINAL, M. SARRÀ a S. RODRÍGUEZ-MOZAZ. The role of sorption processes in the removal of pharmaceuticals by fungal treatment of wastewater. *Science of The Total Environment* [online]. 2018, **610–611**, 1147–1153. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.118
- [137] ZHOU, Qi, Xinze WANG, Jianyong LIU a Ling ZHANG. Phosphorus removal from wastewater using nano-particulates of hydrated ferric oxide doped activated carbon fiber prepared by Sol–Gel method. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2012, **200–202**, 619–626. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2012.06.123
- [138] WU, Baile, Jun WAN, Yanyang ZHANG, Bingcai PAN a Irene M. C. LO. Selective Phosphate Removal from Water and Wastewater using Sorption: Process Fundamentals and Removal Mechanisms. *Environmental Science & Technology* [online]. 2020, **54**(1), 50–66. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.9b05569
- [139] CHITRAKAR, Ramesh, Satoko TEZUKA, Akinari SONODA, Kohji SAKANE, Kenta OOI a Takahiro HIROTSU. Selective adsorption of phosphate from seawater and wastewater by amorphous zirconium hydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2006, **297**(2), 426–433. ISSN 0021-9797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcis.2005.11.011
- [140] ZEJDA, Vojtěch, Vítězslav MÁŠA, Šárka VÁCLAVKOVÁ a Pavel SKRYJA. A Novel Check-List Strategy to Evaluate the Potential of Operational Improvements in

- Wastewater Treatment Plants. *Energies* [online]. 2020, **13**(19), 5005. Dostupné z: doi:10.3390/en13195005
- [141] ZEJDA, V., BĚLOHRADSKÝ, P. a L. HOUDKOVÁ. Měření čerpacích charakteristik mamutových čerpadel. In *Odpadové fórum 2018*. eds. *TVIP 2018 6. - 8. 3. 2018 Hustopeče*. Praha: CEMC, 2018. ISBN 978-80-85990-12-6.
- [142] PRODUCT INFORMATION LEWATIT® FO 36, 2017-05-03 ed, 2017. . LANXESS Deutschland, Germany.
- [143] BRUMMER, V., ZEJDA, V. a L. HOUDKOVÁ. Recovery Of Phosphorus From Wastewater Using Ion Exchange Resins. In *ecoSTP IWA 2018*. [online] Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.13313.92004
- [144] Dotaz na úsporná oběhová čerpadla. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o. ©2020 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://forum.tzb-info.cz/123289-dotaz-na-usporna-obehova-čerpadla>
- [145] TIGHZERT, Hamid, Malek BRAHIMI, Nassima KECHROUD a Farida BENABBAS. Effect of submergence ratio on the liquid phase velocity, efficiency and void fraction in an air-lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [online]. 2013, **110**, 155–161. ISSN 0920-4105. Dostupné z: doi:10.1016/j.petrol.2013.08.047
- [146] Dmyhadla. *IN-ECO* [online]. Rožumberok: IN-ECO, spol. s.r.o. ©2020 [cit. 2020-09-21]. Dostupné z: <https://www.in-eco.cz/>
- [147] ÚTERSKÝ, M. Návrh technických ukazatelů energetické náročnosti čistíren odpadních vod. *Vodovod.info* [online]. Praha: Vodovod.info ©2013. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/kanalizace-a-cov/280-navrh-technicky-ch-ukazatelu-energeticke-narocnosti-cistiren-odpadnich-vod#.X2j1GGgzaUI>
- [149] PODSTAWKOVÁ, M. *Hodnocení rizik bioplynových stanic z hlediska možností exploze*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2015. 117 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing, Aleš Bernatík.
- [149] *Bezpečnost bioplynových stanic | BOZPinfo.cz* [online]. [vid. 2020-08-18]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/bezpecnost-bioplynovych-stanic>
- [151] ZEJDA, V., BĚLOHRADSKÝ, P. a L. HOUDKOVÁ. Experimentální model vyhřívací nádrže ČOV. In *Odpadové fórum 2017*. eds. *TVIP 2017 21. - 23. 3. 2017 Hustopeče*. Praha: CEMC, 2018. ISBN 978-80-85990-30-0.
- [152] BRADÁČ, A. *Návrh optimálního promíchávání velkokapacitních vyhřívacích nádrží*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vojtěch Zejda.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
a, b, c, d, e, f	regresní koeficienty modelu	-
$d_1$	průměr míchadla	m
$d_2$	průměr hřídele míchadla	m
g	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
$q_0 \dots 8$	exponenty	-
n	otáčky míchadla	$s^{-1}$
D	průměr výtlačného potrubí mamutového čerpadla	m
$D_1$	průměr nádrže	m
$D_2$	průměr centrální trubky	m
$D_3$	průměr dna nádrže	m
$D_4$	průměr hladiny kapaliny v nádrži při provozu	m
$E_f$	efektivita využití vzduchu	-
$E_{f-Opt}$	efektivita využití vzduchu pracovního bodu	-
$E_{f-Max}$	poměrná maximální efektivita při dané konfiguraci	-
$E_{f-Rel}$	poměrná efektivita využití vzduchu	-
H	výška výtlaku mamutového čerpadla	m
$H_1$	výška hladiny v nádrži při provozu	m
$H_2$	výška míchadla ode dna nádrže	m
$H_3$	vzdálenost dolního hrdla centrální trubky ode dna nádrže	m
$H_4$	vzdálenost míchadla od horního hrdla centrální trubky	m
$H_5$	výška válcové části nádrže	m
$H_6$	výška kuželového dna nádrže	m
$H_7$	výška hladiny v horní kuželové části nádrže při provozu	m
$Fr_M$	Froudovo kritérium pro míchání	-
$K_p$	příkonové kritérium	-
L	délka výtlačného potrubí	m
$Q_A$	průtok tlakového vzduchu	$Nm^3 \cdot h^{-1}$

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

---

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
$Q_{A-Opt}$	průtok vzduchu pracovního bodu	$Nm^3 \cdot h^{-1}$
$Q_V$	průtok vody	$l \cdot min^{-1}$
$Q_{V-Max}$	poměrný maximální průtok vody při dané konfiguraci	$l \cdot min^{-1}$
$Q_{V-Opt}$	průtok vody pracovního bodu	$l \cdot min^{-1}$
$Q_{V-Rel}$	poměrný průtok vody	$l \cdot min^{-1}$
$P$	hloubka ponoření mamutového čerpadla	m
$P_{Atm}$	atmosférický tlak	Pa
$P_{in}$	přívodní tlak vzduchu	Pa
$P_M$	charakteristický příkon míchadla	(W)
$Re_M$	Reynoldsovo kritérium pro míchání	-
$S_R$	poměrné ponoření	-
$\eta$	účinnost	-
$\rho$	hustota kapaliny	$kg \cdot m^{-3}$
$\Gamma_{1...8}$	geometrické simplex	-
index 1,2	hodnoty pro vedlejší změřené body	
index n	hodnota konkrétního bodu	

**PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA**

ZEJDA, V., MÁŠA V., VÁCLAVKOVÁ Š. a P. SKRYJA, A Novel Check-List Strategy to Evaluate the Potential of Operational Improvements in Wastewater Treatment Plants. *ENERGIES*. 2020, 13(19), 5005. Dostupné z: doi:10.3390/en13195005

ZEJDA, V., GREGOR, J., KROPÁČ, J. a Š. VÁCLAVKOVÁ, The Difficulties of Designing Technical-Economic Models for Czech Wastewater Treatment Plants. In TBMCE. eds. *2nd International Conference on Technologies & Business Models for Circular Economy*, 24. – 25. 10. 2019: Portorož, Slovenija. Maribor: University of Maribor. 2020. [online] Dostupné z: 10.18690/978-961-286-353-1.22

BRUMMER, V.; ZEJDA, V. Experimental verification of anaerobic fermentation of potato processing agro-industrial waste products. *10th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Rhodes Island, Greece*: IWA, 2019.

BRUMMER, V., ZEJDA, V. a L. HOUDKOVÁ. Recovery Of Phosphorus From Wastewater Using Ion Exchange Resins. In *ecoSTP IWA 2018*. [online] Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.13313.92004

ZEJDA, V., BĚLOHRADSKÝ, P. a L. HOUDKOVÁ. Měření čerpacích charakteristik mamutových čerpadel. In *Odpadové fórum 2018*. eds. *TVIP 2018* 6. - 8. 3. 2018 Hustopeče. Praha: CEMC, 2018. ISBN 978-80-85990-12-6.

ZEJDA, V., BĚLOHRADSKÝ, P. a L. HOUDKOVÁ. Experimentální model vyhnivací nádrže ČOV. In *Odpadové fórum 2017*. eds. *TVIP 2017* 21. - 23. 3. 2017 Hustopeče. Praha: CEMC, 2018. ISBN 978-80-85990-30-0.

ZEJDA, V.; HUDÁK, I. Adsorpční jednotka PSA pro výuku a výzkum. In *Recenzovaný sborník příspěvků mezinárodní vědecké konference MMK 2016*. VII. Hradec Králové, Česká republika: MAGNANIMITAS, 2016. s. 1405-1413. ISBN: 978-80-87952-17-7.