



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

## TESTOVÁNÍ AERAČNÍCH ELEMENTŮ

TESTING OF AERATION ELEMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Špunarová

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství obcí  
Studentka: **Kateřina Špunarová**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24  
Studijní program: B0732A260005 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

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

## Testování aeračních elementů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V teoretické části práce student provede rešerši v oblasti aerace, aeračních elementů a způsobu stanovení výkonnosti aeračních elementů. V praktické části práce student provede testování vybraných parametrů pro jemnobublinné aerační elementy. Vzájemně budou porovnány použité a nové elementy stejného typu. Testování bude probíhat v areálu ČOV Modřice za spolupráce spol. BVK, a.s.

### Cíle a výstupy bakalářské práce:

- rešerše problematiky v oblasti aeračních elementů,
- testování vybraných aeračních elementů,
- vyhodnocení a komparace výsledků.

### Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] MALÝ Josef; MALÁ Jitka. Chemie a technologie vody. 2. doplněné vydání. Brno: ARDEC s.r.o., 2006. 329 s. ISBN 80-86020-50-9.
- [2] LIN, Shundar. Water and wastewater calculations manual. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2007, xi, 945 s. ISBN 00-714-7624-5.
- [3] HLAVÍNEK Petr, HLAVÁČEK Jiří: Čištění odpadních vod – praktické příklady výpočtů, NOEL 2000, 1996, 196 s. ISBN 80-86020-00-2.
- [4] Sborníky Water Science and Technology, IWA Publishing.
- [5] Technické listy dodavatelů aeračních zařízení.
- [6] Normy v oblasti čištění odpadních vod.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 16. 11. 2023

L. S.

---

doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.  
vedoucí ústavu

---

doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.  
vedoucí práce

---

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

## **ABSTRAKT**

V bakalářské práci s názvem *testování aeračních elementů* je zpracována rešerše o aeračních systémech a aeračních elementech používaných na čistírnách odpadních vod. Praktická část popisuje metodiku měření a vyhodnocení dat z testování konkrétních aeračních elementů. Cílem práce je srovnání určitých parametrů jako je oxygenační kapacita, otvírací tlaky a spotřeba energie. Tyto parametry mohou mít významný dopad na efektivitu a provozní náklady čistíren odpadních vod.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Aerace, provzdušňování, aerační elementy, oxygenační kapacita, spotřeba energie, testování, čistírna odpadních vod, jemnobublinná aerace

## **ABSTRACT**

In the bachelor thesis entitled testing of aeration elements, research is carried out on aeration systems and aeration elements used at wastewater treatment plants. The practical part describes the methodology of measurement and evaluation of data from the testing of specific aeration elements. The aim of the work is the comparison of certain parameters such as oxygenation capacity, opening pressures and energy consumption. These parameters can have a significant impact on the efficiency and operating costs of wastewater treatment plants.

## **KEYWORDS**

Aeration, aeration elements, oxygenation capacity, energy consumption, testing, wastewater treatment plants, fine bubble aeration

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠPUNAROVÁ, Kateřina. *Testování aeračních elementů*. Brno, 2024. 67 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.

**PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Testování aeračních elementů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 05. 2024

---

Kateřina Špunarová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Testování aeračních elementů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 05. 2024

---

Kateřina Špunarová  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Hlušíkovi, PhD., nejen za odborné vedení při zpracování práce, ale za veškerou ochotu, poskytnuté podklady a informace a hlavně za přátelský přístup. Velké poděkování patří i společnosti BVK, a.s. za možnost uskutečnit měření a za poskytnuté pracovní prostředí a vybavení.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
1.1	CÍL PRÁCE.....	4
<b>2</b>	<b>REŠERŠNÍ ČÁST</b> .....	<b>5</b>
2.1	AERACE.....	5
2.2	DĚLENÍ AERAČNÍCH SYSTÉMŮ.....	6
2.2.1	PNEUMATICKÁ AERACE.....	7
2.2.2	MECHANICKÁ AERACE.....	10
2.2.3	HYDROPNEUMATICKÁ AERACE.....	13
2.2.4	KOMBINOVANÁ AERACE.....	14
2.3	AERAČNÍ ELEMENTY.....	15
2.3.1	TVARY AERAČNÍCH ELEMENTŮ.....	16
2.3.2	TYPY AERAČNÍCH ELEMENTŮ.....	17
2.4	VÝROBCI AERAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	18
2.5	VÝPOČET A STANOVENÍ OXYGENAČNÍ KAPACITY.....	20
2.6	PRŮTOK VZDUCHU.....	23
2.7	PŘESTUP KYSLÍKU.....	23
2.8	KRITICKÉ ZHODNOCENÍ REŠERŠNÍ ČÁSTI.....	25
<b>3</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>26</b>
3.1	HLAVNÍ CÍLE MĚŘENÍ.....	26
3.2	PŘÍPRAVNÉ PRÁCE.....	26
3.3	TESTOVANÉ AERAČNÍ ELEMENTY.....	28
3.3.1	ENVICON.....	28
3.3.2	XYLEM.....	30
3.4	POPIS PROSTŘEDÍ.....	32
3.4.1	NÁDRŽ.....	32
3.4.2	KYSLÍKOVÉ SONDY.....	32

3.4.3	ČERPADLO .....	34
3.4.4	ROZMÍSTĚNÍ AERAČNÍCH ELEMENTŮ V NÁDRŽI .....	35
3.4.5	KVALITA VODY .....	36
3.4.6	CHEMIKÁLIE.....	37
<b>3.5</b>	<b>POSTUP MĚŘENÍ.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>40</b>
3.6.1	PRŮTOK VZDUCHU .....	40
3.6.2	VYHODNOCENÍ OXYGENAČNÍ KAPACITY.....	43
3.6.3	MĚŘENÍ TLAKŮ .....	43
3.6.4	TEORETICKÝ VÝPOČET SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE AERÁTORŮ .....	49
<b>3.7</b>	<b>SHRNUTÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÝCH DAT .....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>59</b>

# 1 ÚVOD

Současná doba, která je zatížena rychle se rozvíjející společnostmi a s ní spojenými službami a průmyslem, na nás neustále klade větší nároky na zachování a ideálně i zlepšení podmínek životního prostředí. Jedním z faktorů vedoucích ke zlepšení stavu životního prostředí je snížení spotřeby elektrické energie, zejména s ohledem na současný zrychlený životní styl. Významným nositelem myšlenek a iniciátorem opatření vedoucích k výše uvedenému cíli je Evropská unie. Je kladen důraz na snížení množství spotřebované elektrické energie, což by mělo přinést za následek snížení závislosti Evropské unie na dovozu energie ze států mimo Evropskou unii (např. z Ruska ve formě fosilních paliv – program REPowerEU). Na základě těchto požadavků se v procesu čištění odpadních vod nabízí řešení problematiky efektivity a optimalizace čistírenských procesů. Inovacemi vedoucími k zefektivnění procesů je možno docílit snížení negativního environmentálního dopadu čistíren odpadních vod [1].

Mezi klíčové procesy čištění odpadních vod se řadí aerace. Aerace je proces nasycení odpadní vody kyslíkem, která je nezbytná pro biologické rozkladné procesy a představuje přibližně 50-70 % celkové spotřeby elektrické energie na městských čistírnách odpadních vod. Výběr aeračního systému závisí na specifických požadavcích čistírny, jako je projektovaná kapacita, typ odpadní vody a požadované účinnosti čištění daných ukazatelů. Výkonnost aeračního systému se hodnotí podle jeho schopnosti přenášet kyslík do odpadní vody, což je obvykle vyjádřeno v  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . Návrh a správné fungování aeračních systémů jsou zásadní pro celkovou efektivitu procesu aerace při čištění odpadních vod.

## 1.1 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce se v první řadě zaměřuje na rešerši existujících způsobů technologií aerace. Zabývá se různými typy aeračních systémů včetně výrobců a dodavatelů těchto systémů. Bakalářská práce popisuje výpočet oxygenační kapacity.

Ve druhé, praktické části, je popsána metodika měření a vyhodnocení dat z testovaných aeračních elementů. Použité aerační elementy pro měření byly předem vybrány a zkontrolovány společností BVK, a.s. Práce detailně popisuje měření otevíracích tlaků na membránách a měření oxygenační kapacity, což jsou kritické parametry pro hodnocení výkonnosti a účinnosti aerace.

Hlavním cílem práce je poskytnout komplexní přehled o existujících technologiích aerace používaných na čistírnách odpadních vod. Dále bakalářská práce zkoumá životnost jemnobublinných diskových aeračních elementů ve vztahu k nárůstu spotřeby elektrické energie a změně výkonnosti, což je sledováno na parametrech otevíracích tlaků a oxygenační kapacity. Cílem práce byla komparace parametrů u použitých aerátorů v závislosti na jejich stáří a opotřebení.

## 2 REŠERŠNÍ ČÁST

### 2.1 AERACE

Aerace neboli provzdušňování je proces, při kterém dochází k přenosu kyslíku ze vzduchu do kapaliny. Při aeraci dochází k přímému kontaktu mezi vodou a vzduchem. Aerace funguje na principu zvýšení koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě [2].

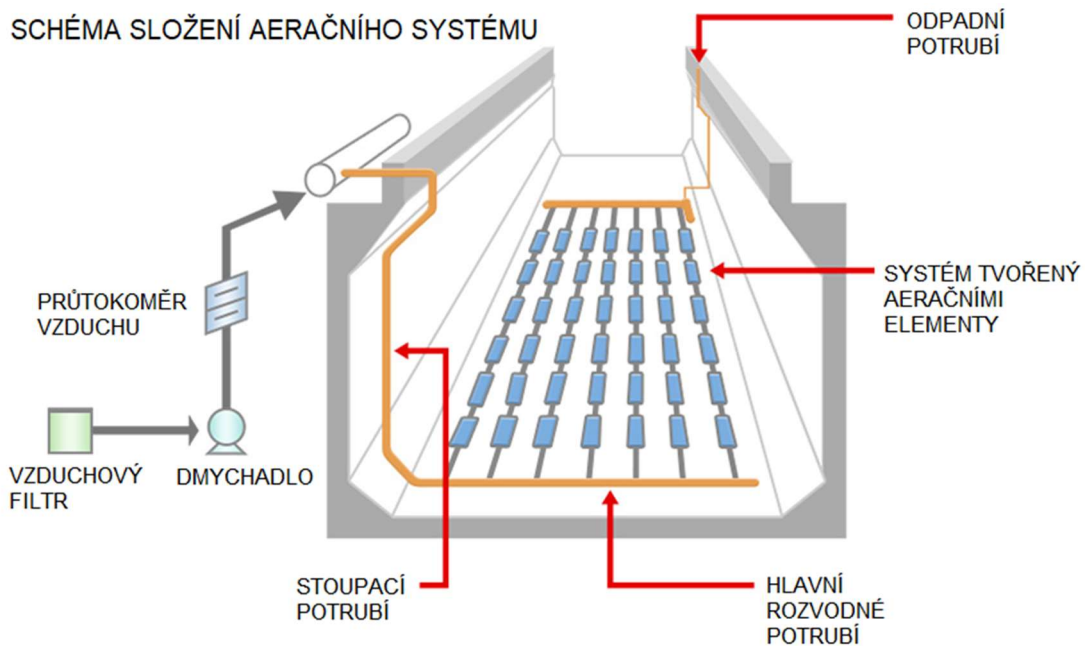
S procesem provzdušňování se setkáme na čistírnách odpadních vod (ČOV), kde je součástí biologického čištění. Při biologickém čištění se pomocí nastavení vhodných podmínek, jako je množství kyslíku nebo teplota, ve vodě vypěstují bakterie, které požírají pevné látky rozpuštěné ve vodě a vylučují je ve formě nerozpuštěných pevných látek [3].

Aerace je nezbytná pro správné biologické rozkládání rozpuštěných a koloidních organických látek. Díky dodanému kyslíku dochází také k oxidaci amoniaku a dusitanů. Zajištěním dostatečného množství kyslíku se zabrání tvorbě nepříjemných pachů [3].

K dosažení efektivní aerace se používají různé technologie a zařízení. Existuje několik druhů systémů i několik výrobců. Na trhu máme české i zahraniční výrobce.

Chemické látky odstraněné pomocí provzdušňování jsou: těkavé organické chemikálie (benzen, trichlorethylen, dichlorethylen a perchlorethylen), amoniak, chlor, oxid uhličitý, sirovodík, metan, železo a mangan [4].

Aerační systém je složen z několika částí (Obr. 2-1). Mezi hlavní části systému řadíme: vzduchový filtr, dmyhadlo jako zdroj vzduchu, potrubní systém, řídicí systémy a jednotlivé aerační elementy. Řídicí systémy umožňují monitorování a řízení množství vzduchu dodávaného do systému. Může se jednat o kyslíkové sondy, průtokoměry vzduchu a další.



Obrázek 2-1 – Schéma složení aeračního systému [5]

## 2.2 DĚLENÍ AERAČNÍCH SYSTÉMŮ

Existuje několik způsobů dělení aeračních systémů. Základní dělení je uvedeno v tabulce 2-1.

Tabulka 2-1 – Dělení aeračních systémů

1. Pneumatická aerace	
	1a. Jemnobublinná aerace
	s bodovými elementy
	s trubkovými elementy
	s velkoplošnými elementy
	1b. Středobublinná aerace
	1c. Hrubobulinná aerace
2. Mechanická aerace	
	2a. Aerátory s osou horizontální
	povrchové aerátory
	ponořené aerátory
	2b. Aerátory s osou vertikální
	povrchové aerátory
	ponořené aerátory
3. Hydropneumatická aerace	
4. Kombinovaná aerace	
5. Aerace za použití čistého kyslíku	

Podle provozního systému dělíme aeraci na přerušovanou a kontinuální.

## 2.2.1 PNEUMATICKÁ AERACE

Pneumatická aerace neboli aerace stlačeným vzduchem. Při pneumatické aeraci se vzduch do aktivačních nádrží vhání za pomoci kompresorů, dmychadel, turbodmychadel nebo ventilátorů a následně se za pomoci různých aeračních elementů rozptyluje do vody. Tvar a velikost aeračních elementů jsou různé. Může se jednat např. o trubky, dómy, disky nebo desky [6].

Cílem pneumatického provzdušňování je zlepšit rozpustnost kyslíku ve vodě, což je nezbytné pro přežití aerobních organismů.

Hloubka ponoření aeračních elementů je obvykle 3-6 m a vzdálenost aeračních elementů ode dna nádrže je přibližně 0,2-0,35 m [6].

Podle průměru vzduchových bublin rozeznáváme tři druhy pneumatické aerace:

- jemnobublinná aerace,
- středobublinná aerace,
- hrubobublinná aerace.

Menší průměr bubliny (při stejném množství vzduchu) zvětšuje povrch kontaktní plochy mezi vodou a vzduchem, což usnadňuje difuzi vzduchu do vody. Uvažuje se, že menší průměr bubliny a delší doba působení bubliny ve vodě, zlepšuje přenos plynu do vody, a tím se zvyšuje koncentrace rozpuštěného plynu [7].

Přehled používaných aeračních elementů dle průměru bublin je na obrázku 2-2.



Obrázek 2-2 – Schematické rozdělení pneumatické aerace [8]

## Jemnobublinná pneumatická aerace

Jemnobublinná pneumatická aerace je nejrozšířenějším způsobem provzdušňování vody v oblasti provzdušňování v aktivačních nádržích [6].

System (Obr. 2-3) je složen ze: zdroje vzduchu, jednotky filtrace vzduchu, hlavního a rozvodného vzduchového potrubí z nekorodujících materiálů, provzdušňovacích roštů osazených jemnobublinnými elementy a z odvodňovacího zařízení [6].

U tohoto typu aerace jsou na dně nádrže umístěny difuzory, pomocí kterých jsou do nádrže vháněny bublinky, které stoupají vodou a poskytují vysokou účinnost přenosu kyslíku [9].

Pro jemnobublinnou aeraci se používají porézní nebo membránové elementy o průměru  $d = 1-4$  mm. Účinnost přestupu kyslíku se u tohoto typu aerace pohybuje od 15 % do 30 % v případě, že jsou aerační elementy umístěny v hloubce 4 m [6].

Pro jemnobublinnou aeraci se používají různé aerační elementy: bodové elementy (disky, desky, dómy), trubkové elementy (trubice, svíčky) a velkoplošné elementy (deskové, hadicové) [6].

Aerátory (Obr. 2-4, Obr.2-5) sloužící pro jemnobublinnou aeraci mohou být vyhotoveny z různých materiálů. Každý materiál je díky svým specifickým vlastnostem vhodný pro jiný systém čištění odpadních vod [9].



Obrázek 2-3- Ilustrativní obrázek jemnobublinného aeračního systému [10]



Obrázek 2-4 – Jemnobublinný diskový aerátor

[11]



Obrázek 2-5 – Jemnobublinný trubicový aerátor

[11]

### **Středobublinná pneumatická aerace**

Pro středobublinnou pneumatickou aeraci je typické použití děrovaných trubek nebo různých vibračních klapek o průměrech  $d = 4-10$  mm. Účinnost přestupu kyslíku se u tohoto typu aerace pohybuje od 5 % do 10 % v případě, že jsou aerační elementy umístěny v hloubce 4 m [6].

Nejčastěji se používají ocelové děrované trubky, které vytváří aerační rošt. Rošty se umísťují podél jedné stěny nádrže asi 0,25 m nade dnem. Na přívodu do každého roštu musí být umístěn ventil [6].

### **Hrubobublinná pneumatická aerace**

Hrubobublinná aerace využívá bubliny o průměru  $d > 10$  mm. Účinnost přestupu kyslíku se u tohoto typu aerace pohybuje od 4 % do 6 % v případě, že jsou aerační elementy umístěny v hloubce 4 m [6].

Aerátory (Obr. 2-7, Obr. 2-8) s hrubými bublinami jsou méně náchylné na ucpání než jemnobublinné aerátory. Používají se tedy převážně na ČOV, kde je v nádržích vysoký výskyt sedimentu [12].

Technici a operátoři často volí řešení s hrubými bublinkovými aerátory pro aplikace, které vyžadují více prostoru a větší otvory. Využívají se například pro aerobní vyhnívací nádrže, pískové komory, kalové nádrže a vyrovnávací nádrže [12].

Nejčastějším řešením pro hrubobublinnou aeraci jsou trubkové aerační rošty s otevřenými konci [6].

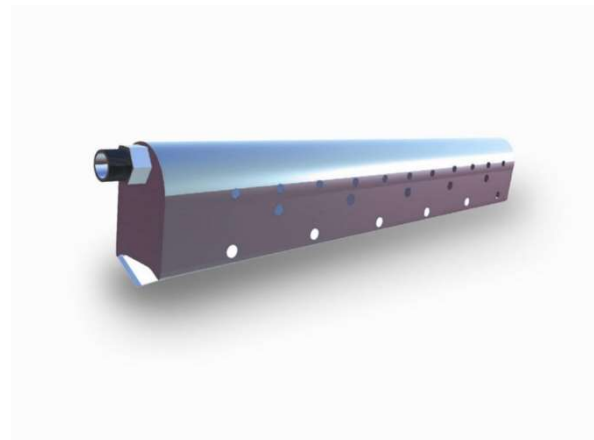
Hrubobublinný aerační systém je na obrázku 2-6.



Obrázek 2-6 – Ilustrativní obrázek hrubobublinného aeračního systému [10]



Obrázek 2-7 – Hrubobublinný diskový aerátor [11]



Obrázek 2-8 – Hrubobublinný trubicový aerátor [11]

## 2.2.2 MECHANICKÁ AERACE

Mechanická aerace neboli aerace mechanickými aerátory. Mechanická aerace funguje buď na principu promíchávání vody tak, aby se zvýšil její kontakt se vzduchem, nebo přímým vstřikováním vzduchu do vody. Tento proces rovněž zvyšuje hladinu rozpuštěného kyslíku ve vodě, což přispívá k aerobnímu rozkladu organické hmoty na ČOV [13].

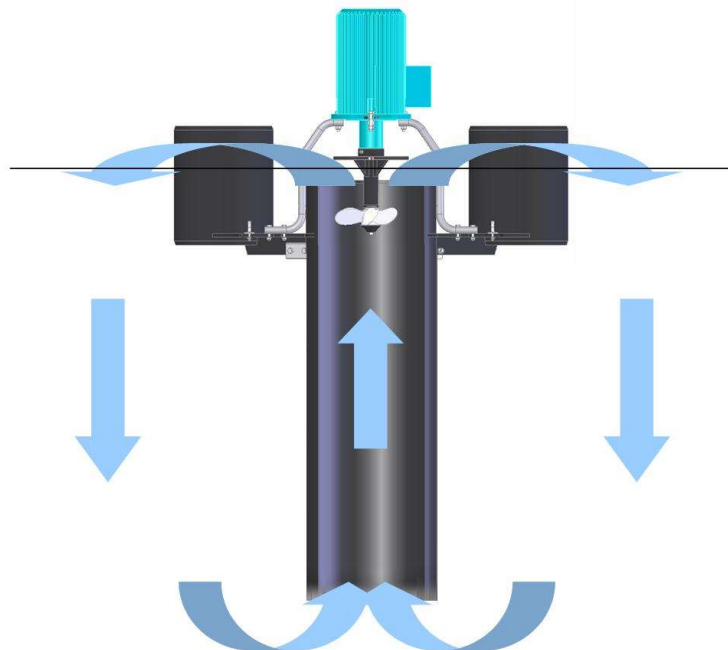
Mechanické aerátory dělíme na aerátory s osou vertikální (aerační turbíny) a na aerátory s osou horizontální (aerační válce) [6].

### **Aerátory s vertikální osou**

Aerátory s vertikální osou (Obr. 2-9) můžeme dále dělit na aerátory povrchové a aerátory ponořené.

Povrchové mechanické aerátory s vertikální osou otáčení mají za cíl v nádrži vyvolat silné sestupné a vzestupné proudění. Skládají se z motoru umístěného nad vodní hladinou na lávce anebo na plovoucím zařízení, z převodovky a vlastního rotoru, tzv. turbíny. Podle tvaru turbíny se dělí na odstředivé, radiálně-axiální a axiální [6].

Ponořené mechanické aerátory s vertikální osou mají pod vodou připevněno distribuční zařízení vzduchu, které dodává vzduch do vody [6].



*Obrázek 2-9 – Aerátor s vertikální osou [14]*

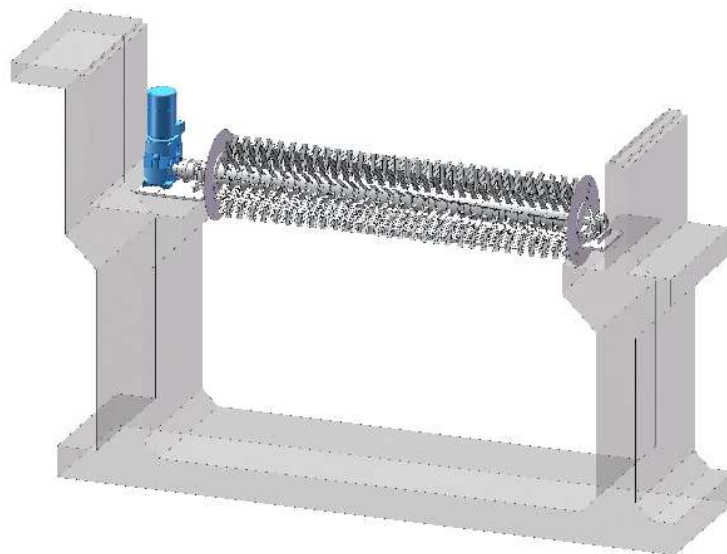
## Aerátory s horizontální osou

Aerátory s horizontální osou můžeme dále dělit na aerátory povrchové a aerátory ponořené.

Povrchové mechanické aerátory s horizontální osou jsou určeny do speciálně tvarovaných aktivačních nádrží. Principem tohoto typu aerátoru je rozstřikování vody díky lopatkám umístěným na aeračním válci [6].

Mechanický povrchový provzdušňovač s horizontální osou je vytvořen podle původního kartáčového provzdušňovače Kessener (Obr. 2-10, Obr. 2-11). Provzdušňovač kartáčového typu má vodorovný válec se štětinami namontovaný těsně nad vodní hladinou. Štětiny jsou ponořeny v odpadní vodě a válec se otáčí pomocí elektromotoru, který rozstřikuje odpadní vodu přes nádrž. Místo štětín se nyní používají úhlové ocelové nebo plastové tyče nebo čepele [14].

Ponořené aerátory s horizontální osou jsou podobné aerátorům povrchovým. U tohoto typu nedochází k rozstřikování vody, nýbrž k přečerpávání a následnému zavzdušnění [6].



Obrázek 2-10 – Schéma povrchového provzdušňovače s horizontální osou (Kessener) [15]



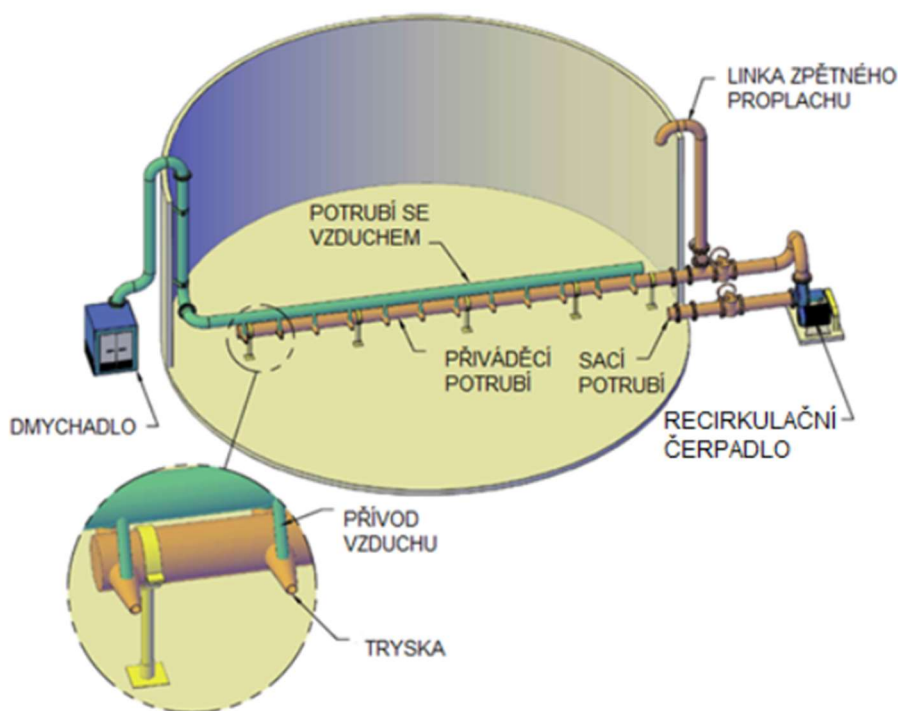
Obrázek 2-11 – Aplikace povrchového provzdušňovače s horizontální osou (Kessener) [15]

### 2.2.3 HYDROPNEUMATICKÁ AERACE

Hydropneumatická aerace neboli využití ejektorů a injektorů. Hydropneumatická aerace je značně podobná pneumatické aeraci, jelikož účinek hydropneumatické aerace je závislý na vzduchových bublinách. Rozdíl je ve způsobu dodávání vzduchu do vody [6].

Při hydropneumatické aeraci dochází k dodání vzduchu do vody pomocí koncentrických trysek. Voda a vzduch putují samostatnými potrubími v provzdušňovačích a setkávají se v soustředných tryskách. Intenzivní kontakt a směšování těchto dvou proudů nastává ve směšovací komoře s vysokým stříhem. Těsný kontakt mezi proudy plynu a kapaliny má za následek tvorbu bublin o velikosti mikronů. [16].

Jeden ze způsobů zapojení systému je na obrázku 2-12.



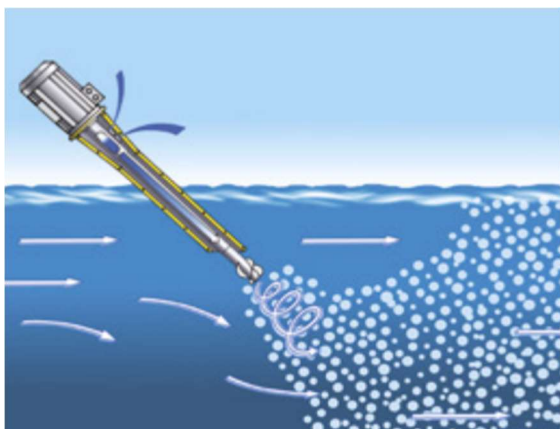
Obrázek 2-12 – Mechanismus hydropneumatické aerace [16]

## 2.2.4 KOMBINOVANÁ AERACE

Pod pojmem kombinovaná aerace rozumíme propojení několika systémů. Kombinovaná aerace je složena z povrchového aerátoru a horizontálního ponorného míchadla, anebo z jemnobublinného aeračního roštu a horizontálního ponorného míchadla [6].

U kombinovaného systému (Obr. 2-13, Obr. 2-14, Obr. 2-15 a Obr. 2-16) je aerátor umístěn těsně pod hladinou. Bubliny vzduchu jsou z tohoto systému vypouštěny pod určitým úhlem směrem ke dnu nádrže a až poté stoupají směrem k hladině.

Základní charakteristikou a hlavní výhodou tohoto systému je to, že zajišťuje míchání vody a provzdušňování zároveň [17].



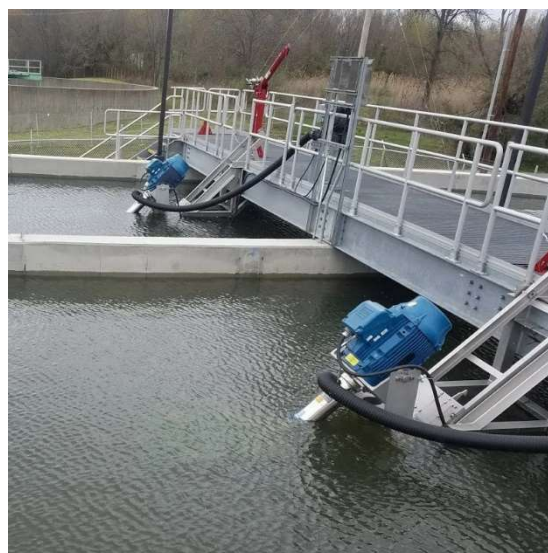
Obrázek 2-13 – Kombinované systémy FUCHS [18]



Obrázek 2-14 – Kombinované systémy FUCHS [18]



Obrázek 2-15 – Kombinované systémy TRITON [19]



Obrázek 2-16 – Kombinované systémy TRITON [20]

## 2.3 AERAČNÍ ELEMENTY

Samotný aerátor je generátor vzduchových bublin. Tyto bubliny mohou mít v návaznosti na druh a velikost zvoleného aerátoru rozdílnou velikost.

V dnešní době je nejúčinnější technologií využívání aeračních elementů, které vytváří mikrobubliny. Mikrobubliny vykazují vlastnosti, které jsou klíčové pro účinný přenos kyslíku do vody, včetně rychlého rozpouštění, zvýšeného poměru povrchové kontaktní plochy k objemu a vysoké rychlosti stoupání bublin.

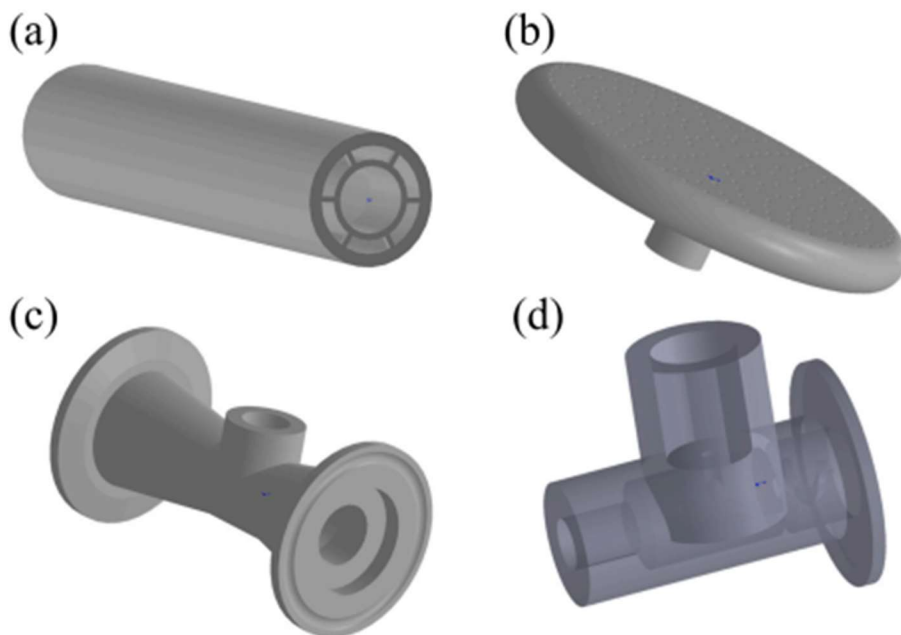
Jak se velikost bublin snižuje, dochází k odpovídajícímu nárůstu vnitřního tlaku, což způsobuje zvýšení jak parciálního tlaku rozpuštěného plynu, tak rychlosti, s jakou se plyn rozpouští [21].

Pro hodnocení aerátorů se často používá standardní rychlost přenosu kyslíku a standardní účinnost aerace.

Standardní rychlost přenosu kyslíku je množství kyslíku přeneseného do kapalné fáze na objem vody za jednotku času za standardních teplotních a tlakových podmínek. Alternativně standardní účinnost aerace představuje podíl energie přeměněné na přenos kyslíku na každou použitou jednotku.

### 2.3.1 TVARY AERAČNÍCH ELEMENTŮ

Podle tvaru rozlišujeme aerátory tubulární (trubicové) (Obr. 2-17: a), diskové (Obr. 2-17: b), Venturiho aerátory (Obr. 2-17: c) a vírové aerátory (Obr. 2-17: d) [21].



Obrázek 2-17 – Aerační elementy podle tvaru [21]

### 2.3.2 TYPY AERAČNÍCH ELEMENTŮ

Existuje několik typů aeračních elementů. Aerační elementy se od sebe liší velikostí, použitým materiálem a dalšími parametry.

#### Bodové aerační elementy

Mezi bodové aerační elementy se řadí disky, desky nebo dómy.



Obrázek 2-18 – Deskový aerátor [22]



Obrázek 2-19 – Aerační systém s deskovými aerátory [23]

#### Trubkové aerační elementy

Trubkové elementy jsou trubice nebo svíčky.



Obrázek 2-20 – Trubicový aerátor [2]



Obrázek 2-21 – Aerační systém využívající trubkové aerátory [24]

#### Velkoplošné aerační elementy

Velkoplošné elementy mohou být deskové nebo hadicové.

## 2.4 VÝROBCI AERAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

V tabulce 2-2 jsou uvedeni výrobci a distributoři aeračních systémů působící na území České republiky. Rešerše byla provedena ke dni 11. 04. 2024.

Tabulka 2-2: Přehled výrobců a prodejců aeračních systémů

1	<b>ALVEST MONT CZ, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Ochodnica č. 60, 023 35 Ochodnica, Slovensko
	Web:	<a href="http://www.alvest.cz/">http://www.alvest.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové aerační elementy
2	<b>ASEKO, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Chromeč 3, 789 01 Chromeč
	Web:	<a href="https://www.asekochromec.cz/">https://www.asekochromec.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – trubkové aerační elementy STBA – trubkové aerační elementy
3	<b>ATER, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Strakonická 1134/13, 150 00 Praha 5 - Smíchov
	Web:	<a href="https://www.ater.cz/">https://www.ater.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy
		STBA – diskové i trubkové aerační elementy
HRBA – diskové i trubkové aerační elementy		
4	<b>BIBUS, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Vídeňská 125, 619 00 Brno
	Web:	<a href="https://www.bibus.cz/">https://www.bibus.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy STBA – diskové i trubkové aerační elementy
5	<b>ČKV Praha, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Ke Kablu 683/3, 102 00 Praha 10 – Dolní Měcholupy
	Web:	<a href="https://www.ckvp Praha.cz/">https://www.ckvp Praha.cz/</a>
6	<b>ENVI-PUR, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Na Vlčovce 13/4, 160 00 Praha 6, Dejvice
	Web:	<a href="https://www.envi-pur.cz/">https://www.envi-pur.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy STBA – diskové i trubkové aerační elementy HRBA – diskové i trubkové aerační elementy
7	<b>FORTEX-AGS, a.s.</b>	
	Sídlo:	Jílová 1550/1, 787 01 Šumperk
	Web:	<a href="https://www.fortex.cz/">https://www.fortex.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové, deskové i trubkové aerační elementy STBA – diskové i trubkové aerační elementy HRBA – diskové i trubkové aerační elementy

8	<b>IN-ECO, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Radlinského 13, 034 01 Ružomberok
	Web:	<a href="https://www.in-eco.cz/">https://www.in-eco.cz/</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy
9	<b>KUBÍČEK VHS, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Maršíkovská 615, 788 15 Velké Losiny
	Web:	<a href="https://kubicekvhs.cz/cs/">https://kubicekvhs.cz/cs/</a>
Sortiment:	Aerační membrány	
10	<b>KUNST, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Palackého 1906, 753 01 Hranice
	Web:	<a href="http://www.kunst.cz/cs">http://www.kunst.cz/cs</a>
	Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy HRBA – trubkové aerační elementy
11	<b>MIVALT, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Hlinky 972/34, 603 00 Brno
	Web:	<a href="https://www.mivalt.cz/">https://www.mivalt.cz/</a>
Sortiment:	JMBA – trubkové aerační elementy STBA – diskové aerační elementy	
12	<b>REHAU, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Obchodní 117, 251 01 Čestlice
	Web:	<a href="https://www.rehau.com/cz-cs">https://www.rehau.com/cz-cs</a>
Sortiment:	JMBA – diskové i trubkové aerační elementy	
13	<b>Vodní energie, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Jakubská 290, 377 01 Jindřichův Hradec 1
	Web:	<a href="https://www.vodnienergie.cz/cs/">https://www.vodnienergie.cz/cs/</a>
Sortiment:	JMBA –trubkové aerační elementy	
14	<b>ZEMSKÝ Rohatec, s.r.o.</b>	
	Sídlo:	Na Kopci 1196/27, 696 01 Rohatec
	Web:	<a href="https://www.zemsky.cz/">https://www.zemsky.cz/</a>
Sortiment:	Kombinované systémy	

Vysvětlivky: JMBA = jemnobublinná aerace,

STBA = středobublinná aerace,

HRBA = hrubobublinná aerace.

Většina společností uvedených v tabulce 2-2 se nezabývá pouze prodejem uvedených systémů, ale také jejich údržbou a opravami. Důležitým faktorem je skutečnost, že značná část výrobců je schopna po konzultaci dodat aerační systém o jakékoliv velikosti s aeračními elementy o různých velikostech produkovaných bublin.

Dle tabulky 2-2 je patrné, že kombinované systémy nabízí na českém trhu společnost ZEMSKÝ Rohatec, s.r.o.

Dále existuje několik dalších výrobců působících na zahraničním trhu.

## 2.5 VÝPOČET A STANOVENÍ OXYGENAČNÍ KAPACITY

Pro vyjádření výkonu aeračního zařízení, a také z důvodu možnosti porovnání různých typů zařízení byla zavedena veličina oxygenační kapacita. Požadavky na měření oxygenační kapacity a celkové účinnosti dodávky kyslíku aeračními zařízeními jsou definovány v normě ČSN EN 12255-15 Čistírny odpadních vod – Část 15: Měření standardní oxygenační kapacity v aktivační nádrži [25].

### Oxygenační kapacita – $OC$

Oxygenační kapacita udává množství kyslíku na objemovou jednotku nádrže za čas. Její stanovení vyplývá z rovnice R.1 [26]:

$$OC = K_{LAT} \cdot c_s \text{ [kg}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (\text{R.1})$$

kde:  $K_{LAT}$  – objemový koeficient přestupu kyslíku [ $\text{h}^{-1}$ ]

$c_s$  – rozpustnost kyslíku za daných teplotních a tlakových podmínek (saturační koncentrace) [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

Obě vstupující veličiny by měly být stanoveny experimentálně, na základě sledování měření příslušných parametrů.

Přestup kyslíku je vždy ovlivněn okolním prostředím. Pro sjednocení se výkony aeračních zařízení udávají za standardních podmínek (20 °C, 0  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  rozpuštěného kyslíku, 0,1013 MPa), a tím vznikla veličina „standardní oxygenační kapacita“ [27].

Dle TNV 75 6613 je standardní oxygenační kapacita definována jako množství kyslíku, které je za časovou jednotku přivedeno do celé arované nádrže za standardních podmínek (R.2) [27].

$$OC_{st} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{f_p} \cdot \frac{c_{m,s}}{c_{m,s} - c_m} \cdot k_n \cdot OC_p \text{ [kg}\cdot\text{d}^{-1}] \quad (\text{R.2})$$

kde:  $k_n$  – součinitel nerovnoměrnosti oxygenační kapacity (pro městské ČOV má hodnotu 1,0-1,3) [-]

$\alpha$  – součinitel přestupu kyslíku [-]

$OC_p$  – provozní spotřeba kyslíku aktivačním procesem [ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ]

$c_m$  – provozní koncentrace rozpuštěného kyslíku [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$c_{m,s}$  – saturační koncentrace rozpuštěného kyslíku [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$f_p$  – korekční faktor pro přepočítání na nadmořskou výšku (s vyšší nadmořskou výškou klesá) [-]

Dle ČSN EN 12255-15 se standardní oxygenační kapacita stanovuje pomocí následující rovnice R.3 [25]:

$$OC_{st} = V \cdot K_L a_{20} \cdot c_{s,20} / 1000 \quad [\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (\text{R.3})$$

kde:  $OC_{st}$  – standardní oxygenační kapacita [ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

$V$  – objem nádrže [ $\text{m}^3$ ]

$K_L a_{20}$  – součinitel přestupu kyslíku při teplotě 20 °C [ $\text{h}^{-1}$ ]

$c_{s,20}$  – zkušební hodnota nasyc. kyslíkem pro standardní podmínky [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

Převodní vztah je následující dle R.4 [26]:

$$OC_{st} = OC \cdot V / 1000 \quad [\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (\text{R.4})$$

Níže uvedená rovnice R.5 je vhodná pro použití při detailním návrhu aeračního zařízení pro jemnobublinnou pneumatickou aeraci. Tento vztah lépe zachycuje vliv provozních podmínek [27].

$$OC_{st} = OC_p \cdot c_{m,s} / [\alpha \cdot F \cdot \tau^{T-20} \cdot (\beta \cdot t \cdot \Omega \cdot c_{m,s} - c_m)] \quad (\text{R.5})$$

kde:  $\Omega$  – poměr mezi tlakem v místě ponoření elementu a atmosférickým tlakem

$\tau$  – teplotní součinitel

$t$  – teplotní korekce mezi provozní a standardní teplotou

$F$  – teplotní součinitel [ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

$\beta$  – součinitel [-]

$T$  – teplota [°C]

Teplotní součinitel  $F$  se stanoví následovně dle rovnice R.6:

$$F = 1,072^{(T-15)} \quad [\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (\text{R.6})$$

## Objemový koeficient přestupu kyslíku – $K_{LaT}$

Tento koeficient ovlivňují následující faktory:

- způsob přivádění kyslíku do vody,
- přiváděné množství kyslíku za čas,
- aerační systém,
- arovaná nádrž (tvar, velikost).

Přepočít součinitele pro standardní podmínky (R.7) [25]:

$$K_{La20} = K_{LaT} \cdot 1,024^{(20-T)} \quad [h^{-1}] \quad (R.7)$$

kde:  $K_{La20}$  – součinitel přestupu kyslíku při teplotě 20 °C [ $h^{-1}$ ]

$K_{LaT}$  – součinitel přestupu kyslíku při zkušební teplotě [ $h^{-1}$ ]

$T$  – teplota vody [°C]

## Součinitel nerovnoměrnosti - $k_n$

Norma zohledňuje pouze součinitel nerovnoměrnosti vlivem změn látkového zatížení BSK<sub>5</sub>. Pro trvale provzdušňovaný systém jako je například předřazená denitrifikace je nutné započítat pouze látkové zatížení. Při směšovací aktivaci je přerušovaná nitrifikace a denitrifikace důvodem zvýšené potřeby kyslíku a tím i navýšení součinitele nerovnoměrnosti. Pro městské ČOV se pohybuje v rozmezí 1,0-1,3 [28].

## Korekční faktor pro přepočít na nadmořskou výšku - $f_p$

V některých odborných literaturách není oproti normám uváděn. Zřejmě z důvodu minimálních změn při jeho použití ve výpočtu nebo také proto, že se ČOV obecně umísťují v nejnižších místech zájmového území. Hodnoty korekčního faktoru dle normy TNV 75 6613 navrhování aeračního systému čistíren odpadních vod jsou uvedeny v tabulce 2-3.

Tabulka 2-3 – Hodnoty korekčního faktoru [27]

nadmořská výška [m n. m.]	$f_p$ [-]
0	1,000
200	0,976
500	0,942
1000	0,885
1500	0,834
1850	0,798

### Provozní spotřeba kyslíku - $OC_p$

Jedná se o spotřebu kyslíku aktivačním procesem. Do této hodnoty se nezahrnuje vliv odpadní vody, provozní koncentrace kyslíku ani koncentrace aktivovaného kalu [28].

## 2.6 PRŮTOK VZDUCHU

Pro požadovaný průtok vzduchu je dle normy výpočet následující (R.8) [27]:

$$Q_{vz} = \frac{100 \cdot OC_{st}}{24 \cdot E_a \cdot c_i} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (R.8)$$

kde:  $E_a$  – množství využitého kyslíku ze vzduchu, při dané hloubce ponoření, hustotě osazení aeračních elementů a jejich zatížení, stanovené podle oxygenační charakteristiky (udává výrobce aeračního zařízení) [%]

$c_i$  – obsah kyslíku ve vzduchu při 20 °C a 0,1013 MPa (má hodnotu 0,280 kg·m<sup>-3</sup>)

## 2.7 PŘESTUP KYSLÍKU

Součinitel  $K_{LAT}$  se dá z prováděné zkoušky pro stanovení aeračního zařízení stanovit lineární nebo nelineární regresí.

Kinetiku přestupu kyslíku do vody lze vyjádřit diferenciální rovnicí [26]:

$$d_c/d_t = K_{LAT} \cdot (c_s - c_t) \quad [mg \cdot l^{-1} \cdot h^{-1}] \quad (R.9)$$

kde:  $d_c/d_t$  – změna koncentrace rozpuštěného kyslíku v čase [mg·l<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>]

$c_s$  – rozpustnost kyslíku za daných podmínek (saturační konc.) [mg·l<sup>-1</sup>]

$c_t$  – koncentrace rozpuštěného kyslíku v čase  $t$  [mg·l<sup>-1</sup>]

Tento zmíněný diferenciál je směrnici tečny v bodě pro čas  $t$  a dosahuje nejvyšší hodnoty při  $c_t = 0$  (maximální kyslíkový deficit).

Součinitel přestupu kyslíku se pak stanoví z rovnice R.10 [25]:

$$\ln(c_{s,p^*,T} - c_t) = \ln(c_{s,p^*,T} - c_0) - (K_{LaT} \cdot t) \quad (\text{R.10})$$

kde:  $c_{s,p^*,T}$  – zkušební hodnota nasycení kyslíkem [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$c_t$  – koncentrace rozpuštěného kyslíku za dobu  $t$  [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$c_0$  – koncentrace rozpuštěného kyslíku v čase  $t = 0$  [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$K_{LaT}$  – součinitel přestupu kyslíku při zkušební teplotě [ $\text{h}^{-1}$ ]

Průběh snížení koncentrace rozpuštěného kyslíku vychází z rovnice (R.9) [25]. Její výpočet se pomocí hledání parametrů při použití nelineární regresní metody přizpůsobuje naměřeným hodnotám.

$$c_t = c_{s,p^*,T} - (c_{s,p^*,T} - c_0) \cdot \exp(-K_{LaT} \cdot t) \quad [\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}] \quad (\text{R.11})$$

kde:  $c_{s,p^*,T}$  – zkušební hodnota nasycení kyslíkem [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$c_t$  – koncentrace rozpuštěného kyslíku za dobu  $t$  [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$c_0$  – koncentrace rozpuštěného kyslíku v čase  $t = 0$  [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$K_{LaT}$  – součinitel přestupu kyslíku při zkušební teplotě [ $\text{h}^{-1}$ ]

$t$  – příslušný čas pro  $c_t$  [s]

Pro výše uvedené výpočty se využívá hodnot saturačních koncentrací. Tabulka 2-4 zobrazuje rozpustnost kyslíku ve vodě při 0,1013 MPa v závislosti na teplotě. Hodnoty mezi uvedenými celými stupni se interpolují.

Tabulka 2-4 – Rozpustnost kyslíku ve vodě [27]

<i>T</i>	rozpustnost	<i>T</i>	rozpustnost	<i>T</i>	rozpustnost	<i>T</i>	rozpustnost
[°C]	[mg·l <sup>-1</sup> ]	[°C]	[mg·l <sup>-1</sup> ]	[°C]	[mg·l <sup>-1</sup> ]	[°C]	[mg·l <sup>-1</sup> ]
0	14,64	11	10,09	22	8,73	33	7,18
1	14,23	12	10,75	23	8,57	34	7,06
2	13,83	13	10,51	24	8,41	35	6,94
3	13,45	14	10,28	25	8,25	36	6,83
4	13,09	15	10,05	26	8,11	37	6,72
5	12,75	16	9,85	27	7,96	38	6,61
6	12,42	17	9,64	28	7,82	39	6,51
7	12,11	18	9,45	29	7,69	40	6,41
8	11,81	19	9,26	30	7,55		
9	11,53	20	9,08	31	7,42		
10	11,25	21	8,90	32	7,30		

## 2.8 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ REŠERŠNÍ ČÁSTI

Rešeršní část popisuje proces provzdušňování na ČOV, definuje, kde je systém využíván, k čemu slouží a jaké jsou jeho prvky.

Existuje několik druhů aeračních systémů. Každý systém má své vlastní výhody a nevýhody, a navíc je každý systém konstruován do jiných podmínek, záleží na druhu ČOV a umístění systému. Provozovatel ČOV si na základě zkušeností vybírá vhodný aerační systém.

Kromě aeračních systémů je v rešeršní části řešen výpočet oxygenační kapacity dle normy ČSN EN 12255-15 Čistírny odpadních vod – Část 15: Měření standardní oxygenační kapacity v aktivační nádrži a s tím související výpočty ostatních parametrů.

## **3 PRAKTICKÁ ČÁST**

### **3.1 HLAVNÍ CÍLE MĚŘENÍ**

Praktická část se zabývá získáním a následným vyhodnocením dat pro stanovení určitých parametrů aeračních elementů. Přesněji se jedná o otevírací tlaky, oxygenační kapacitu a další parametry závislé na příkonu jednotlivých aerátorů. Cílem práce bylo porovnání parametrů u použitých aerátorů v závislosti na jejich stáří a opotřebení.

Samotné měření proběhlo v měsících 06-08/2023. Zajištěné úkony oběma stranami:

VUT Brno – zajištění monitoringu, výpočet a vyhodnocení měření, výpočet OC.

BVK, a.s. ČOV Modřice – zajištění podmínek pro měření, zprostředkování nádrže, zajištění aeračních elementů, příprava nádrže, nákup potřebných chemikálií.

Aerační elementy byly zajištěny a vybrány společností BVK, a.s. Před samotným měřením byla ověřena funkčnost těchto elementů. Aerační elementy mají potřebnou certifikaci od výrobce. Bližší specifikace o aeračních elementech jsou uvedeny v kapitole 3.3.

### **3.2 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE**

Samotnému měření předcházelo několik důležitých kroků. Přípravy před měřením probíhaly přibližně 4 měsíce, během tohoto času proběhlo plánování celé realizace projektu, nutné objednávky, nákupy a další potřebné kroky.

#### **1. KROK**

V první řadě se jednalo o nastudování dané problematiky. Prostudování existujících norem a informačních letáků aeračních elementů.

#### **2. KROK**

Volba vhodného prostředí pro měření. Pro měření byla vybrána nádrž v prostorách ČOV Modřice. Nádrž musela být sanována a utěsněna.

### **3. KROK**

Umístění aeračních elementů. Na dno nádrže byly umístěny čtyři diskové aerační elementy. Bližší specifikace aeračních elementů viz kap. 3.3.

### **4. KROK**

Zajištění přísunu vzduchu do jednotlivých aeračních elementů. Přísun vzduchu byl zajištěn provizorním trubním systémem, který byl připojen na jedno ze čtyř dmychadel, nacházejících se v prostorách ČOV Modřice. Na přívodu vzduchu byl umístěn průtokoměr, který zajišťoval potřebný průtok vzduchu do testovaných aeračních elementů.

### **5. KROK**

Zajištění zdroje vody. Nádrž byla napuštěna pitnou vodou.

### **6. KROK**

Měření a záznam dat. Pro měření byly zajištěny 3 kyslíkové sondy. Před měřením bylo potřeba sondy umístit do nádrže tak, aby splňovaly plochu pokrytí a vzdálenost od stěn nádrže. Sondy byly uchyceny ve 3 různých výškách. Následovala jejich kalibrace. Sondy byly vedeny do dataloggeru společnosti HACH. Před použitím dataloggeru bylo provedeno proškolení.

### **7. KROK**

Výpočet množství a nákup chemikálií. Pro odstranění přebytečného kyslíku ve vodě byly použity chemikálie. Bylo provedeno několik výpočtů pro stanovení potřebného množství chemikálií. Následně byla provedena objednávka potřebných chemikálií.

### **8. KROK**

Osazení čerpadla. Do nádrže bylo umístěno čerpadlo, které sloužilo k míchání objemu vody v nádrži, a také k vypouštění vody z nádrže.

Přípravy na měření byly započaty od 02/2023, řešily se především tyto body:

- vhodná nádrž (velikost, materiál, umístění, přístupnost, čistota),
- kyslíkové sondy (druh, jejich zapůjčení, umístění v nádrži, zapojení),
- kvalita vody a způsob napouštění nádrže,
- nastavení aerace,
- způsob vypouštění vody z nádrže,
- typ a rozmístění aeračních elementů v nádrži,
- chemikálie pro odstraňování rozpuštěného kyslíku z vody (typ, dávkování, objednání),
- způsob omezení průtoku vzduchu,
- způsob měření průtoku vzduchu,
- způsob měření teploty vody,
- způsob záznamu naměřených hodnot,
- počet zkoušek pro každý aerační element,
- ostatní měřené veličiny.

### **3.3 TESTOVANÉ AERAČNÍ ELEMENTY**

Pro účely měření byly využity jemnobublinné diskové aerační elementy od dvou různých výrobců. Od každého výrobce byly použity vždy dva aerační elementy, a to aerační element „nový“ a „starý“. Před samotným měřením proběhlo čištění tzv. starých aeračních elementů. Celkem tedy byly v nádrži umístěny čtyři aerační elementy. Tyto diskové aerátory slouží pouze k provzdušňování znečištěné vody v nádrži.

Diskové aerační elementy jsou často spojovány do větších celků pokrývajících celé dno aktivačních nádrží.

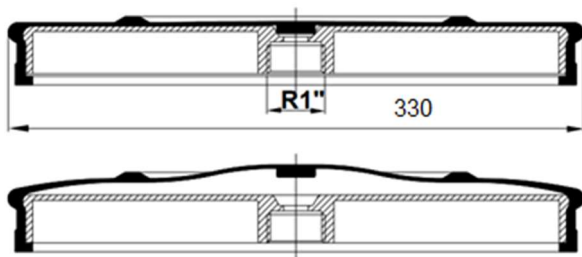
#### **3.3.1 ENVICON**

ENVICON je německá společnost zabývající se výrobou různých druhů aeračních elementů. Veškeré produkty jsou vyráběny přímo v Německu.

#### **ENVICON EMS 12"**

ENVICON EMS 12" (Obr. 3-1, Obr. 3-2) je modelové označení pro jeden z několika druhů aeračních elementů, které tato společnost nabízí. Přesněji jde o diskový provzdušňovací element.

Vnější průměr je 330 mm (12"). Nosný kotouč a upínací kroužek jsou vyrobeny z vysoce chemicky i tepelně odolného polyamidu, který je vyztužen sklolaminátem. Centrální vzduchové potrubí, které se nachází bezprostředně pod membránou disku, zajišťuje co nejmenší tlakovou ztrátu. Membrána disku je dostatečně vyztužená, aby docházelo k rovnoměrnému vzniku bublin v rámci celé plochy diskového aeračního elementu. Na membráně se také nachází těsnicí zátka, která by měla zamezovat zpětnému vniku vody do aeračního elementu v době, kdy je aerační element mimo provoz [29].



Obrázek 3-1 – Schéma aeračního elementu ENVICON EMS 12" [29]



Obrázek 3-2 – Aerační element ENVICON EMS 12" [29]

V nabídce je několik membránových materiálů. Membránový materiál se volí podle znečišťujících látek obsažených v odpadních vodách [29].

Konkrétní okysličení závisí na instalaci aeračních elementů, ale i na zvoleném způsobu provozu.

Aerační element lze využít pro průtok vzduchu 2-12 Nm<sup>3</sup>/hod. Pokud bude využíván pro přerušovanou aeraci je možno nastavit průtok vzduchu až 15 Nm<sup>3</sup>/hod. Doporučená maximální hloubka ponoření dle výrobce je 7 m [29].

Pro potřeby měření byly do nádrže umístěny dva aerační elementy tohoto výrobce. Aerační elementy jsou označeny jako „nový“ a „starý“ aerační element. „Starý“ aerační element byl využíván v aktivační nádrži na ČOV Modřice mezi lety 2003-2013, následně byl vytažen a uskladněn. Čištěn byl až v roce 2020 pro potřeby měření. „Nový“ aerační element byl výrobcem dodán na ČOV Modřice v roce 2020.



Obrázek 3-3 – Aerační element ENVICON EMS 12"



Obrázek 3-4 – Aerační element ENVICON EMS 12"

### 3.3.2 XYLEM

XYLEM je celosvětový poskytovatel vodohospodářských technologií, který pomáhá řešit nejnáročnější problémy týkající se vody, a to na trzích veřejných služeb, průmyslu, obchodu a bydlení po celém světě.

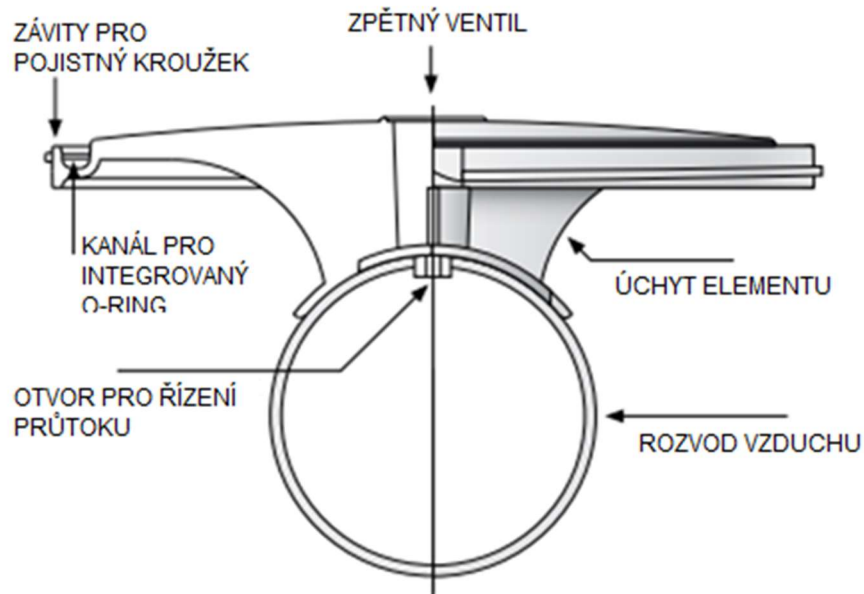
#### SILVER SANITAIRE SERIES II

Obdobně jako aerační element od ENVICONU se jedná o diskový jemnobublinový provzdušňovací element. Průměr disku je 229 mm.

Aerační element (Obr. 3-5, Obr.3-6 a Obr.3-7) lze využít pro průtok vzduchu 0,8-6,8 Nm<sup>3</sup>/hod. Doporučená maximální hloubka ponoření dle výrobce je 6 m [30].

Membrána u aeračního elementu silver sanitaire series II je dle výrobce vyrobena ze speciálně namíchaného vysoce kvalitního EPDM [30]. EPDM je polymer, který se získává ze syntetického kaučuku. Tento materiál se vyznačuje vysokou tepelnou odolností, odolností vůči kyselinám i zásadám a odolností vůči vlivům počasí a ozónu [31].

Pro potřeby měření byly do nádrže umístěny dva aerační elementy. Aerační elementy jsou označeny jako „nový“ a „starý“. „Starý“ aerační element byl využíván v aktivační nádrži na ČOV Modřice mezi lety 2014-2023, následně byl vytažen a vyčištěn. „Nový“ aerační element byl výrobcem dodán na ČOV Modřice v roce 2022.



Obrázek 3-5 – Schéma aeračního elementu XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II [30]



Obrázek 3-6 – Aerační element XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II



Obrázek 3-7 – Aerační element XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES [30]

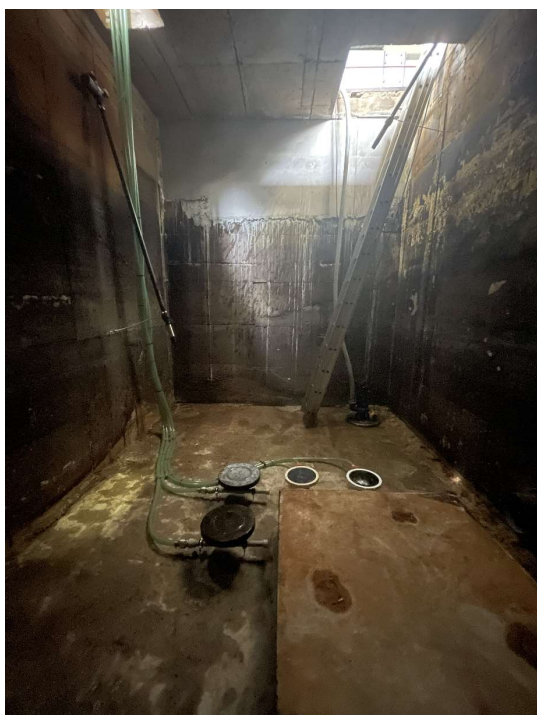
### 3.4 POPIS PROSTŘEDÍ

Kapitola se věnuje bližší specifikaci prostředí, ve kterém měření proběhlo. Zkoušky byly provedeny v budově dmychárny v areálu ČOV Modřice v nevyužité nádrži. Měření in-situ proběhlo za reálných podmínek.

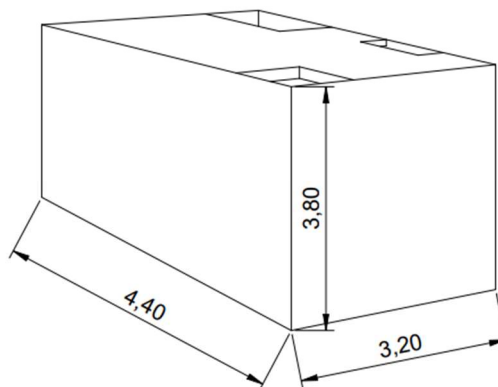
#### 3.4.1 NÁDRŽ

Pro měření byla využita obdélníková nádrž (Obr. 3-9) o půdorysných rozměrech 3,2 m a 4,4 m s hloubkou 3,8 m, která se nachází v budově dmychárny v areálu ČOV Modřice. Dnes již z provozního hlediska nevyužívaná nádrž sloužila původně jako akumulční jímka chladících věží.

Nádrž byla před měřením řádně vyčištěna a sanována. Původní otvory byly zaslepeny. Nádrž (Obr.3-8) je opatřena třemi vstupními otvory. Na dně nádrže přibližně uprostřed se nachází betonový blok, který nemá pro účely měření zvláštní opodstatnění a nijak jej neovlivnilo.



Obrázek 3-8 – Pohled do nádrže



Obrázek 3-9 – Přibližný model nádrže

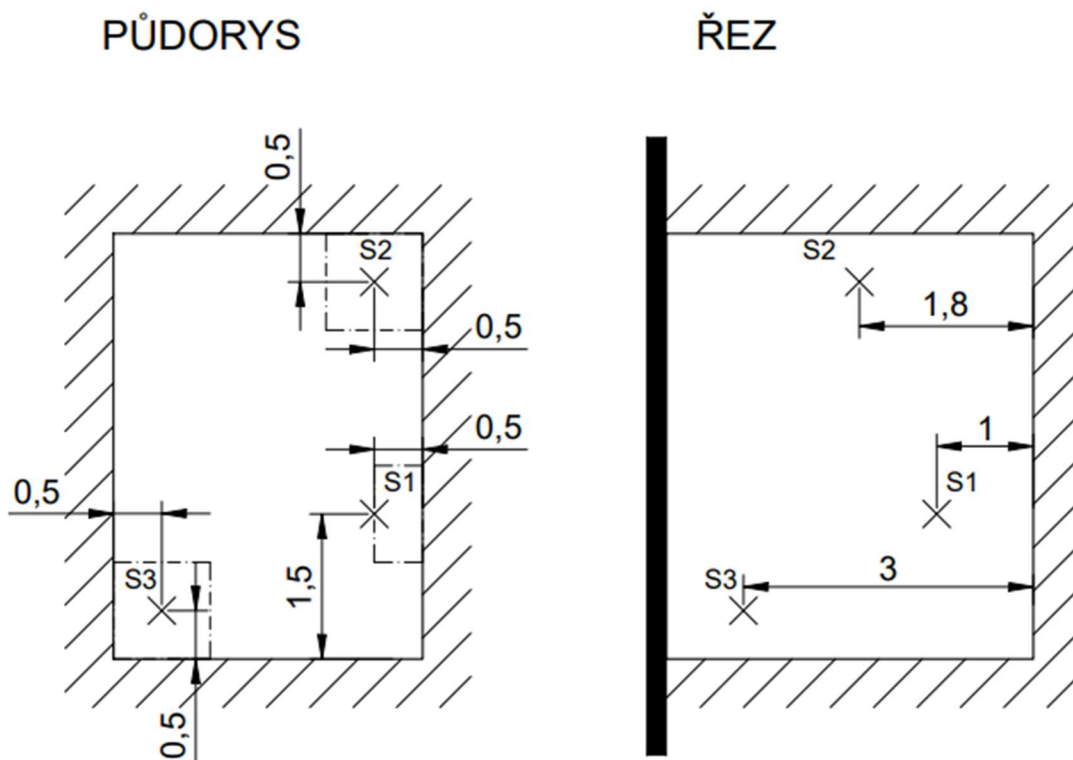
#### 3.4.2 KYSLÍKOVÉ SONDY

Norma pro stanovení oxigenační kapacity požaduje pro výzkumné měření minimálně tři sondy pro měření rozpuštěného kyslíku [25]. V konečném případě

byly pro výzkumné měření použity právě tři kyslíkové sondy. Nebylo možné zajistit větší množství kyslíkových sond pro potřeby měření.

Sondy byly zapojeny do jednotky SC1000 od výrobce HACH LANGE pro zaznamenávání naměřených dat. Při správném nastavení byla zaznamenávána data každých třicet vteřin. Docházelo k průběžnému ukládání dat koncentrace kyslíku obsaženého ve vodě a teploty vody.

Sondy byly osazeny na konkrétních místech v konkrétních hloubkách. Dle normy ČSN EN 12255-15 by sondy měly být umístěny mimo přímo provzdušňovanou plochu, tak aby nedocházelo k hromadění vzduchových bublin nad membránami a minimálně 500 mm od stěny nádrže, hladiny vody a dna nádrže [25]. Hloubka ponoření sond ode dna byla 1 m, 1,8 m a 3 m.



Obrázek 3-10 – Schematické rozmístění sond v nádrži



Obrázek 3-11 – Pohled na umístěnou sondu



Obrázek 3-12 – Detail kyslíkové sondy

### 3.4.3 ČERPADLO

Pro míchání vody v nádrži bylo nainstalováno kalové čerpadlo s plovákem. Čerpadlo zajišťovalo rovnoměrné a rychlejší promíchání nadávkovaných chemikálií v nádrži. Bylo zapotřebí udržet zcela promíchanou nádrž. Při samotném měření bylo čerpadlo mimo provoz, tak aby byly zajištěny stejné podmínky pro všechna měření. Jedná se o čerpadlo od společnosti SIGMA GROUP a.s., typ 50-GFHU 105-70-LN-009, kalové čerpadlo s plovákem. S maximálním výtlačkem  $H_{max} = 10,5 \text{ m}$  a o průtoku  $Q = 11 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Čerpadlo také sloužilo k čerpání vody z nádrže.



Obrázek 3-13 – čerpadlo umístěné v nádrži



Obrázek 3-14 – čerpadlo umístěné v nádrži

#### **3.4.4 ROZMÍSTĚNÍ AERAČNÍCH ELEMENTŮ V NÁDRŽI**

Přibližně doprostřed, na dno nádrže byly umístěny čtyři aerační elementy. Dva diskové jemnobublinné provzdušňovací elementy od výrobce ENVICON a dva diskové jemnobublinné provzdušňovací elementy od výrobce XYLEM. Jeden z dvojice je vždy „nový“, druhý „starý“ (opotřeбенý). Přesné definice použitých aeračních elementů viz kapitoly 3.3.1 a 3.3.2. Skutečné rozmístění aerátorů se nachází na obrázku 3-15.



Obrázek 3-15 – Umístění aeračních elementů v nádrži

### 3.4.5 KVALITA VODY

Aby byly dodrženy požadavky dle ČSN EN 12255-15 Čistírny odpadních vod – Část 15: Měření standardní oxygennační kapacity v aktivační nádrži, byla nádrž vždy napouštěna pitnou vodou. Pitná voda byla čerpána do nádrže z nedaleké vodovodní přípojky.

Podle ČSN EN 12255-15 nesmí být pro výzkumné měření použita voda, která:

- obsahuje organické látky,
- má vyšší koncentraci veškerých rozpuštěných látek větší než 500 mg/l,
- má rozlišnou jakost vody než voda pitná.

Z tohoto důvodu byl vždy po provedeném ukončeném měření odebrán vzorek vody, který byl následně vyhodnocen pro posouzení výsledné koncentrace.

Nemá být používána biologicky vyčištěná odpadní voda, ani voda zbarvená řasami. Pro měření může být použita voda s obsahem takových znečišťujících látek, které neovlivňují přenos kyslíku [25].

### 3.4.6 CHEMIKÁLIE

Norma ČSN EN 12255-15 Čistírny odpadních vod – Část 15: Měření standardní oxigenační kapacity definuje, které chemikálie se používají pro snížení koncentrace kyslíku ve zkušební vodě.

Pro odkysličování se používá siřičitan sodný  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  technicky čistý nebo čistoty pro analýzu. K odstranění 1 kg rozpuštěného kyslíku je třeba 8 kg  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  [25].

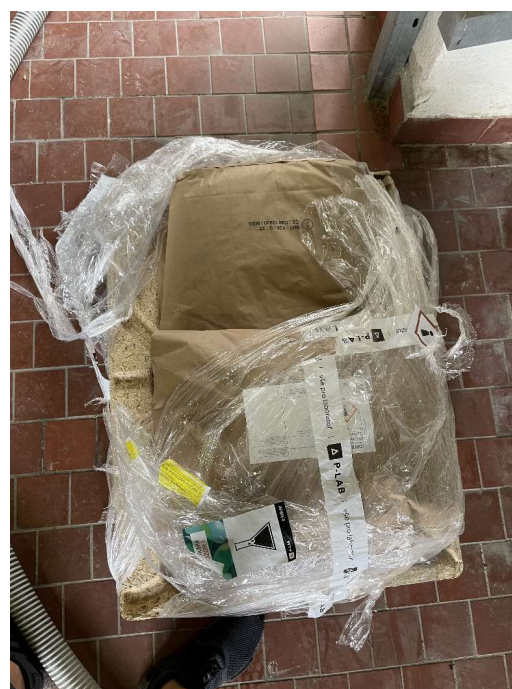
Jako katalyzátor se používá chlorid kobaltnatý  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  nebo siřičitan kobaltnatý  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , technicky čistý nebo čistoty pro analýzu [25].

Pro odstranění kyslíku z vody v nádrži byl využit siřičitan sodný a chlorid kobaltnatý jako katalyzátor. Jejich množství bylo předem vypočítáno. Vždy před začátkem každého měření se do nádrže dávkoval chlorid kobaltnatý a siřičitan sodný v potřebném množství, a to podle obsahu kyslíku ve vodě. Manipulace s chemikáliemi probíhala v souladu s bezpečnostními pokyny.

Navážené množství bylo předem rozmícháno v barelech s pitnou vodou a poté přidáno do již promíchávané nádrže.



Obrázek 3-16 – Siřičitan sodný  $\text{Na}_2\text{SO}_3$



Obrázek 3-17 – Pytlovaný siřičitan sodný  $\text{Na}_2\text{SO}_3$



Obrázek 3-18 – Chlorid kobaltnatý  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



Obrázek 3-19 – Chlorid kobaltnatý  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

### 3.5 POSTUP MĚŘENÍ

Měření proběhlo v budově dmychárny v areálu ČOV Modřice, v reálných rozměrech a v souladu se zmíněnými normami. Celkem bylo ujednáno 5 stejných zkoušek na čtyřech rozdílných diskových aeračních elementech, tedy celkem mělo být provedeno 20 měření.

Při každém pokusu byl kyslík z vody odstraněn, a to za pomoci nadávkování chemikálií – siřičitanu sodného a chloridu kobaltnatého, jež byl využit jako katalyzátor. Katalyzátor slouží k urychlení chemické reakce. Nedílnou součástí bylo míchání vody v nádrži, které probíhalo bezprostředně po nadávkování chemikálií do nádrže a bylo vykonáváno prostřednictvím čerpadla. Rozmíchávání chemikálií trvalo přibližně půl hodiny. Při poklesu rozpuštěného kyslíku na nulovou hodnotu (s určitou odchylkou) bylo vypnuto míchání vody v nádrži.

Následovalo spuštění samotného provzdušňování. Pro daný aerační element byl nastaven odpovídající maximální průtok vzduchu dle výrobce. Měření bylo ukončeno, když koncentrace rozpuštěného kyslíku dosáhla přibližně 5 mg/l.

Měření se několikrát opakovalo. Vždy po 5 měřeních byla voda z nádrže vyčerpána a nádrž byla znovu napuštěna pitnou vodou.

Během měření byly zaznamenávány následující veličiny:

- pokles a nárůst rozpuštěného kyslíku,
- měření průtoku vzduchu,
- tlakové poměry,
- teplota vody.



Obrázek 3-20 – Průběh měření – prostředí



Obrázek 3-21 – Průběh měření – data logger



Obrázek 3-22 – Průběh měření – průtokoměr



Obrázek 3-23 – Průběh měření – míchání chemikálií

### 3.6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vyhodnocení měření bylo zpracováno pro každý aerační element i pro jednotlivé zkoušky na určitém elementu zvlášť. Pro měření rozpuštěného kyslíku byly využity záznamy ze všech tří sond. Bylo naměřeno velké množství dat – jedná se přibližně o 20 tisíc hodnot. Všechna data jsou zpracována a vyhodnocena v MS excel.

#### 3.6.1 PRŮTOK VZDUCHU

Pro měření průtoku vzduchu byl využit průtokoměr od výrobce LA TECHNICA-FLUIDI s označením R/2-R.

Přístroj byl umístěn za plastovou hadicí vedoucí od dmyhadla bezprostředně před přípojkami jednotlivých aeračních elementů. Na tomto přístroji se vždy nastavil potřebný průtok vzduchu odpovídající danému aeračnímu elementu. Data nemohla být zaznamenávána elektronicky.

Tabulka 3-1– Přehled průtoků vzduchu aeračními elementy

Výrobce aeračního elementu	ENVICON	XYLEM
Maximální průtok vzduchu stanovený výrobcem [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]	12	6,8

#### ENVICON

Aerační elementy od výrobce ENVICON během měření vykazovaly nižší tlaky než aerátory od společnosti XYLEM. Průtok vzduchu při měření byl  $12 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

#### ENVICON EMS 12" – „STARÝ“ AERAČNÍ ELEMENT

Na tomto aerátoru bylo celkem provedeno 7 měření. Z toho 2 měření byla zaznamenávána pouze na 2 sondy, kvůli technickým problémům. Průměrná oxygenační kapacita byla stanovena jako  $OC = 8,48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ . Průměrná teplota vody při měření byla  $17,50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Průměrný tlak při měření  $41,8 \text{ kPa}$ .

Tabulka 3-2 – Porovnání měření pro aerační element ENVICON EMS 12“ „STARÝ“

	M 1	M 2	M 3	M 4	M 6	M 22	M 23	PRŮMĚR	
Objemový koeficient přestupu kyslíku <i>K</i>	0,86	0,77	0,86	0,79	0,78	0,82	0,88	0,82	[h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita <i>OC</i>	9,15	7,94	8,77	8,10	7,93	8,45	9,03	8,48	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita <i>OC</i> <sub>20</sub>	9,29	7,92	8,75	8,08	7,92	8,43	9,01	8,49	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Vnos kyslíku do aerované směsi <i>OC</i>	0,46	0,39	0,43	0,40	0,39	0,42	0,44	0,42	[kg·h <sup>-1</sup> ]

### ENVICON EMS 12“ – „NOVÝ“ AERAČNÍ ELEMENT

Na tomto aerátoru bylo celkem provedeno 5 měření. Průměrná oxygenační kapacita byla stanovena jako  $OC = 9,24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Průměrná teploty vody při měření byla 17,15 °C. Průměrný tlak při měření 38,9 kPa.

Tabulka 3-3 - Porovnání měření pro aerační element ENVICON EMS 12“ „NOVÝ“

	M 7	M 8	M 9	M 10	M11	PRŮMĚR	
Objemový koeficient přestupu kyslíku <i>K</i>	0,88	0,85	0,89	0,90	0,95	0,90	[h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita <i>OC</i>	9,11	8,83	9,21	9,30	9,73	9,24	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita <i>OC</i> <sub>20</sub>	9,08	8,81	9,19	9,28	9,72	9,22	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Vnos kyslíku do aerované směsi <i>OC</i>	0,45	0,43	0,45	0,46	0,48	0,45	[kg·h <sup>-1</sup> ]

### XYLEM

Aerátory od výrobce XYLEM mají výrobcem stanovený nižší maximální průtok vzduchu než aerační elementy od výrobce ENVICON, a to  $6,8 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Při měření aerátory vykazovaly vyšší tlaky než aerátory značky ENVICON.

## XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II – „STARÝ“ AERAČNÍ ELEMENT

Pro daný aerační element bylo provedeno 5 měření. Průměrná oxygenační kapacita je  $OC = 5,47 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Průměrná teploty vody při měření byla  $17,18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Průměrný tlak při měření  $49,4 \text{ kPa}$ .

Tabulka 3-4 – Porovnání měření pro aerační element XYLEM SS SII „STARÝ“

	M 17	M 18	M 19	M 20	M 21	PRŮMĚR	
Objemový koeficient přestupu kyslíku $K$	0,52	0,52	0,52	0,53	0,55	0,53	$[\text{h}^{-1}]$
Oxygenační kapacita $OC$	5,42	5,39	5,38	5,49	5,68	5,47	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}]$
Oxygenační kapacita $OC_{20}$	5,40	5,37	5,37	5,47	5,67	5,46	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}]$
Vnos kyslíku do aerované směsi $OC$	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27	$[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$

## XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II – „NOVÝ“ AERAČNÍ ELEMENT

Pro daný aerační element bylo provedeno 5 měření. Průměrná oxygenační kapacita je  $OC = 5,84 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Průměrná teploty vody při měření byla  $16,81 \text{ }^\circ\text{C}$ . Průměrný tlak při měření  $43,5 \text{ kPa}$ .

Tabulka 3-5 – Porovnání měření pro aerační element XYLEM SS SII „NOVÝ“

	M 12	M 13	M 14	M 15	M 16	PRŮMĚR	
Objemový koeficient přestupu kyslíku $K$	0,55	0,56	0,56	0,56	0,59	0,56	$[\text{h}^{-1}]$
Oxygenační kapacita $OC$	5,72	5,79	5,80	5,80	6,09	5,84	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}]$
Oxygenační kapacita $OC_{20}$	5,70	5,77	5,78	5,78	6,07	5,82	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}]$
Vnos kyslíku do aerované směsi $OC$	0,28	0,28	0,28	0,28	0,30	0,29	$[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$

### 3.6.2 VYHODNOCENÍ OXYGENAČNÍ KAPACITY

Vyhodnocení bylo provedeno z naměřených dat. Data byla zpracována a vyhodnotila se oxygenační kapacita  $OC$  a  $OC_{20}$ . Z následující tabulky je patrné porovnání jednotlivých aeračních elementů, které byly v rámci měření testovány.

Tabulka 3-6 –Porovnání vypočítaných hodnot jednotlivých aeračních elementů

Aerační element	ENVICON „NOVÝ“	ENVICON STARÝ	XYLEM NOVÝ	XYLEM STARÝ	
Průtok vzduchu	12	12	6,8	6,8	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Objemový koeficient přestupu kyslíku $K$	0,90	0,82	0,56	0,53	[h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita $OC$	9,24	8,48	5,84	5,47	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Oxygenační kapacita $OC_{20}$	9,22	8,49	5,82	5,46	[g·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]

Oxygenační kapacita  $OC$  pro „nový“ aerátor ENVICON se pohybuje v intervalu 8,83-9,73 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> a oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se pohybuje v intervalu 8,81-9,72 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>. Pro „starý“ aerátor ENVICON se pohybuje v oxygenační kapacita  $OC$  v intervalu 7,94-9,15 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> a oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se pohybuje v intervalu 7,92-9,29 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>. Průměrné hodnoty se nachází v tabulce 3-6, kdy „nový“ ENVICON vykazuje vyšší oxygenační kapacitu než ENVICON „starý“.

Oxygenační kapacita  $OC$  pro „nový“ aerátor XYLEM se pohybuje v intervalu 5,72-6,09 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> a oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se pohybuje v intervalu 5,70-6,07 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>. Pro „starý“ aerátor XYLEM se pohybuje v oxygenační kapacita  $OC$  v intervalu 5,38-5,68 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> a oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se pohybuje v intervalu 5,37-5,67 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>. Průměrné hodnoty se nachází v tabulce 3-6, kdy „nový“ XYLEM vykazuje vyšší oxygenační kapacitu než XYLEM „starý“.

Dle naměřených dat a následných výpočtů se oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se aeračních elementů výrobce ENVICON snížila o 8 %. Oxygenační kapacita  $OC_{20}$  se u aeračních elementů výrobce XYLEM snížila o 6 %.

### 3.6.3 MĚŘENÍ TLAKŮ

V rámci měření  $OC$  byly měřeny vstupní – spínací tlaky pro jednotlivé aerátory. Porovnání tlaků je uvedeno v tabulce 3-7.

Tabulka 3-7 – Porovnání naměřených tlaků při konstantním průtoku vzduchu při měření

Aerační element	ENVICON NOVÝ	ENVICON STARÝ	XYLEM NOVÝ	XYLEM STARÝ	
Průtok vzduchu	12	12	6,8	6,8	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
Naměřený tlak	38,8	42,0	43,5	49,5	[kPa]
Otvírací tlak	3,0	6,1	8,3	14,2	[kPa]

Otvírací tlaky u aeračních elementů výrobce ENVICON jsou značně menší. ENVICON nový má otvírací tlak 3,0 kPa a starý má otvírací tlak 6,1 kPa. Aerátory od výrobce XYLEM mají vyšší otvírací tlaky. Nový aerátor XYLEM má otvírací tlak 8,3 kPa a starý má otvírací tlak 14,2 kPa.

V následující tabulce 3-8 jsou hodnoty naměřených tlaků v prázdné nádrži.

Tabulka 3-8 – Naměřené tlaky v závislosti na průtoku vzduchu v prázdné nádrži

PRÁZDNÁ NÁDRŽ					
ENVICON			XYLEM		
PRŮTOK	NOVÝ	STARÝ	PRŮTOK	NOVÝ	STARÝ
[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]		[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]	
2,0	1,7	5	2,0	5,1	12,2
4,0	2,3	5,5	3,0	6,5	13
5,0	2,8	6	4,0	7,6	14,8
6,0	3	7	5,0	9,1	16,3
10,0	5,1	8	6,0	10,9	18,4
12,0	5,9	9	6,8	12,8	20,5
15,0	7,2	10,5			

Z následující tabulky 3-8 jsou patrné vyšší otvírací tlaky aerátoru XYLEM oproti aerátoru ENVICON, a to i při stejných průtocích vzduchu.

Tabulka 3-9 vyjadřuje rozdíly tlaků pro aerační elementy jednotlivých výrobců při prázdné nádrži (tzn. rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem).

Tabulka 3-9 – Rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem v prázdné nádrži

PRÁZDNÁ NÁDRŽ			
ENVICON		XYLEM	
PRŮTOK	$\Delta p$	PRŮTOK	$\Delta p$
[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]	[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]
2,0	3,3	2,0	7,1
4,0	3,2	3,0	6,5
5,0	3,2	4,0	7,2
6,0	4,0	5,0	7,2
10,0	2,9	6,0	7,5
12,0	3,1	6,8	7,7
15,0	3,3		
<b>PRŮMĚR <math>\Delta p</math></b>	<b>3,3</b>	<b>PRŮMĚR <math>\Delta p</math></b>	<b>7,2</b>

V následující tabulce 3-10 jsou hodnoty naměřených tlaků v nádrži napuštěné vodou.

Tabulka 3-10 – Naměřené tlaky v závislosti na průtoku vzduchu v napuštěné nádrži

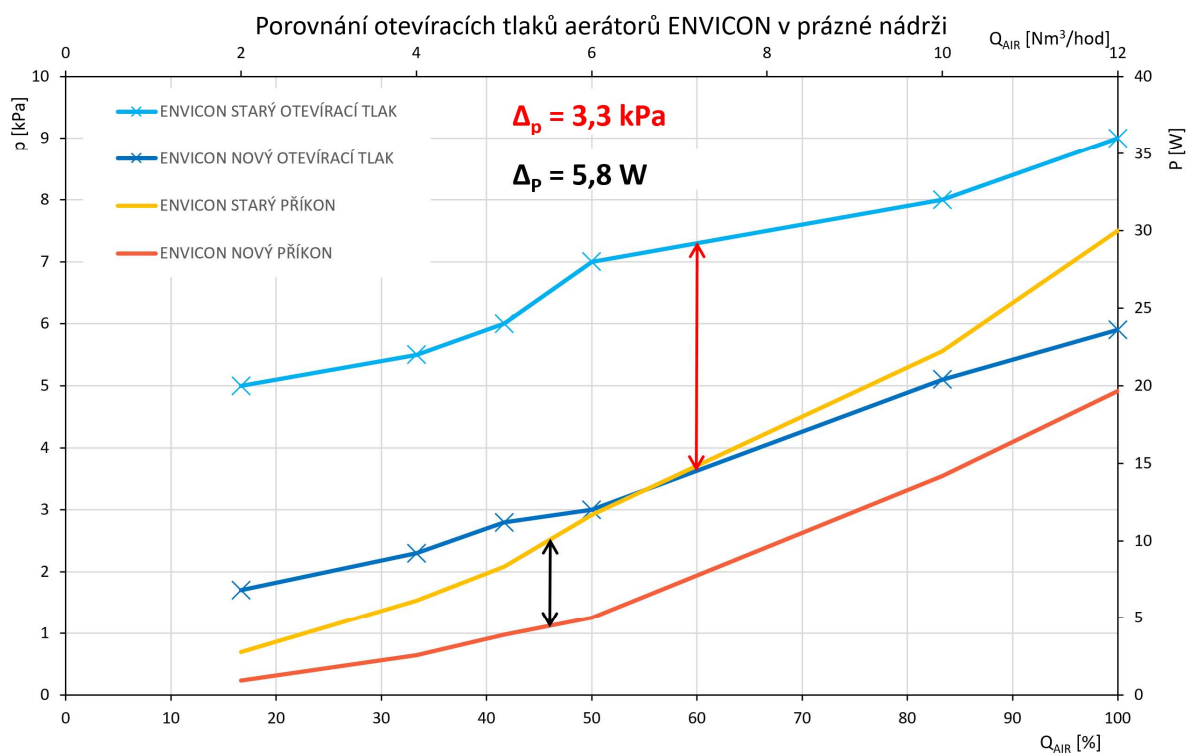
NAPUŠTĚNÁ NÁDRŽ VODOU					
ENVICON			XYLEM		
PRŮTOK	NOVÁ	STARÁ	PRŮTOK	NOVÁ	STARÁ
[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]		[Nm <sup>3</sup> /h]	[kPa]	
2,0	36	36,2	2,0	38,6	41,3
4,0	36,1	37,5	3,0	38,8	43,3
5,0	36,4	37,9	4,0	39,5	45,1
6,0	36,8	38,3	5,0	41,1	47,8
10,0	37,7	39,9	6,0	42,9	49,9
12,0	38,3	41,1	6,8	44	52
15,0	39	42			

Následující tabulka 3-11 vyjadřuje rozdíly tlaků pro aerační elementy jednotlivých výrobců při napuštěné nádrži vodou (tzn. rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem).

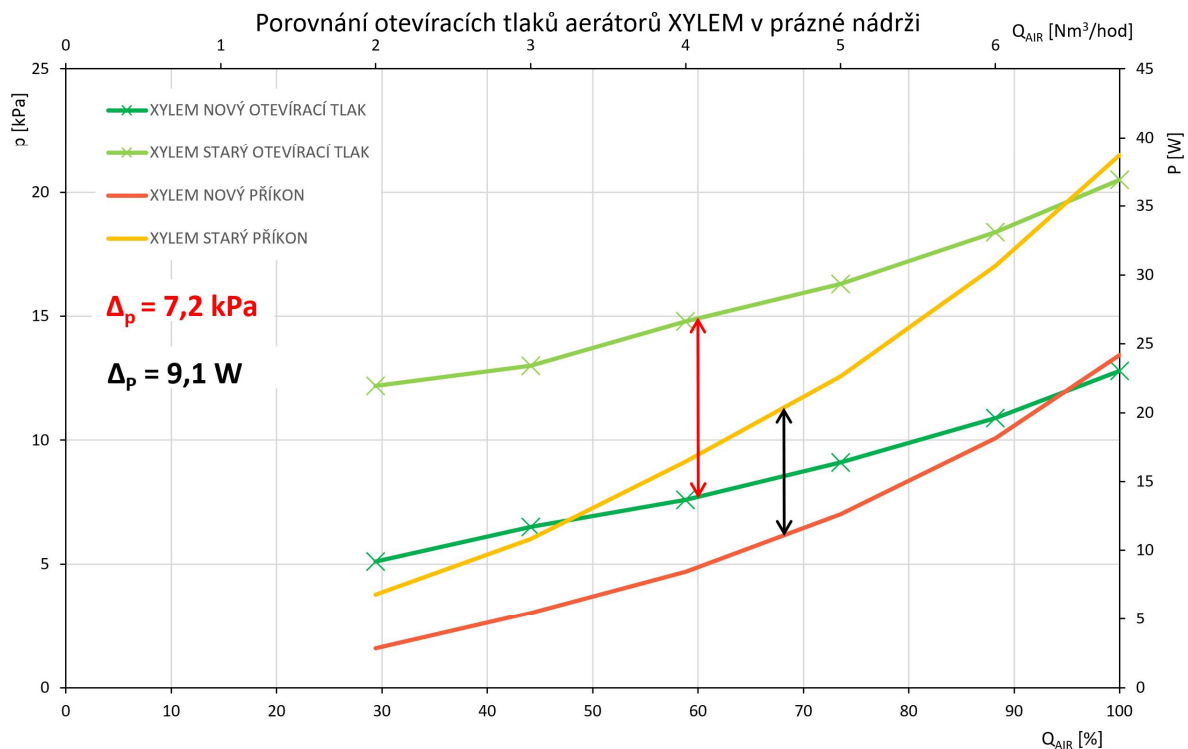
Tabulka 3-11 Rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem v napuštěné nádrži vodou

NAPUŠTĚNÁ NÁDRŽ VODOU			
ENVICON		XYLEM	
PRŮTOK [Nm <sup>3</sup> /h]	$\Delta p$ [kPa]	PRŮTOK [Nm <sup>3</sup> /h]	$\Delta p$ [kPa]
2,0	0,2	2,0	2,7
4,0	1,4	3,0	4,5
5,0	1,5	4,0	5,6
6,0	1,5	5,0	6,7
10,0	2,2	6,0	7,0
12,0	2,8	6,8	8,0
15,0	3,0		
<b>PRŮMĚR <math>\Delta p</math></b>	<b>1,8</b>	<b>PRŮMĚR <math>\Delta p</math></b>	<b>5,8</b>

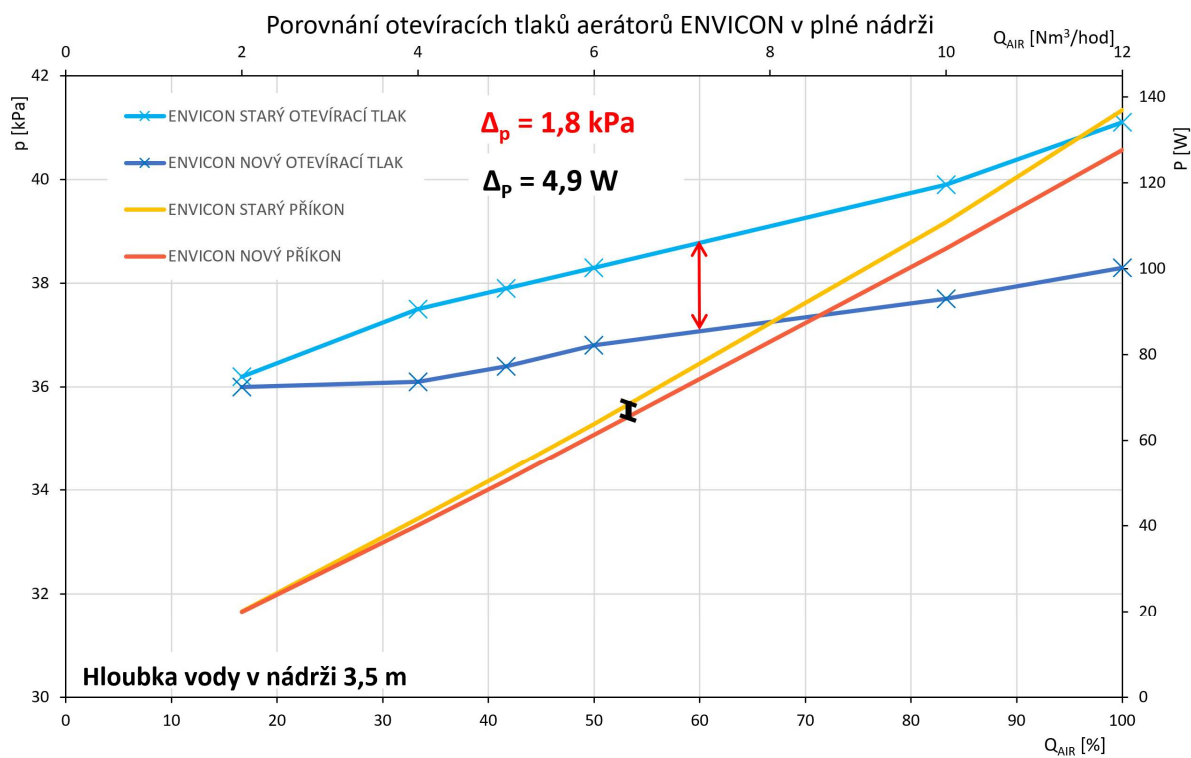
Pro lepší orientaci ve zpracovaných hodnotách slouží přiložené grafy.



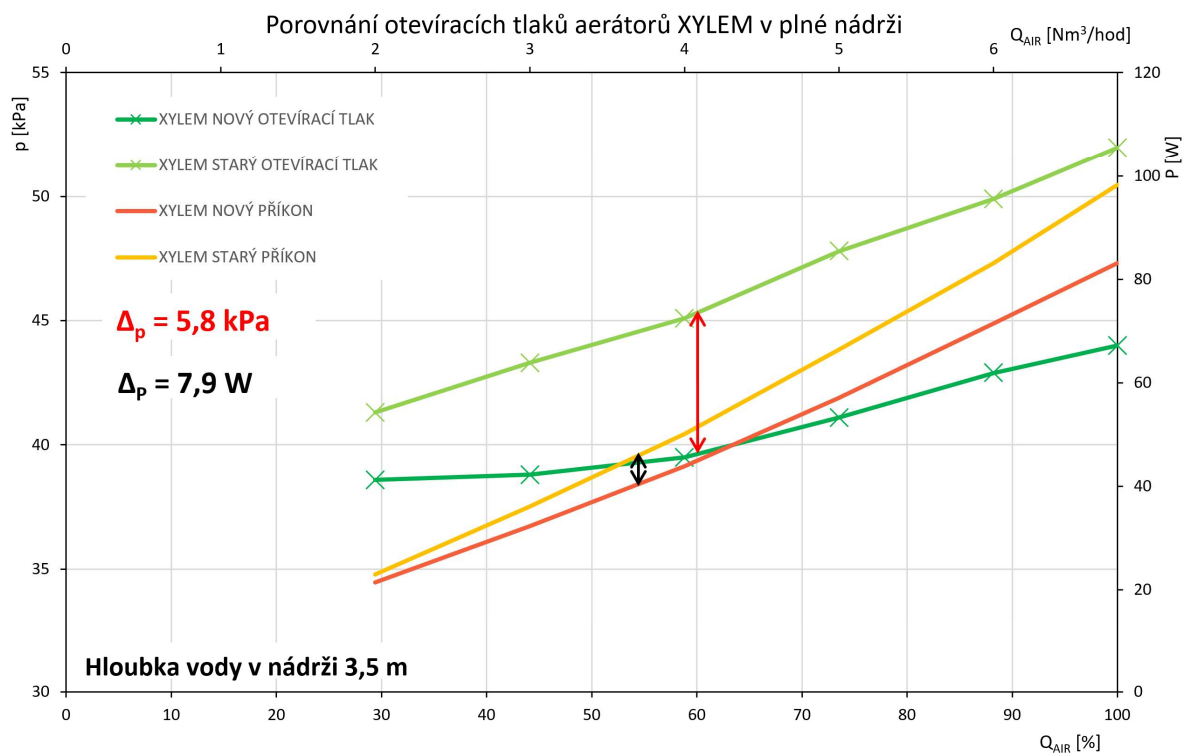
Obrázek 3-24 - Graf - vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy ENVICON v prázdné nádrži



Obrázek 3-25 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy XYLEM v prázdné nádrži



Obrázek 3-26 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy ENVICON v plné nádrži



Obrázek 3-27 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy XYLEM v plné nádrži

Před měřením bylo provedeno čištění starých aeračních elementů výrobce XYLEM. Rozdíly tlaků před a po čištění jsou uvedeny v následující tabulce 3-12.

Tabulka 3-12 – Rozdíly otevíracích tlaků aeračních elementů před a po čištění

XYLEM			
Před čištěním	Po čištění	$\Delta$	
6,5 [Nm <sup>3</sup> /h]	6,5 [Nm <sup>3</sup> /h]	6,5 [Nm <sup>3</sup> /h]	
11,5	10,0	1,5	[kPa]
12,0	10,5	1,5	[kPa]
12,0	10,5	1,5	[kPa]
12,5	10,5	2,0	[kPa]
12,5	11,0	1,5	[kPa]
12,5	11,0	1,5	[kPa]
12,5	11,0	1,5	[kPa]
12,5	11,0	1,5	[kPa]
13,0	11,0	2,0	[kPa]
13,0	11,5	1,5	[kPa]
13,0	11,5	1,5	[kPa]
13,5	12,0	1,5	[kPa]

### 3.6.4 TEORETICKÝ VÝPOČET SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE AERÁTORŮ

Pro energetické porovnání byl proveden teoretický výpočet spotřebované energie v  $W \cdot m^{-3}$ . Teoretický výpočet byl proveden pro oba typy aerátorů (nový, použitý) pro skutečné hodnoty měřených dat. Mezi tyto parametry patří elementární průtok aerátorem a naměřený vstupní tlak. Probíhaly pravidelné kontroly hladiny vody v nádrži.

Mezi vstupní parametry výpočtu patří:

- elementární měřený skutečný průtok vzduchu jednotlivými aerátory ( $Q$ );
- zapínací tlak aeračních zařízení (+ hydrostatický tlak 35 kPa) ( $p$ ).

Na základě vstupních parametrů byl stanoven teoretický příkon jednotlivých aeračních elementů. Příkon byl stanoven za pomoci fluidní mechaniky.

$$P = Q \cdot p \text{ [W]}$$

Tabulka 3-13 – Přehledná tabulka s hodnotami příkonů jednotlivých aerátorů

	ENVICON NOVÝ	ENVICON STARÝ	XYLEM NOVÝ	XYLEM STARÝ	
$P$	128	137	78	90	[W]

Z tabulky 3-13 je patrný rozdíl mezi příkonem u starého a u nového aerátoru obou výrobců. Příkon u starého aerátoru značky ENVICON se opotřebením oproti novému aerátoru značky ENVICON zvýšil o 7 %. Příkon u starého aerátoru značky XYLEM se opotřebením oproti novému aerátoru značky XYLEM zvýšil o 16 %.

Tabulka 3-14 pozorujeme rozdíly v kyslíkovém výtěžku jednotlivých aerátorů v  $kg \cdot kWh^{-1}$  a ve skutečné hustotě energie ve  $W \cdot m^{-3}$ .

Tabulka 3-14 – Srovnání parametrů aeračních elementů závislých na příkonu

Aerační element	ENVICON NOVÝ	ENVICON STARÝ	XYLEM NOVÝ	XYLEM STARÝ	
Kyslíkový výtěžek $E^*$	3,55	3,05	3,68	2,99	[ $kg \cdot kWh^{-1}$ ]
Skutečná hustota energie	2,60	2,78	1,58	1,83	[ $W \cdot m^{-3}$ ]

Při srovnání nového a starého aeračního elementu značky ENVICON dochází k poklesu kyslíkového výtěžku o 14 % a k nárůstu skutečné spotřebované energie na 1  $m^3$  o 7 %. Pokud budeme srovnávat nový a starý aeračního elementu značky XYLEM pozorujeme pokles kyslíkového výtěžku o 19 % a nárůst skutečné spotřebované energie na 1  $m^3$  o 15 %.

### 3.7 SHRNUÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÝCH DAT

Výsledky práce ukázaly, že aerační elementy s ozn. „starý“ měly nižší oxygenační kapacitu a vyšší spotřebu elektrické energie v porovnání s aeračními elementy s ozn. „nový“, což má přímý dopad na celkové provozní náklady ČOV. Kromě rozdílů oxygenační kapacity, výsledky dokazují nárůst otevíracích tlaků na jednotlivých membránách aeračních elementů. Práce tak přináší důležité informace pro provozovatele, kteří se snaží optimalizovat provoz a snižovat náklady na energie. Otázkou zůstává, do jaké míry se vyplatí zachování stávajícího systému s ohledem na zvýšení provozních nákladů vůči pořizovacím nákladům nového systému.

Doporučení pro další výzkum zahrnují provádění podobných monitoringů s širším spektrem aeračních technologií a dlouhodobější monitoring výkonnosti aeračních systémů s ohledem na jejich stárnutí a technologický vývoj. Tímto způsobem by bylo možné lépe pochopit dynamiku stárnutí a opotřebení aeračních elementů a jejich vliv na ekonomiku a ekologii čistírenských procesů.

Zprostředkované měření je nestandardní, protože proběhlo v reálných podmínkách. Většina podobných měření probíhá v laboratorních podmínkách.

Měření proběhlo na základě zadání provozovatele. Provozovatel si sám rozhodne o případných dalších krocích na základě uvedených dat.

## 4 ZÁVĚR

Bakalářská práce s názvem *Testování aeračních elementů* se zaměřuje na hodnocení výkonu a efektivity různých typů aeračních systémů, které se používají na čistírnách odpadních vod. Práce kombinuje teoretickou rešerši a praktické měření, což umožňuje komplexní pohled na problematiku aerace ve vztahu k udržitelnému hospodaření s energií na ČOV.

Teoretická část práce poskytuje důkladný přehled dostupných technologií a jejich rozdělení. Zvláštní důraz byl kladen na jemnobublinnou aeraci v aktivačních nádržích, která je zatím v dnešní době považována za nejefektivnější způsob aerace z hlediska energetické účinnosti a kvality přenosu kyslíku. Detailně byly zpracovány: typy aeračních elementů, jejich materiály, údaje o výrobcích a typické aplikace. Dále teoretická část zpracovává teoretický postup výpočtu oxygenační kapacity.

Praktická část se soustředí na experimentální testování a srovnání vybraných aeračních elementů, což umožnilo získat data o jejich výkonnosti a změnách parametrů v čase. Měření bylo provedeno ve spolupráci s BVK, a.s., kde byly podrobeny zkoušce čtyři aerační elementy od dvou různých výrobců. Byly zjištěny významné rozdíly mezi novými a starými aerátory ve výkonu a účinnosti, což poukazuje na význam pravidelné údržby a obměny aeračních systémů pro zachování optimální funkčnosti ČOV.

Výsledky práce byly předány a odprezentovány vedení a provozovateli ČOV Brno Modřice.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2020/852 ze dne 18. června 2020 o zřízení rámce pro usnadnění udržitelných investic a o změně nařízení (EU) 2019/2088 (Text s významem pro EHP). In: . 2020.
- [2] MIVALT. online. In: Mivalt.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.mivalt.cz/terminologie/aerace>. [cit. 2024-02-26].
- [3] *What is Aeration for Wastewater Treatment?*. online. In: TUSER, Cristina. WASTEWATER DIGEST. 2022. Dostupné z: <https://www.wwdmag.com/what-is-articles/article/10939130/what-is-aeration-for-wastewater-treatment>. [cit. 2024-03-05].
- [4] *Aeration*. online. In: RURAL WATER association. 2024. Dostupné z: <https://www.mrwa.com/WaterWorksMnl/Chapter%2011%20Aeration.pdf>. [cit. 2024-03-05].
- [5] Aeration system. online. In: METAWATER. 2024. Dostupné z: [https://www.metawater.co.jp/eng/assets/renew/images/solution/product/sewer/aerote/img\\_aerote\\_04.jpg](https://www.metawater.co.jp/eng/assets/renew/images/solution/product/sewer/aerote/img_aerote_04.jpg). [cit. 2024-04-01].
- [6] HLAVÍNEK, Petr; MIČÍN, Jan a PRAX, Petr. *Příručka stokování a čištění*. Vydání první. Brno: NOEL 2000, s.r.o., 2001. ISBN 80-86020-30-4.
- [7] NAVISA, J.; SRAVYA, T.; SWETHA, M. a VENKATESAN, M. Effect of Bubble Size on Aeration Process. online. *Asian Journal of Scientific Research*. 2014, roč. 74, č. 482-487, s. 6. Dostupné z: <https://doi.org/10.3923/ajsr.2014.482.487>. [cit. 2024-03-13].
- [8] *Bubble Diffuser Differences*. online. In: MOOERS PRODUCTS. c2010-2020. Dostupné z: <https://www.mooersproductsinc.com/bubble-diffuser-aeration-differences/>. [cit. 2024-03-18].
- [9] *FINE BUBBLE DIFFUSERS*. online. In: Smart ideas for water. 2024. Dostupné z: <https://www.ssaeration.com/diffusers/fine-bubble-diffusers/>. [cit. 2024-03-05].

- [10] *Diffused Aeration – Fine and Coarse Bubble Systems*. online. In: Aquarius technologies. 2024. Dostupné z: <https://www.aquariustechnologies.com/solutions/fine-coarse-bubble-aeration-systems/>. [cit. 2024-03-05].
- [11] *AERAČNÍ SYSTÉMY*. online. In: ENVI PUR. 2024. Dostupné z: <https://www.envi-pur.cz/cisticky-odpadnich-vod-aeracni-systemy/>. [cit. 2024-03-18].
- [12] *COARSE BUBBLE DIFFUSERS*. online. In: Smart ideas for water. 2024. Dostupné z: <https://www.ssaeration.com/coarse-bubble-diffusers/>. [cit. 2024-03-05].
- [13] *Mechanical aeration*. online. In: Water programs. Dostupné z: <https://www.owp.csus.edu/glossary/mechanical-aeration.php>. [cit. 2024-03-05].
- [14] *Mechanical Aerator*. online. In: The Water Treatments. 2008-2022. Dostupné z: <https://www.thewatertreatments.com/wastewater-sewage-treatment/mechanical-aerator-waste-water-treatment/>. [cit. 2024-03-05].
- [15] *Horizontal Shaft Aerator*. online. In: VORTEX engineering. c2020-2024. Dostupné z: <https://vortex-eng.com/wastewater-treatment-equipment/biological-treatment-equipment/horizontal-shaft-aerator/>. [cit. 2024-03-18].
- [16] *JET AERATION SYSTEMS EXPLAINED*. online. In: MIXING SYSTEMS, INC. 2022. Dostupné z: <https://www.mixing.com/jet-aeration/312-jet-aeration-systems-explained>. [cit. 2024-03-18].
- [17] Combined aeration and mixing system and its use in practice. online. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, roč. 444, č. 012049, s. 6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/444/1/012049>. [cit. 2024-03-05].
- [18] *FUCHS AERATOR*. online. In: FUCHS. 2024. Dostupné z: <https://www.fuchswater.com/en/products/>. [cit. 2024-03-18].

- [19] *Technologie pro aeraci a míchání vody*. online. In: ZEMSKÝ. 2022. Dostupné z: <https://www.zemsky.cz/data/uploadHTML/files/aia-katalog.pdf>. [cit. 2024-03-18].
- [20] *Triton 2.0 Series Process Aerator and Mixer*. online. In: NEWTERRA. 2024. Dostupné z: <https://www.newterra.com/technology/triton-2-0-series-process-aerator-mixer/>. [cit. 2024-03-18].
- [21] GU, Yong; LI, Yu; YUAN, Fang a YANG, Qiang. Optimization and control strategies of aeration in WWTPs: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2023, roč. 418, č. 138090, s. 21.
- [22] *Aerační systém*. online. In: FORTEX. 2024. Dostupné z: <https://www.fortex.cz/cistirny-odpadnich-vod/sluzby-produkty-cistirny/aeracni-system>. [cit. 2024-03-25].
- [23] *Fine Bubble EPDM Plate Aerator for Industrial/Domestic Wastewater Treatment*. online. In: Made-in-China. c1998-2024. Dostupné z: <https://jingzhiquan.en.made-in-china.com/product/MOqfegFErhVi/China-Fine-Bubble-EPDM-Plate-Aerator-for-Industrial-Domestic-Wastewater-Treatment.html>. [cit. 2024-03-25].
- [24] *ENVICON tube diffusers (plug aerators) EMR*. online. In: ENVICON. 2023. Dostupné z: <https://www.envicon.net/en/products.html>. [cit. 2024-05-01].
- [25] ČSN EN 12 255-15. *Čistírny odpadních vod - Část 15: Měření standartní oxigenační kapacity v aktivační nádrži*. 12/2004.
- [26] MALÝ, Josef a MALÁ, Jitka. *Chemie a technologie vody*. 2., dopl. vyd. Brno: ARDEC, 2006. ISBN 8086020509.
- [27] TNV 75 6613. *Navrhování aeračních systémů čistíren odpadních vod: Pneumatická aerace*. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [28] TNV 75 6614. *Navrhování aeračních systémů čistíren odpadních vod: Mechanická aerace*. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [29] *ENVICON disc diffusers EMS 12" (330 mm): smart aeration*. pdf. 09/2019. 2019.

- [30] *Sanitaire® Silver Series II Diffusers: THE FINEST FINE BUBBLE DIFFUSER FOR BIOLOGICAL TREATMENT.* .pdf. 1. 2022.
- [31] *EPDM: materiál do vysokých teplot, odolný kyselinám i povětrnostním vlivům.* online. In: GUMEX. c1995-2024. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/blog/epdm-material-do-vysokych-teplot-odolny-kyselinam-i-povetrnostnim-vlivum-90>. [cit. 2024-05-01].
- [32] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky.* In: . 2000.
- [33] *Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod.* In: . 1991.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

ČOV	...	čistírna odpadních vod
BSK <sub>5</sub>	...	biologická spotřeba kyslíku
BVK	...	Brněnské vodárny a kanalizace
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
JMBA	...	jemnobublinná aerace
STBA	...	středobublinná aerace
HRBA	...	hrubobublinná aerace
kap.	...	kapitola
Obr.	...	obrázek
Sb.	...	Sbírka zákonů
$Q$	...	<i>průtok</i>
OC	...	oxygenační kapacita

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1 – Schéma složení aeračního systému [4]</i> .....	6
<i>Obrázek 2-2 – Schematické rozdělení pneumatické aerace [7]</i> .....	7
<i>Obrázek 2-3– Ilustrativní obrázek jemnobublinného aeračního systému [9]</i> .....	8
<i>Obrázek 2-4 – Jemnobublinný diskový aerátor [10]</i> .....	9
<i>Obrázek 2-5 – Jemnobublinný trubicový aerátor [10]</i> .....	9
<i>Obrázek 2-6 – Ilustrativní obrázek hrubobublinného aeračního systému [9]</i> .....	10
<i>Obrázek 2-7 – Hrubobublinný diskový aerátor [10]</i> .....	10
<i>Obrázek 2-8 – Hrubobublinný trubicový aerátor [10]</i> .....	10
<i>Obrázek 2-9 – Aerátor s vertikální osou [13]</i> .....	11
<i>Obrázek 2-10 – Schéma povrchového provzdušňovače s horizontální osou (Kessener) [14]</i> .....	12
<i>Obrázek 2-11 – Aplikace povrchového provzdušňovače s horizontální osou (Kessener) [14]</i> .....	13
<i>Obrázek 2-12 – Mechanismus hydropneumatické aerace [15]</i> .....	14
<i>Obrázek 2-13 – Kombinované systémy FUCHS [17]</i> .....	15
<i>Obrázek 2-14 – Kombinované systémy FUCHS [17]</i> .....	15
<i>Obrázek 2-15 – Kombinované systémy TRITON [18]</i> .....	15
<i>Obrázek 2-16 – Kombinované systémy TRITON [19]</i> .....	15
<i>Obrázek 2-17 – Aerační elementy podle tvaru [20]</i> .....	16
<i>Obrázek 2-18 – Deskový aerátor [21]</i> .....	17
<i>Obrázek 2-19 – Aerační systém s deskovými aerátory [22]</i> .....	17
<i>Obrázek 2-20 – Trubicový aerátor [1]</i> .....	17
<i>Obrázek 2-21 – Aerační systém využívající trubkové aerátory [23]</i> .....	17
<i>Obrázek 3-1 – Schéma aeračního elementu ENVICON EMS 12" [29]</i> .....	29
<i>Obrázek 3-2 – Aerační element ENVICON EMS 12" [29]</i> .....	29
<i>Obrázek 3-3 – Aerační element ENVICON EMS 12" .....</i>	30
<i>Obrázek 3-4 – Aerační element ENVICON EMS 12" .....</i>	30
<i>Obrázek 3-5 – Schéma aeračního elementu XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II [30]</i> .....	31
<i>Obrázek 3-6 – Aerační element XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES II .....</i>	31
<i>Obrázek 3-7 – Aerační element XYLEM SILVER SANITAIRE SERIES [30]</i> .....	31

Obrázek 3-8 – Pohled do nádrže .....	32
Obrázek 3-9 – Přibližný model nádrže .....	32
Obrázek 3-10 – Schematické rozmístění sond v nádrži .....	33
Obrázek 3-11 – Pohled na umístěnou sondu .....	34
Obrázek 3-12 – Detail kyslíkové sondy .....	34
Obrázek 3-13 – čerpadlo umístěné v nádrži .....	35
Obrázek 3-14 – čerpadlo umístěné v nádrži .....	35
Obrázek 3-15 – Umístění aeračních elementů v nádrži.....	36
Obrázek 3-16 – Siřičitan sodný $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .....	37
Obrázek 3-17 – Pytlovaný siřičitan sodný $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .....	37
Obrázek 3-18 – Chlorid kobaltnatý $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .....	38
Obrázek 3-19 – Chlorid kobaltnatý $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .....	38
Obrázek 3-20 – Průběh měření – prostředí.....	39
Obrázek 3-21 – Průběh měření – data logger .....	39
Obrázek 3-22 – Průběh měření – průtokoměr .....	39
Obrázek 3-23 – Průběh měření – míchání chemikálií.....	39
Obrázek 3-24 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy ENVICON v prázdné nádrži .....	46
Obrázek 3-25 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy XYLEM v prázdné nádrži .....	47
Obrázek 3-26 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy ENVICON v plné nádrži.....	47
Obrázek 3-27 – Graf – vyjadřující vývoj otevíracích tlaků pro aerační elementy XYLEM v plné nádrži.....	48

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1 – Dělení aeračních systémů .....	6
Tabulka 2-2: Přehled výrobců a prodejců aeračních systémů.....	18
Tabulka 2-3 – Hodnoty korekčního faktoru [27].....	23
Tabulka 2-4 – Rozpustnost kyslíku ve vodě [27] .....	25
Tabulka 3-1– Přehled průtoků vzduchu aeračními elementy.....	40
Tabulka 3-2 – Porovnání měření pro aerační element ENVICON EMS 12“ „STARÝ“.....	41
Tabulka 3-3 - Porovnání měření pro aerační element ENVICON EMS 12“ „NOVÝ“ .....	41
Tabulka 3-4 – Porovnání měření pro aerační element XYLEM SS SII „STARÝ“ .....	42
Tabulka 3-5 – Porovnání měření pro aerační element XYLEM SS SII „NOVÝ“ .....	42
Tabulka 3-6 –Porovnání vypočítaných hodnot jednotlivých aeračních elementů .....	43
Tabulka 3-7 – Porovnání naměřených tlaků při konstantním průtoku vzduchu při měření .....	44
Tabulka 3-8 – Naměřené tlaky v závislosti na průtoku vzduchu v prázdné nádrži.....	44
Tabulka 3-9 – Rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem v prázdné nádrži .....	45
Tabulka 3-10 – Naměřené tlaky v závislosti na průtoku vzduchu v napuštěné nádrži .....	45
Tabulka 3-11 Rozdíly tlaků mezi novým a starým aeračním elementem v napuštěné nádrži vodou .....	46
Tabulka 3-12 – Rozdíly otevíracích tlaků aeračních elementů před a po čištění.....	48
Tabulka 3-13 – Přehledná tabulka s hodnotami příkonů jednotlivých aerátorů .....	49
Tabulka 3-14 – Srovnání parametrů aeračních elementů závislých na příkonu .....	49