



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

KLASIFIKACE KONCENTRÁTU Z MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

CLASSIFICATION OF CONCENTRATE FROM MEMBRANE PROCESSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Vespalec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Martina Repková, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1873/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Student: **Bc. Jan Vespalec**
Studijní program: Environmentální chemie a technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Mgr. Martina Repková, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Klasifikace koncentrátu z membránových procesů

Zadání diplomové práce:

- 1) Vypracování literární rešerše na téma koncentrát z membránových procesů a jeho klasifikace podle aktuální legislativy. V literární rešerši bude popsána recyklační technologie založená na membránových procesech a limity pro klasifikaci koncentrátu jako odpadu.
- 2) Budou vybrána odběrová místa, která jsou vybavena pilotní jednotkou na recyklaci vody pomocí membránových procesů. Následně bude prováděno pravidelné vzorkování.
- 3) Statistické zpracování a analýza získaných dat
- 4) Interpretace, diskuse a shrnutí dosažených výsledků

Termín odevzdání diplomové práce: 8.5.2023:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Jan Vespalec
student

Mgr. Martina Repková, Ph.D.
vedoucí práce

vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá klasifikací koncentráту z membránových procesů, konkrétně koncentráту z reverzní osmózy. Membránová technologie byla použita ve dvou lokalitách, a to v lokalitě čistírny odpadních vod a dále v lokalitě průmyslové prádelny. Při opětovném získávání vody pomocí membránových procesů je nutné se zamyslet nad následným nakládáním s koncentrátem. Koncentrát může být zakoncentrovaný do takové míry, kdy již nesplňuje zákonem definované limity. Cílem této práce je zjistit, zda lze vypouštět koncentrát z reverzní osmózy do recipientu/kanalizace a zda se nejedná o nebezpečný odpad. Z výsledků této práce vyplývá, že sledované ukazatele vyskytující se v koncentrátu z reverzní osmózy jsou nad limitem pro vypouštění do recipientu/kanalizace, ale jsou pod limitem klasifikace coby nebezpečný odpad.

ABSTRACT

The Master's Thesis deals with the classification of concentrate from membrane processes, specifically reverse osmosis concentrate. Membrane technology was used in two locations, namely a wastewater treatment plant location and an industrial laundry location. The reuse of water by using membrane processes requires consideration of the management of the concentrate further on. The concentrate may be concentrated to the point where it is not meeting the legally defined limits. The goal of this work is to determine whether reverse osmosis concentrate can be discharged to the surface water/sewage system and whether it is a hazardous waste or not. The conclusion of this work is that the monitored parameters occurring in the reverse osmosis concentrate are over the limits to be discharged to a surface water/sewage system but are below the limit for classification as hazardous waste.

KLÍČOVÁ SLOVA

koncentrát, tlakové membránové procesy, reverzní osmóza, kanalizační řád, nebezpečný odpad, čištění odpadních vod, odpadní voda, prádelenská voda

KEYWORDS

concentrate, pressure membrane processes, reverse osmosis, sewage regulations, hazardous waste, wastewater treatment, wastewater, laundry water

VESPALEC, Jan. Klasifikace koncentráту z membránových procesů. Brno, 2023. 85 s. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/147908>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí . Vedoucí práce Martina Repková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde upřímně poděkoval vedoucí této diplomové práce Mgr. Martině Repkové, Ph.D., za trpělivost, vstřícný přístup, odborné vedení, spoustu cenných rad a připomínek v průběhu řešení celé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Marku Minichovi za jeho objektivní rady a připomínky. Rovněž bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Lvovi, Ph.D., Ing. Lucii Báborské a Ing. Alexandře Kukučkové z firmy ASIO TECH, spol. s r.o. i celé firmě za technickou podporu a spolupráci. Také děkuji doc. Mgr. Michaele Vašinové Galiové, Ph.D., která mi společně se svým týmem pomáhala při optimalizaci prvkové analýzy.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	9
2.1	LEGISLATIVA	9
2.1.1	Cirkulární ekonomika	9
2.1.2	Klasifikace odpadu a odpadní vody	9
2.1.2.1	Klasifikace odpadu podle zákona o odpadech	10
2.1.2.2	Klasifikace odpadní vody podle vodního zákona	11
2.2	MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S PRŮMYSLOVOU ODPADNÍ VODOU	12
2.2.1	Vypouštění NZL do kanalizace	12
2.2.2	Decentralizované čištění odpadních vod	13
2.2.2.1	Flotace	13
2.2.2.2	Koagulace a flokulace	13
2.2.2.3	Adsorpce na aktivním uhlí	13
2.2.2.4	Membránové separační procesy	14
2.2.2.5	Technologie zero liquid discharge	14
2.2.3	Zpracování externí firmou	14
2.3	MEMBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY	15
2.3.1	Základní vlastnosti membrán	15
2.3.2	Dělení membrán	17
2.3.2.1	Dle hnací síly	18
2.3.2.2	Dle původu	18
2.3.2.3	Dle skupenství	18
2.3.2.4	Dle materiálu	18
2.3.2.5	Dle struktury	21
2.3.2.6	Dle morfologie	21
2.3.2.7	Dle mechanismu účinku separace	21
2.3.3	Membránové moduly	22
2.3.3.1	Deskové moduly	22
2.3.3.2	Spirálně vinuté moduly	22
2.3.3.3	Trubkové moduly	23
2.3.3.4	Kapilární moduly	24
2.3.3.5	Moduly s dutými vlákny	24
2.4	TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY	25
2.4.1	Rozdělení tlakových membrán	25
2.4.2	Mikrofiltrace	25
2.4.3	Ultrafiltrace	26
2.4.4	Nanofiltrace	26
2.4.5	Reverzní osmóza	26

2.5	APLIKOVATELNOST TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ	27
2.5.1	Opětovné využívání odpadních průdelenských vod	27
2.5.2	Výroba pitné vody z vody odpadní	30
2.6	KONCENTRÁT Z REVERZNÍ OSMÓZY	30
2.6.1	Specifikace koncentráту z průdelenských vod	30
2.6.2	Specifikace koncentráту z upravené komunální odpadní vody	31
3	CÍLE PRÁCE	33
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
4.1	Použité chemikálie, přístroje, software a pomůcky	34
4.2	Poloprovozní membránová jednotka	36
4.2.1	Odběrová lokace: Čistírna odpadních vod	36
4.2.2	Odběrová lokace: Průmyslová prádelna	37
4.3	Vzorkování	39
4.3.1	Plán vzorkování odběrové lokace: Čistírna odpadních vod	40
4.3.2	Plán vzorkování odběrové lokace: Průmyslová prádelna	40
4.4	Sledované ukazatele	41
4.4.1	Stanovení základních fyzikálně-chemických parametrů	41
4.4.2	Stanovení chemické a biologické spotřeby kyslíku	41
4.4.3	Stanovení nerozpuštěných látek	41
4.4.4	Stanovení rozpuštěných látek	42
4.4.5	Stanovení rozpuštěných anorganických solí	42
4.4.6	Stanovení dusitanů, dusičnanů a amonných kationtů	42
4.4.7	Prvková analýza	42
4.5	Statistické vyhodnocení dat	43
5	Výsledky a diskuse	44
5.1	Lokalita čistírny odpadních vod	44
5.1.1	Základní fyzikálně-chemické ukazatele	44
5.1.2	Chemická a biologická spotřeba kyslíku	45
5.1.3	Nerozpuštěné a rozpuštěné látky	46
5.1.4	Makronutrienty	48
5.1.5	Analyzované kovy	50
5.2	Lokalita průmyslové prádelny	54
5.2.1	Základní fyzikálně-chemické ukazatele	55
5.2.2	Chemická a biologická spotřeba kyslíku	55
5.2.3	Nerozpuštěné a rozpuštěné látky	57
5.2.4	Makronutrienty	59
5.2.5	Analyzované kovy	60
6	ZÁVĚR	67

7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	76
9	PŘÍLOHY	78
9.1	Příloha A – Zvlášť nebezpečné závadné a nebezpečné závadné látky	78
9.2	Příloha B – Základní kanalizační řád	79
9.3	Příloha C – Seznam sledovaných ukazatelů	80
9.4	Příloha D – Kalibrační řada prvkové analýzy	81
9.5	Příloha E – Nastavení přístroje ICP-MS	82
9.6	Příloha F – Detekční limity ICP-MS	83
9.7	Příloha G – Fotodokumentace pilotní poloprovodní jednotky	84

1 ÚVOD

Nacházíme se v konzumním světě, ve kterém mezi základy funkční ekonomiky řadíme průmyslové podniky. Většina průmyslových podniků potřebuje ke svému provozu vodu, a to jako tepelně výměnné médium, prací vodu a další. Tyto podniky musí následně nakládat s průmyslovými odpadními vodami. Tuto průmyslovou odpadní vodu mohou podniky vypouštět do kanalizace, pokud splňuje kanalizační řád navržený podle platných zákonů nebo mohou odpadní vodu přecistit a opětovně využívat. V případě průmyslových podniků je před vypouštěním do kanalizace většinou nutné vodu předčistit přímo v průmyslovém podniku na kvalitu vody, která splňuje limity pro vypouštění do kanalizace. Kanalizací se dostává odpadní voda do čistírny odpadních vod (ČOV), kde dochází k vypouštění přečištěné odpadní vody do recipientu. Vypouštěná odpadní voda musí splňovat parametry uvedené v nařízení vlády č. 401/2015 Sb. o kvalitě, kterou nařizuje platná legislativa. Tato přečištěná voda však nesplňuje limity dle platné legislativy pro klasifikaci jako pitná či užitková voda a pro případné budoucí využití této vody jakožto vody pitné je nutné ji dočistit.

„Svět směřuje k cirkulární ekonomice, a to i ve snaze spojení s vodou“ [1, 2]. Díky modelu cirkulární ekonomiky dochází k úspoře na spotřebě tepelné energie, ale i objemu spotřebované vody. Při produkci odpadních vod nejsme prozatím schopni stoprocentně opětovně využívat průmyslovou odpadní vodu. Pro opětovné využívání vody lze použít mnohé procesy úpravy vody, přičemž v této diplomové práci je věnována pozornost membránovým procesům.

Při opětovném využívání průmyslové odpadní vody pomocí membránových procesů dostáváme vyčištěný permeát a velmi zahuštěný koncentrát. Otázkou tedy je, zda koncentrát z membránových procesů bude splňovat kanalizační řád a zda může být klasifikován jako nebezpečný odpad. Ze zpracované literární rešerše v teoretické části dostáváme tři hypotézy, a to: H1 „Koncentrát z membránových procesů splňuje kvalitu pro vypouštění do recipientu“, H2 „Koncentrát z membránových procesů splňuje kanalizační řád“ a H3 „Koncentrát z membránových procesů není nebezpečný odpad“.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 LEGISLATIVA

2.1.1 Cirkulární ekonomika

Cirkulární ekonomika, rovněž nazývaná oběhové hospodářství, se zaměřuje na udržení hodnoty výrobků, materiálů a zdrojů v ekonomickém cyklu co nejdéle. Hlavní myšlenkou je minimalizace množství odpadu tím, že se výrobky vracejí zpět do výrobního cyklu po skončení jejich životnosti. V prosinci 2021 vláda schválila **Strategický rámec cirkulární ekonomiky České republiky 2040**, což je první komplexní strategie pro cirkulární ekonomiku v naší zemi. Tento dokument slouží k podpoře rozvoje cirkulární ekonomiky v ČR tím, že představuje souhrn znalostí a udává různé zásady a opatření k zavedení oběhového hospodářství [1].

Dokument je složen z mnoha oblastí, z nichž jednou je oblast vody. Voda je v současné době chápána jako služba s lineárním způsobem využití, přičemž kvalitní voda je nenahraditelnou vstupní surovinou pro mnoho hospodářských sektorů. Jako příklad lze uvést výrobní průmysl, průmyslový průmysl, zemědělství a mnoho dalších. V oblasti vody klade dokument za cíl: „V maximální možné míře jsou realizovány úspory vody. Zvyšuje se recyklace vody. Na půdě se hospodaří udržitelně s cílem zadržení vody v krajině.“ [2].

S touto diplomovou prací se pojí 5 ze 17 opatření, která jsou popsána ve Strategickém rámci v kapitole 9.6 „Prioritní oblast 6 – Voda“. Zde jsou vybraná opatření vypsána [2]:

- „Podporovat projekty znovuvyužití a recyklace odpadní vody v průmyslu, i na úrovni municipalit.“
- „Podporovat výzkum nových technologií pro nakládání s odpadními vodami, kapalnými odpady a čistírenskými kaly s cílem snížení energetické náročnosti procesu čištění odpadních vod a k maximalizaci využití fosforu z kalů z ČOV.“
- „Zavádět nové technologie k využití recyklované vody v průmyslové výrobě, obzvláště v odvětvích s vysokou spotřebou vody, jako jsou potravinářský, papírenský, chemický a textilní průmysl a energetika.“
- „Podporovat zavádění systémů a rozvodů pro využívání recyklované či upravené šedé vody.“
- „Vyhodnotit možnosti legislativního zakotvení recyklace odpadních vod.“

2.1.2 Klasifikace odpadu a odpadní vody

Odpadní koncentrát z membránových procesů je definován podle vyhlášky č. 8/2021 Sb. (Vyhláška o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů – Katalog odpadů) a zařazen do kategorie 16: „Odpady v tomto katalogu jinak neurčené“ a 19: „Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely“ [3]. Tato diplomová práce se bude zabývat podkategoriemi: **16 10 Odpadní vody určené k úpravě mimo místo vzniku**, **19 08 Odpady z čistíren odpadních vod jinde neuvedené** a **19 09 Odpady z výroby vody pro spotřebu lidí nebo vody pro průmyslové účely** [3].

Katalogové číslo odpadů, které obsahuje na konci *, znamená, že se jedná o nebezpečný odpad. Jinými slovy se jedná o odpad obsahující látky, které vykazují alespoň jednu z nebezpečných vlastností uvedených níže [3].

Následující skupiny odpadů, mohou mít spojitost s touto diplomovou prací [3]:

- „16 10 01* *Odpadní vody obsahující nebezpečné látky*“
- „16 10 02 *Odpadní vody neuvedené pod číslem 16 10 01*“
- „16 10 03* *Vodné koncentráty obsahující nebezpečné látky*“
- „16 10 04 *Vodné koncentráty neuvedené pod číslem 16 10 03*“
- „19 08 08* *Odpad z membránového systému obsahující těžké kovy*“
- „19 08 13* *Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky*“
- „19 08 14 *Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod neuvedené pod číslem 19 08 13*“

2.1.2.1 Klasifikace odpadu podle zákona o odpadech

Odpad je definovaný v paragrafu 4 *Odpad* v zákoně č. 541/2020 Sb. (Zákon o odpadech) [4] ve znění pozdějších předpisů jako movitá věc, které se osoba zbavuje. Dle paragrafu 6 *Zařazování odpadu* se odpad zařazuje do kategorie odpadu: nebezpečný odpad (NO), ostatní odpad a druhu odpadu vymezeného v Katalogu odpadu. Dle paragrafu 7 *Nebezpečný odpad a ostatní odpad* je definován nebezpečný odpad jako odpad, který vyazuje alespoň jednu z nebezpečných vlastností HP 1 až HP 15 [4]. Ve sdělení komise o technických pokynech pro klasifikování odpadu (2018/C 124/01) [5] v příloze 3 *Konkrétní přístupy k určování nebezpečných vlastností (HP 1 až HP 15)* jsou u každé nebezpečné vlastnosti HP vypsány konkrétní kódy standardních vět o nebezpečnosti a u HP 3–8, 10–14 jsou vypsány i koncentrační limity pro klasifikaci. V části *HP 15 Odpad schopný vykazovat při nakládání s ním některou z výše uvedených nebezpečných vlastností, kterou v době vzniku neměl*, je napsáno: „Členské státy mohou navíc označit odpady za nebezpečné s vlastností HP 15 na základě dalších kritérií, jako je například posouzení vodného výluhu.“ [5]. Nebezpečnou vlastnost HP 15 má rovněž odpad, který uvolňuje do vodného výluhu škodliviny v množstvích překračujících hodnoty limitních koncentrací ve výluhu. Limitní koncentrace jsou stanoveny v příloze č. 2 k vyhlášce č. 8/2021 Sb. (Vyhláška o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů – Katalog odpadů) [3] ve znění pozdějších předpisů v *Tabulce č. 2 Hodnoty limitních koncentrací ve výluhu pro hodnocení nebezpečné vlastnosti HP 15*. Uvedená tabulka limitních hodnot je převzata do diplomové práce jako Tabulka 1 [3].

Tabulka 1: Hodnoty limitních koncentrací ve výluhu pro hodnocení nebezpečné vlastnosti HP 15 [3]

Ukazatel	Jednotka	Limitní hodnota
pH	–	5,5–13
RL (rozpuštěné látky)	mg·l ⁻¹	8 000
Fluoridy	mg·l ⁻¹	30
As	mg·l ⁻¹	2,5
Ba	mg·l ⁻¹	30
Cd	mg·l ⁻¹	0,5
Cr celkový	mg·l ⁻¹	7
Cu	mg·l ⁻¹	10
Hg	mg·l ⁻¹	0,2
Ni	mg·l ⁻¹	4
Pb	mg·l ⁻¹	5
Sb	mg·l ⁻¹	0,5
Se	mg·l ⁻¹	0,7
Zn	mg·l ⁻¹	20
Mo	mg·l ⁻¹	3
B	mg·l ⁻¹	90
Jednosytné fenoly	mg·l ⁻¹	100

2.1.2.2 Klasifikace odpadní vody podle vodního zákona

Odpadní voda nepodléhá přímo zákonu o odpadech, ale má svůj vlastní specifický zákon. Jedná se o zákon č. 544/2020 Sb. ve znění pozdějších předpisů, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb. (Zákon o vodách a o změně některých zákonů – vodní zákon, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony) [6], který má za účel chránit povrchové a podzemní vody jakožto nenahraditelné složky životního prostředí. Odpadní vodou se rozumí použité vody v různých stavebních, nás však zajímají použité vody z průmyslových staveb. Ve většině případů je i průmyslová stavba napojena na kanalizační síť a je nutné, aby odpadní voda odpovídala svým složením kanalizačnímu řádu (KŘ) [6].

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. (Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech) [7] ve znění pozdějších předpisů definuje pojem průmyslová odpadní voda jako odpadní vody z výroby uvedených v části B přílohy 1 nařízení vlády č. 401/2015 Sb. ve znění pozdějších předpisů, jakož i odpadní vody z výroby v příloze neuvedené, jsou-li vypouštěny z výrobních nebo jim obdobných zařízení, včetně odpadních vod vypouštěných z průmyslových areálů, které vznikají převážně jako produkt průmyslové činnosti [7].

Vodní zákon definuje pojem závadné látky (ZL). Závadné látky jsou látky, které jsou obsaženy ve vodě a jsou schopné poškodit jakost povrchových či podzemních vod, přičemž se nejedná o odpadní ani důlní vody. Vybrané závadné látky jsou vypsány v Tabulce 2 a celkový seznam závadných látek je uveden jako příloha A. V příloze I vodního zákona je

uveden seznam zvlášť nebezpečných závadných látek (ZNZL) a nebezpečných závadných látek (NZL). Z této přílohy byly vybrány pouze sloučeniny kovů, které budou dále diskutovány [6].

Tabulka 2: Seznam vybraných závadných látek [6]

Zvlášť nebezpečné závadné látky			
Kadmium a jeho sloučeniny			
Nebezpečné závadné látky			
Sloučeniny metaloidů a kovů:			
Zinek	Cín	Měď	Baryum
Nikl	Beryllium	Chrom	Bor
Olovo	Uran	Selen	Vanad
Arsen	Kobalt	Antimon	Thallium
Molybden	Tellur	Titan	Stříbro
Elementární fosfor a anorganické sloučeniny fosforu.			

Povolení k vypouštění odpadní vody s obsahem nebezpečných závadných látek vydává vodoprávní úřad. Odpadní vody s obsahem nebezpečných závadných látek musejí být čištěny tak, aby splňovaly limity kanalizačního řádu. Dle vyhlášky č. 428/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích) [8] ve znění pozdějších předpisů je v příloze č. 15 navržena tabulka s vybranými ukazateli a jejich koncentračními limity pro orientační stanovení přípustné míry znečištění ve vypouštěné průmyslové odpadní vodě. Tabulka z přílohy č. 15 vyhlášky č. 428/2001 Sb. je přepsána do přílohy B [8].

Každý provozovatel kanalizací si stanovuje vlastní kanalizační řád s ohledem na kvalitu a kvantitu přitékajících vod do kanalizační sítě a dále s ohledem na možnosti čištění čistírny odpadních vod. V případě, že lze odůvodněně předpokládat výskyt zvlášť nebezpečných látek na přítoku průmyslových odpadních vod, je nutné, aby byly zařazeny dotyčné ukazatele do kanalizačního řádu [6, 8].

2.2 MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S PRŮMYSLOVOU ODPADNÍ VODOU

Průmyslová odpadní voda může obsahovat nebezpečné závadné látky nebo i zvlášť nebezpečné závadné látky, které je zakázáno vypouštět do kanalizace. Dále může průmyslová odpadní voda překračovat individuální limity kanalizačního řádu a je tedy rovněž zakázáno tuto vodu vypouštět do kanalizace. Jedním z řešení je jednat s vodoprávním úřadem o vypuštění nebo takovouto průmyslovou odpadní vodu na místě zpracovat. Při zpracování průmyslové odpadní vody na místě vzniku se nabízí možnost tuto vodu přechistit do opětovně použitelné kvality. Společně s tím však vzniká zahuštěný odpad, se kterým je nutné nakládat již jako s odpadem.

2.2.1 Vypouštění NZL do kanalizace

Povolením k vypouštění průmyslových odpadních vod s obsahem ZNZL nebo prioritní nebezpečné látky (PNL) do kanalizace se zabývá § 16 zákona č. 544/2020 Sb. ve znění pozdějších předpisů. U vod, kde je podezření, že mohou obsahovat ZNZL nebo PNL, je třeba

žadat vodoprávní úřad o povolení k vypouštění do kanalizace. Obsahové náležitosti žádosti jsou stanoveny v příloze č. 10 vyhlášky č. 183/2018 Sb. ve znění pozdějších předpisů (Vyhláška o náležitostech rozhodnutí a dalších opatřeních vodoprávního úřadu a o dokladech předkládaných vodoprávnímu úřadu). Ve zvláštních a odůvodněných případech lze s vodoprávním úřadem, provozovatelem kanalizací a provozovatelem ČOV uzavřít dohodu o změně limitů a ukazatelů přípustné míry znečištění pro vypouštění NZL v odpadních vodách a ZNZL v odpadních vodách do kanalizace. Před povolením musí být projednáno: jaká je kvalita a kvantita odpadní vody, na kolik je dimenzovaná ČOV, v jakých hodinách a množství by docházelo k vypouštění. Všechny žádosti vyřizuje vodoprávní úřad individuálně s ohledem na přípustné zatížení kanalizační sítě a na kapacitu ČOV [6, 9].

2.2.2 Decentralizované čištění odpadních vod

Producent průmyslové odpadní vody může vodu zpracovat před jejím vypouštěním do kanalizace tak, aby splňovala podmínky kanalizačního řádu. Nebo může průmyslovou odpadní vodu zpracovat do kvality, která je dostatečná pro opětovné použití v průmyslu. Decentralizované čištění odpadní vody může obsahovat následující metody. Není vyloučené, že se metody mohou kombinovat, dokonce je to v některých případech až žádoucí. Mezi nejčastější procesy využívané k decentralizovanému čištění patří: oxidace (pokročilé oxidační procesy, elektrochemické oxidační procesy), adsorpce, koagulace, flokulace, hydrolýza, neutralizace, flotace, iontová výměna, destilace, filtrace, zero liquid discharge (nulové vypouštění kapalin), odlučování olejů a tuků, separace oleje/vody, sedimentace, membránové separační procesy, membránové bioreaktory (MBR) a biologické procesy (aktivovaný kal, aerobní a anaerobní procesy) [10–26]. U vybraných procesů, které jsou zmiňovány v experimentální části, jsou níže popsány jejich základní principy.

2.2.2.1 Flotace

Funguje na principu, že se uvolňuje flotační plyn (např. vzduch) a na stoupajících bublinách dochází k selektivní adsorpci na rozhraní plyn/kapalina nebo plyn/pevná látka. Při separaci se využívá rozdílné smáčivosti látek. Nečistoty v rozpustné či nerozpustné formě jsou adsorbované na bublinách a tím se dostávají do horní části nádoby, kde se odstraní. V současné době se velmi rozvíjí jemnobublinná flotace a elektroflotace [10–13, 16–18].

2.2.2.2 Koagulace a flokulace

Koagulace a flokulace jsou důležitými procesy při odstraňování zákalu, kovů, koloidních a makromolekulárních organických látek ze surové vody. Tyto látky jsou přirozenými mechanismy stabilizovány proti agregaci. Při koagulaci dochází k destabilizaci částic a následně k agregaci částic. Agregované látky jsou poté separovány prostou sedimentací nebo filtrací [10, 14, 16–18].

2.2.2.3 Adsorpce na aktivním uhlí

Aktivní uhlí jako absorbent je oblíbené kvůli své schopnosti adsorbovat širokou škálu organických sloučenin a těžké kovy. Adsorpce je používána při čištění vody a odpadních vod, například v kombinaci s tlakovými membránovými procesy. Adsorpce probíhá na povrchu pórů vysoce porézního aktivního uhlí, které se obvykle používá v granulované (GAU) formě

při aplikaci uhlíkové adsorpční kolony, ale také v práškové (PAU) formě pro čištění odpadních vod [10, 14–18, 23, 24].

2.2.2.4 Membránové separační procesy

Membránové separační procesy jsou citlivější na vstupní vodu; pokud je voda velmi znečištěná, například suspendovanými látkami nebo zvýšenou koncentrací oxidovadel, je třeba vstupní vodu předupravit pomocí technologií výše zmiňovaných. Membránové separační procesy mají velmi široké pole působnosti a jsou tou hlavní technologií využívanou v této diplomové práci. Membránové separační procesy jsou hlavní technologií směřující k produkci opětovně využitelné vody o dostačující kvalitě. Tématem membránových technologií se zabývají kapitoly 2.3 a 2.4.

2.2.2.5 Technologie zero liquid discharge

V současné době ve snaze o opětovné využívání vody je velmi zmiňované takzvané řešení „zero liquid discharge“ (ZLD), tedy nulové vypouštění kapalin. Jedná se o zpracování odpadní vody, kdy jediným zbytkem ze zařízení jsou pevné látky, a tím dochází ke snížení množství zbytků, které se pak snáze likvidují. ZLD technologie se dají využít na zpracování koncentráту z membránových procesů, které jsou již tak velmi zahuštěné (nazývané též solanka). Tento přístup je nyní aktivně zkoumán v zájmu o nalezení nejefektivnějších metod nakládání se solankou. Mezi ZLD technologie řadíme koncentrátory solanky, krystalizátory, membránové procesy a odparky. Technologie ZLD se používají v některých průmyslových procesech, například v energetice, jejich provoz je však drahý a energeticky náročný. Dalšími technickými problémy při zpracování solanky z reverzní osmózy je usazování a zanášení tepelných a membránových technologií. Před použitím ZLD technologie je zásadní předupravit solanku pomocí následujících technologií: flokulace, změkčování a koagulace. Zatím se neprokázalo, že by tyto technologie byly nákladově efektivní v komunální sféře při úpravě vody [14, 26–31].

Bez použití ZLD technologií je v současné době solanka neboli koncentrát z reverzní osmózy likvidován následujícími způsoby: 45 % je vypouštěno do vod povrchových, 25–27 % je vypouštěno do kanalizace, 13–17 % je hlubinně injektováno, 7–8 % je vypouštěno na povrch země, 4–5 % je zavedeno do odpařovacích nádrží a 1–3 % je likvidováno jinak, například formou těžby nerostů [32, 33].

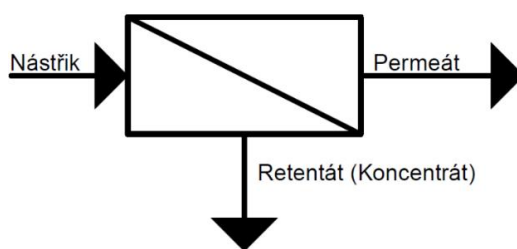
2.2.3 Zpracování externí firmou

Existují specializované firmy, které se zabývají přímo zpracováním odpadů a to i těch klasifikovaných jako nebezpečné. Firmy dokážou zajistit odvoz odpadu a jeho zpracování, jsou schopné zpracovat i primární odpad, ale ten může obsahovat zbytkové teplo a bývá ve velkém množství. Je proto výhodné primární odpad zpracovat (zkoncentrovat) a až zahuštěný odpad předat firmě k dalšímu zpracování. Příklad firmy nacházející se v okolí, kde byl odebrán vzorek a nabízející zpracování odpadů definované v kapitole 2.1.2, je například Kaiser servis, spol. s r.o.

2.3 MEMBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY

Membránové separační metody jsou v současné době hojně používané a nabízejí jiné možnosti separace oproti klasickým separačním metodám, jako je koagulace, flotace, destilace, filtrace a další. Membránové separační metody umožňují selektivní transport jedné složky skrz membránu vlivem rozdílných vlastností látek. Membrána představuje selektivně propustnou bariéru mezi dvěma prostředími, kde dochází k transportu látek. Membrány lze použít k separaci směsí plynů a kapalin a dále k průmyslovému zahušťování roztoků. Obecné schéma membránového procesu je znázorněné na obrázku 1 a zahrnuje nástřík, permeát a retentát (též nazývaný koncentrát) [36–45]. Jednotlivé výrazy a další důležitá terminologie jsou vypsány v seznamu zde:

- Nástřík (Feed) – je vstupní proud na membránu [34].
- Permeát (Permeate) – je výstupní proud procházející skrze membránu obsahující penetranty, tedy složky, které prošly membránou; jsou obvykle o nižší koncentraci látek než na vstupu [34].
- Retentát (Retentate) – je výstupní proud, který neprošel membránou. A v českém jazyce je často pojmenováván koncentrát [34].
- Fouling – Při dlouhodobém provozu membrán dochází k jejich zanášení, usazování látek na povrchu membrány nebo uvnitř pórů membrány. V ten moment hovoříme o foulingu [34–36].
- Dead-end flow – neboli jednosměrný tok, je způsob toku nástříku na membránu, kdy se koncentrát neodvádí. Jediný odtok je permeát, který projde membránou [34–36].
- Cross-flow – neboli příčný tok, je způsob toku nástříku na membránu. Při způsobu cross-flow proudí nástřík „po povrchu membrány“ a odtéká koncentrát. Přičemž permeát pronikne membránou [34–36].



Obrázek 1: Schéma základního membránového procesu

2.3.1 Základní vlastnosti membrán

Membrány v běžném životě nacházíme všude, příkladem může být naše pokožka. Pokožka je přírodní selektivní membrána, která propouští pouze některé látky a vytváří koncentrační rovnováhu na obou stranách. Pro technologii membránových separačních procesů se využívají syntetické membrány, které si obdobně jako pokožku můžeme představit jako tenkou vrstvu. Syntetická membrána může nabývat různých vlastností, které ovlivňují propouštění látek. Záleží na tom, z jakých materiálů je membrána vyrobená a jaká byla zvolena geometrie membrány při výrobě [37–39]. Při výběru membrán se rozhodujeme podle požadovaných vlastností:

- **Permeabilita** [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] (**Permeability**)

Permeabilita neboli propustnost membrány se měří jako objemový tok čisté deionizované vody přes plochu nové membrány za jednotku času při určitém tlaku nástríku. Permeabilita se počítá podle rovnice (4.1):

$$L = \frac{V_p}{A \cdot t \cdot p} \quad (4.1)$$

kde L je permeabilita [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$], V_p je objem permeátu [m^3], A je plocha membrány [m^2], t je čas [s] a p je tlak nástríku [Pa] [34, 35, 37, 40, 41].

- **Hustota toku** [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] (**Flux**)

V chemickém inženýrství se též nazývá intenzita toku. Jedná se o intenzitu toku dané složky protékající membránou. Hustota toku se počítá podle rovnice (4.2):

$$J_V = \frac{\Delta p}{\mu \cdot R_M} \quad (4.2)$$

kde J_V je intenzita objemového toku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], Δp je rozdíl tlaků před a za membránou [Pa], μ je dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] a R_M je hydrodynamický odpor membrány [m^{-1}] (převrácená hodnota permeability) [34, 35, 37, 40, 41].

- **Selektivita** (**Selectivity**)

Selektivita je dělicí schopnost membrány přednostně propouštět jednu složku ze vstupního proudu na membránu [34, 35, 37, 40, 41].

- **Permselectivita** (**Permselectivity**)

Je schopnost membrány jednu nebo více složek pronikající membránou zvýhodňovat oproti jiným složkám ze vstupního proudu [34, 35, 37, 40, 41].

- **Retenční koeficient** [-] (**Retencion factor**)

Retence vyjadřuje účinek membránové separace, neboli schopnost zadržet separovanou složku. Jedná se o procentuální podíl separovaných látek zadržovaných na membráně. Retenční koeficient se počítá podle rovnice (4.3):

$$R_F = 1 - \left[\frac{(c_i)_{\text{permeát}}}{(c_i)_{\text{koncentrát}}} \right] \cdot 100 \quad (4.3)$$

kde R_F je retenční koeficient [%], c_i je koncentrace i složky [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$] [34, 35, 37, 40, 41].

- **Rejekční koeficient** [-] (**Rejection factor**)

Rejekční koeficient je schopnost zadržení složky z nástríku na membráně. Rejekční koeficient nám udává, kolik látky z nástríku projde skrze membránu do permeátu, a počítá se podle rovnice (4.4):

$$R = 1 - \left[\frac{(c_i)_{\text{permeát}}}{(c_i)_{\text{nástrík}}} \right] \quad (4.4)$$

kde R je rejekční koeficient [-], c_i je koncentrace i složky [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$] [34, 35, 37, 40, 41].

- **Výtěžek [%] (*Recovery*)**

Výtěžek je poměr množství složky B v produktu (může být permeát nebo koncentrát) vůči všem složkám v nástríku. Udává se v procentech a počítá se podle rovnice (4.5):

$$R = 1 - \left[\frac{(c_i)_{\text{permeát}}}{(c_i)_{\text{nástrík}}} \right] \quad (4.5)$$

kde R je výtěžek [%], c_i je koncentrace i složky [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$] [34, 35, 37, 40, 41].

- **Měrný aktivní povrch membrány [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$] (*Membrane packing density*)**

Aktivní plocha membrány připadající na jednotku objemu modulu [34, 35, 37, 40, 41].

- **Membránový rozdělovací koeficient [-] (*Partition (distribution) coefficient, membrane p.c.*)**

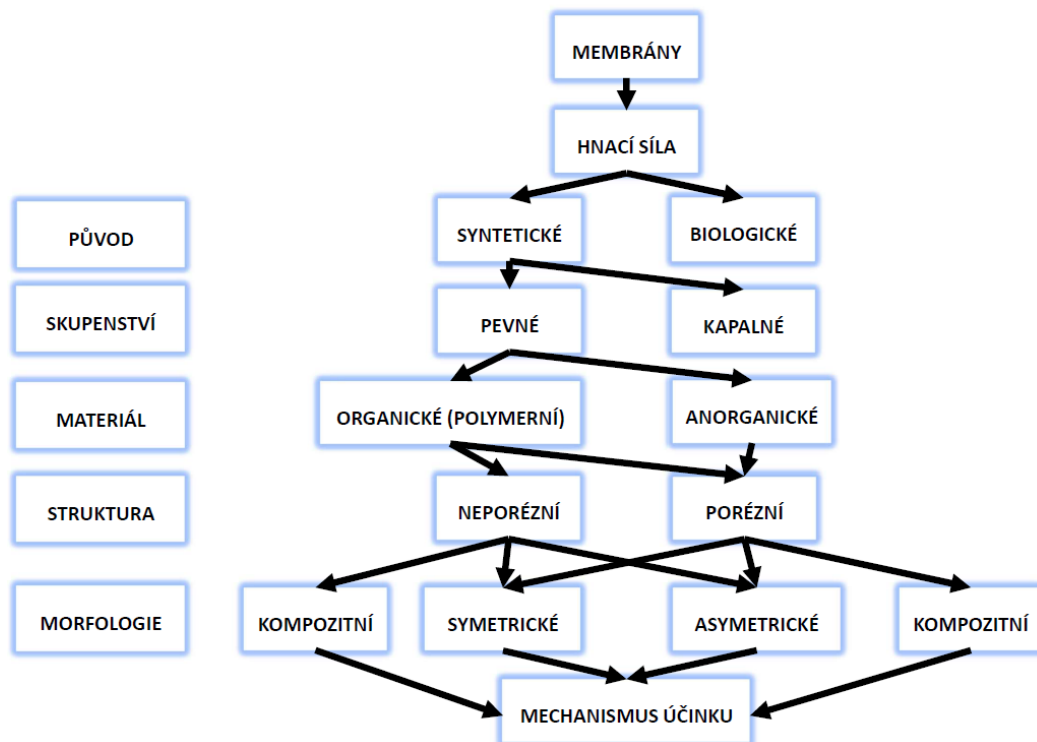
Poměr rovnovážné koncentrace složky i v membráně a v roztoku, který je v kontaktu s povrchem membrány. Membránový rozdělovací koeficient se počítá podle rovnice (4.6):

$$K = \frac{c_i^{(m)}}{c_i^{(e)}} \quad (4.6)$$

kde K je membránový rozdělovací koeficient [-], $c_i^{(m)}$ je rovnovážná koncentrace [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$] složky v membráně a $c_i^{(e)}$ je rovnovážná koncentrace [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$] stejné složky v roztoku [34, 35, 37, 40, 41].

2.3.2 Dělení membrán

Membrány můžeme dělit podle hnací síly, původu, skupenství, materiálu, struktury, morfologie a podle mechanismu účinku separace. Na obrázku 2 je schématicky znázorněno rozvětvené dělení. Jednotlivé skupiny budou více rozepsány v následujících kapitolách [38].



Obrázek 2: Dělení membrán [upraveno dle 38]

2.3.2.1 Dle hnací síly

Je-li kritériem dělení hnací síla, můžeme membrány dělit podle následujících hnacích sil: gradient tlaku, gradient chemického potenciálu, gradient elektrochemického potenciálu a gradient teploty [37, 38, 41]. Rozdělení je přehledně zpracované v Tabulce 3.

Tabulka 3: Dělení membránových separačních procesů podle hnací síly [36–38, 41, 42]

Hnací síla	Membránový separační proces	Změna fáze
Gradient tlaku	Mikrofiltrace	Kapalina/Kapalina
	Ultrafiltrace	
	Nanofiltrace	
	Reverzní osmóza	
	Separace plynů	Plyn/Plyn
Gradient chemického potenciálu	Dialýza	Kapalina/Kapalina
	Pervaporace	Kapalina/Plyn
Gradient elektrochemického potenciálu	Elektrodialýza	Kapalina/Kapalina
	Elektroforéza	
Gradient teploty	Membránová destilace	

Dále se tato práce bude věnovat pouze membránovým separačním procesům, kde hnací silou je gradient tlaku a membrána je mezi kapalnými fázemi.

2.3.2.2 Dle původu

Membrány dle původu dělíme na biologické a syntetické. Biologické membrány se nacházejí ve všem živém a plní nepostradatelnou funkci tím, že umožňují, aby vůbec existoval život. Syntetické membrány jsou polopropustné bariéry, které mají různé fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti podle toho, z jakého materiálu jsou vyrobeny [37, 38, 42].

2.3.2.3 Dle skupenství

Dle skupenství lze rozdělit membrány na pevné a kapalné. Pevné membrány jsou velmi široce používané v průmyslu a hlavně při úpravách vod. Pevná membrána je tenká vrstva z pevného materiálu, například z polyamidu nebo keramiky. Kapalné membrány jsou tvořené ukotvením kapaliny na pevném pórovitém nosiči nebo ve formě dvojité emulze. V průmyslu se kapalných membrán příliš nepoužívá [42].

2.3.2.4 Dle materiálu

Semipermeabilní selektivní membrány mohou být vytvořeny z kteréhokoliv materiálu, který má požadované vlastnosti, jako je selektivní permeabilita. Mezi nejčastější materiály řadíme polymery a keramiku. Dalšími použitelnými materiály mohou být mikroporézní uhlík, sklo nebo kovy [36–38, 41–45].

Z hlediska skupin materiálů lze membrány rozdělit na polymerní neboli organické membrány a keramické neboli anorganické membrány. **Polymerní membrány** mají celou řadu výhod: jsou relativně levné, snadno se vyrábějí, vyrábějí se v široké škále velikostí pórů. Mají ale i zásadní omezení, a tím je jejich náročnost na splnění následujících podmínek:

pH, teplota, tlak, tolerance chlóru a oxidovadel. Polymerní membrány jsou v průmyslu široce používané, ale jejich dalšímu rozšiřování brání zmíněné parametry, které při překročení vedou k destrukci membrány. **Keramické membrány** mají vysokou mechanickou pevnost, chemickou a teplotní stabilitu oproti polymerním membránám. Tyto výhodné odolnostní vlastnosti se odráží na pořizovací ceně membrány [37, 38, 46].

Materiál membrány nám ovlivňuje výsledné vlastnosti membrány, mezi které řadíme například následující (zvýrazněné tučně): **velikost pórů** materiálu nám udává, kolik toho zvládne membrána zadržet na svém povrchu. **Hydrofobicita** membrány vyjadřuje mezifázové napětí mezi vodou a materiálem membrány. **Chemická a tepelná stabilita** materiálu ovlivňuje životnost membrány. Při větší chemické i teplotní odolnosti je možné agresivnější čištění membrány s menší degradací materiálu. **Biologická stabilita** ovlivňuje životnost membrány, kdy při nízké biologické stabilitě může nastat kolonizace a poškození membrány mikroorganismy. **Tolerance vůči chlóru/oxidačním činidlům** ovlivňuje možnosti dezinfekce membrány. **Mechanická odolnost** ovlivňuje schopnost materiálu odolávat tlakům a rázovým vlnám [47].

Vzhledem k tomu, že neexistuje dokonalý materiál pro všechny membránové tlakové procesy, existuje velmi široké spektrum materiálů a jejich vzájemných kompozitů. Nejčastější materiály jsou vypsány v Tabulce 4 a jsou také uvedeny výhody a nevýhody materiálů. Většina syntetických membrán je hydrofobní, a proto musí být skladovány vlhké nebo naplněny smáčedlem. Pokud by se nechaly vyschnout, nastanou strukturní změny, čímž dojde ke snížení potenciálního toku [36, 37, 41, 46, 47].

Tabulka 4: Membránové materiály a jejich vlastnosti [36, 37, 43, 46–49]

Materiál membrán	Vlastnosti materiálu
Acetát celulózy (CA)	<ul style="list-style-type: none"> • jeden z nejhydrofilnějších z běžných průmyslových materiálů • nízká mezní teplota 30–40 °C • úzký rozsah pH 2,8–2,6 • nízká tolerance chlóru (pod 1 mg·l⁻¹ volného chlóru) • biologicky poškoditelný • materiál se používá v procesech: RO, NF, UF
Polypropylen (PP)	<ul style="list-style-type: none"> • jeden z nejhydrofilnějších z běžných průmyslových materiálů • chemicky a biologicky odolný • středně vysoké teploty • rozmezí pH 1–13 • je možné provádět agresivní čištění • není tolerantní vůči chlóru, což brání kontrole biologického růstu • materiál se používá v procesech: MF

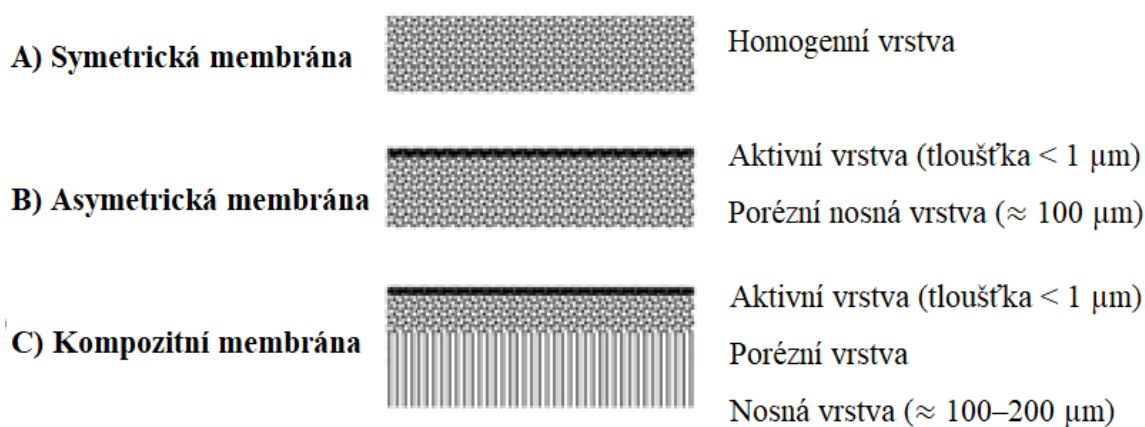
Polyamid (PA)	<ul style="list-style-type: none"> • jsou obecně odolné vůči biologické degradaci • pH rozmezí 3–11 a ve vodě nehydrolyzují • za podobných tlakových a teplotních podmínek mohou PA membrány produkovat vyšší tok vody a vyšší rejekci solí než CA membrány • náchylnější k zanášení a nesnášejí volný chlor v jakékoli koncentraci • materiál se používá v procesech: RO, NF
Polyvinylidenfluorid (PVDF)	<ul style="list-style-type: none"> • mírně hydrofobní • chemická i biologická odolnost • odolává nepřetržitému působení volného chlóru o jakékoli koncentraci • pH rozmezí 2–10 • odolný teplotám do 75 °C • je možné provádět agresivní čištění a dezinfekci • materiál se používá v procesech: UF, MF
Polysulfon (PS)	<ul style="list-style-type: none"> • mírně hydrofobní • chemická tolerance (volný chlor až 200 mg·l⁻¹) • biologická odolnost
Polyethersulfon (PES)	<ul style="list-style-type: none"> • pH rozmezí 1–13 • odolný teplotám do 75 °C • je možné provádět agresivní čištění a dezinfekci • materiál se používá v procesech: UF
Keramika	<ul style="list-style-type: none"> • jedná se o tuhé monolitické prvky • materiál je hydrofilní, drsný • odolává vysokému provoznímu tlaku a teplotě • má vynikající chemickou a pH toleranci • je možné agresivní čištění a dezinfekce • materiál se používá v procesech: MF
Uhlík	<ul style="list-style-type: none"> • mají široké limity teploty, pH a tlaku • mají prodlouženou životnost • jsou velmi křehké • mají vysoké náklady • materiál se používá v procesech: UF, MF
Kompozitní membrána (PA + PS + textilie)	<ul style="list-style-type: none"> • pH rozmezí 2–11 (krátkodobě 1–13) • odolný teplotám do 45 °C • mají nízkou toleranci vůči oxidačním činidlům • materiál se používá v procesech: RO, NF

2.3.2.5 Dle struktury

- Porézní membrány ve své struktuře obsahují póry, které propojují obě strany membrány. Separální schopnost membrány tedy určuje velikost pórů. Porézní membrány se vyrábí jak z polymerních materiálů, tak z keramických materiálů [38, 48, 50].
- Neporézní membrány ve své struktuře neobsahují póry a k separaci dochází vlivem difúze látek skrze neporézní membránu. Neporézní membrány se vyrábí výhradně z polymerních materiálů, protože v keramických materiálech dosahují složky nízké difuzivity a rozpustnosti [38, 48, 50].

2.3.2.6 Dle morfologie

- Struktura symetrické membrány (obrázek 3A) je podle příčného řezu membránou neměnná. Tloušťka membrány bývá obvykle 10–200 μm , přičemž odpor membrány se mění s její tloušťkou [38, 48, 50].
- Struktura asymetrické membrány (obrázek 3B) se ve své tloušťce mění. Membrána obsahuje svrchní tenkou vrstvu, kde dochází k dělení složek. A ve zbývající části membrány je tvořena podpůrnou makroporézní vrstvou s rozšiřujícími se póry [38, 48, 50].
- Kompozitní membrány jsou nejnovější a jsou složeny z více vrstev (obrázek 3C). Na povrchu bývá selektivní vrstva, což může být aromatický polyamid. Uprostřed bývá mikroporézní vrstva, která může být složena z polysulfonu nebo polymočoviny. A na závěr je nosná podložka, kterou může být netkaná textilie [38, 39, 44, 50, 55].



Obrázek 3: Morfologické dělení membrán [upraveno dle 50]

2.3.2.7 Dle mechanismu účinku separace

Na membránách dochází k separaci látky na základě různých mechanismů nebo jejich kombinací uvedených zde:

- Podle velikosti částic (sítový efekt)
 - Mezi tlakové membránové separační procesy, kde jsou membrány porézní a látky se separují podle sítového efektu, řadíme: mikrofiltraci, ultrafiltraci a částečně nanofiltraci [37, 42].
- Podle afinity složek k materiálu membrány a různé rychlosti difúze složek skrze membránu (rozpouštění a difúze)

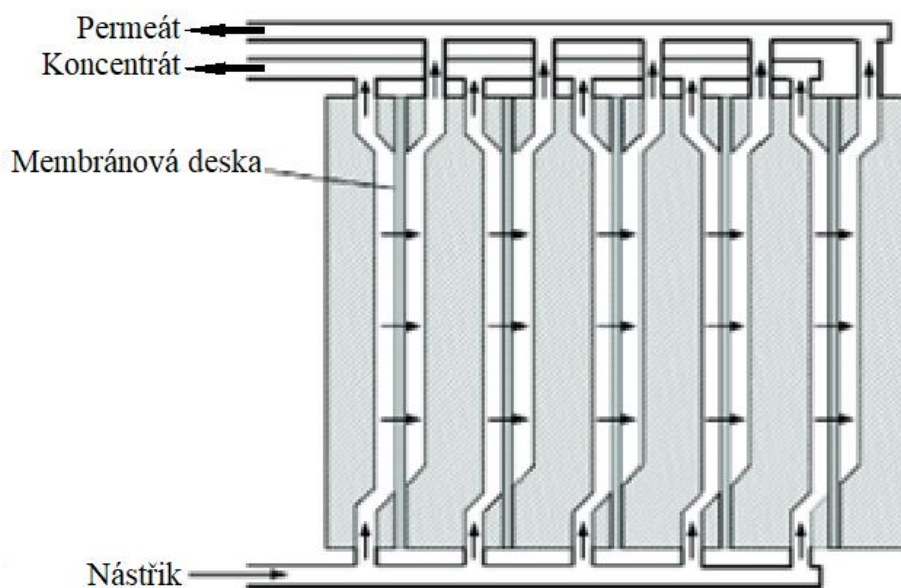
- Mezi tlakové membránové separační procesy, kde jsou membrány neporézní a dochází k separaci podle mechanismu rozpouštění a difúze, řadíme: částečně nanofiltraci a reverzní osmózu [37, 42].
- Podle elektrochemických interakcí mezi složkami a materiálem membrány
 - Mezi tlakové membránové separační procesy, kde dochází k odpuzování molekul s elektrickým nábojem materiálu membrány, řadíme nanofiltraci [37, 42].

2.3.3 Membránové moduly

Membránový modul představuje pouzdro, do kterého se umísťuje membrána. Existují dva základní typy modulů: tubulární (trubkové, kapilární moduly a moduly s dutými vlákny) a plošné (deskové moduly a spirálně vinuté moduly). Toto jsou základní typy, ale existuje jich více [37, 41, 46, 48].

2.3.3.1 Deskové moduly

Deskový modul je nejzákladnější a nejjednodušší pro laboratorní konstrukci. Modul je tvořen z jednotlivých desek membrány (obrázek 4), které jsou za sebou uspořádány sendvičově. Konstrukčně se podobá konstrukci kalolisu. Proudění v modulu je spíše laminárního charakteru. Tohoto uspořádání se využívá spíše u elektromembránových procesů. U tohoto modulu je hustota uložení $100\text{--}400\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$ [36–38, 41, 42, 46, 49].

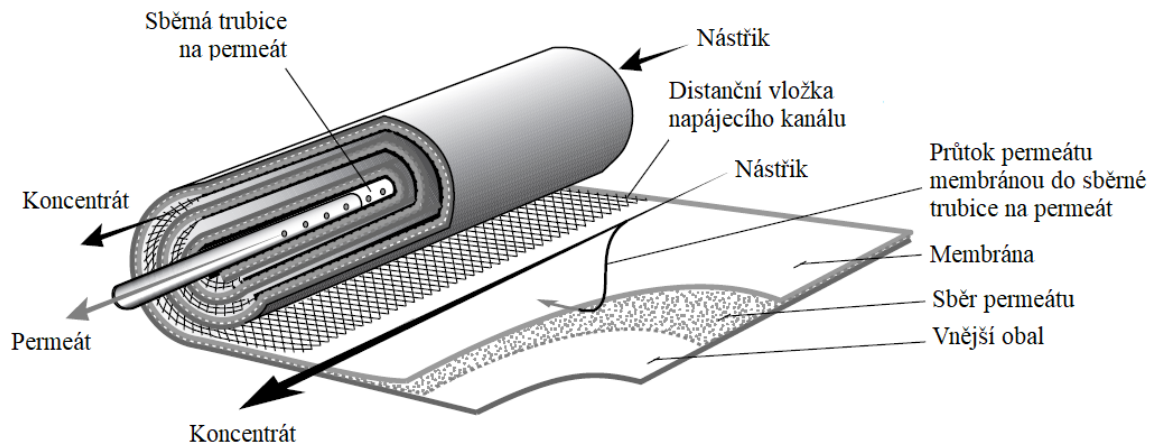


Obrázek 4: Deskový modul [upraveno dle 38]

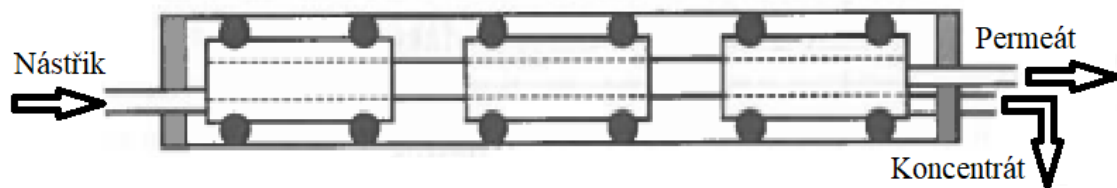
2.3.3.2 Spirálně vinuté moduly

Spirálně vinutý modul, který je zobrazen na obrázku 5, je složen ze spaceru, skrze který je odváděn permeát do středové trubice. Z obou stran spaceru je umístěna membrána permeátovou stranou a obě membrány jsou k sobě po okrajích slepeny. Tímto slepením tvoří „kapsu“, kdy se uvnitř kapsy nachází již zmiňovaný spacer pro odvod permeátu. Nad membránou je umístěný turbulizér, aby byl prostor pro vstupní proud a docházelo k rovnoměrnému rozptýlení kapaliny po celé ploše membrány. Následně je tento

sled vrstev spirálovitě smotán do jednoho modulu. Tento model dosahuje lepší hustoty uložení (poměru membránové plochy k objemu zařízení), a to $300\text{--}1\,000\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$. Nevýhoda nastává při nutnosti čištění modulu. Z důvodu problematictějšího čištění je tak nutné předupravovat vstupní proud, aby obsahoval minimální množství suspendovaných částic. Proudění tohoto modulu je turbulentní, čímž v důsledku vzniká větší tlaková ztráta. Tento model je možné za sebe řadit sériově (obrázek 6) a tím získat větší kapacitu [36–38, 41–43, 46, 49].



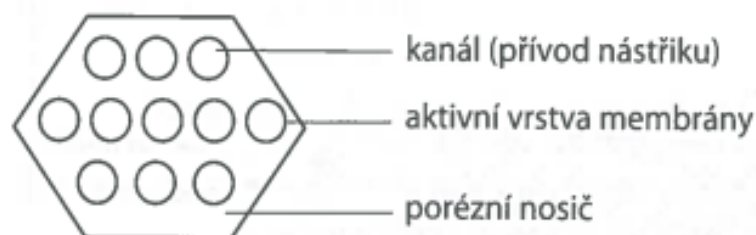
Obrázek 5: Spirálně vinutý modul [upraveno dle 14]



Obrázek 6: Sériové zapojení spirálně vinutého modulu [upraveno dle 37]

2.3.3.3 Trubkové moduly

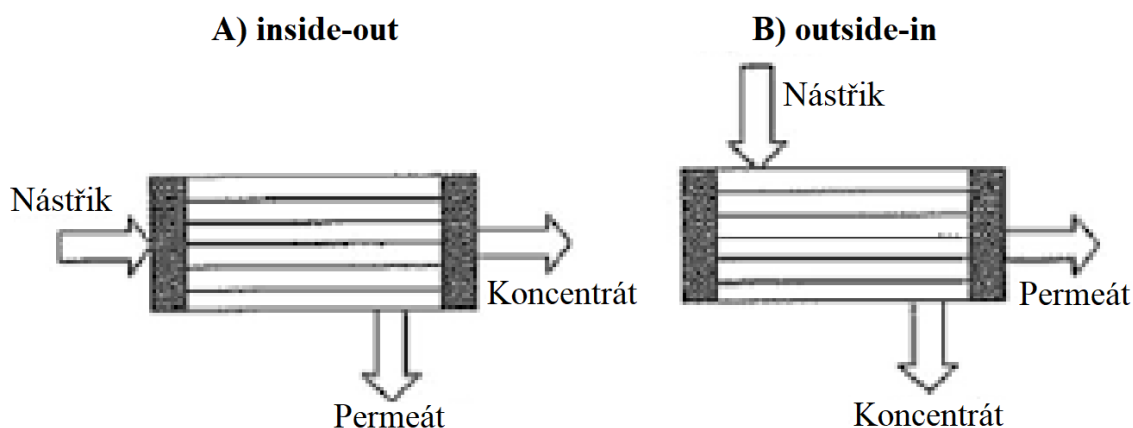
Trubkový modul (obrázek 7) je tvořen ze 4 až 18 trubkových membrán, které jsou uspořádané v pouzdře z oceli nebo plastu. Vstupní proud je přiváděn do trubice a vnitřní stranou trubice prochází skrze membránu permeát. Permeát je porézním nosičem odváděn z modulu a koncentrát je odváděn na opačné straně modulu. Materiál membrán je nejčastěji keramický a je tedy jednodušší jej čistit. Proto je vhodný i pro kapaliny se suspendovanými částicemi. Nevýhodou je nízká hustota plochy, jež je menší než $300\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$ [37, 41, 46, 49].



Obrázek 7: Průřez trubkovitého modulu [upraveno dle 37]

2.3.3.4 Kapilární moduly

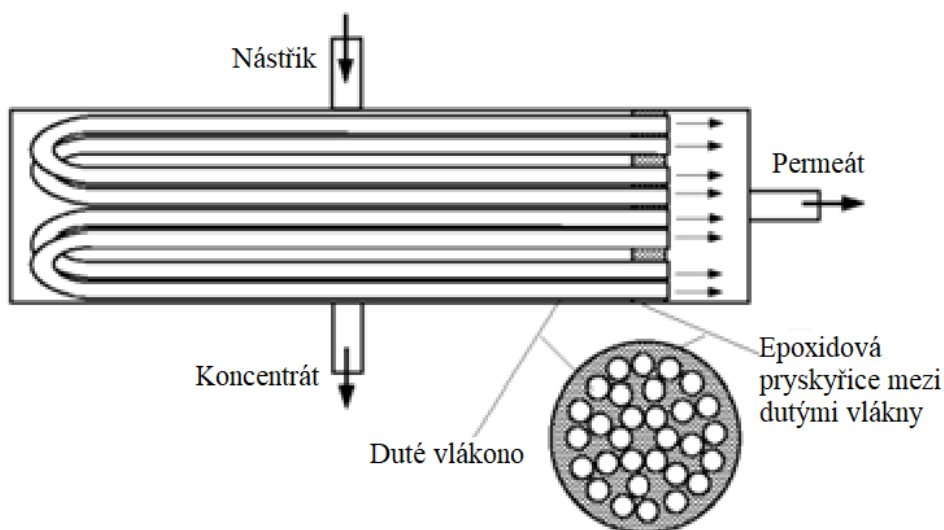
Kapilární moduly jsou tvořeny z velkého množství kapilár o rozměrech 1,5 až 4 mm umístěných do jednoho svazku. Konce svazku jsou často spojovány pomocí epoxidové pryskyřice tak, aby tvořily jeden celek a nedocházelo ke kontaminaci. Hustota uložení je 600–1 200 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. Existují dva způsoby uspořádání (obrázek 8A), inside-out nebo (obrázek 8B) outside-in. Režim inside-out funguje na principu, že nástřík vedeme do kapiláry. Zároveň odtéká koncentrát z vnitřní strany kapiláry. Permeát odtéká skrze kapiláru do svazku a dál. Kdežto v režimu outside-in vedeme nástřík nejprve do svazku a po průchodu membránou permeát teče vnitřní stranou kapiláry ven. Koncentrát tedy teče po vnější straně membrány a odtéká ze svazku ven [36–38, 41, 49].



Obrázek 8: Kapilární modul [upraveno dle 37]

2.3.3.5 Moduly s dutými vlákny

Na stejném principu jako pracují kapilární moduly, fungují i moduly s dutými vlákny (obrázek 9). Jen u modelu s dutými vlákny je menší průměr, a to méně než 1,5 mm. Díky většímu povrchu dosahují moduly s dutými vlákny hustoty uložení 20 000–30 000 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. Obdobně jako u kapilárního modulu i zde existují dva způsoby nástříku (inside-out nebo outside-in) [36–38, 41, 49].



Obrázek 9: Modul s dutými vlákny [upraveno dle 38]

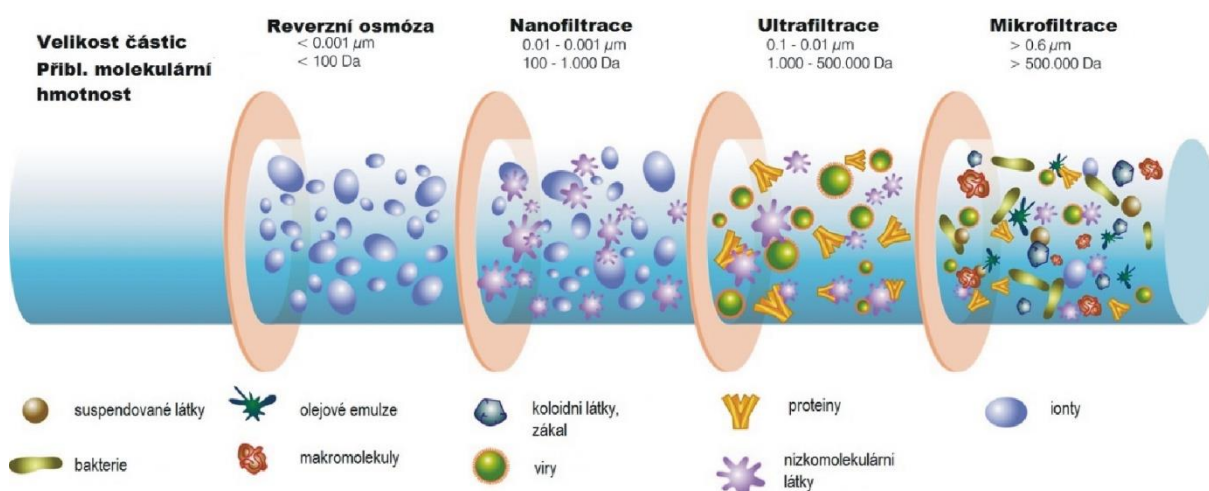
2.4 TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY

2.4.1 Rozdělení tlakových membrán

Membránové separační procesy se vyznačují svými specifickými vlastnostmi, mezi něž řadíme selektivitu a polopropustnost membrány. V případě, kdy je hnací silou gradient tlaku, je selektivita procesu dána:

- rozdílnou velikostí pórů membrány a separovaných částic,
- rozdílnými povrchovými vlastnostmi membrány,
- rozdílnou difúzí či rozpouštěním některých separovaných složek v části aktivní vrstvy membrány [14, 37, 41, 46].

Pod název tlakové membránové separační procesy obvykle zahrnujeme pojmy mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a reverzní osmóza (RO). Tyto procesy lze ještě rozdělit na nízkotlaké (MF a UF) a vysokotlaké (NF a RO) [14, 37, 41, 46]. Na obrázku 10 je znázorněn rozptyl velikostí separovaných částic a přibližná molekulární hmotnost částic, které je schopen daný proces separovat [51]. Velikosti separovaných částic a molekulární hmotnosti částic jsou pouze orientační. Výsledný účinek ovlivňuje použitý materiál membrány a jeho vlastnosti.



Obrázek 10: Rozdělení membránových procesů podle velikosti separovaných molekul [51]

2.4.2 Mikrofiltrace

Mikrofiltrace je separační proces, který se nejvíce přibližuje klasické filtraci, protože zde není potřebný tak vysoký tlak. Rozdíl tlaku na membráně bývá nižší v rozmezí 0,7–2 barů [41, 48, 52]. Membrány se vyrábějí jak z organických, tak anorganických materiálů a používají se jak symetrické porézní, tak asymetrické porézní, popřípadě i kompozitní. Velikost pórů je v rozmezí 0,1–10 μm . MF odstraňuje například: bakterie, makromolekuly, suspendované pevné látky nebo olejové emulze. Využití MF nachází zejména v čištění odpadních vod, ve výrobě velmi čisté vody pro farmaceutický, potravinářský či energetický průmysl. Rovněž se používá jako předfiltr pro následné procesy UF, NF, RO [14, 16, 17, 37, 38, 41, 47, 48, 53].

2.4.3 Ultrafiltrace

Ultrafiltrace je separační proces, který se svými vlastnostmi řadí mezi mikrofiltraci a nanofiltraci. Na ultrafiltračních membránách dochází k separaci makromolekulárních a koloidních látek o molekulární velikosti větší než 1 000–100 000 Da. Stejně jako u mikrofiltrace i zde se používají symetrické a asymetrické porézní membrány. Membrány mohou být vyráběny z organických i anorganických materiálů. Jako materiál pro výrobu membrán bývá nejčastěji použit polysulfon, polyakrylonitril, polyamid nebo keramika. Velikost pórů je v rozmezí 10–500 nm a kvůli menší velikosti pórů vzniká větší hydrodynamický odpor a je zapotřebí i větší rozdíl tlaku na membráně, a to 1–10 barů [16, 18, 19, 36, 37, 46, 52, 52, 56, 57]. Ultrafiltrační membrány bývají často předřazeny před NF a RO jako dostačující předseparace velkých molekul, které by mohly NF nebo RO zanášet. UF na rozdíl od MF separuje i proteiny a viry. Díky těmto vlastnostem se běžně používá jako mechanická dezinfekce vody [14, 37, 38, 41, 48].

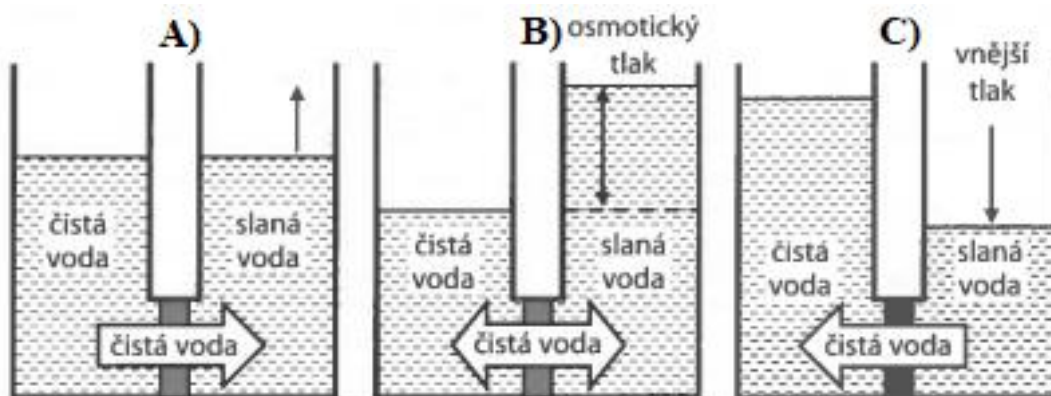
2.4.4 Nanofiltrace

Nanofiltrační proces řadíme již mezi vysokotlaké procesy z toho důvodu, že rozdíl tlaků na membráně bývá 10–25 barů [41]. Takto vysoký tlak je zapříčiněn malou velikostí pórů, a to do 2 nm. Separace zde probíhá na principu rozpouštění a difúze v aktivní vrstvě membrány. Membrány se používají kompozitní s obvykle používaným materiálem polyamidem. V takovýchto podmínkách jsou primárně oddělovány organické látky s nízkou molekulovou hmotností větší než 200–1 000 Da. Anorganické látky jsou separovány s účinností < 50 % jednovalentní soli a dvouvalentní soli s účinností > 90 %. Bakterie a viry jsou separovány s účinností < 99 %. A rozpuštěné látky s molekulovou hmotností > 100 jsou separované > 50 %, kdežto s molekulovou hmotností < 100 jsou separované pouze z 0 až 50 %. Díky těmto schopnostem se NF využívá při odstraňování dusičnanů, změkčování vody nebo k úpravě produktů v potravinářském či mlékárenském průmyslu a dalších [14, 16, 17, 37, 38, 41, 43, 48, 53].

2.4.5 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza funguje na principu separace látek z prostředí o vyšším osmotickém tlaku do prostředí o nižším osmotickém tlaku. Osmóza probíhá ve dvou nádobách s kapalinou o různých koncentracích, které jsou spojeny polopropustnou membránou (obrázek 11A). V případě působení stejného vnějšího tlaku na povrch kapaliny v obou nádobách dojde k transportu molekul vody do nádoby s vyšším obsahem soli (obrázek 11B). Reverzní osmóza tedy využívá toho, že působíme vnější silou na jednu stranu membrány a skrze membránu dochází k transportu molekul vody a penetrantů (obrázek 11C). Jedná se tedy o separační princip rozpouštění-difúze. Membrány se používají asymetrické nebo kompozitní s vysokým hydrodynamickým odporem. RO membrány jsou nejběžněji vyráběny z materiálu acetát celulózy nebo z polyamidu. Rozdíl tlaků na membráně bývá 15–80 barů. Na RO se separují ionty a molekuly až na molekulovou hmotnost, která je menší než 10 Da. Proces RO se využívá k odsolování mořské a brakické vody. Dále se používá ke zkoncentrování v potravinářském průmyslu nebo pro zkoncentrování odpadních vod. Ve většině aplikací

je potřeba, aby tomuto procesu předcházela předúprava (např. koagulace, flotace, sedimentace, MF nebo UF) [14, 16, 17, 37, 38, 40, 41, 43, 46, 53].



Obrázek 11: Princip osmózy a reverzní osmózy [upraveno dle 41]

Při produkci retentátu se prudce zvyšuje salinita a může docházet ke krystalizaci. Proto se před systém RO zařazují dávkovače antiskalantu. Antiskalant umožňuje přesycení bez rizika srážení, tvorby nebo růstu krystalů. Obzvláště nebezpečný může být vysoký obsah křemičitého vodního kamene. V těchto případech se vstupní voda ještě musí předupravovat, aby se zabránilo srážení na membráně [14].

2.5 APLIKOVATELNOST TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

Tlakové membránové separační procesy se využívají téměř všude ve výrobních procesech, ať už při zpracování produktu v potravinářském průmyslu nebo i při výrobě čisté vody. Tak membrány nacházejí i své důležité postavení při čištění odpadních vod a s tím je spojené opětovné využívání vod, například vod dešťových, bazénových odpadních vod nebo prádelenských odpadních vod [18, 19, 36, 37, 42, 57]. V následujících podkapitolách jsou rozepsány příklady aplikace na opětovné využívání odpadních prádelenských vod a na netradiční, ale stále více diskutované téma získávání užitkové či dokonce pitné vody z vyčištěné odpadní vody odtékající z ČOV.

2.5.1 Opětovné využívání odpadních prádelenských vod

Pro opětovné použití vody je nutné většinou snížit obsah suspendovaných i rozpuštěných pevných látek. Ke snížení celkového obsahu rozpuštěných látek se ve většině systémů používají NF membrány nebo membrány pro RO. Vzhledem k vysokému zatížení suspendovanými látkami, oleji a tuky však nelze NF a RO použít bez předúpravy. NF membrána není však zcela schopná separovat jednovalentní ionty, a dochází tedy pouze k částečnému snížení alkality. Pro předúpravu se často využívá MF nebo UF. Obecně lze získat 80–85 % vody, která se jinak jako odpadní voda posílá do kanalizace [53].

Procesu koagulace a membránové filtrace využívá Šostar-Turk S. a kol. pro opětovné využití odpadní vody z praní prádla. Zpracování vody probíhalo pomocí dvou typů metod, které byly porovnávány výkonností a ekonomickou zátěží. Zpracování probíhalo pomocí konvenční metody, a to konkrétně s využitím koagulačního a flokulačního procesu společně s adsorpcí na GAU, a druhým typem metod, a to alternativními metodami UF a RO. Pro UF byl použit

trubkový modul s keramickou membránou. Do RO systému byl nástřik zaveden pod vysokým tlakem 20–30 barů do spirálově vinutého modulu a membrána byla z polyethersulfonového materiálu. Ultrafiltrace nedostatečně přečistila odpadní vodu, a proto bylo nutné použít RO, která již velmi spolehlivě odseparovala zbylé znečištění. Objem vypouštěné koncentrované vody je 20 % z vyčištěné vody. Zjištěním ve studii bylo, že alternativní metody dosahují lepších účinností a nespotřebovávají chemikálie, čímž mají pozitivní ekologický dopad, avšak alternativní metody jsou dražší než konvenční metody. Do budoucna se očekávají nižší náklady s rostoucím využíváním membrán [54].

V článku Hoinkise a Pantena se využívají přímo membránové procesy pro opětovné využívání odpadní vody z prádelny. Pro mycí proces je dostačující kvalita vody z permeátu membránového bioreaktoru, který obsahuje ponořené deskové rámy s mikrofiltračními membránami. Pro splnění požadované kvality vody pro oplachování je zapotřebí daný permeát ještě upravit reverzní osmózou. Zde použili spirálově vinutých modulů za účelem odstranění solí. Průměrný tok RO jednotky byl $25\text{--}30\text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ při přibližně 16 barech. Míra retence soli přesahuje 99 %. Ve studii došli k závěru, že lze znovu využít až 90 % celkových odpadních vod, ale proces MBR a RO vytváří dva druhy odpadu, který je třeba zlikvidovat. Přebytečný kal je skladován v samostatné nádrži a je odebírán komerčními podniky nakládajícími s odpady. Koncentrát z úpravy RO je odváděn do městské čistírny [55].

Mimo výše zmiňované hovoří i další studie o využívání membránových procesů pro úpravu odpadní vody pro její opětovné využití. Využívají zejména MF, UF a NF, ale zmiňují, že pro oplachovou vodu je nutné zařadit RO. Mycí voda může pocházet z UF či NF, aby byla dostatečné kvality. Kvalita oplachovací vody však musí být bez rozpuštěných solí a je nutné využívat reverzní osmózu. Mimo membránové procesy v některých studiích využívají i pokročilé oxidační procesy pro degradaci povrchově aktivních látek, které zapříčiňují vysokou CHSK v odpadní vodě z prádelen [16, 17, 56–61].

Z dostupné literatury je vytvořena Tabulka 5, kde je sepsán přehled složení odpadní vody z prádelen. Data pocházejí ze studií, které řešily problematiku prádelenských odpadních vod. Některé ze studií aplikovaly membránové separační postupy, jiné používaly konvenční metody separace či degradace pomocí pokročilých oxidačních procesů.

Tabulka 5: Přehled složení odpadní vody z prádelen

Zdroj / Ukazatele	Komerč. prádelna [62]	Domáci prádelna [56]	Komerč. prádelna [63]	Komerč. prádelna [56]	Nemoc. prádelna [63]	Komerč. prádelna [54]	Komerč. prádelna [53]	Komerč. prádelna [53]	Komerč. prádelna [55]	Komerč. prádelna [55]	Komerč. prádelna [59]
pH [-]	5,4 ± 2,5	7,88–10,32	9–11	9,2 ± 0,5	11,4–6	9,6	8,26	11,6	9–11	10,8–11,5	7,5–8,5
Teplota [°C]		30–34				62			15–30	30–40	
Vodivost [μS·cm ⁻¹]		190–1 400	640–3 000	715 ± 20	808–2 000		640	1 000–2 000	1 900	2 000	1 800–2 300
RL [mg·l ⁻¹]		640–1 455	420	400 ± 20	456–800		420	800			
NL [mg·l ⁻¹]	0,05 ± 0,03	445–1 550	4–7 000	60 ± 20	66–71	35	69	67			
CHSK [mg·l ⁻¹]	1 434 ± 453	376–910	80–212 000	628 ± 20	477–876	280			1 050	700	686–1 088
BSK ₅ [mg·l ⁻¹]		48–1 200	218–9 810		44–55	195	262	44			190–210
NO ₃ ⁻ [mg·l ⁻¹]	6,6 ± 1,6										
NH ₄ ⁺ [mg·l ⁻¹]	10,6 ± 3					2,45					
Cel. N [mg·l ⁻¹]						2,75			40	8	
Cel. P [mg·l ⁻¹]						9,9					
PO ₄ ³⁻ [mg·l ⁻¹]	145,4 ± 49		3,43		10,8–167		3,43	167	5	7	

2.5.2 Výroba pitné vody z vody odpadní

S rychlým růstem populace je kladen důraz na zvyšující se množstevní nároky na vodu, avšak použitelné vody v okolí měst ubývá. Jako řešení se nabízí opětovné využívání komunálních odpadních vod. Tyto odpadní vody jsou nejprve přečištěny na městských čistírnách odpadních vod a poté jsou ve většině případů vypouštěny do recipientu. Použitelným řešením jak produkovat kvalitní průmyslově aplikovatelnou vodu, užitkovou vodu nebo dokonce pitnou vodu, je proces tlakové membránové separace. Pro produkci pitné vody je však po aplikaci reverzní osmózy nutná následná remineralizace [16–18]. Vstupní vodou je tedy přečištěná odpadní voda z ČOV, která podle nařízení vlády č. 401/2015 Sb. ve znění pozdějších předpisů [7] musí být v legislativních mezích dle Tabulky 6.

Tabulka 6: Emisní standardy: přípustné hodnoty (p), maximální hodnoty (m) a hodnoty průměru (prů) pro koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ [7]

Kategorie ČOV (EO)	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄ ⁺		N _{celk}		P _{celk}	
	p	m	p	m	p	m	prů	m	prů	m	prů	m
<500	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	8
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 přečištěných odpadních vodách z ČOV lze očekávat převážně mikropolutanty z řad farmaceutik, produktů osobní péče či mikroplastů. Mezi tyto 3 kategorie řadíme velmi mnoho látek, přičemž každá látka je odstraňována s jinou účinností a tak se stává, že některé mikropolutanty se dostávají do recipientu [64–66].

2.6 KONCENTRÁT Z REVERZNÍ OSMÓZY

Definice koncentráту je uvedena v kapitole 2.3. Tato práce se zabývá klasifikací koncentráту a to z důvodu, že koncentrát může obsahovat vysoké koncentrace solí. Koncentrace mohou dosahovat takových hodnot, kdy je vyžadováno speciální nakládání s takovými vodami. Vysoký obsah dokládají publikované výsledky z analýz koncentráту z membránových procesů souhrnně sepsané v Tabulkách 7 a 8.

2.6.1 Specifikace koncentráту z prádelenských vod

Problematika použití membránových procesů na odpadní vody pocházející z prádelen je řešena pouze v pár studiích. Navíc většina ze studií se nezabývá nakládáním s koncentrátem ani jeho klasifikací. Je řešena primárně funkčnost technologie pro opětovné použití vody. Ukazatele nacházející se v koncentrátu z membránových procesů použité na prádelenské odpadní vody jsou vypsány v Tabulce 7.

Tabulka 7: Publikované výsledky analýz koncentrátu z membránových procesů pocházející z prádelenské odpadní vody

Zdroj	Nanofiltrace [53]	Poloprovoz – Reverzní osmóza [55]	Reverzní osmóza [55]
Ukazatele			
pH [-]	11,3	8–9	8–9
Vodivost [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	3 000–4 000	5 000–8 000	5 000–6 000
RL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	1 000–2 000		
NL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	300		
CHSK [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		Maximálně 400	Maximálně 100
PO_4^{3-} [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	470		
Pb [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		<0,02	
Cu [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		0,015	
Celk. Cr [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		0,032	
Ni [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		0,05	
Zn [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]		1,5	

2.6.2 Specifikace koncentrátu z upravené komunální odpadní vody

Membránové procesy se velmi často používají pro produkci užitkové vody, v některých oblastech světa i pro produkci pitné vody z přečištěné vody odtékající z komunální ČOV. V Tabulce 8 je vypsáno pár vybraných studií, které monitorovaly i základní kationty [19–25, 67, 68].

Tabulka 8: Publikované výsledky analýz koncentrátu z RO pocházející z upravené komunální odpadní vody

Zdroj Ukazatele	Komunál. ČOV [20]	Komunál. ČOV [25]	Komunál. ČOV [19]	Komunál. ČOV [19]	Komunál. ČOV [68]	Komunál. ČOV [67]	Komunál. ČOV [21]	Komunál. ČOV [24]	Komunál. ČOV [22]	Komunál. ČOV [23]
pH [-]	8,8	7,9	8,03 ± 0,08	7,98 ± 0,11	7,7 ± 0,2	8,5	8,3	7,5	7,2	7,7 ± 0,2
Vodivost [μS·cm ⁻¹]	3 800	1 016	5 020 ± 110	4 890 ± 150	1 110 ± 500	2 820	5 960	2 350	1 895	2 350 ± 1 300
RL [mg·l ⁻¹]		5 500			5 500 ± 300	1 685		2 250	1 215	16 600 ± 800
CHSK [mg·l ⁻¹]		80–90	173 ± 8	166 ± 4	164 ± 7,8	65	77,0			120 ± 19
BSK ₅ [mg·l ⁻¹]		20–22					2,2			
NO ₂ ⁻ [mg·l ⁻¹]		0,190	0,37 ± 0,02	0,33 ± 0,03	5,7 ± 0,3			1,3–1,5		
NO ₃ ⁻ [mg·l ⁻¹]		7,2	11,46 ± 1,76	13,81 ± 0,04	164 ± 7	35	83,7	23–26	83,2	
NH ₄ ⁺ [mg·l ⁻¹]		0,054	7,4 ± 0,3	9,2 ± 0,1	3,35 ± 0,13		3,23			
Cel. N [mg·l ⁻¹]	32	74–76			43,2 ± 2,2		22,9			21,4 ± 4,5
Cel. P [mg·l ⁻¹]	8	23,5			13,1 ± 0,4					28,5 ± 1,1
PO ₄ ³⁻ [mg·l ⁻¹]						38	3,96	8–9	28,7	
Cl ⁻ [mg·l ⁻¹]	954		1 229 ± 25	1 018 ± 3		780	1540	400–650	337,8	7,7 ± 1,8
Na ⁺ [mg·l ⁻¹]	600					529	1 065	330–360	300,5	
K ⁺ [mg·l ⁻¹]					187 ± 7,4	66	135	55–63	55,7	
Ca ²⁺ [mg·l ⁻¹]	47				68 ± 2,7	68	477	80–93	91,8	
Mg ²⁺ [mg·l ⁻¹]	53				122 ± 6,2	56	145	65–72	14,7	
Fe ³⁺ [mg·l ⁻¹]						8				
Zn ²⁺ [mg·l ⁻¹]						20				

3 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je vyhodnocení procesů opětovného využívání odpadních vod z hlediska charakterizace vznikajících odpadních proudů a zhodnocení možností jejich likvidace v souladu s legislativními požadavky. Konkrétně se zaměříme na koncentrát produkovaný reverzní osmózou a jeho klasifikaci. Sledované ukazatele byly vybrány z platných limitů z nařízení vlády č. 401/2015 Sb. pro vypuštění odpadní vody do recipientu, dále z limitů kanalizačního řádu společnosti zajišťující kanalizaci, která vychází z vodního zákona a z vyhlášky o vodovodech a kanalizacích (viz kapitola 2.1.2.2.). A dále z limitů vycházejících ze zákona o odpadech (viz kapitola 2.1.2.1) ohledně klasifikace odpadu, zda se jedná o nebezpečný odpad, či nikoliv.

Vzhledem k tomu, že firmou ASIO TECH spol. s r.o. byly vybrány dvě odběrové lokality, tak je nutné se zamyslet, jaké limity je nutné dodržovat. U odběrové lokality Čistírna odpadních vod je nutné dodržovat hlavně limity pro nebezpečný odpad, neboť ČOV je schopná řídit vypouštění koncentráту na vstupní nátok do ČOV podle aktuální nárokové situace na ni samotnou. Kdežto u druhé lokality, Průmyslové prádelny, je nutné ověřit, zda splňuje limity pro vypouštění do kanalizace a dále zda se dokonce nemůže jednat o nebezpečný odpad.

Dalším důležitým cílem je správně provést vzorkování a laboratorní analýzu získaných vzorků. A následně získaná data statisticky vyhodnotit a porovnat s platnými limity, zda je možné koncentrát vypouštět do kanalizace a zda není klasifikován jako nebezpečný odpad.

Hlavními body cíle práce jsou:

- Připravit plán vzorkování.
- Pro sledované ukazatele vyhledat platný kanalizační řád pro danou lokaci.
- Laboratorní analýza získaných vzorků a jejich statistické zpracování.
- Vyhodnocení výsledků, zda splňují požadované limity.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Použité chemikálie, přístroje, software a pomůcky

- Destilovaná voda, FCH VUT, ČR
- Deionizovaná voda (0,054 μS), Milli-Q® Academic, Millipore, Merck spol. s r.o., ČR
- Kyselina dusičná, ANALPURE®, Analytika s.r.o., ČR
- Kyselina sírová, p.a., Merci s.r.o, ČR
- Dichroman draselný, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Kyselina sírová, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Síran rtuťnatý, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Síran stříbrný, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Hydrogenftalan draselný, p.a., PENTA s.r.o., ČR
- Souprava Spectroquant® pro stanovení dusičnanů, Merck spol. s r.o., ČR
- Souprava Spectroquant® pro stanovení dusitanů, Merck spol. s r.o., ČR
- Souprava Spectroquant® pro stanovení amonných iontů, Merck spol. s r.o., ČR
- Souprava Spectroquant® pro stanovení CHSK_{Cr} , Merck spol. s r.o., ČR
- Dihydrogenfosforečnan draselný, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Hydrogenfosforečnan didraselný, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného, p.a., LACHEMA a.s., ČR
- Chlorid amonný, LACHEMA a.s., ČR
- Síran hořečnatý krystalický (heptahydrát), LACHEMA a.s., ČR
- Chlorid vápenatý dihydrát, p.a., PENTA s.r.o., ČR
- Chlorid železitý bezvodý, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- D-glukóza bezvodá, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- Kyselina L-glutamová, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- N-allylthiomocovina, čistota 98 %, Sigma-Aldrich Chemie GmbH, DEU
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® AN9090MN 100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (5% HNO_3), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® P 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (0,05% H_2SO_4), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Sb 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (10% HCl), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Sn 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (10% HCl), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Te 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (20% HCl), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® U 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (2% HNO_3), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Ag 1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (2% HNO_3), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® CZ9087MC1 100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (20% HCL), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR

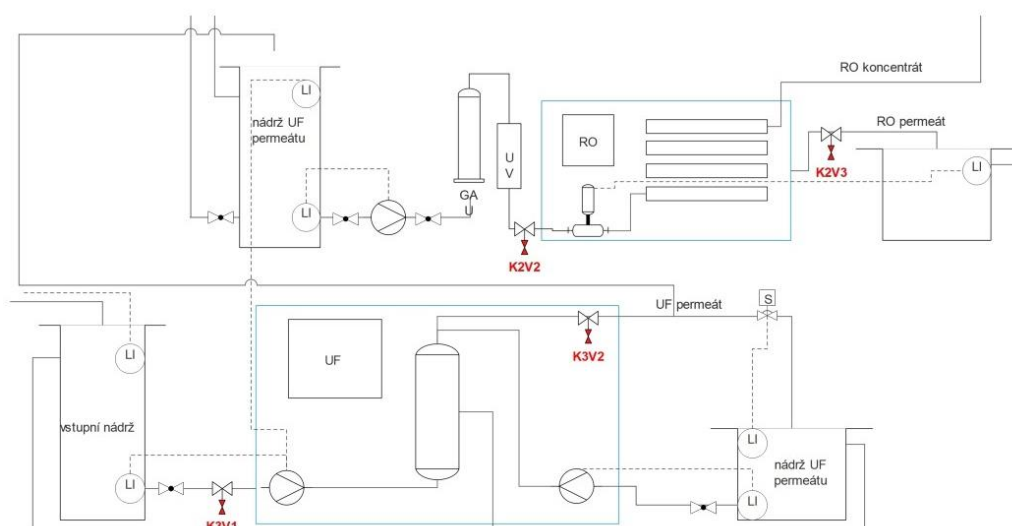
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Sc 1 g·l⁻¹ (2% HNO₃), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® Li 1 g·l⁻¹ (2% HNO₃), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Vodný kalibrační roztok ASTASOL® In 1 g·l⁻¹ (2% HNO₃), ANALYTIKA®, spol. s r.o., ČR
- Ladicí roztok pro ICP-MS (2% HNO₃), Agilent Technologies, Inc., USA
- Roztok pro stanovení P/A faktoru č.1 (5% HNO₃), Agilent Technologies, Inc., USA
- Roztok pro stanovení P/A faktoru č.2 (10% HCl, 1% HNO₃ a stopové množství HF), Agilent Technologies, Inc., USA
- Kapalný Ar (čistota ≥ 99,996 %), SIAD Czech spol. s r.o., ČR
- Kapalné He (čistota ≥ 99,999 %), SIAD, Czech spol. s r.o., ČR
- Analytické váhy HR-120-EC, A&D Company, JPN
- Běžné laboratorní sklo
- Kyslíkové lahve podle Winklera
- Odpařovací miska
- Vzorkovnice 1000 ml, HDPE
- Polypropylénové sterilní uzavíratelné zkumavky (VWR®: 15 ml, 50 ml; metal free), VWR International, USA
- Automatické pipety (různé rozsahy), Eppendorf, DEU
- Filtry ze skelného mikrovlákná GF/C™, GE Healthcare UK Limited, GBR
- Membránový filtr, Pragopor 5; Pragochema, ČR
- Pec laboratorní muflová, LAC s.r.o, ČR
- Sušárna laboratorní, model 500, Memmert GmbH + Co.KG, DEU
- Laboratorní chlazený inkubátor serie Q-Cell, Verkon s.r.o, ČR
- Vakuová pumpa MV-2, Ser. No. 25939201, Vacuubrand GmbH + Co.KG, DEU
- Míchačka elektrom. typ MM4, Lavat Chotutice, ČSR
- Oxymetr přenosný, Greisinger GMH 3651, GHM Group, DEU
- Termostat Spectroquant® TR 620, Merck spol. s r.o., ČR
- Atomový absorpční spektrometr AMA 254, Altec s.r.o., ČR
- Spektrofotometr SPECORD 40, Analytik Jena, DE
- Spektrofotometr UV/VIS Spectroquant ® Prove 300, Merck KGaA, DEU
- Křemenná kyveta, 1 cm; Hellma, DE
- pHTester 20, Oakton, USA
- EC/TDS/SALT Testr 11+ multi-range, Oakton, USA
- Multimetr HI 5522, Hanna Instruments Czech s.r.o., ČR
- ICP-MS, Agilent 7900 Agilent Technologies, Inc., USA
- Agilent SPS 4 autosampler, Agilent Technologies, Inc., USA
- Agilent MassHunter software, Agilent Technologies, Inc., USA
- MS Excel, Microsoft Corporation, USA
- R v 4.2.2, The R Foundation for Statistical Computing, AUT
- RStudio 2022.12.0 Build 353, Posit Software, PBC, USA

4.2 Poloprovozní membránová jednotka

V této práci byla využita pilotní poloprovozní membránová jednotka, kterou nakonfigurovala a sestrojila firma ASIO TECH spol. s r.o. Poloprovozní membránová jednotka (jejíž fotodokumentace je součástí přílohy G) je složena z ultrafiltrace, granulovaného aktivního uhlí, UV lampy a reverzní osmózy. UV lampa zde plní úlohu sterilizace nástřiku na RO, aby byla zajištěna ochrana membrány před biofoulingem, tedy před vznikem biofilmu na membránách.

4.2.1 Odběrová lokace: Čistírna odpadních vod

Pilotní poloprovozní jednotka využitá na lokalitě čistírny odpadních vod je schématicky znázorněná na obrázku 12. Vstupní voda proudila z odtoku přečištěné odpadní vody z ČOV vstupní nádrže, odkud byla čerpána s inline dávkováním koagulantu Preflok ($150 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$, $68\text{--}70 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$) přes ultrafiltrační membránu (specifikace v Tabulce 9) do nádrže permeátu. Z naakumulovaného permeátu byla voda čerpána přes GAU a UV lampu na RO membránu (specifikace v Tabulce 10).



Obrázek 12: Schéma pilotní poloprovozní jednotky umístěné v lokaci ČOV [upraveno dle 69]

Tabulka 9: Technické specifikace a provozní nastavení ultrafiltrace [70]

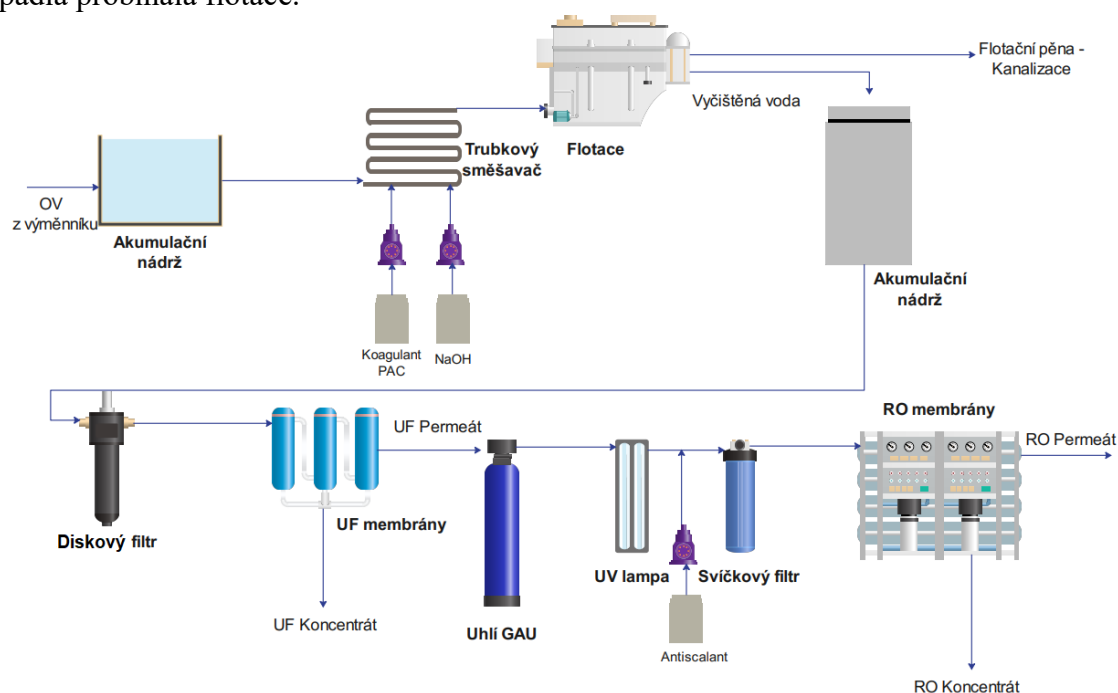
Membránový modul	inge multibore® 1.5 dizzer® XL1.5 MB 40
Materiál pouzdra	Neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U)
Maximální systémový tlak	5 bar
Teplotní rozsah	1–40 °C
Materiál membrány	Polyethersulfon (PES)
Konfigurace membrány	Kapilární membrána
Počet kapilár ve vlákně	7
Aktivní povrch membrány	40 m ²
Velikost pórů	Přibližně 0,02 μm
Typ filtrace	Dead-end
Mód filtrace	Inside-out
Transmembránový tlak	0,7/0,5 bar
Průtok na vstupu	2,2 m ³ ·h ⁻¹

Tabulka 10: Technické specifikace a provozní nastavení reverzní osmózy [71]

Membrána	CSM® 4040-BLF, Toray Advanced Materials Korea
Materiál membrány	Polyamid (PA)
Typ membrány	Tenkvrstvý kompozit
Konfigurace membrány	Spirálově-vinutá
Garantovaný průtok permeátu	9,5 m ³ ·den ⁻¹
Normální rejekce soli	99,2 %
Efektivní membránová plocha	7,9 m ²
Maximální operační tlak	41,4 bar
Maximální operační teplota	45 °C
Operační rozsah pH	3,0–10,0
Počet membrán v sérii	4
Transmembránový tlak	5,5/4,5 bar
Průtok na vstupu	1 m ³ ·h ⁻¹
Průtok permeátu	0,5 m ³ ·h ⁻¹
Průtok koncentrátu	0,25 m ³ ·h ⁻¹
Průtok recirkulace	1,2 m ³ ·h ⁻¹
Antiskalanť Vitec™ 3000	5 g·m ⁻³

4.2.2 Odběrová lokace: Průmyslová prádelna

Pilotní poloprovozní jednotka využitá na lokalitě průmyslové prádelny je schématicky znázorněná na obrázku 13. Vstupní voda proudila skrze tepelný výměník do zásobní nádrže (0,5 m³). Prádelna disponuje teplemým výměníkem, který je využíván pro zpětné získávání tepla z odpadní vody, ale je i nutnou předúpravou pro použítou technologii pilotní poloprovozní jednotky. Nutnost použití je z důvodů: zvýšení rozpustnosti vzruchu při flotačním procesu, zvýšení permeability a omezení teplotní stability materiálu membrán (viz kapitola 2.3.2.4). Ze zásobní nádrže byla voda čerpána do flotační nádrže (2 m³), kde pomocí recirkulačního čerpadla probíhala flotace.



Obrázek 13: Schéma pilotní poloprovozní jednotky umístěné v lokaci průmyslové prádelny

V období 28.4.2022–19.5.2022 byl ve flotačním procesu použit flokulant ($1,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) a koagulant PAC ($400 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$). Předčištěná voda z flotace byla čerpána na UF membránu (specifikace v Tabulce 11), odkud byl permeát čerpán přes GAU a UV lampu na RO membránu (specifikace v Tabulce 12).

V období 25.8.2022–29.8.2022 byl ve flotačním procesu použit koagulant PAC ($700 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$) a NaOH 30% ($280\text{--}350 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$). Navazující procesy zůstaly zachovány jako v předcházejícím období, tedy podle specifikace v Tabulce 11 a 12.

Tabulka 11: Technické specifikace a provozní nastavení ultrafiltrace 28.4.2022–29.8.2022 [72]

Membránový modul	Pentair x-flow compact 1.2
Materiál pouzdra	PVC
Maximální systémový tlak	8 bar
Teplotní rozsah	Do $40 \text{ }^\circ\text{C}$
Materiál membrány	Polyvinylidenfluorid (PVDF)
Konfigurace membrány	Tubulární membrána
Aktivní povrch membrány	$1,2 \text{ m}^2$
Velikost pórů	Přibližně $0,03 \text{ }\mu\text{m}$
Typ filtrace	Cross-flow
Mód filtrace	Inside-out
Transmembránový tlak	$0,4/0,2 \text{ bar}$
Průtok na vstupu	$2,2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$

Tabulka 12: Technické specifikace a provozní nastavení reverzní osmózy 28.4.2022–29.8.2022 [71]

Membrána	CSM® 4040-BLF, Toray Advanced Materials Korea
Materiál membrány	Polyamid (PA)
Typ membrány	Tenkvrstvý kompozit
Konfigurace membrány	Spirálově-vinutá
Garantovaný průtok permeátu	$9,8 \text{ m}^3\cdot\text{den}^{-1}$
Normální rejekce soli	99,2 %
Efektivní membránová plocha	$7,9 \text{ m}^2$
Maximální operační tlak	41,4 bar
Maximální operační teplota	$45 \text{ }^\circ\text{C}$
Operační rozsah pH	3,0–10,0
Transmembránový tlak	$8,3/7,2 \text{ bar}$
Průtok na vstupu	$0,4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
Průtok permeátu	$0,1 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
Průtok koncentráту	$0,2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
Antiskalant Vitec™ 3000	$6 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$

V období 29.8.2022–18.1.2023 nebyl změněn flotační proces, byl tedy použit koagulant PAC ($700 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$) a NaOH 30% ($280\text{--}350 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$). Byly ale změněny použité membrány, kdy předčištěná voda z flotace byla nastříkována na UF membránu (specifikace v Tabulce 13), odkud byl permeát čerpán přes GAU a UV lampu na RO membránu (specifikace v Tabulce 14).

Tabulka 13: Technické specifikace a provozní nastavení ultrafiltrace 8.12.2022–18.1.2023 [73]

Membránový modul	inge multibore® 0.9 dizzer® P 4040-6
Materiál pouzdra	PVC-U
Maximální systémový tlak	10 bar
Teplotní rozsah	1–40 °C
Materiál membrány	PES
Konfigurace membrány	Kapilární membrána
Počet kapilár ve vlákne	7
Aktivní povrch membrány	6 m ²
Velikost pórů	Přibližně 0,02 μm
Typ filtrace	Cross-flow
Mód filtrace	Inside-out
Transmembránový tlak	0,4/0,1 bar
Průtok na vstupu	1 m ³ ·h ⁻¹
Průtok permeátu	0,5 m ³ ·h ⁻¹
Průtok koncentrátu	0,5 m ³ ·h ⁻¹

Tabulka 14: Technické specifikace a provozní nastavení reverzní osmózy 8.12.2022–18.1.2023 [74]

Membrána	CSM® 4040-BLN, Toray Advanced Materials Korea
Materiál membrány	Polyamid (PA)
Typ membrány	Tenkvrstvý kompozit
Konfigurace membrány	Spirálově-vinutá
Garantovaný průtok permeátu	9,8 m ³ ·den ⁻¹
Normální rejekce soli	99,2 %
Efektivní membránová plocha	7,9 m ²
Maximální operační tlak	41,4 bar
Maximální operační teplota	45 °C
Operační rozsah pH	3,0–10,0
Transmembránový tlak	10,7/10,5 bar
Průtok na vstupu	0,95 m ³ ·h ⁻¹
Průtok permeátu	0,35 m ³ ·h ⁻¹
Průtok koncentrátu	0,15 m ³ ·h ⁻¹
Antiskalant Vitec™ 3000	6 ml·h ⁻¹

4.3 Vzorkování

Vzorkování probíhalo podle platných norem: ČSN EN ISO 5667–1 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 1 Návod pro návrh programu vzorkování a pro způsoby odběru vzorků [75], ČSN EN ISO 5667–3 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 3: Konzervace vzorků vod a manipulace s nimi [78], ČSN ISO 5667–10 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 10 Návod pro odběr vzorků odpadních vod [76] a ČSN EN ISO 5667–14 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 14 Návod pro prokazování a řízení kvality odběru vzorků vod a manipulace s nimi [77].

Vzorky do diplomové práce byly odebírány ze dvou odběrových lokací, a to z městské čistírny odpadních vod o počtu ekvivalentních obyvatel 640 000 a z průmyslové prádelny, která obsahovala dvě prací linky a dále šest velkoobjemových praček s celkovou kapacitou zpracování 22 tun prádla denně. Při vzorkování byl brán ohled na specifické požadavky sledovaných ukazatelů, které jsou souhrnně sepsány v příloze C. Vzorky byly odebírány tak, aby bylo zamezeno jejich kontaminaci a zároveň byl odebrán procesní blank. Vše bylo provedeno pro splnění reprezentativnosti vzorků a minimalizace chyb při vzorkování.

4.3.1 Plán vzorkování odběrové lokace: Čistírna odpadních vod

Před samotným vzorkováním byl vytvořen vzorkovací plán, který zahrnuje:

- Vzorkovací období
 - 9.11.2021–7.6.2022
- Typ vzorkování
 - Aktivní vzorkování – prostý vzorek
- Místo a počet odběrů vzorku
 - Jedno vzorkovací místo (plastová výpusť koncentrátu z RO) a 13 odběrů vzorku
- Specifikace vzorkovnic
 - Nové čisté vzorkovnice z HDPE o objemu 1 litr
- Způsob úpravy vzorků
 - Filtrace 0,6 mikronovým membránovým filtrem
- Uchovávání a konzervace vzorků
 - Uchovávání vzorku v ledničce při 4 °C
 - Konzervace části vzorku pro prvkovou analýzu pomocí 1 ml koncentrované HNO₃ na 100 ml vzorku

4.3.2 Plán vzorkování odběrové lokace: Průmyslová prádelna

Před samotným vzorkováním byl vytvořen vzorkovací plán, který zahrnuje:

- Vzorkovací období
 - 28.4.2022–18.1.2023
- Typ vzorkování
 - Aktivní vzorkování – prostý vzorek
- Místo a počet odběrů vzorku
 - Jedno vzorkovací místo (plastová výpusť koncentrátu z RO) a 12 odběrů vzorku
- Specifikace vzorkovnic
 - Nové čisté vzorkovnice z HDPE o objemu 1 litr
- Způsob úpravy vzorků
 - Filtrace 0,6 mikronovým membránovým filtrem
- Uchovávání a konzervace vzorků
 - Uchovávání vzorku v ledničce při 4 °C
 - Konzervace části vzorku pro prvkovou analýzu pomocí 1 ml koncentrované HNO₃ na 100 ml vzorku

4.4 Sledované ukazatele

Sledované ukazatele byly vybrány podle legislativy o nebezpečném odpadu a podle limitů kanalizačního řádu. Pro lokalitu čistírny odpadních vod je řešena pouze legislativa o nebezpečném odpadu, poněvadž ČOV si s produkovanou odpadní vodou dokáže poradit. V případě lokality průmyslové prádelny jsou řešeny jak limity pro nebezpečný odpad, tak limity kanalizačního řádu ze sledované lokality. Celkem je sledováno 34 ukazatelů, které jsou souhrnně sepsány v příloze C.

4.4.1 Stanovení základních fyzikálně-chemických parametrů

Stanovení pH, vodivosti a teploty probíhalo přímo na místě vzorkování mobilním pH metrem a konduktometrem (ECTestr 11+). Přístroj byl ponořen tak, aby byla sonda pod hladinou a bylo vyčkáno, dokud se hodnota neustálí. Po příjezdu do laboratoře byly ukazatele pH a vodivost přeměřeny přesnějším stolním multimetrem HI 5522.

4.4.2 Stanovení chemické a biologické spotřeby kyslíku

Bylo provedeno stanovení chemické spotřeby kyslíku za pomoci dichromanu (CHSK_{Cr}) podle normy ČSN ISO 15705 Jakost vod – Stanovení chemické spotřeby kyslíku (CHSK_{Cr}) – metoda ve zkumavkách [78]. Rovněž bylo provedeno stanovení biologické spotřeby kyslíku, a to 7denní (BSK_7), která byla následně přepočítána na 5denní (BSK_5) podle normy ČSN EN ISO 5815–1 Kvalita vod – Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech (BOD_n) – Část 1: Zředovací a očkovací metoda s přidavkem allylthiomocoviny [79].

- Stanovení CHSK_{Cr}

CHSK_{Cr} byla stanovena pomocí soupravy Spectroquant® na spektrofotometru NOVA 60 od Merck spol. s r.o. Vzhledem k velkému množství vzorků byla rovněž připravena vlastní kyvetová souprava pro stanovení CHSK_{Cr} , a to podle bakalářské práce Ing. Martiny Švábové [80]. Všechny pracovní postupy byly prováděny podle předepsaných návodů.

- Stanovení BSK_5

BSK byla vždy měřena ve třech opakování vybraného ředění. Vždy byly vybrány minimálně dva rozsahy stanovení (dvě rozdílná ředění) BSK , a to podle naměřeného výsledku CHSK_{Cr} . BSK byla měřena 7denní, aby byl konec měření v pracovní den. Následně však byla BSK přepočítána na 5denní. Ke každému stanovení byl vždy připraven i kontrolní vzorek, aby byla zajištěna kontrola správného postupu. BSK byla vyhodnocována na základě poklesu rozpuštěného kyslíku v kyslíkové lahvi podle Winklera. Rozpuštěný kyslík byl měřen podle přenosného oxymetru Greisinger GMH 3651.

4.4.3 Stanovení nerozpuštěných látek

Nerozpuštěné látky (NL) byly stanoveny podle normy ČSN EN ISO 872 Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken [81]. Každý vzorek (o objemu 100 ml) byl měřen třikrát z různých vzorkovnic. Při každém měření byl měřen i jeden

slepý vzorek, kde byl vzorek nahrazen 150 ml destilované vody. Pro filtraci byly použity filtry ze skelného mikrovlákná GF/CTM.

4.4.4 Stanovení rozpuštěných látek

Rozpuštěné látky (RL) byly stanoveny podle normy ČSN 75 7346 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných látek [82]. Každý vzorek (o objemu 100 ml) byl měřen třikrát z různých vzorkovnic. Při každém měření byl měřen i jeden slepý vzorek, kde byl vzorek nahrazen 150 ml destilované vody. Pro filtraci byly použity filtry ze skelného mikrovlákná GF/CTM a následně byl vzorek sušen v sušárně při 105 °C v odpařovací misce.

4.4.5 Stanovení rozpuštěných anorganických solí

Rozpuštěné anorganické soli (RAS) byly stanoveny podle normy ČSN 75 7347 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných anorganických solí (RAS) v odpadních vodách – Gravimetrická metoda po filtraci filtrem ze skleněných vláken [83]. Před každým měřením byly odpařovací misky vyčištěny a vyžháný v muflové peci při 550 °C po dobu 1 hodiny. Každý vzorek (o objemu 100 ml) byl měřen třikrát z různých vzorkovnic. Při každém měření byl měřen i jeden slepý vzorek, kde byl vzorek nahrazen 150 ml destilované vody. Pro filtraci byly použity filtry ze skelného mikrovlákná GF/CTM a následně byl vzorek sušen v sušárně při 105 °C a poté žhán v muflové peci při 550 °C v odpařovací misce.

4.4.6 Stanovení dusitanů, dusičnanů a amonných kationtů

Ke stanovení byly použity mobilní analytické sety řady Spectroquant®, Merck spol. s r.o. dusitanů (0,07–3,28 mg·l⁻¹), dusičnanů (4,4–110,7 mg·l⁻¹) a amonných kationtů (2,6–193 mg·l⁻¹). Metoda byla analogická k metodám podle: ISO 6777, DIN 38405-9, ISO 7150-1. Každý vzorek byl změřen třikrát a stanoven na přístroji Spectroquant® NOVA 60, Merck spol. s r.o. s přednastavenou metodou stanovení ke každému setu. Výsledky byly vyhodnoceny podle návodu přiloženého ke každému setu.

4.4.7 Prvková analýza

Sledované prvky byly měřeny pomocí hmotnostní spektrometrie indukčně vázaného plazmatu (ICP-MS) Agilent 7900 od společnosti Agilent Technologies, Inc. ICP-MS bylo laděné 10x zředěným ladicím roztokem, který obsahoval prvky Ce, Co, Li, Tl a Y o koncentraci 10 mg·l⁻¹. Pro přepočítání signálů při změně módu měření (analogový a pulzní mód) byl změřen P/A faktor. P/A faktor byl změřen pomocí směsi dvou roztoků o poměru 1:1. Roztok č. 1 obsahoval prvky Zn, Be, Cd a As o koncentraci 20 mg·l⁻¹; Ni, Pb a Mg o koncentraci 10 mg·l⁻¹; Tl, Na, Al, U, Cu, Th, Ba, Co, Sr, V, Cr, Mn, Li, Sc, In, Lu a Bi o koncentraci 5 mg·l⁻¹; Y a Yb o koncentraci 2,5 mg·l⁻¹. Roztok č. 2 obsahoval prvky Mo, Sb, Sn, Ge, Ru a Pb o koncentraci 10 mg·l⁻¹; Ti a Ir o koncentraci 5 mg·l⁻¹. Jako interní standard byl připraven roztok s ionty Li, Sc, Pt, Rh a In o koncentraci 1 mg·l⁻¹. Pro externí kontrolu byla kolegou připravena standardní voda o jednotné koncentraci 40 µg·l⁻¹. Pro měření na ICP-MS byly vytvořeny kalibrační řady z certifikovaných standardů od společnosti ANALYTIKA®, spol. s r.o. Kalibrační řady jsou uvedeny v příloze D. Po změření kalibračních řad byly měřeny procesní blanky a jednotkové vzorky, které byly seřazeny podle vzestupné hodnoty vodivosti. Po čas měření byl přístroj proplachován Mili-Q vodou a 3% roztokem HNO₃. Použité nastavení přístroje je uvedené

v příloze E. Detekční limity pro jednotlivé prvky jsou uvedené v příloze F. Naměřená data byla vyhodnocena v softwaru MassHunter, MS Excel a RStudio.

4.5 Statistické vyhodnocení dat

Statistické vyhodnocení dat probíhalo ve statistickém programu RStudio. Nejprve byla u naměřených dat zjištěna normalita pomocí testů: Shapiro-Wilk, Anderson-Darling a Shapiro-Francia. U dat Gaussovského rozdělení byly provedeny jak parametrické odhady polohy a variability (průměr a směrodatná odchylka), tak neparametrické odhady polohy a variability (medián a mediánová absolutní odchylka). Navíc byl vypočten interval spolehlivosti pro jednotlivé odhady. U dat, která byla identifikována testy normality za ne Gaussovské rozdělení, byl proveden výpočet uřezaného (trimmed) průměru a směrodatné odchylky, dále byly vypočteny neparametrické odhady polohy a variability (medián a mediánová absolutní odchylka) plus byl vypočten interval spolehlivosti pro jednotlivé odhady. Každý ukazatel byl otestován jednostranným testem vůči limitním hodnotám v případě Gaussovského rozdělení t-testem a v případě, že se nejednalo o Gaussovské rozdělení byl využit Wilcoxonův test. K vybraným ukazatelům byl vytvořen boxplotový graf pro porovnání vstupních dat (VS), dat permeátu UF (UFP), dat koncentrátu z RO (ROK) a dat z permeátu RO (ROP).

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

Kapitola Výsledky a diskuse je dělena na dvě podkapitoly, kde v každé je diskutována jedna vzorkovaná lokalita. Dále každý výsledek stanovení je dělen na vstupní data, permeát z UF (UFP) – vstup na RO, koncentrát z RO (ROK) a permeát z RO (ROP). V některých místech odběru byla koncentrace některých ukazatelů pod kvantifikačním (LOQ) nebo detekčním limitem (LOD). U každého ukazatele jsou uvedeny limitní hodnoty pro jednotlivé zdroje limitu: limit nařízení vlády k vypouštění (NŘV), limit pro nebezpečný odpad (NO), limit kanalizačního řádu (KŘ) a limit pro látky nedefinované v KŘ, ale obsažené ve vodním zákoně jako nebezpečné závadné látky (NZL). V tabulkách s výsledky je uveden symbol hvězdičky u vzorků, které nejsou Gaussovského rozdělení dle výsledku testu normality. Pro tyto vzorky byla provedena statistika pomocí neparametrických metod. Statisticky vyhodnocená data jsou vynesena v boxplotovém grafu. Tlustá čára v boxplotu značí medián. Samotný boxplot je mezikvartilový rozsah (IQR), tedy rozpětí mezi 1 a 3 kvantilem. Linie vycházející z boxplotu značí rozsah hodnot, které jsou do 1,5násobku IQR. U vzorků, které byly pod limity detekce je graficky znázorněn samotný limit detekce v konkrétním boxplotu.

5.1 Lokalita čistírny odpadních vod

V odběrové lokaci čistírny odpadních vod jsou vzorky porovnávány s limity (viz Tabulka 6) pro vypouštění z ČOV z důvodu zjištění, zda lze přímo vypouštět z ČOV. A dále jsou vzorky porovnávány s limity pro klasifikaci (podle kapitoly 2.1.2.1) jako nebezpečné odpady. Naměřená data tedy byla porovnána s vybranými ukazateli (viz příloha C) definovanými v HP 15, aby se zjistilo, zda je nutné s odpadní vodou nakládat jako s nebezpečným odpadem. Kompletní seznam limitů z HP 15 je vypsán v Tabulce 1. Data ze vstupu, UF permeátu a RO permeátu byla poskytnuta firmou ASIO TECH, spol. s r.o. Poskytnutá data byla statisticky zpracována stejným postupem jako data vlastní.

5.1.1 Základní fyzikálně-chemické ukazatele

Pod základní fyzikálně-chemické ukazatele řadíme pH a vodivost. Podle výsledků statistických testů na normalitu jsou data ze vstupu, UF-permeátu a RO-konzentrátu (ROK) Gaussovského rozdělení. Ukazatel vodivosti z RO-permeátu (ROP) není Gaussovského rozdělení.

Tabulka 15: Statisticky vyhodnocené hodnoty základních fyzikálně-chemických ukazatelů ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
pH [–]	7,5 ± 0,3	7,2 ± 0,3	7,87 ± 0,17	5,9 ± 0,3
(NO: 5,5–13)	(7,3–7,6)	(7,0–7,4)	(7,77–7,97)	(5,7–6,1)
Vodivost	1 137 ± 33	1 140 ± 34	2 751 ± 428	* 32 ± 22
[μS·cm ⁻¹]	(1 117–1 157)	(1 119–1 160)	(2 493–3 010)	(17–20)

Tabulka 16: Statisticky vyhodnocené hodnoty základních fyzikálně-chemických ukazatelů ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
pH [-] (NO: 5,5–13)	7,5 ± 0,3 (7,1–7,5)	7,3 ± 0,3 (6,8–7,3)	7,90 ± 0,15 (7,70–7,90)	5,85 ± 0,13 (5,57–5,78)
Vodivost [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	1 140 ± 15 (1 090–1 134)	1 140 ± 30 (1 090–1 130)	2 933 ± 408 (2 206–2 930)	* 21 ± 4 (17–20)

V Tabulkách 15 a 16 je uveden ukazatel pH, který byl sledován při hodnocení nebezpečného odpadu. Hodnoty pH byly v rozmezí 5,5–13, což odpovídá limitům platné legislativy. A interval spolehlivosti se rovněž nachází v rozmezí definovaném zákonem. Z výsledků vodivosti je vidět průběh odstraňování rozpuštěných látek. Výrazný vliv na jejich odstranění měl až proces reverzní osmózy. Lze konstatovat, že naměřená data pH a vodivosti uvedená v Tabulkách 15 a 16 jsou srovnatelná s daty ze studií uvedených v Tabulce 8.

5.1.2 Chemická a biologická spotřeba kyslíku

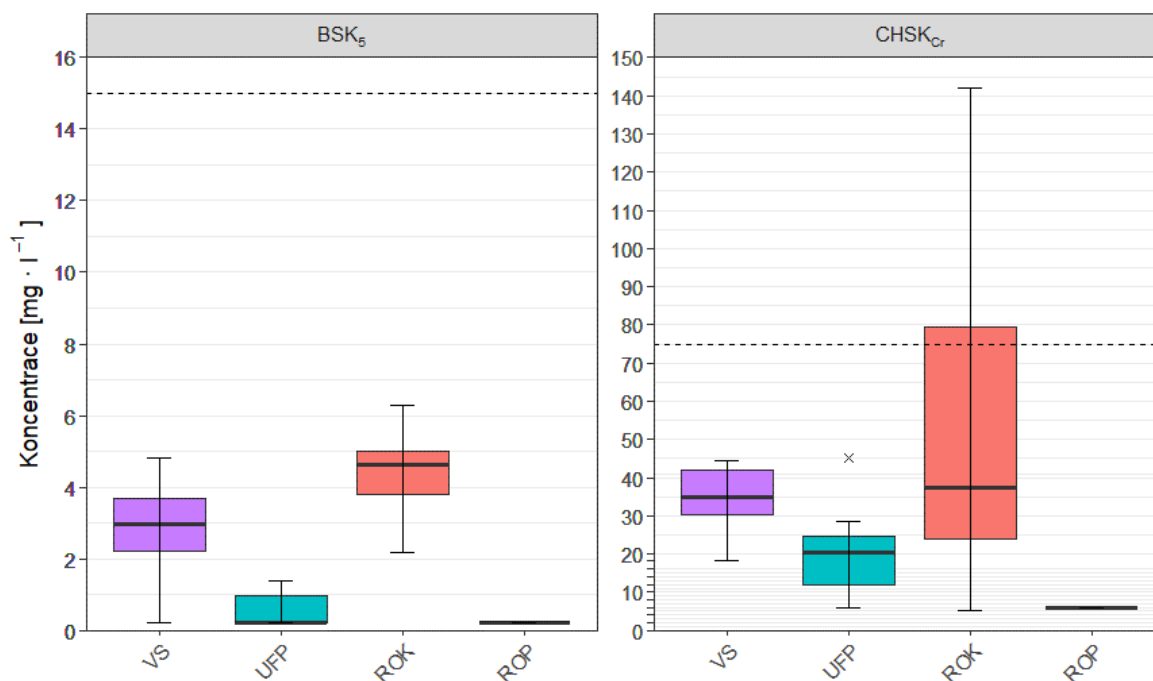
V lokalitě ČOV u ukazatelů chemické a biologické spotřeby kyslíku nebyl předpoklad zvýšených hodnot, poněvadž voda byla upravena biologickým postupem čištění. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že data jsou Gaussovského rozložení. Avšak u vybraných dat CHSK_{Cr} a BSK_5 , která nabývala menších hodnot než byl limit detekce, nebyl proveden test normality.

Tabulka 17: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
CHSK_{Cr} [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 75)	34 ± 9 (29–40)	20 ± 10 (14–26)	57 ± 43 (31–83)	< 6 (LOQ)
BSK_5 [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 15)	3 ± 1 (2–4)	< 1,4 (LOQ)	4,1 ± 1,3 (3,0–5,2)	< 0,2 (LOD)

Tabulka 18: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
CHSK_{Cr} [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 75)	35 ± 10 (23–35)	21 ± 11 (11–19)	57 ± 43 (24–42)	< 6 (LOQ)
BSK_5 [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 15)	3 ± 1 (0–3)	< 1,4 (LOQ)	4,3 ± 0,9 (2,1–4,1)	< 0,2 (LOD)



Obrázek 14: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku

Ukazatele CHSK_{Cr} a BSK₅ nejsou hodnoceny v rámci nebezpečnosti odpadu HP 15, viz Tabulka 1. Ukazatele jsou však kontrolovány v rámci vypouštění z ČOV, viz Tabulka 6, a zde se ukazatel CHSK_{Cr} z koncentráту RO blíží k limitní hodnotě 75 mg·l⁻¹. Na obrázku 14 je hodnota limitu CHSK_{Cr} 75 mg·l⁻¹ vykreslena přerušovanou čarou. Medián ani průměr tuto hodnotu nepřekračují, ale IQR tento limit z části převyšuje. Horní interval průměru spolehlivosti z Tabulky 17 dosahuje hodnoty 83 mg·l⁻¹, což nesplňuje limit k vypouštění z ČOV. Na obrázku 14 je hodnota limitu BSK₅ 15 mg·l⁻¹ vykreslena přerušovanou čarou. Ukazatel BSK₅ je ve všech případech prokazatelně nižší než limit vypouštění. Podobnost našich výsledků CHSK_{Cr} i BSK₅ s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 8) potvrzuje funkčnost použité technologie.

5.1.3 Nerozpuštěné a rozpuštěné látky

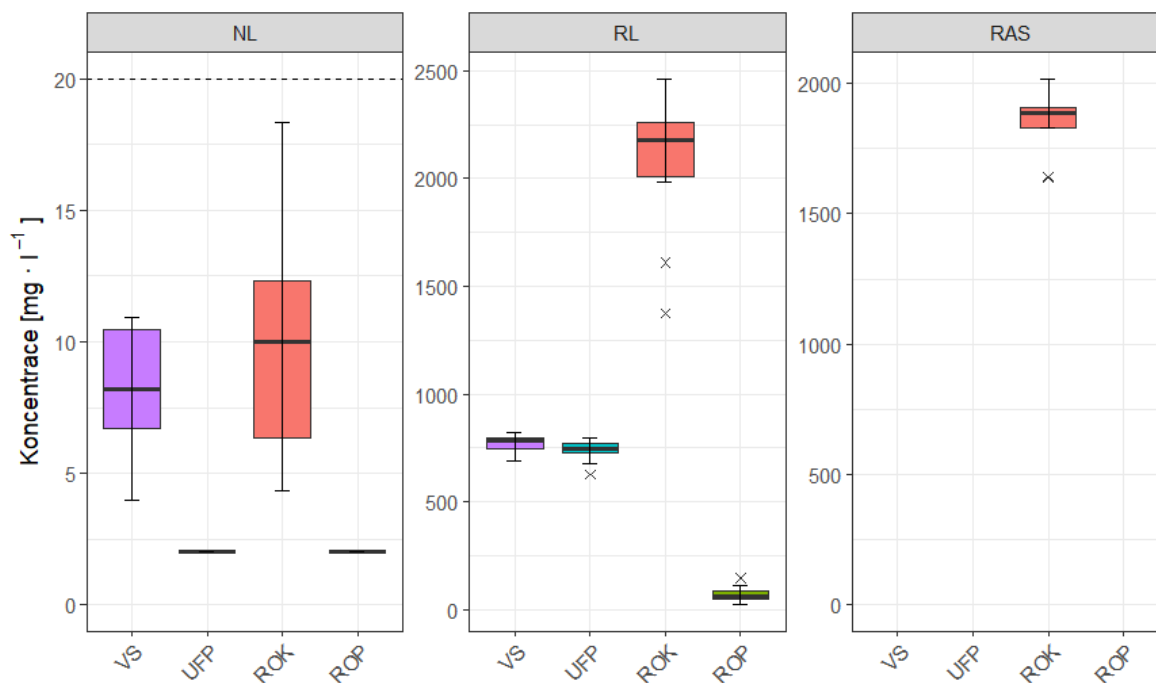
V této kapitole jsou vypsány a diskutovány výsledky nerozpuštěných látek, rozpuštěných látek a rozpuštěných anorganických solí. Rozpuštěné anorganické soli byly měřeny pouze u koncentráту z RO. Z dalších míst odběru nebyla data k dispozici. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že všechna data vyjma permeátu u NL jsou Gaussovského rozdělení. NL z UF permeátu a RO permeátu byly ve většině případů menší než 2, a tak u těchto dat nebyl proveden test na normality. Veškeré NL obsažené v UF permeátu, RO koncentráту a RO permeátu jsou menší velikosti, než je velikost pórů ultrafiltrační membrány, a to 0,02 μm.

Tabulka 19: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěné a rozpuštěné látky ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
NL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 20)	8 ± 2 (7–10)	< 2 (LOD)	10 ± 5 (7–13)	< 2 (LOD)
RL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 8 000)	768 ± 39 (744–791)	740 ± 46 (713–768)	$2\,088 \pm 306$ (1 903–2 273)	74 ± 36 (48–99)
RAS [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]			$1\,849 \pm 131$ (1 748–1 950)	

Tabulka 20: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěné a rozpuštěné látky ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
NL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 20)	8 ± 3 (6–8)	< 2 (LOD)	10 ± 5 (5–7)	< 2 (LOD)
RL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 8 000)	783 ± 39 (713–757)	745 ± 30 (725–745)	$2\,179 \pm 249$ (1 610–2 086)	63 ± 32 (30–62)
RAS [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]			$1\,886 \pm 83$ (1 641–1 851)	



Obrázek 15: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěných a rozpuštěných látek

Nerozpuštěné látky jsou zahrnuty v limitech vypouštění odpadních vod z ČOV (viz Tabulka 6) a to na hodnotě $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Výsledky měření jsou pod tímto limitem. Průměrná i mediánová hodnota včetně intervalů spolehlivosti je do $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, pouze hodnoty v 1,5násobku IQR v grafu na obrázku 15 jsou na hodnotě $18,3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, což znamená, že by výjimečně mohlo dojít k překročení hodnoty. Pro posouzení by však bylo nutné provést dlouhodobější sledování. V limitech nebezpečného odpadu HP 15 (viz Tabulka 1) se nachází limit RL na hodnotě $8\,000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Tento limit je prokazatelně dodržen, poněvadž vyhodnocená data se nacházela do maximální hodnoty $2\,462 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Z rozdílu hodnot RAS a RL (přibližně $300 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) je patrné, kolik nerozpuštěných látek bylo organického původu – mohou to být například tenzidy, uhlovodíky, oleje, produkty osobní péče a další. Podobnost našich výsledků RL s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 8) potvrzuje funkčnost použité technologie.

5.1.4 Makronutrienty

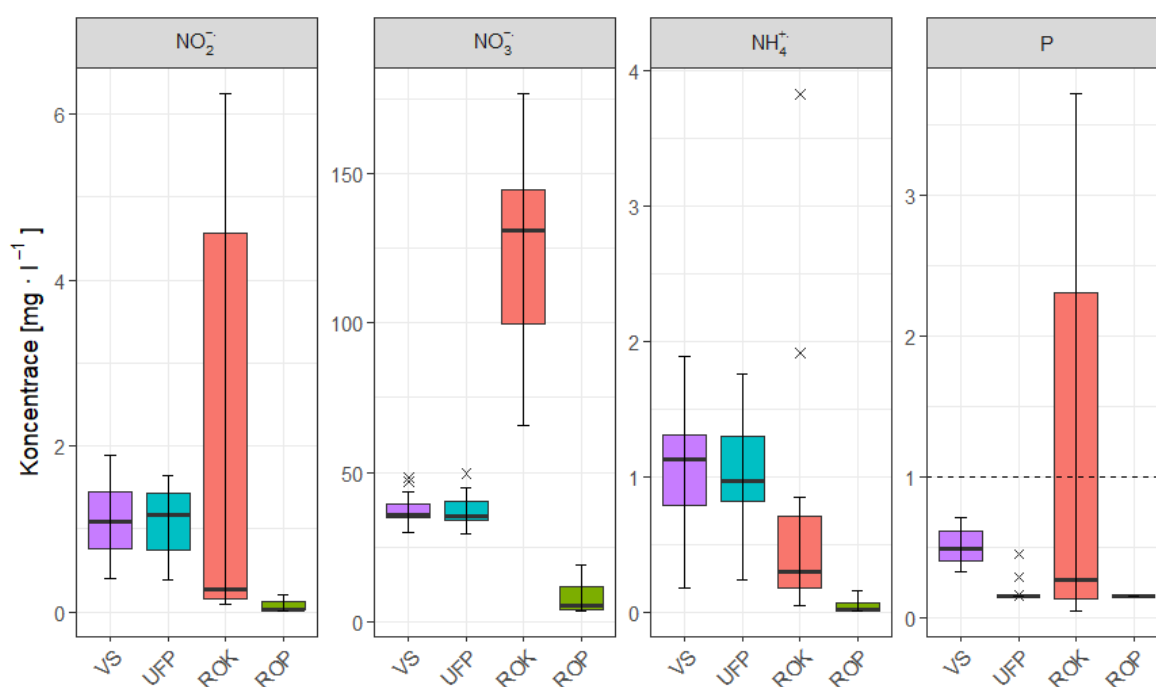
Mezi makronutrienty řadíme dusitany, dusičnany, amonné kationty a celkový fosfor. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že dusitany, amonné kationty a celkový fosfor z koncentrátu RO nejsou Gaussovského rozdělení; dále dusičnany a amonné kationty z permeátu RO rovněž nejsou Gaussovského rozdělení. Zbylá data jsou Gaussovského rozdělení. Avšak u vybraných dat celkového fosforu, která nabývala menších hodnot, než byl limit detekce, nebyl proveden test normality. Ke zvýšenému množství dusičnanů došlo nejspíše z důvodu toho, že u některých vzorků došlo k nitrifikaci před jejich stanovením.

Tabulka 21: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů ve formátu: Průměr \pm směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
NO_2^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	$1,1 \pm 0,5$ (0,8–1,4)	$1,1 \pm 0,4$ (0,9–1,4)	* $1,9 \pm 2,3$ (0,1–0,2)	$0,08 \pm 0,07$ (0,03–0,13)
NO_3^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	38 ± 6 (34–41)	37 ± 5 (34–41)	122 ± 34 (102–143)	* 7 ± 4 (4–4)
NH_4^+ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	$1,1 \pm 0,5$ (0,7–1,4)	$1,0 \pm 0,4$ (0,7–1,3)	* $0,5 \pm 0,5$ (0,1–0,3)	* $0,03 \pm 0,03$ (0,010–0,010)
Celk. P [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 1)	$0,50 \pm 0,13$ (0,42–0,58)	< 0,45 (LOQ)	* $1,08 \pm 1,11$ (0,11–0,15)	< 0,15 (LOQ)

Tabulka 22: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-konzentrát	RO-permeát
NO_2^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	$1,1 \pm 0,5$ (0,7–1,0)	$1,1 \pm 0,5$ (0,6–1,1)	* $0,3 \pm 0,3$ (0,1–0,2)	$0,06 \pm 0,06$ (0,02–0,03)
NO_3^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	36 ± 2 (32–35)	36 ± 5 (32–35)	130 ± 35 (70–122)	* $4,8 \pm 1,4$ (3,8–4,2)
NH_4^+ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	$1,1 \pm 0,3$ (0,5–1,1)	$1,0 \pm 0,4$ (0,4–1,0)	* $0,3 \pm 0,2$ (0,1–0,3)	* $0,014 \pm 0,006$ (0,010–0,010)
Celk. P [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (NŘV: 1)	$0,49 \pm 0,19$ (0,34–0,45)	< 0,45 (LOQ)	* $0,4 \pm 0,5$ (0,11–0,15)	< 0,15 (LOQ)



Obrázek 16: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů

Makronutrienty jsou hodnoceny pouze v limitech pro vypouštění z ČOV. Pro ČOV, kde byla umístěna pilotní poloproduční jednotka, jsou definované limity pro celkový fosfor ($1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a celkový dusík ($10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) v průměru. Ačkoliv ukazatel celkového dusíku není k dispozici, tak při pohledu na medián dusičnanů ($130 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) je prokazatelně překročen limit. Celkový fosfor byl překročen ve třetině případů, avšak medián byl pod limitem pro vypouštění. Pro ověření, že k překračování limitů dochází pravidelně, by byla potřeba intenzivnější a delší měrná kampaň. Podobnost našich výsledků dusitanů, dusičnanů, amonných kationtů a celkového fosforu s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 8) potvrzuje funkčnost použité technologie.

5.1.5 Analyzované kovy

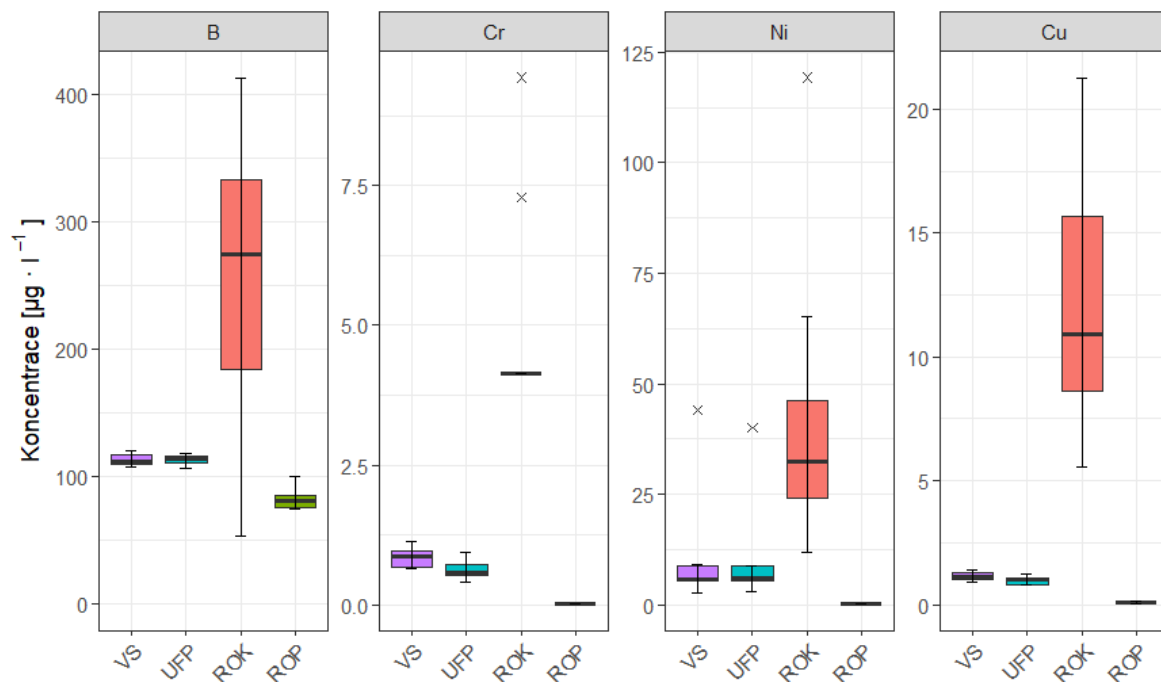
V lokaci ČOV byly hodnoceny pouze vybrané kovy, které jsou definovány v Tabulce 1, jakožto ukazatele nebezpečného odpadu. Baryum a antimon byly měřeny pouze u koncentrátu z RO. Z dalších míst odběru nebyla data k dispozici. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že některá data (označená hvězdičkou v Tabulkách 23 a 24), nejsou Gaussovského rozdělení.

Tabulka 23: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů hodnocených v rámci NO ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

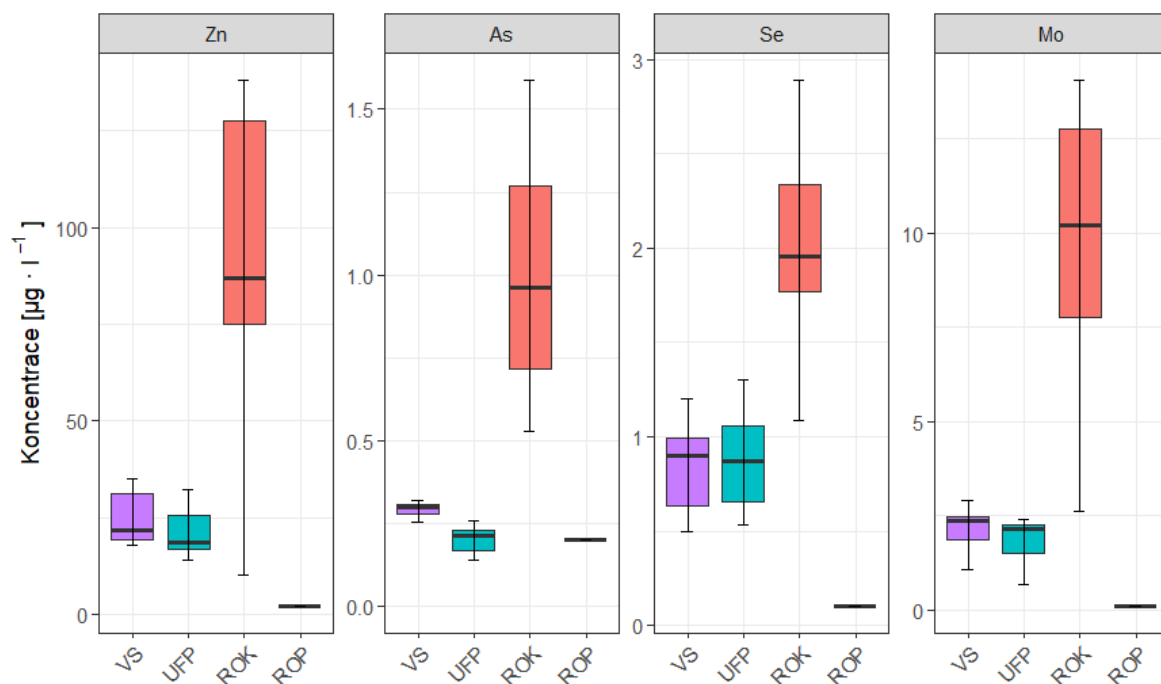
Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
B [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 90 000)	114 ± 5 (109–118)	113 ± 4 (109–117)	251 ± 104 (185–317)	84 ± 10 (71–96)
Cr celkový [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 7 000)	0,84 ± 0,19 (0,67–1,02)	0,62 ± 0,19 (0,45–0,80)	< 4,13 (LOQ)	< 0,01 (LOQ)
Ni [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 4 000)	* 12 ± 15 (3–6)	* 11 ± 13 (3–6)	* 37 ± 15 (16–29)	< 0,2 (LOQ)
Cu [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 10 000)	1,14 ± 0,19 (0,96–1,32)	0,97 ± 0,18 (0,81–1,13)	12 ± 5 (8,8–15,4)	0,09 ± 0,04 (0,03–0,14)
Zn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 20 000)	25 ± 7 (18–32)	* 21 ± 8 (14–17)	92 ± 36 (69–115)	< 2 (LOQ)
As [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 2 500)	0,29 ± 0,03 (0,27–0,32)	0,20 ± 0,04 (0,16–0,24)	1,00 ± 0,36 (0,77–1,23)	< 0,2 (LOQ)
Se [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 700)	0,8 ± 0,3 (0,6–1,1)	0,9 ± 0,3 (0,6–1,1)	2,0 ± 0,5 (1,7–2,3)	< 0,1 (LOQ)
Mo [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 3 000)	2,2 ± 0,6 (1,6–2,7)	1,8 ± 0,6 (1,3–2,4)	10 ± 4 (7–12)	< 0,1 (LOQ)
Cd [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 500)	0,005 ± 0,003 (0,003–0,007)	0,005 ± 0,002 (0,003–0,007)	< 0,09 (LOD)	< 0,008
Sb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 500)			1,5 ± 1,3 (0,7–2,3)	
Ba [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 30 000)			* 409 ± 69 (318–390)	
Pb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 5 000)	0,06 ± 0,03 (0,03–0,09)	0,05 ± 0,03 (0,03–0,08)	< 1,05 (LOQ)	0,008 ± 0,005 (0,002–0,014)

Tabulka 24: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů hodnocených v rámci NO ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

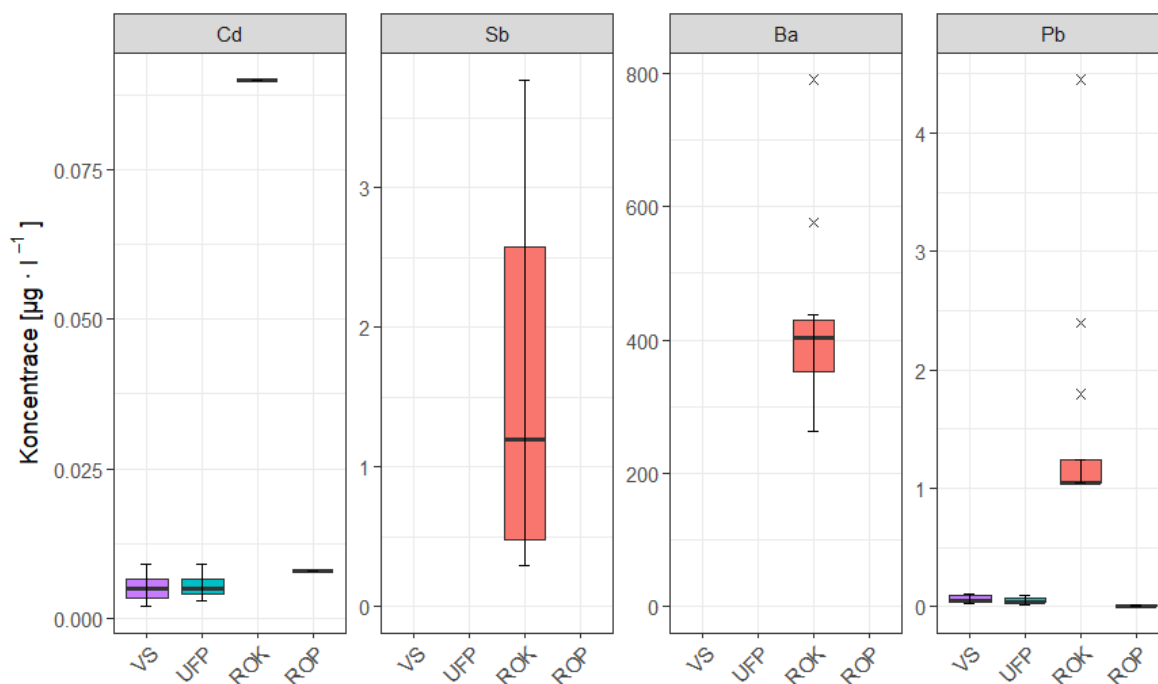
Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
B [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 90 000)	112 ± 6 (108–111)	114 ± 4 (107–113)	275 ± 88 (140–245)	82 ± 8 (75–76)
Cr celkový [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 7 000)	0,9 ± 0,2 (0,6–0,7)	0,57 ± 0,10 (0,40–0,54)	< 4,13 (LOQ)	< 0,01 (LOQ)
Ni [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 4 000)	* 6 ± 4 (3–6)	* 6 ± 4 (3–6)	* 32 ± 14 (16–29)	< 0,2 (LOQ)
Cu [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 10 000)	1,11 ± 0,18 (0,88–1,03)	1,0 ± 0,3 (0,8–0,8)	11 ± 5 (7,6–9,4)	0,10 ± 0,04 (0,02–0,07)
Zn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 20 000)	22 ± 5 (18–20)	* 19 ± 3 (14–17)	87 ± 30 (64–82)	< 2 (LOQ)
As [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 2 500)	0,30 ± 0,03 (0,26–0,30)	0,21 ± 0,06 (0,14–0,17)	0,96 ± 0,45 (0,62–0,90)	< 0,2 (LOQ)
Se [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 700)	0,9 ± 0,3 (0,5–0,7)	0,9 ± 0,4 (0,5–0,7)	2,0 ± 0,4 (1,5–1,9)	< 0,1 (LOQ)
Mo [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 3 000)	2,4 ± 0,5 (1,1–2,0)	2,2 ± 0,4 (0,7–1,5)	10 ± 4 (4–10)	< 0,1 (LOQ)
Cd [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 500)	0,005 ± 0,003 (0,002–0,004)	0,0050 ± 0,0015 (0,0030– 0,0040)	< 0,09 (LOD)	< 0,008 (LOQ)
Sb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 500)			1,2 ± 1,3 (0,3–0,8)	
Ba [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 30 000)			* 407 ± 49 (318–390)	
Pb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NO: 5 000)	0,05 ± 0,04 (0,03–0,05)	0,04 ± 0,03 (0,02–0,04)	< 1,05 (LOQ)	0,008 ± 0,007 (0,003–0,003)



Obrázek 17: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



Obrázek 18: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



Obrázek 19: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů

Před klasifikací koncentrátu, zda je, nebo není nebezpečným odpadem, byla provedena i analýza vstupu, ultrafiltrace permeátu a reverzní osmózy permeátu, aby byla ověřena funkčnost a spolehlivost pilotní poloprovozní jednotky. Na většině grafů je vidět trend zvýšení koncentrace na straně koncentrátu a snížení koncentrace na straně permeátu bez výrazných odchylek. To dokazuje, že membrána fungovala spolehlivě. Při porovnání vstupu, UFP, ROK a ROP lze konstatovat, že došlo k odstranění části kovů na ultrafiltraci pomocí koagulace, ale hlavní část byla odseparována do koncentrátu na reverzní osmóze. Příhodným zjištěním bylo, že už vstup i permeát z ultrafiltrace se nachází na nízkých koncentracích sledovaných kovů. A následně po zkoncentrování pomocí reverzní osmózy jsou stále všechny sledované ukazatele prokazatelně nižší než limity pro klasifikaci jako nebezpečný odpad. Zjištěné výsledky splňují očekávání, poněvadž se jedná o odtokovou vodu z čistírny odpadních vod, kde nebyl předpoklad velmi vysokých koncentrací kovů.

5.2 Lokalita průmyslové prádelny

V odběrové lokaci průmyslové prádelny jsou vzorky porovnávány s limity kanalizačního řádu (podle kapitoly 2.1.2.2). V Tabulce 25 jsou vypsány limity pro sledované ukazatele kanalizačního řádu, aby bylo zjištěno, zda je koncentrát možné přímo vypouštět do kanalizace. Rovněž jsou vzorky porovnávány s limity nebezpečných závadných látek (NZL), které definuje vodní zákon (viz kapitola 2.1.2.2). Dále jsou vzorky porovnávány s limity pro klasifikaci (podle kapitoly 2.1.2.1) jako nebezpečné odpady, aby bylo zjištěno, zda je s koncentrátem nutné nakládat jako s nebezpečným odpadem. V Tabulce 1 jsou vypsány limitní hodnoty ukazatelů v HP 15. Z ukazatelů v Tabulkách 1 a 25 byly vybrány jen některé ukazatele a tyto jsou sepsány v příloze C.

Tabulka 25: Vybrané ukazatele z kanalizačního řádu pro sledovanou lokalitu

Ukazatel znečištění	Maximální hodnota – prů. (směsný vzorek)	Maximální hodnota – max. (bodový vzorek)
CHSK _{Cr} [mg·l ⁻¹]	800	1 000
BSK ₅ [mg·l ⁻¹]	400	500
NL [mg·l ⁻¹]	350	420
RL [mg·l ⁻¹]	1 500	2 200
RAS [mg·l ⁻¹]	1 000	1 500
NH ₄ ⁺ [mg·l ⁻¹]	64	90
P _{celkový} [mg·l ⁻¹]	10	13
měď (Cu) [mg·l ⁻¹]	0,7	0,7
zinek (Zn) [mg·l ⁻¹]	2,5	2,5
železo (Fe) [mg·l ⁻¹]	10	10
pH [-]	6,5–9,5	6,5–9,5
arsen (As) [mg·l ⁻¹]	0,05	0,05
chrom celkový (Cr) [mg·l ⁻¹]	0,3	0,3
kadmium (Cd) [mg·l ⁻¹]	0,005	0,005
kobalt (Co) [mg·l ⁻¹]	0,05	0,05
nikl (Ni) [mg·l ⁻¹]	0,15	0,15
olovo (Pb) [mg·l ⁻¹]	0,25	0,25
selen (Se) [mg·l ⁻¹]	0,05	0,05
vanad (V) [mg·l ⁻¹]	0,05	0,05
stříbro (Ag) [mg·l ⁻¹]	0,1	0,1
molybden (Mo) [mg·l ⁻¹]	0,03	0,03
čín (Sn) [mg·l ⁻¹]	0,01	0,01
beryllium (Be) [mg·l ⁻¹]	0,001	0,001
baryum (Ba) [mg·l ⁻¹]	0,5	0,5
hliník (Al) [mg·l ⁻¹]	2	2

5.2.1 Základní fyzikálně-chemické ukazatele

Pod základní fyzikálně-chemické ukazatele řadíme pH a vodivost. Podle výsledků statistických testů na normalitu nejsou Gaussovského rozdělení ukazatele pH z koncentrátu RO a vodivost ze vstupu a permeátu RO. Naměřená data ze vstupu pro ukazatele pH a vodivost odpovídají očekávání podle Tabulky 5.

Tabulka 26: Statisticky vyhodnocené hodnoty základních fyzikálně-chemických ukazatelů ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
pH [-] (KŘ: 6,5–9,5; NO: 5,5–13)	9,92 ± 0,17 (9,78–10,07)	7,6 ± 0,5 (7,3–8,0)	* 7,83 ± 0,16 (7,41–7,84)	8,1 ± 0,4 (7,9–8,4)
Vodivost [μS·cm ⁻¹]	* 1 351 ± 223 (1 171–1 212)	1 621 ± 279 (1 444–1 798)	4 037 ± 857 (3 492–4 581)	* 26 ± 2 (19–25)

Tabulka 27: Statisticky vyhodnocené hodnoty základních fyzikálně-chemických ukazatelů ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
pH [-] (KŘ: 6,5–9,5; NO: 5,5–13)	9,95 ± 0,18 (9,71–9,86)	7,8 ± 0,4 (7,0–7,7)	* 7,8 ± 0,2 (7,4–7,8)	8,1 ± 0,4 (7,7–8,0)
Vodivost [μS·cm ⁻¹]	* 1 269 ± 117 (1 171–1 212)	1 581 ± 207 (1 373–1 570)	3 806 ± 1 116 (3 392–3 682)	* 26 ± 3 (19–25)

V Tabulkách 26 a 27 je uveden ukazatel pH, který je v rozmezí limitu jak nebezpečného odpadu (viz Tabulka 1), tak limitu kanalizačního řádu (viz Tabulka 25). I intervaly spolehlivosti se nachází v těchto rozmezích. Z výsledků vodivosti je patrný průběh odstraňování rozpuštěných látek. Při porovnání UF permeátu a vstupu došlo k nárůstu vodivosti, což bylo způsobeno použitím vyššího množství koagulantu. Výrazný vliv na snížení vodivosti měl proces reverzní osmózy, kde došlo ke zkoncentrování v koncentrátu. Podobnost našich výsledků pH i vodivosti s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 7) potvrzuje funkčnost použité technologie.

5.2.2 Chemická a biologická spotřeba kyslíku

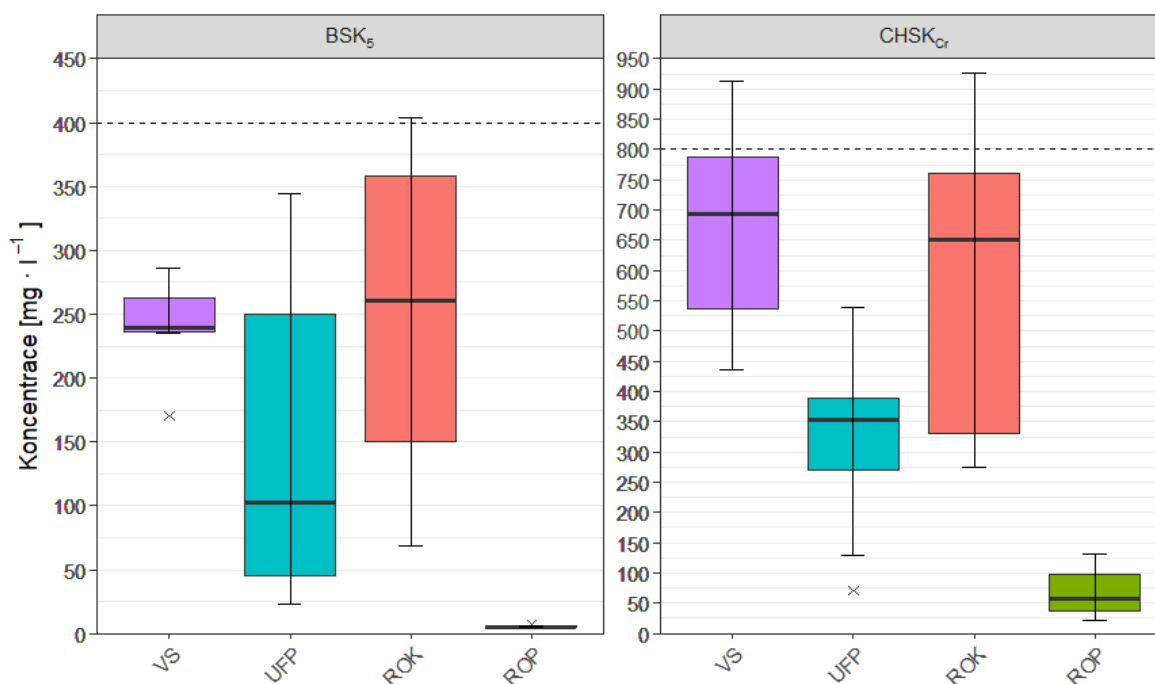
V lokalitě průmyslové prádely u ukazatelů chemické a biologické spotřeby kyslíku byl předpoklad zvýšených hodnot z důvodu používání tenzidů při praní prádla. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že všechna naměřená data jsou Gaussovského rozdělení. Naměřená data ze vstupu pro ukazatele CHSK_{Cr} a BSK₅ odpovídají očekávání podle Tabulky 5.

Tabulka 28: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
CHSK _{Cr} [mg·l ⁻¹] (KŘ: 800)	674 ± 170 (532–817)	324 ± 131 (241–407)	592 ± 224 (449–734)	67 ± 37 (40–94)
BSK ₅ [mg·l ⁻¹] (KŘ: 400)	214 ± 35 (177–251)	134 ± 122 (5–262)	250 ± 139 (103–396)	4,8 ± 1,0 (3,6–6,0)

Tabulka 29: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
CHSK _{Cr} [mg·l ⁻¹] (KŘ: 800)	693 ± 211 (474–582)	354 ± 90 (181–329)	632 ± 239 (321–592)	58 ± 49 (21–48)
BSK ₅ [mg·l ⁻¹] (KŘ: 400)	214 ± 23 (152–212)	91 ± 99 (21–66)	260 ± 158 (69–165)	4,6 ± 0,7 (4,0–4,2)



Obrázek 20: Statisticky vyhodnocené hodnoty chemické a biologické spotřeby kyslíku

Ukazatele CHSK_{Cr} a BSK₅ nejsou hodnoceny v rámci nebezpečnosti odpadu HP 15, viz Tabulka 1. Ukazatele jsou však kontrolovány v rámci kanalizačního řádu (viz Tabulka 25). BSK₅ je v kanalizačním řádu limitován na hodnotu 400 mg·l⁻¹. Tato hodnota je vyznačena v grafu na obrázku 16. Této limitní hodnotě se blíží hodnota intervalu spolehlivosti průměru. Dokonce v grafu na obrázku 16 dochází k překročení limitu hodnotami 1,5násobku IQR. Ukazatel BSK₅ se tedy blíží k hodnotě limitu a nelze prokazatelně rozhodnout, zda splňuje limit. Ukazatel CHSK_{Cr} má limit v kanalizačním řádu na hodnotě 800 mg·l⁻¹,

který je rovněž vyznačen v grafu na obrázku 16. K limitu $CHSK_{Cr}$ se blíží jak intervaly spolehlivosti, tak IQR. Tento ukazatel tedy rovněž nelze prokazatelně označit, že by splňoval limit, poněvadž je zde podezření, že by mohlo docházet k občasnému překročení limitu. Podobnost našich výsledků $CHSK_{Cr}$ s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 7) potvrzuje funkčnost použité technologie.

5.2.3 Nerozpuštěné a rozpuštěné látky

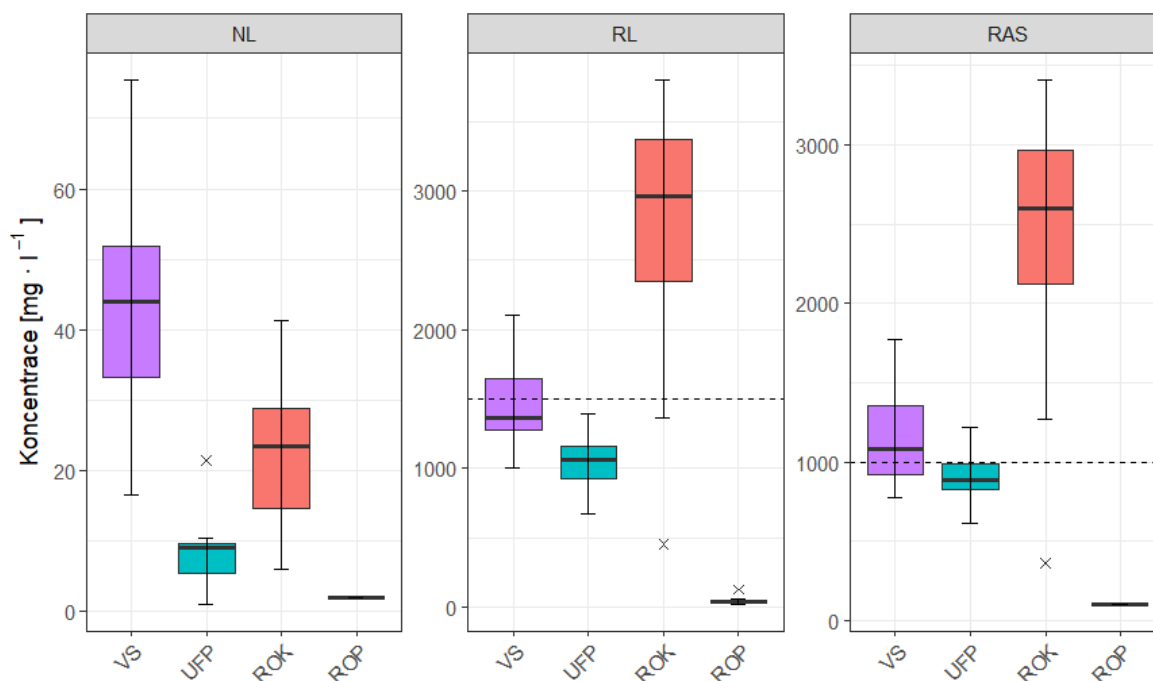
V této kapitole jsou vypsané a diskutovány výsledky nerozpuštěných látek, rozpuštěných látek a rozpuštěných anorganických solí. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že RL z RO permeátu a NL z UF permeátu nejsou Gaussovského rozdělení. Zbylá data jsou Gaussovského rozdělení, avšak u vybraných dat NL a RAS, která nabývala menších hodnot, než byl limit detekce, nebyl proveden test normality. Veškeré NL obsažené v UF permeátu, RO koncentrátu a RO permeátu jsou menší velikosti, než je velikost pórů ultrafiltrační membrány a to $0,02 \mu m$. Naměřená data ze vstupu pro ukazatele NL a RL odpovídají očekávání podle Tabulky 5.

Tabulka 30: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěné a rozpuštěné látky ve formátu: Průměr \pm směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
NL [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 350)	44 ± 19 (28–60)	* 8 ± 3 (2–8)	23 ± 10 (16–29)	< 2 (LOD)
RL [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 1 500; NO: 8 000)	$1 461 \pm 356$ (1 164–1 759)	$1 027 \pm 202$ (899–1 156)	$2 701 \pm 974$ (2 082–3 320)	* 40 ± 13 (20–35)
RAS [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 1 000)	$1 153 \pm 335$ (873–1 433)	883 ± 170 (775–992)	$2 400 \pm 866$ (1 850–2 951)	< 100 (LOD)

Tabulka 31: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěné a rozpuštěné látky ve formátu: Medián \pm mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
NL [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 350)	44 ± 20 (17–40)	* $8,6 \pm 1,9$ (1,5–7,9)	24 ± 11 (11–22)	< 2 (LOD)
RL [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 1 500; NO 8 000)	$1 368 \pm 337$ (1 002–1 336)	$1 058 \pm 164$ (735–1 008)	$2 961 \pm 756$ (1 360–2 781)	* 40 ± 19 (20–35)
RAS [$mg \cdot l^{-1}$] (KŘ: 1 000)	$1 080 \pm 379$ (773–1 013)	889 ± 142 (704–860)	$2 597 \pm 671$ (1 683–2 412)	< 100 (LOD)



Obrázek 21: Statisticky vyhodnocené hodnoty nerozpuštěných a rozpuštěných látek

Nerozpuštěné látky jsou zahrnuty v limitech kanalizačního řádu (viz Tabulka 25) a to na hodnotě $350 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Výsledky měření jsou prokazatelně pod tímto limitem. V grafu na obrázku 17 je znázorněno, že většina NL byla odseparována na ultrafiltraci. Pouze látky do velikosti $0,02 \mu\text{m}$ prošly do UF permeátu (medián $8,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a následně byly odseparovány na RO do koncentráту, kde se koncentrace NL ztrojnásobila.

Rozpuštěné látky jsou hodnoceny v limitech nebezpečného odpadu HP 15 (viz Tabulka 1) a v kanalizačním řádu. V HP 15 se nachází limit na hodnotě $8\,000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – tento limit je prokazatelně dodržen. Avšak KŘ je přísnější a zde je limit na $1\,500 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, tento limit byl prokazatelně překročen, a to přibližně dvojnásobně. Takovouto odpadní vodu tedy nelze volně vypouštět do kanalizace a je nutné kontaktovat provozovatele kanalizace.

Obdobně jako RL na tom byly rozpuštěné anorganické soli, které jsou rovněž hodnoceny v KŘ a byl zde také prokazatelně překročen limit a to téměř trojnásobně. Takovouto odpadní vodu opět nelze volně vypouštět do kanalizace a je nutné kontaktovat provozovatele kanalizace. Z rozdílu hodnot RAS a RL (přibližně $350 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) je patrné, kolik nerozpuštěných látek bylo organického původu. Mohou to být například tenzidy, uhlovodíky, oleje, produkty osobní péče a další. Rozdílnost našich výsledků NL a RL s výsledky uvedenými ve studiích (viz Tabulka 7) poukazuje na možné rozdíly praného prádla.

5.2.4 Makronutrienty

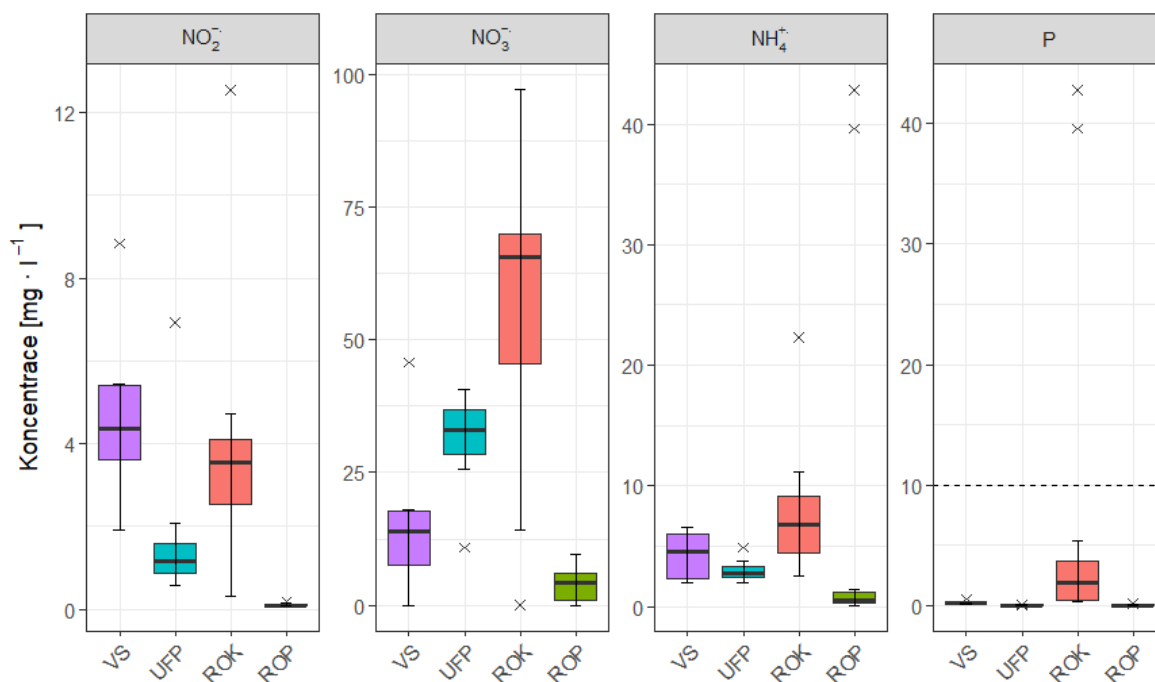
Mezi makronutrienty řadíme dusitany, dusičnany, amonné kationty a celkový fosfor. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že dusičnany ze vstupu a permeátu UF nejsou Gaussovského rozdělení; dále, že amonné ionty z koncentráту RO nejsou Gaussovského rozdělení. A rovněž, že dusitany z permeátu UF, permeátu RO a koncentráту RO nejsou Gaussovského rozdělení. Zbylá data jsou Gaussovského rozdělení, až na celkový fosfor z permeátu UF a RO, který byl pod mezí detekce ($< 0,005$ a $< 0,004 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Obdobně jako u odběrové lokality ČOV došlo nejspíše u některých vzorků k nitrifikaci před jejich stanovením. Naměřená data ze vstupu pro ukazatele dusičnany, amonné kationty a celkový fosfor odpovídají očekávání podle Tabulky 5.

Tabulka 32: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů ve formátu: Průměr \pm směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
NO_2^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	5 ± 2 (3–6)	* $1,3 \pm 0,5$ (0,6–1,1)	* $3,3 \pm 1,0$ (1,5–3,1)	* $0,11 \pm 0,02$ (0,10–0,10)
NO_3^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	* 15 ± 14 (0–9)	* 32 ± 4 (27–30)	55 ± 28 (37–73)	4 ± 3 (2–6)
NH_4^+ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 64)	$4,3 \pm 1,9$ (2,6–5,9)	$3,0 \pm 0,8$ (2,4–3,5)	* 7 ± 3 (3–5)	$0,6 \pm 0,5$ (0,3–0,9)
Celk. P [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10)	$0,19 \pm 0,13$ (0,11–0,13)	$< 0,005$ (LOD)	$5,7 \pm 12,0$ (0,3–1,3)	$< 0,004$ (LOD)

Tabulka 33: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů ve formátu: Medián \pm mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
NO_2^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	$4,4 \pm 1,6$ (1,9–4,2)	* $1,2 \pm 0,5$ (0,6–1,1)	* $3,5 \pm 1,4$ (1,5–3,1)	* $0,0993 \pm 0,0011$ (0,0990–0,0990)
NO_3^- [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	* 14 ± 8 (0–9)	* 33 ± 7 (27–30)	66 ± 18 (21–59)	4 ± 3 (0–4)
NH_4^+ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 64)	5 ± 2 (2–4)	$2,8 \pm 0,7$ (2,1–2,6)	* 7 ± 4 (3–5)	$0,5 \pm 0,6$ (0,12–0,4)
Celk. P [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10)	$0,14 \pm 0,03$ (0,11–0,13)	$< 0,005$ (LOD)	$1,8 \pm 2,1$ (0,3–1,3)	$< 0,004$ (LOD)



Obrázek 22: Statisticky vyhodnocené hodnoty makronutrientů

Makronutrienty jsou hodnoceny pouze v limitech pro kanalizační řád. Pro oblast prádelny je definován limit pro celkový fosfor ($10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a amonné kationty ($64 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) v průměru. Hodnoty průměru, mediánu i intervalů spolehlivosti u celkového fosforu prokazatelně nepřekročily definovaný limit. Ale v grafu na obrázku 18 jsou vykresleny dvě hodnoty nad limitem, které jsou však odlehlé a pochází z doby provozu optimalizace pilotní poloprovozní jednotky. Amonné kationty byly rovněž prokazatelně pod definovaným limitem.

5.2.5 Analyzované kovy

Vzorky z prádelny byly hodnoceny vůči limitům kanalizačního řádu (viz Tabulka 25), dále vůči zákazu vypouštění nebezpečných závadných látek do kanalizace (pokud nebyly dané látky definovány v KŘ, viz Tabulka 38) a vůči limitům HP 15 (viz Tabulka 1) jakožto nebezpečného odpadu. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že některá data (označená hvězdičkou v Tabulkách 34 a 35) nejsou Gaussovského rozdělení.

Tabulka 34: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů hodnocených v rámci KŘ a NO ve formátu: Průměr ± směrodatná odchylka (interval spolehlivosti průměru)

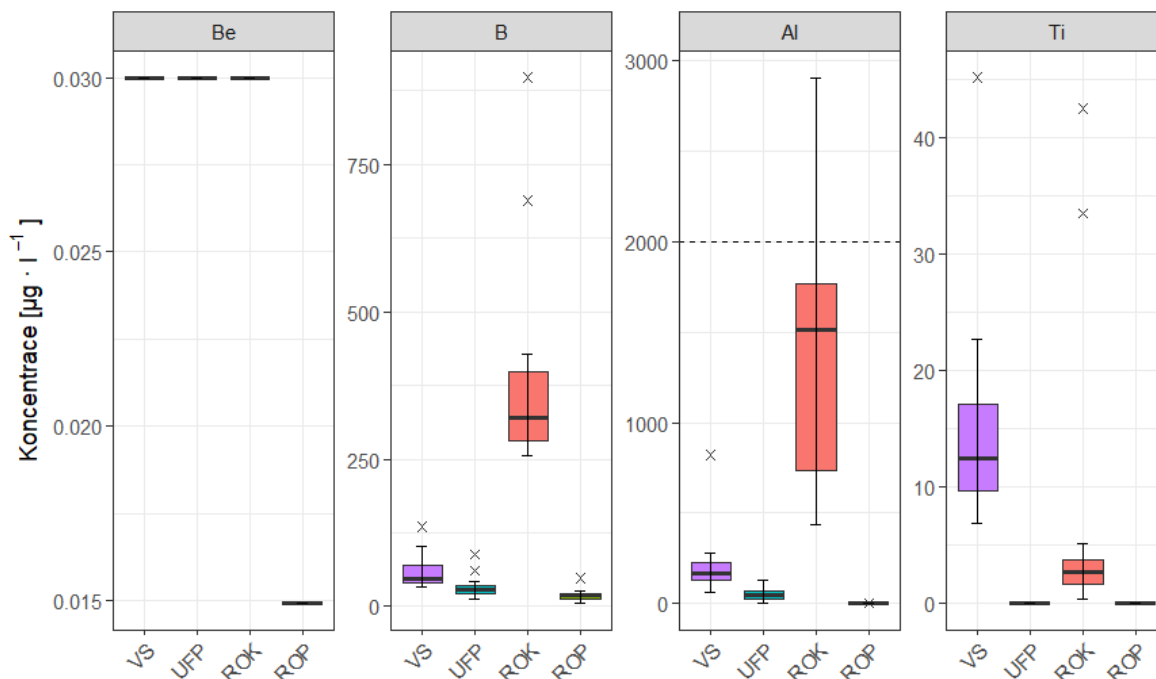
Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO-koncentrát	RO-permeát
Be [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 1)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,01491 (LOD)
B [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL; NO: 90 000)	* 63 ± 37 (34–43)	* 31 ± 12 (21–26)	* 360 ± 126 (259–311)	* 19 ± 5 (10–20)
Al [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 2 000)	* 243 ± 242 (61–147)	53 ± 39 (28–77)	$1\,454 \pm 826$ (929–1 979)	* $2,4 \pm 0,0$ (2,2–2,4)

Ti [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	17 ± 12 (7–10)	< 0,03 (LOD)	6,5 ± 9,8 (1,1–2,7)	< 0,06 (LOD)
V [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50)	* 0,8 ± 1,0 (0,1–0,4)	0,31 ± 0,26 (0,14–0,48)	3,8 ± 1,6 (2,8–4,8)	< 0,10 (LOQ)
Cr celkový [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 300; NO: 7 000)	* 2,2 ± 1,6 (1,1–1,5)	* 0,53 ± 0,17 (0,19–0,53)	< 4,13 (LOQ)	* 0,87 ± 1,78 (0,08–0,17)
Fe [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10 000)	* 204 ± 253 (57–99)	* 10,7 ± 5,3 (5,2–6,4)	* 178 ± 205 (47–63)	< 1,9 (LOQ)
Co [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50)	* 0,3 ± 0,4 (0,08–0,15)	* 0,064 ± 0,051 (0,018–0,037)	* 1,1 ± 0,9 (0,2–0,5)	* 0,007 ± 0,007 (0,002–0,003)
Ni [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 150; NO: 4 000)	* 4,5 ± 5,2 (1,4–1,8)	* 1,7 ± 0,8 (1,2–1,5)	* 11 ± 4 (6–9)	* 0,8 ± 0,5 (0,1–0,9)
Cu [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 700; NO: 10 000)	* 19 ± 11 (11–15)	9 ± 5 (6–13)	* 67 ± 29 (31–57)	0,6 ± 0,4 (0,3–0,9)
Zn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 2 500; NO: 20 000)	91 ± 49 (50–132)	48 ± 33 (27–69)	210 ± 129 (128–292)	10 ± 6 (6–14)
As [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50; NO: 2 500)	* 0,6 ± 0,3 (0,4–0,5)	* 0,33 ± 0,06 (0,27–0,31)	* 0,9 ± 0,3 (0,7–0,8)	< 0,07 (LOQ)
Se [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50; NO: 700)	* 2,9 ± 0,3 (2,1–3,0)	3,1 ± 0,4 (2,9–3,4)	3,1 ± 0,5 (2,8–3,5)	< 1,8 (LOQ)
Mo [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 30; NO: 3 000)	* 2,2 ± 4,0 (0,4–0,7)	* 1,04 ± 0,97 (0,46–0,69)	* 6,1 ± 2,1 (3,8–5,4)	< 0,04 (LOQ)
Ag [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 100)	< 0,04 (LOD)	< 0,04 (LOD)	< 0,9 (LOD)	< 0,06 (LOQ)
Cd [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 5; NO: 500)	< 0,0002 (LOD)	< 0,0002 (LOD)	< 0,09 (LOD)	< 0,004 (LOD)
Sn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10)	* 3,3 ± 1,9 (1,6–2,4)	* 0,83 ± 0,16 (0,41–0,86)	1,3 ± 0,9 (0,7–1,8)	* 0,49 ± 0,04 (0,47–0,47)
Sb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL; NO: 500)	* 19,1 ± 44,5 (0,5–0,6)	* 1,7 ± 2,5 (0,4–0,6)	* 9 ± 11 (1,2–2,3)	< 0,0013 (LOD)
Te [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,3 (LOQ)	< 0,3 (LOQ)	< 4,8 (LOD)	< 0,09 (LOQ)
Ba [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 500; NO: 30 000)	253 ± 188 (96–410)	128 ± 120 (52–205)	* 829 ± 610 (417–482)	146 ± 64 (100–192)
Tl [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,009 (LOD)	< 0,009 (LOD)	< 0,09 (LOD)	< 0,01 (LOD)
Pb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 250; NO: 5 000)	* 6 ± 12 (0,09–0,63)	< 0,03 (LOD)	* 11 ± 10 (2–5)	< 0,08 (LOQ)
U [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,4 (LOD)	< 0,003 (LOQ)

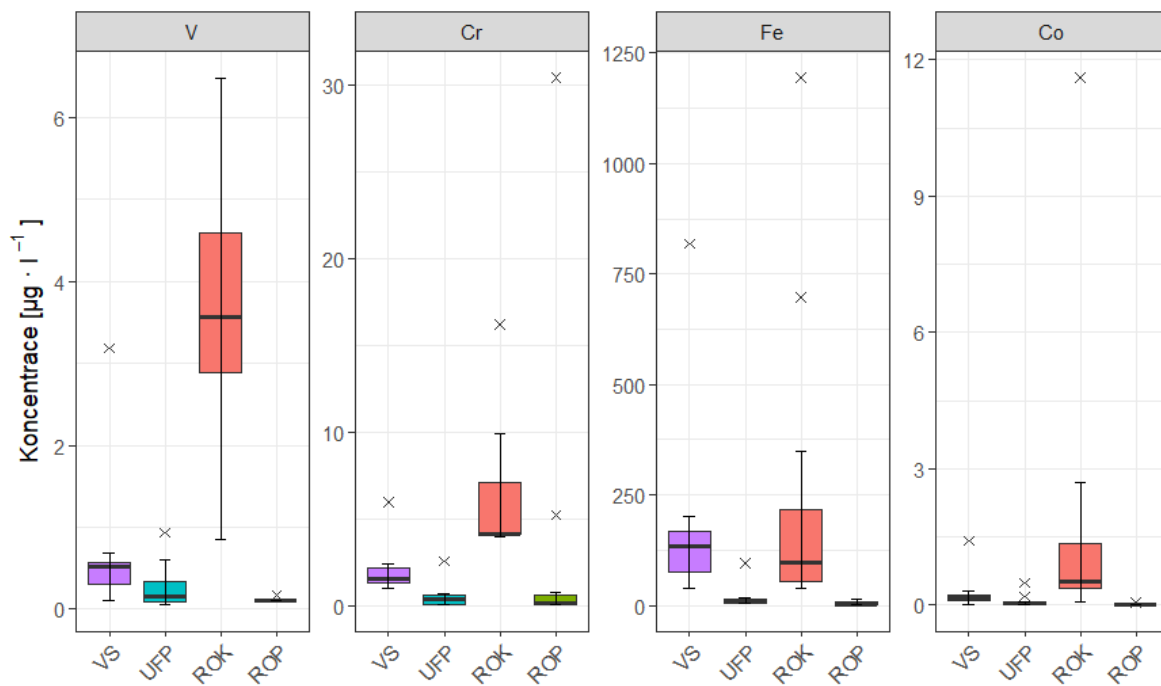
Tabulka 35: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů hodnocených v rámci KŘ a NO ve formátu: Medián ± mediánová absolutní odchylka (interval spolehlivosti mediánu)

Ukazatel (limit)	Vstup	UF-permeát	RO- koncentrát	RO-permeát
Be [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 1)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,01491 (LOD)
B [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL; NO: 90 000)	* 47 ± 17 (34–43)	* 28 ± 9 (21–26)	* 319 ± 76 (259–311)	* 20 ± 6 (10–20)
Al [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 2 000)	* 165 ± 66 (61–147)	47 ± 34 (5–39)	1 516 ± 852 (532–1 304)	* 2,4 ± 0,0 (2,2–2,4)
Ti [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	13 ± 5 (7–10)	< 0,03 (LOD)	3,2 ± 2,5 (1,1–2,7)	< 0,06 (LOD)
V [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50)	* 0,5 ± 0,3 (0,1–0,4)	0,26 ± 0,23 (0,05–0,21)	3,6 ± 1,1 (2,3–3,3)	< 0,10 (LOQ)
Cr celkový [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 300; NO: 7 000)	* 1,6 ± 0,7 (1,1–1,5)	* 0,62 ± 0,17 (0,19–0,53)	< 4,13 (LOQ)	* 0,17 ± 0,12 (0,08–0,17)
Fe [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10 000)	* 134 ± 87 (57–99)	* 11,0 ± 7,5 (5,2–6,4)	* 97 ± 81 (47–63)	< 1,9 (LOQ)
Co [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50)	* 0,17 ± 0,13 (0,08–0,15)	* 0,052 ± 0,051 (0,018–0,037)	* 0,58 ± 0,61 (0,22–0,52)	* 0,004 ± 0,003 (0,002–0,003)
Ni [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 150; NO: 4 000)	* 2,0 ± 0,8 (1,4–1,8)	* 1,6 ± 0,3 (1,2–1,5)	* 10 ± 5 (6–9)	* 0,88 ± 0,67 (0,11–0,88)
Cu [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 700; NO: 10 000)	* 17 ± 4 (11–15)	8 ± 6 (3–7)	* 62 ± 33 (31–57)	0,61 ± 0,46 (0,16–0,61)
Zn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 2 500; NO: 20 000)	80 ± 47 (40–71)	35 ± 37 (17–29)	190 ± 147 (79–168)	8 ± 3 (3–7)
As [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50; NO: 2 500)	* 0,52 ± 0,04 (0,43–0,49)	* 0,32 ± 0,04 (0,27–0,31)	* 0,81 ± 0,19 (0,67–0,77)	< 0,07 (LOQ)
Se [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 50; NO: 700)	* 2,99 ± 0,15 (2,14–2,96)	3,2 ± 0,3 (2,7–3,2)	3,1 ± 0,5 (2,6–3,0)	< 1,8 (LOQ)
Mo [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 30; NO: 3 000)	* 0,8 ± 0,4 (0,4–0,7)	* 0,7 ± 0,3 (0,5–0,7)	* 5,5 ± 1,7 (3,8–5,4)	< 0,04 (LOQ)
Ag [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 100)	< 0,04 (LOD)	< 0,04 (LOD)	< 0,9 (LOD)	< 0,06 (LOQ)
Cd [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 5; NO: 500)	< 0,0002 (LOD)	< 0,0002 (LOD)	< 0,09 (LOD)	< 0,004 (LOD)
Sn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 10)	* 2,7 ± 1,1 (1,6–2,4)	* 0,86 ± 0,00 (0,41–0,86)	1,0 ± 0,9 (0,3–0,9)	* 0,47 ± 0,00 (0,47–0,47)
Sb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL; NO: 500)	* 1,0 ± 0,6 (0,5–0,6)	* 0,7 ± 0,4 (0,4–0,6)	* 2,5 ± 2,1 (1,2–2,3)	< 0,0013 (LOD)
Te [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,3 (LOQ)	< 0,3 (LOQ)	< 4,8 (LOD)	< 0,09 (LOQ)

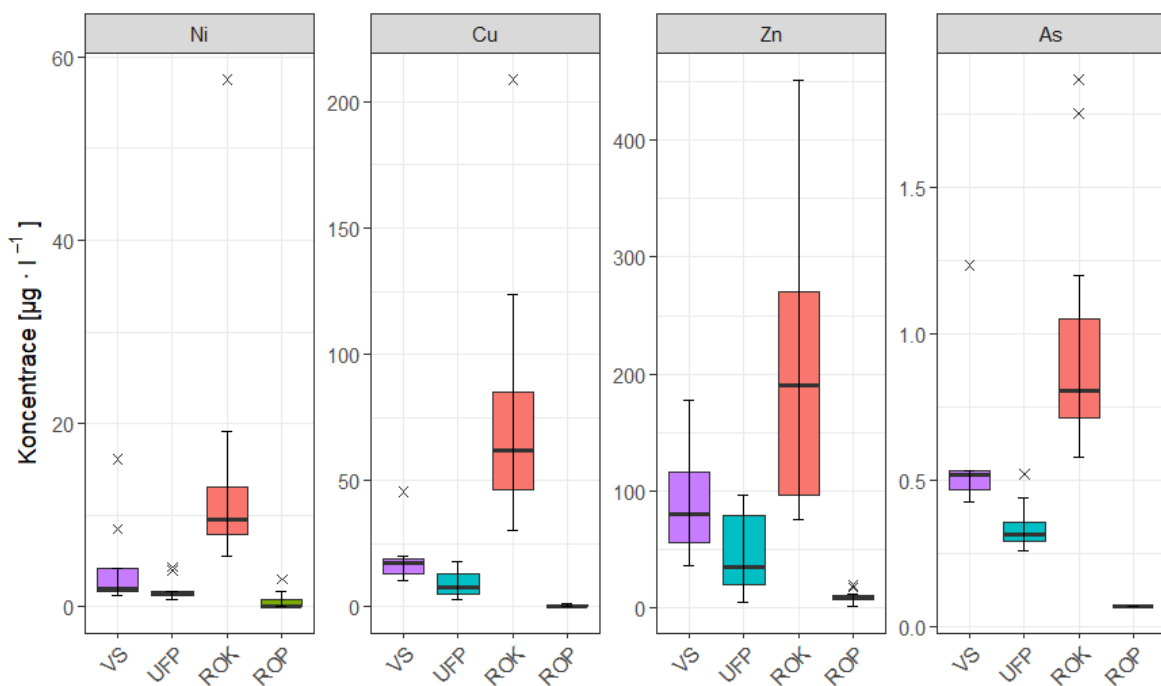
Ba [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 500; NO: 30 000)	330 ± 161 (5–180)	* 103 ± 139 (9–86)	* 616 ± 326 (417–482)	146 ± 89 (61–130)
Tl [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,009 (LOD)	< 0,009 (LOD)	< 0,09 (LOD)	< 0,01 (LOD)
Pb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (KŘ: 250; NO: 5 000)	* $1,09 \pm 1,02$ (0,09–0,63)	< 0,03 (LOD)	* 8 ± 9 (2–5)	< 0,08 (LOQ)
U [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$] (NZL)	< 0,03 (LOD)	< 0,03 (LOD)	< 0,4 (LOD)	< 0,003 (LOQ)



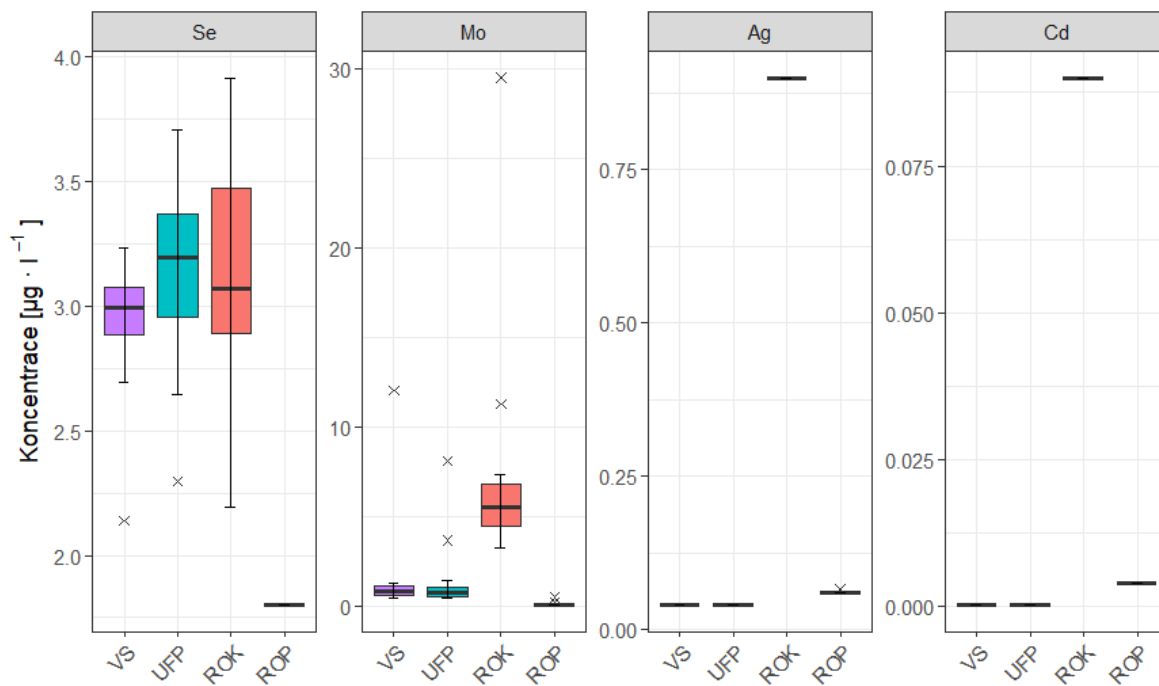
Obrázek 23: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



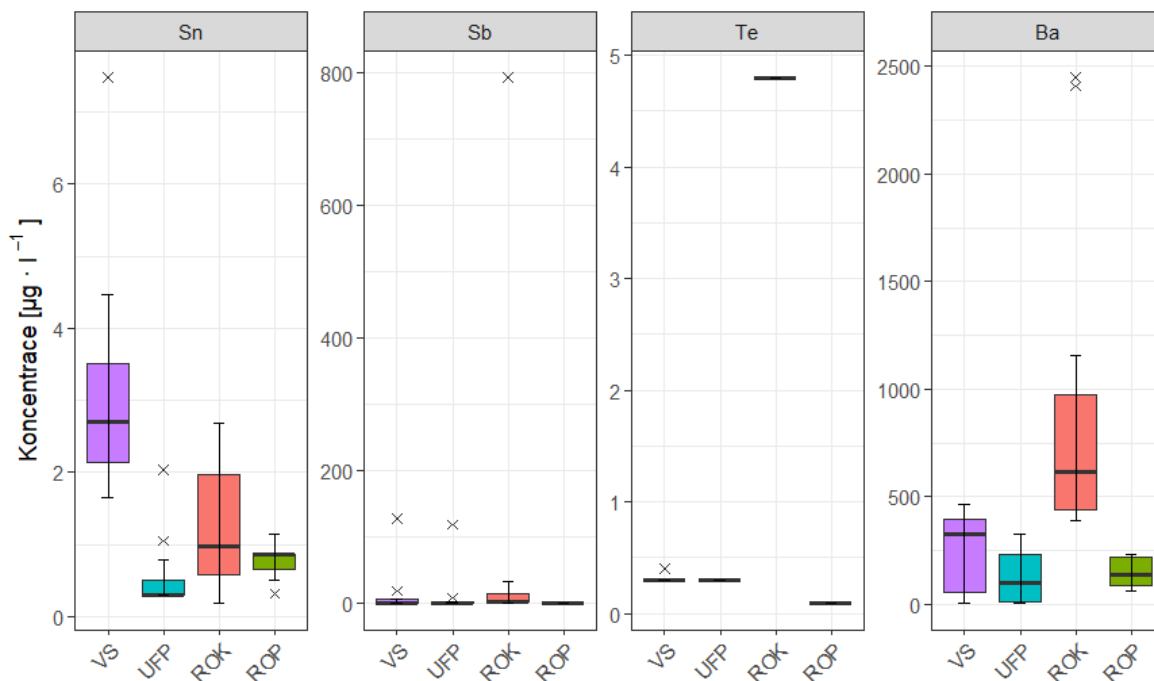
Obrázek 24: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



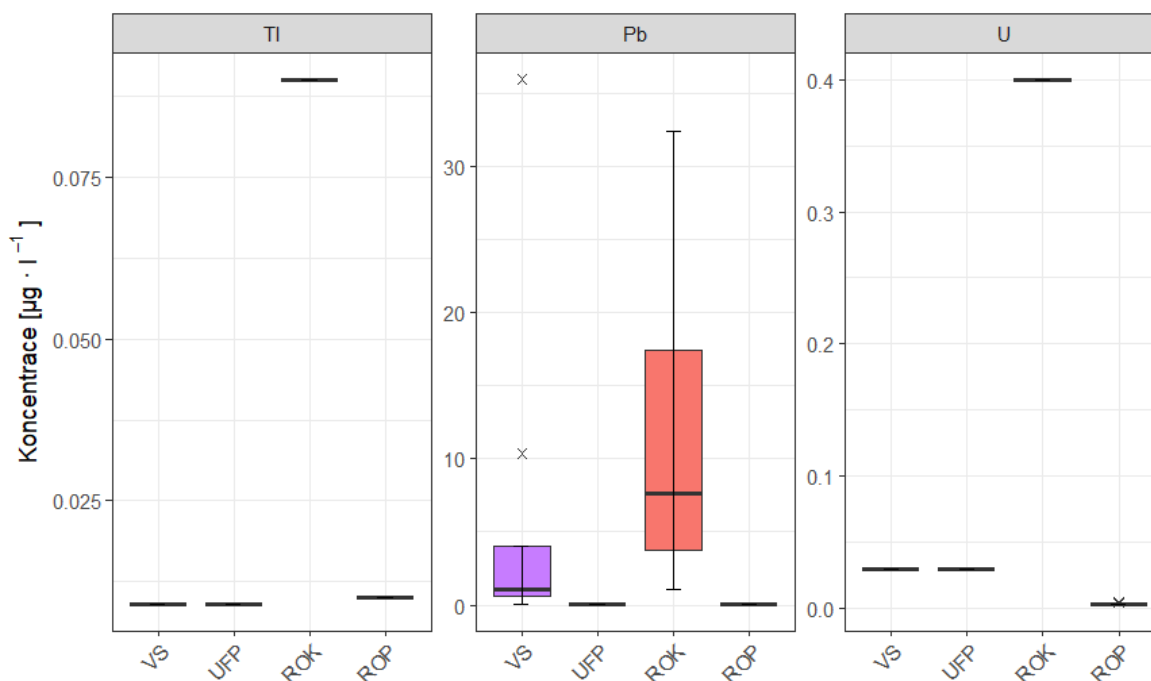
Obrázek 25: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



Obrázek 26: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



Obrázek 27: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů



Obrázek 28: Statisticky vyhodnocené hodnoty kovů

Před klasifikací koncentráту, zda je, nebo není nebezpečným odpadem, byla provedena i analýza vstupu, ultrafiltrace permeátu a reverzní osmózy permeátu, aby byla ověřena funkčnost a spolehlivost pilotní poloproduční jednotky. Na většině grafů je vidět trend zvýšení koncentrace na straně koncentráту a snížení koncentrace na straně permeátu bez výrazných odchylek. To dokazuje, že membrána fungovala spolehlivě. Při porovnání vstupu, UFP, ROK a ROP lze konstatovat, že došlo k odstranění části kovů na ultrafiltraci pomocí koagulace, ale hlavní část byla odseparována do koncentráту na reverzní osmóze.

Koncentrát pocházející z prádely je hodnocen třemi limity, a to látkami zakázanými vypouštět do kanalizace – tedy nebezpečné závadné látky (NZL), pokud nejsou uvedeny konkrétní koncentrace v kanalizačním řádu – dále samotným kanalizačním řádem a limitem pro nebezpečný odpad dle vybraných ukazatelů z HP 15.

Nebezpečných závadných látek bylo analyzováno 6 (bór, titan, antimon, telur, thalium a uran). Všechny sledované NZL kromě bóru se pohybovaly v jednotkách $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ až $\text{ng}\cdot\text{l}^{-1}$ (často na limitu kvantifikace či detekce), což je velmi nízká koncentrace a lze vést diskusi, zda se jedná o různou kontaminaci vzorků nebo zda je to matricové pozadí. Bór dosahuje relativně vyšších hodnot ($0,3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) na to, že by se neměl vyskytovat v kanalizaci vůbec.

Ze sledovaných ukazatelů v kanalizačním řádu překračoval limit pouze hliník. K překročení došlo pouze v pásmu 1,5násobku IQR. Avšak intervaly spolehlivosti se pouze blížily limitní hodnotě, nelze tedy prokazatelně vyloučit, že by nemohlo docházet k překračování limitu. K posouzení, zda by mohlo docházet k překračování limitní koncentrace hliníku, by byla potřeba dlouhodobější měrná kampaň.

Při hodnocení vybraných ukazatelů vůči limitům z HP 15 (viz Tabulka 1) bylo prokazatelně určeno, že všechna naměřená data jsou pod limitem. Nejedná se tedy o nebezpečný odpad.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá klasifikací koncentráту z membránových procesů. Pro klasifikaci byly ve spolupráci s firmou řešeny dvě odběrové lokality, a to městská čistírna odpadních vod s EO 640 000 a průmyslová prádelna o denní kapacitě 22 tun prádla.

V lokalitě ČOV byl koncentrát z reverzní osmózy hodnocen vůči dvěma limitům. První limit byl stanoven nařízením vlády č. 401/2015 Sb. o vypouštění odpadních vod do recipientu a druhý limit byl dán vyhláškou č. 8/2021 Sb., konkrétně větou HP 15, a z ní vybrané ukazatele. Ze statisticky zpracovaných výsledků vychází, že koncentrát z reverzní osmózy prokazatelně nesplňuje limity pro vypouštění do recipientu v následujících bodech: $CHSK_{Cr}$, celkový dusík a celkový fosfor. Dále ze statisticky zpracovaných výsledků vyplývá, že koncentrát z reverzní osmózy prokazatelně splňuje limity vybraných ukazatelů z věty HP 15 týkající se nebezpečných látek. Vhodným řešením, jak nakládat se vznikajícím koncentrátem, je vypouštění koncentráту do vstupního nátoku na ČOV. Tímto je tedy zamítnuta hypotéza 1 „Koncentrát z membránových procesů splňuje kvalitu pro vypouštění do recipientu“ a je potvrzena hypotéza 3 „Koncentrát z membránových procesů není nebezpečný odpad“, které byly definované v úvodu.

V lokalitě průmyslové prádelny byl koncentrát hodnocen vůči třem limitům. První limit je definován vodním zákonem, tedy že je zakázáno vypouštět nebezpečné závadné látky do kanalizace, pokud je nějakým způsobem neupravuje kanalizační řád. Druhým limitem je kanalizační řád vydaný provozovatelem kanalizace ve vzorkované lokaci. Třetí limit je definován vyhláškou č. 8/2021 Sb., konkrétně větou HP 15, a z ní vybrané ukazatele. Ze statisticky zpracovaných výsledků vychází, že koncentrát z reverzní osmózy obsahuje minimální množství NZL, avšak u bóru byla koncentrace relativně vyšší ($0,3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Dále ze statisticky zpracovaných výsledků vychází, že koncentrát z reverzní osmózy prokazatelně nesplňuje limity vybraných ukazatelů kanalizačního řádu, a to v těchto bodech: $CHSK_{Cr}$, BSK_5 , RL, RAS a Al. Ze statisticky zpracovaných výsledků rovněž plyne, že koncentrát z reverzní osmózy prokazatelně splňuje limity vybraných ukazatelů z věty HP 15 týkající se nebezpečných látek. Vhodným řešením, jak nakládat se vznikajícím koncentrátem, je nejprve jednat s provozovatelem kanalizací a ČOV o navýšení limitu KŘ a možnosti vypouštět definovanou odpadní vodu do kanalizace. Případně koncentrát ještě více zpracovat, např. technologiemi ZLT, a poté nakládat již s bezvodým odpadem. Poslední variantou je požádat o zpracování odpadní vody externí specializovanou firmou. Tímto je tedy zamítnuta hypotéza 2 „Koncentrát z membránových procesů splňuje kanalizační řád“ a potvrzena hypotéza 3 „Koncentrát z membránových procesů není nebezpečný odpad“, které byly definované v úvodu.

Sledované ukazatele vyskytující se v koncentráту z RO jsou nad limitem pro vypouštění do recipientu/kanalizace, ale jsou pod limitem klasifikace jako nebezpečný odpad. Koncentrát není nebezpečný pro životní prostředí, ale do budoucna by bylo vhodné provést další výzkum např. s využitím ZLD technologií. Zde by však bylo nutné zaměřit se na ekonomicky energetickou zátěž. Touto diplomovou prací bylo prokázáno, že **využití recyklačních procesů s sebou nese riziko produkce koncentrátů, se kterými je následně nutné nakládat v rámci platné legislativy.**

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Cirkulární Česko – Ministerstvo životního prostředí [online]. [vid. 2023-03-03]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/cirkularni_cesko
- [2] STRATEGICKÝ RÁMEC CIRKULÁRNÍ EKONOMIKY ČESKÉ REPUBLIKY 2040 [online]. 2021 [vid. 2023-03-03]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cirkularni_cesko/\\$FILE/OODP-Cirkularni_Cesko_2040_web-20220201.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cirkularni_cesko/$FILE/OODP-Cirkularni_Cesko_2040_web-20220201.pdf)
- [3] ČESKO. vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů) - znění od 1. 1. 2023. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 3. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8/zneni-20230101>
- [4] ČESKO. zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech – znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 3. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541/zneni-20220201>
- [5] Sdělení komise o technických pokynech pro klasifikování odpadu (2018/C 124/01) [online]. 2018 [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/technicke_pokyny_odpad/\\$FILE/OODP-sdeleni_komise_pro_klasifikovani_odpadu-20180713.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/technicke_pokyny_odpad/$FILE/OODP-sdeleni_komise_pro_klasifikovani_odpadu-20180713.pdf)
- [6] ČESKO. zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 6. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254/zneni-20220201>
- [7] ČESKO. nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech – znění od 1. 1. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 22. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-401/zneni-20220101>
- [8] ČESKO. vyhláška č. 428/2001 Sb., Ministerstva zemědělství, kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích) - znění od 1. 7. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 5. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-428/zneni-20220701>
- [9] ČESKO. vyhláška č. 183/2018 Sb., o náležitostech rozhodnutí a dalších opatření vodoprávního úřadu a o dokladech předkládaných vodoprávnímu úřadu – znění od 23. 8. 2019. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 13. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-183/zneni-20190823>
- [10] WANG, Lawrence K, David A VACCARI, Yan LI a Nazih K SHAMMAS. *Physicochemical treatment processes*. 2004. ISBN 1-58829-165-0.

- [11] CHEREMISINOFF, Nicholas P. Sedimentation, Clarification, Flotation, and Coalescence. In: Nicholas P CHEREMISINOFF, ed. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2002, s. 268–334. ISBN 0-7506-7498-9.
- [12] WANG, Lawrence K., Nazih K. SHAMMAS, William A. SELKE a Donald B. AULENBACH, ed. Flotation Technology [online]. Totowa, NJ: Humana Press, 2010. ISBN 978-1-58829-494-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-60327-133-2
- [13] WANG, Lawrence, Yung-Tse HUNG a Nazih SHAMMAS, ed. Emerging Flotation Technologies. In: Lawrence WANG, Yung-Tse HUNG a Nazih SHAMMAS, ed. Advanced Physicochemical Treatment Technologies. New Jersey: HANDBOOK OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2007, s. 449–481.
- [14] HOWE, Kerry J., David W. HAND, John C. CRITTENDEN a George TRUSSELL, R. RHODES TCHOBANOGLOUS. Principles of water treatment. B.m.: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-0-470-40538-3.
- [15] CHEREMISINOFF, Nicholas P. Ion exchange and carbon adsorption. In: Nicholas P CHEREMISINOFF, ed. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2002, s. 372–445. ISBN 0-7506-7498-9.
- [16] TEOW, Yeit Haan, Kah Chun HO, Sumith Ranil WICKRAMASINGHE, Mahmood Ghani JEBUR a Zhen Hong CHANG. Integrated process technology for recycling and re-use of industrial and municipal wastewater: A review. In: Integrated Environmental Technologies for Wastewater Treatment and Sustainable Development [online]. B.m.: Elsevier, 2022 [vid. 2023-03-26], s. 49–80. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-91180-1.00014-4
- [17] KAVIYA, S. Recent advances in water treatment facilities for wastewater reuse in the urban water supply. In: [online]. B.m.: Elsevier, 2022 [vid. 2023-03-26], s. 361–379. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-91838-1.00027-0
- [18] DING, Grace Kam Chun. Wastewater Treatment and Reuse—The Future Source of Water Supply. In: Encyclopedia of Sustainable Technologies [online]. B.m.: Elsevier, 2017 [vid. 2023-03-26], s. 43–52. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10170-8
- [19] BAGASTYO, Arseto Y., Jelena RADJENOVIC, Yang MU, René A. ROZENDAL, Damien J. BATSTONE a Korneel RABAEY. Electrochemical oxidation of reverse osmosis concentrate on mixed metal oxide (MMO) titanium coated electrodes. Water Research [online]. 2011, 45(16), 4951–4959 [vid. 2023-03-26]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.06.039
- [20] HURWITZ, Gil, Eric M.V. HOEK, Kai LIU, Linhua FAN a Felicity A. RODDICK. Photo-assisted electrochemical treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate. Chemical Engineering Journal [online]. 2014, 249, 180–188 [vid. 2023-03-26]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.03.084

- [21] JUSTO, A., O. GONZÁLEZ, J. ACEÑA, S. PÉREZ, D. BARCELÓ, C. SANS a S. ESPLUGAS. Pharmaceuticals and organic pollution mitigation in reclamation osmosis brines by UV/H₂O₂ and ozone. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2013, 263, 268–274 [vid. 2023-03-26]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2013.05.030
- [22] LEE, Lai Yoke, How Yong NG, Say Leong ONG, Jiang Yong HU, Guihe TAO, Kiran KEKRE, Balakrishnan VISWANATH, Winson LAY a Harry SEAH. Ozone-biological activated carbon as a pretreatment process for reverse osmosis brine treatment and recovery. *Water Research* [online]. 2009, 43(16), 3948–3955 [vid. 2023-03-26]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2009.06.016
- [23] PRADHAN, Shovana, Linhua FAN a Felicity A. RODDICK. Removing organic and nitrogen content from a highly saline municipal wastewater reverse osmosis concentrate by UV/H₂O₂–BAC treatment. *Chemosphere* [online]. 2015, 136, 198–203 [vid. 2023-03-26]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2015.05.028
- [24] SHANMUGANATHAN, Sukanyah, Tien Vinh NGUYEN, Sanghyun JEONG, Jaya KANDASAMY a Saravanamuthu VIGNESWARAN. Submerged membrane – (GAC) adsorption hybrid system in reverse osmosis concentrate treatment. *Separation and Purification Technology* [online]. 2015, 146, 8–14 [vid. 2023-03-26]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2015.03.017
- [25] QUAN, Xiao, Kai HUANG, Mei LI, Meichao LAN a Baoan LI. Nitrogen removal performance of municipal reverse osmosis concentrate with low C/N ratio by membrane-aerated biofilm reactor. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* [online]. 2018, 12(6), 5 [vid. 2023-03-26]. ISSN 2095-2201. Dostupné z: doi:10.1007/s11783-018-1047-6
- [26] JEPPESEN, T., L. SHU, G. KEIR a V. JEGATHEESAN. Metal recovery from reverse osmosis concentrate. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2009, 17(7), 703–707 [vid. 2023-03-27]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2008.11.013
- [27] PRADO DE NICOLÁS, Amanda, Angel MOLINA-GARCÍA, Juan Tomás GARCÍA-BERMEJO a Francisco VERA-GARCÍA. Reject brine management: Denitrification and zero liquid discharge (ZLD)—Current status, challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2022, 381, 135124 [vid. 2023-04-03]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2022.135124
- [28] YAQUB, Muhammad, Mai Ngoc NGUYEN a Wontae LEE. Treating reverse osmosis concentrate to address scaling and fouling problems in zero-liquid discharge systems: A scientometric review of global trends. *Science of The Total Environment* [online]. 2022, 844, 157081 [vid. 2023-04-03]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157081
- [29] MENG, Lijun, Jaleh MANSOURI, Xuesong LI, Jiaying LIANG, Manhong HUANG, Yan LV, Zhiwei WANG a Vicki CHEN. Omniphobic membrane via bioinspired silicification for the treatment of RO concentrate by membrane distillation. *Journal of Membrane Science* [online]. 2022, 647, 120267 [vid. 2023-04-03]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2022.120267

- [30] CHEN, Qian, Muhammad BURHAN, Muhammad Wakil SHAHZAD, Doskhan YBYRAIYMKUL, Faheem Hassan AKHTAR, Yong LI a Kim Choon NG. A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment. *Desalination* [online]. 2021, 502, 114928 [vid. 2023-04-03]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2020.114928
- [31] LOGANATHAN, Kavithaa, Pamela CHELME-AYALA a Mohamed GAMAL EL-DIN. Pilot-scale study on the treatment of basal aquifer water using ultrafiltration, reverse osmosis and evaporation/crystallization to achieve zero-liquid discharge. *Journal of Environmental Management* [online]. 2016, 165, 213–223 [vid. 2023-04-03]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2015.09.019
- [32] PANAGOPOULOS, Argyris, Katherine-Joanne HARALAMBOUS a Maria LOIZIDOU. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of The Total Environment* [online]. 2019, 693, 133545 [vid. 2023-04-03]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.351
- [33] REZVANI DASTGERDI, Hamid a Hui Tong CHUA. A new zero-liquid-discharge brine concentrator using a Cascaded Fluidised Bed Ice Slurry Generator. *Desalination* [online]. 2021, 520, 115344 [vid. 2023-04-03]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115344
- [34] KŮDELA VLASTIMIL, MIKULÁŠEK PETR a PALATÝ ZDENĚK. Anglicko-český a česko-anglický membranologický výkladový slovník. první. Havlíčkův Brod: Česká membránová platforma, o.s., 2010.
- [35] Membrane Filtration. In: *MWH's Water Treatment* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012 [vid. 2023-03-18], s. 819–902. Dostupné z: doi:10.1002/9781118131473.ch12
- [36] MACKENZIE, Davis. Membrane Filtration. In: *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, Second Edition*. 2019, s. 455–475. ISBN 978-1-260-13227-4.
- [37] PALATÝ, Zdeněk, Bohumil BERNAUER, Petr MIKULÁŠEK, H. JIRÁNKOVÁ, M. ŠÍPEK, K. FRIESS a K. BOUZEK. Membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [38] JELÍNEK, Luděk, Helena PARŠCHOVÁ, Eva MIŠTOVÁ a Martin PAIDAR. Desalinační a separační metody v úpravě vody. B.m.: VŠCHT, 2009. ISBN 978-80-7080-705-7.
- [39] CRITTENDEN, John C., R. Rhodes TRUSSELL, David W. HAND, Kerry J. HOWE a George TCHOBANOGLIOUS. *MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition* [online]. B.m.: John Wiley and Sons, 2012 [vid. 2023-03-18]. ISBN 9780470405390. Dostupné z: doi:10.1002/9781118131473
- [40] Reverse Osmosis. In: *MWH's Water Treatment* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012 [vid. 2023-03-18], s. 1335–1414. Dostupné z: doi:10.1002/9781118131473.ch17

- [41] MIKULÁŠEK, Petr a ČESKÁ MEMBRÁNOVÁ PLATFORMA. Tlakové membránové procesy. B.m.: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [42] HASAL P., SCHREIBER I., ŠNITA D. a ET AL. Chemické inženýrství I. Second edition. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [43] MACKENZIE, Davis. Reverse Osmosis and Nanofiltration. In: Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, Second Edition. Second Edition. B.m.: McGraw-Hill Education, 2019, s. 333–352. ISBN 978-1-260-13227-4.
- [44] SCHAUER, J. a M. KOČIŘÍK. Membránové materiály. In: Membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012, s. 67–105. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [45] SCHAUER, J. a M. KOČIŘÍK. Membránové materiály. In: Tlakové membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, s. 33–55. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [46] CUI, Z.F. a H.S. MURALIDHARA, ed. Membrane Technology A Practical Guide to Membrane Technology and Applications in Food and Bioprocessing [online]. First edition. B.m.: Elsevier, 2010. ISBN 978-1-85617-632-3. Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-19129-8
- [47] Membrane Filtration. In: MWH's Water Treatment [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, s. 819–902. Dostupné z: doi:10.1002/9781118131473.ch12
- [48] WANG, Lawrence K., Jiaping Paul CHEN, Yung-Tse HUNG a Nazih K. SHAMMAS, ed. Membrane and Desalination Technologies [online]. Totowa, NJ: Humana Press, 2011. ISBN 978-1-58829-940-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-59745-278-6
- [49] WANG, Lawrence, Yung-Tse HUNG a Nazih SHAMMAS, ed. Reverse Osmosis Technology for Desalination. In: Lawrence WANG, Yung-Tse HUNG a Nazih SHAMMAS, ed. Advanced Physicochemical Treatment Technologies. New Jersey: HANDBOOK OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2007, s. 329–363.
- [50] Ústav biotechnologie: Separace v biotechnologiích. In: [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2011 [vid. 2023-03-18], s. 20. Dostupné z: <http://ub.vscht.cz/files/uzel/0015847/separ.pdf?redirected>
- [51] Membránové procesy pro úpravu pitné vody – ASIO [online]. [vid. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/news/membranove-procesy-pro-upravu-pitne-vody.62>
- [52] KUCERA, J. Reverse Osmosis - Industrial Processes and Applications. 2nd. Massachusetts (USA): Scrivener Publishing LLC, Wiley & Sons, Inc., 2015. ISBN 978-1-118-63974-0.
- [53] SENEVIRATNE, Mohan. Laundries. In: A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities [online]. B.m.: Elsevier, 2006 [vid. 2023-03-24], s. 343–356. Dostupné z: doi:10.1016/B978-185617489-3.50018-7

- [54] ŠOSTAR-TURK, S., I. PETRINIĆ a M. SIMONIČ. Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2005, 44(2), 185–196 [vid. 2023-03-24]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2004.11.002
- [55] HOINKIS, Jan a Volker PANTEN. Wastewater recycling in laundries—From pilot to large-scale plant. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2008, 47(7), 1159–1164 [vid. 2023-03-24]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2007.12.010
- [56] KUMAR, Sushil, Ali Khosravanipour MOSTAFAZADEH, Lalit R. KUMAR, R. D. TYAGI, Patrick DROGUI a Emmanuel BRIEN. Advancements in laundry wastewater treatment for reuse: a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* [online]. 2022, 57(11), 927–946 [vid. 2023-03-24]. ISSN 1093-4529. Dostupné z: doi:10.1080/10934529.2022.2132076
- [57] KIM, Soyoun a Chanhyuk PARK. Fouling behavior and cleaning strategies of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment and reuse of laundry wastewater. *Journal of Water Process Engineering* [online]. 2022, 48, 102840 [vid. 2023-03-24]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2022.102840
- [58] GUILBAUD, Julie, Anthony MASSÉ, Yves ANDRÈS, François COMBE a Pascal JAOUEN. Laundry water recycling in ship by direct nanofiltration with tubular membranes. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2010, 55(2), 148–154 [vid. 2023-03-24]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.001
- [59] ZOROUFCHI BENIS, Khaled, Ali BEHNAMI, Ehsan AGHAYANI, Somayeh FARABI a Mojtaba POURAKBAR. Water recovery and on-site reuse of laundry wastewater by a facile and cost-effective system: Combined biological and advanced oxidation process. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, 789, 148068 [vid. 2023-03-24]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148068
- [60] JØRGENSEN, Kim Riisgaard, Alejandro VILLANUEVA a Henrik WENZEL. Use of life cycle assessment as decision-support tool for water reuse and handling of residues at a Danish industrial laundry. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* [online]. 2004, 22(5), 334–345 [vid. 2023-03-25]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X04046489
- [61] MOZIA, Sylwia, Magdalena JANUS, Piotr BROŻEK, Sławomira BERING, Krzysztof TARNOWSKI, Jacek MAZUR a Antoni W MORAWSKI. A system coupling hybrid biological method with UV/O₃ oxidation and membrane separation for treatment and reuse of industrial laundry wastewater. *Environmental science and pollution research international* [online]. 2016, 23(19), 19145–55 [vid. 2023-03-25]. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-7111-5

- [62] BRAGA, Juliana K, Fabrício MOTTERAN, Thaís Z MACEDO, Isabel K SAKAMOTO, Tiago P DELFORNO, Dagoberto Y OKADA, Edson L SILVA a Maria Bernadete A VARESCHE. Biodegradation of linear alkylbenzene sulfonate in commercial laundry wastewater by an anaerobic fluidized bed reactor. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering* [online]. 2015, 50(9), 946–57 [vid. 2023-03-24]. ISSN 1532-4117. Dostupné z: doi:10.1080/10934529.2015.1030290
- [63] OMOLARA, Lade. Sustainable water supply: Potential of recycling laundry wastewater for domestic use. *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences* [online]. 2017, 3, 056–060 [vid. 2023-04-04]. ISSN 2455488X. Dostupné z: doi:10.17352/2455-488X.000029
- [64] ÜSTÜN, Gökhan Ekrem, Kübra BOZDAŞ a Tuğba CAN. Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater treatment plant in Turkey. *Environmental Pollution* [online]. 2022, 310, 119890 [vid. 2023-03-27]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2022.119890
- [65] ZHANG, Borui, Qixin WU, Shilin GAO, Yunjun RUAN, Guizhi QI, Ke GUO a Jie ZENG. Distribution and removal mechanism of microplastics in urban wastewater plants systems via different processes. *Environmental Pollution* [online]. 2023, 320, 121076 [vid. 2023-03-27]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2023.121076
- [66] LINGHU, Keli, Qixin WU, Jue ZHANG, Zhuhong WANG, Jie ZENG a Shilin GAO. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of antibiotics in Nanming river: Contribution from wastewater treatment plant and implications of urban river syndrome. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2023, 169, 428–436 [vid. 2023-03-27]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2022.11.025
- [67] LIU, Kai, Felicity A. RODDICK a Linhua FAN. Impact of salinity and pH on the UVC/H₂O₂ treatment of reverse osmosis concentrate produced from municipal wastewater reclamation. *Water Research* [online]. 2012, 46(10), 3229–3239 [vid. 2023-03-26]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2012.03.024
- [68] MOHSENI, Arash, Matthew KUBE, Linhua FAN a Felicity A RODDICK. Potential of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis salina* for nutrient and organic matter removal from municipal wastewater reverse osmosis concentrate. *Environmental science and pollution research international* [online]. 2020, 27(21), 26905–26914 [vid. 2023-03-26]. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-020-09103-6
- [69] MINICH, Marek, Lucie BÁBORSKÁ a Martina REPKOVÁ. PITNÁ VODA 2022. In: Pavel DOBIÁŠ, ed. VYUŽITIE TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESOV PRE RECYKLÁCIU MESTSKÝCH ODPADOVÝCH VÔD. 2022, s. 277. ISBN 978-80-905059-9-5.
- [70] INGE-LENNTECH. dizzer® XL 1.5 MB 40 ST for T-Rack® 3.0 S Module Specifications T-Rack® Specifications Weight (including modules and frame) [2] [online]. [vid. 2023-04-04]. Dostupné z: www.dupontwatersolutions.com

- [71] LENNTECH. RE4040-BLF Ultra-low pressure grade RO element for low TDS water [online]. [vid. 2023-04-04]. Dostupné z: www.lenntech.com
- [72] Pentair - Products | X-Flow [online]. [vid. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://xflow.pentair.com/en/products/compact27>
- [73] INGE-LENNTECH. Inge-Dizzer-P-Ultrafiltration-Lenntech - inge multibore® 0.9 dizzer® P 4040-6 [online]. [vid. 2023-04-04]. Dostupné z: www.lenntech.comFax.
- [74] LENNTECH. RE4040-BLN-L Low pressure grade RO element with extended area for brackish water [online]. [vid. 2023-04-04]. Dostupné z: www.lenntech.comFax.
- [75] ČSN EN ISO 5667-1 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 1 Návod pro návrh programu vzorkování a pro způsoby odběru vzorků. Praha: Český normalizační institut, 2019. 40 s.
- [76] ČSN ISO 5667-10 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 10 Návod pro odběr vzorků odpadních vod. Praha: Český normalizační institut, 2019. 41 s.
- [77] ČSN ISO 5667-14 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 14 Návod pro prokazování a řízení kvality odběru vzorků vod a manipulace s nimi. Praha: Český normalizační institut, 2019. 36 s.
- [78] ČSN ISO 15705 Jakost vod – Stanovení chemické spotřeby kyslíku (CHSK_{Cr}) - Metoda ve zkumavkách. Praha: Český normalizační institut, 2008. 24 s.
- [79] ČSN EN ISO 5815-1 Kvalita vod – Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech (BOD_n) - Část 1: Zředovací a očkovací metoda s přidavkem allylthiomocoviny. Praha: Český normalizační institut, 2020. 28 s.
- [80] ŠVÁBOVÁ, Martina. Optimalizace koagulačního postupu při čištění odpadní vody. [online]. Brno, 2019 [vid. 2023-04-07]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická,. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113498>.
- [81] ČSN EN ISO 872 Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken. Praha: Český normalizační institut, 2005. 12 s.
- [82] ČSN 75 7346 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných látek. Praha: Český normalizační institut, 2002. 12 s.
- [83] ČSN 75 7347 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných anorganických solí (RAS) v odpadních vodách – Gravimetrická metoda po filtraci filtrem ze skleněných vláken. Praha: Český normalizační institut, 2009. 12 s.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Tabulka 36: Seznam použitých zkratek

AUT	Rakousko
BSK	Biologická spotřeba kyslíku
BSK ₅	Biologická spotřeba kyslíku za 5 dní
CA	Acetát celulózy
Celk.	Celkový
č.	Číslo
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	České republika
ČSN	Česká technická norma
ČSR	Československá republika
DEU	Německo
DIN	Německý institut pro normy a standardizace
EO	Ekvivalentní obyvatel
EN	Evropský výbor pro normalizaci
FCH VUT	Fakulta chemická Vysokého učení technického
GAU	Granulované aktivní uhlí
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou
CHE	Švýcarsko
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
CHSK _{Cr}	Chemická spotřeba kyslíku chromanová
ICP-MS	Hmotnostní spektrometrie indukčně vázaného plazmatu
IQR	Mezikvartilový rozsah
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
JPN	Japonsko
Komerč.	Komerční
Komunál.	Komunální
KŘ	Kanalizační řád
LOD	Limit detekce
LOQ	Limit kvantifikace
m	Maximální hodnota
max	Maximální hodnota
MBR	Membránový bioreaktor
MF	Mikrofiltrace
Nemoc.	Nemocniční
NF	Nanofiltrace
NO	Nebezpečný odpad
NŘV	Nářízení vlády
NZL	Nebezpečné závadné látky
p	Průměrná hodnota
PA	Polyamid
PAC	Polyaluminium chlorid
PAU	Práškové aktivní uhlí

PES	Polyethersulfon
PNL	Prioritní nebezpečné látky
PP	Polypropylen
Prádel.	Prádelna
prů	Průměrná hodnota
PS	Polysulfon
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-U	Neměkčený polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RAS	Rozpuštěné anorganické soli
RL	Rozpuštěné látky
RO	Reverzní osmóza
ROK	Koncentrát z reverzní osmózy
ROP	Permeát z reverzní osmózy
spp.	Vícero druhů (species plural)
UF	Ultrafiltrace
UFP	Permeát z ultrafiltrace
USA	Spojené státy americké
VS	Vstup
ZL	Závadné látky
ZLD	Zero liquid discharge
ZNZL	Zvlášť nebezpečné závadné látky

9 PŘÍLOHY

9.1 Příloha A – Zvlášť nebezpečné závadné a nebezpečné závadné látky

Zvlášť nebezpečné závadné látky [6]

- Organohalogenové sloučeniny a látky, které mohou tvořit takové sloučeniny ve vodním prostředí,
- Organofosforové sloučeniny,
- Organocínové sloučeniny,
- Látky nebo produkty jejich rozkladu, u kterých byly prokázány karcinogenní nebo mutagenní vlastnosti, které mohou ovlivnit produkci steroidů, štítnou žlázu, rozmnožování nebo jiné endokrinní funkce ve vodním prostředí nebo zprostředkovaně přes vodní prostředí,
- Rtuť a její sloučeniny,
- Kadmium a jeho sloučeniny,
- Persistentní minerální oleje a persistentní uhlovodíky ropného původu,
- Persistentní syntetické látky, které se mohou vznášet, zůstávat v suspenzi nebo klesnout ke dnu a které mohou zasahovat do jakéhokoliv užívání vod.

Nebezpečné závadné látky [6]

- Sloučeniny metaloidů a kovů: Zinek, Cín, Měď, Baryum, Nikl, Beryllium, Chrom, Bor, Olovo, Uran, Selen, Vanad, Arsen, Kobalt, Antimon, Thallium, Molybden, Tellur, Titan, Stříbro
- Biocidy a jejich deriváty neuvedené v seznamu zvlášť nebezpečných závadných látek.
- Látky, které mají škodlivý účinek na chuť nebo na vůni produktů pro lidskou spotřebu pocházejících z vodního prostředí, a sloučeniny mající schopnost zvýšit obsah těchto látek ve vodách.
- Toxické nebo persistentní organické sloučeniny křemíku a látky, které mohou zvýšit obsah těchto sloučenin ve vodách, vyjma těch, jež jsou biologicky neškodné nebo se rychle přeměňují ve vodě na neškodné látky.
- Elementární fosfor a anorganické sloučeniny fosforu.
- Nepersistentní minerální oleje a nepersistentní uhlovodíky ropného původu.
- Fluoridy.
- Látky, které mají nepříznivý účinek na kyslíkovou rovnováhu, zejména amonné soli a dusitany.
- Kyanidy.
- Sedimentovatelné tuhé látky, které mají nepříznivý účinek na dobrý stav povrchových vod.

9.2 Příloha B – Základní kanalizační řád

Tabulka 37: Vybrané ukazatele a jejich koncentrační limity pro orientační stanovení přípustné míry znečištění ve vypouštěné průmyslové odpadní vodě [8]

Ukazatel	Symbol	Koncentrační limity z kontrolního dvouhodinového směšného vzorku mg·l ⁻¹
Reakce vody	pH	6,0–9,0
Teplota	T	40° C
Biochemická spotřeba kyslíku	BSK ₅	800
Chemická spotřeba kyslíku	CHSK _{Cr}	1 600
Nerozpuštěné látky	NL	500
Dusík amoniakální	N-NH ₄ ⁺	45
Dusík celkový	N _{celk.}	60
Fosfor celkový	P _{celk.}	10
Rozpuštěné anorganické soli	RAS	2 500
Kyanidy celkové	CN ⁻ _{celk.}	0,2
Kyanidy toxické	CN ⁻ _{tox.}	0,1
Uhlovodíky C 10-C40	C10-C40	10
Extrahovatelné látky	EL	80
Tenzidy aniontové	PAL-A	10
Rtuť	Hg	0,05
Měď	Cu	1,0
Nikl	Ni	0,1
Chrom celkový	Cr _{celk.}	0,3
Chrom šestimocný	Cr ⁶⁺	0,1
Olovo	Pb	0,1
Arsen	As	0,2
Zinek	Zn	2
Kadmium	Cd	0,1
<i>Salmonella spp.</i>		negativní nález

9.3 Příloha C – Seznam sledovaných ukazatelů

Tabulka 38: Seznam sledovaných ukazatelů

Fyzikálně–chemické ukazatele	Sledováno v limitech:
1. pH [–]	KŘ a NO
2. Vodivost [$\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$]	
3. Nerozpuštěné látky NL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV a KŘ
4. Rozpuštěné látky RL [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
5. Rozpuštěné anorganické soli RAS [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
Chemické ukazatele	
6. CHSK _{Cr} [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV a KŘ
7. BSK ₅ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV a KŘ
8. Dusitany NO ₂ [–] [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV
9. Dusičnany NO ₃ [–] [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV
10. Amonné kationty NH ₄ ⁺ [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	NŘV a KŘ
11. Beryllium Be [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
12. Bor B [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL a NO
13. Hliník Al [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
14. Fosfor P [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
15. Titan Ti [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL
16. Vanad V [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
17. Chrom Cr [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
18. Železo Fe [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
19. Kobalt Co [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
20. Nikl Ni [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
21. Měď Cu [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
22. Zinek Zn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
23. Arsen As [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
24. Selen Se [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
25. Molybden Mo [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
26. Stříbro Ag [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
27. Kadmium Cd [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
28. Cín Sn [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ
29. Antimon Sb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL a NO
30. Tellur Te [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL
31. Baryum Ba [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
32. Thalium Tl [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL
33. Olovo Pb [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	KŘ a NO
34. Uran U [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	NZL

9.4 Příloha D – Kalibrační řada prvkové analýzy

Tabulka 39: Kalibrační řada pro prvkovou analýzu

Level [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Be	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
B	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Al	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
P	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	2 000
Ti	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
V	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Cr	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Fe	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Co	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Ni	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Cu	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Zn	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
As	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Se	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Mo	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Ag	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	/
Cd	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Sn	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	/
Sb	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	/
Te	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	/
Ba	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Tl	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
Pb	0	1	5	10	20	50	100	300	500	1 000	2 000
U	0	1	5	/	20	50	100	/	500	1 000	/

9.5 Příloha E – Nastavení přístroje ICP-MS

Tabulka 40: Nastavení přístroje ICP-MS

Vzorkovací hloubka [mm]	10,0
Průtok nosného plynu [$l \cdot \text{min}^{-1}$]	1,07
Průtok make-up plynu [$l \cdot \text{min}^{-1}$]	0,0
Teplota zamlžovací kolory [$^{\circ}\text{C}$]	2
Otáčky peristaltického vícekanálového čerpadla [rpm]	
• při optimalizaci vzorku	0,5
• při analýze vzorku	0,1
Příkon do ICP [W]	1550
Horizontální pozice plazmové hlavice [mm]	0,1
Vertikální pozice plazmové hlavice [mm]	-0,1
Extrakční čočky 1 [V]	0,0
Extrakční čočky 2 [V]	-227,5
Omega bias [V]	-109
Omega čočky [V]	13,5
Cela – vstup [V]	-30
Cela – výstup [V]	-50
Odklon [V]	5,4
Plate bias [V]	-43
Průtok kolizního plynu (He) [$\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$]	5
Integrační čas detektoru [s]	0,1
Vzorkovací perioda [s]	0,311

9.6 Příloha F – Detekční limity ICP-MS

Tabulka 41: Detekční limity ICP-MS

PRVEK	DETEKČNÍ LIMIT [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]				
	ČOV-ROK	Prádel.-VS	Prádel.-UFP	Prádel.-ROK	Prádel.-ROP
⁹ Be		$2,78\cdot 10^{-2}$	$2,78\cdot 10^{-2}$	$2,78\cdot 10^{-2}$	$1,49\cdot 10^{-2}$
¹¹ B	5,17	0,203	0,203	10,3	1,50
²⁷ Al		0,19	0,19	11,05	0,17
³¹ P	61,3	4,8	4,8	39,9	4,09
⁴⁷ Ti		$2,85\cdot 10^{-2}$	$2,85\cdot 10^{-2}$	0,28	$5,96\cdot 10^{-2}$
⁵¹ V		$2,09\cdot 10^{-2}$	$2,09\cdot 10^{-2}$	0,108	$3,06\cdot 10^{-2}$
⁵² Cr	1,24	$3,12\cdot 10^{-2}$	$3,12\cdot 10^{-2}$	1,24	$2,62\cdot 10^{-2}$
⁵⁶ Fe		1,7	1,7	25,1	1,8
⁵⁷ Fe		0,38	0,38	8,7	0,58
⁵⁹ Co		$7,92\cdot 10^{-4}$	$7,92\cdot 10^{-4}$	$2,45\cdot 10^{-2}$	$9,35\cdot 10^{-4}$
⁶⁰ Ni	0,88	$2,70\cdot 10^{-2}$	$2,70\cdot 10^{-2}$	0,88	$8,67\cdot 10^{-3}$
⁶³ Cu	0,25	$7,13\cdot 10^{-2}$	$7,13\cdot 10^{-2}$	0,25	$2,43\cdot 10^{-2}$
⁶⁶ Zn	0,59	$3,47\cdot 10^{-2}$	$3,47\cdot 10^{-2}$	0,59	$8,72\cdot 10^{-2}$
⁷⁵ As	0,19	$1,58\cdot 10^{-2}$	$1,58\cdot 10^{-2}$	0,19	$2,15\cdot 10^{-2}$
⁷⁸ Se	0,59	0,59	0,59	0,59	0,55
⁹⁵ Mo	0,35	$4,96\cdot 10^{-3}$	$4,96\cdot 10^{-3}$	0,35	$1,20\cdot 10^{-2}$
¹⁰⁷ Ag		$3,91\cdot 10^{-2}$	$3,91\cdot 10^{-2}$	0,96	$1,74\cdot 10^{-2}$
¹¹¹ Cd	$8,98\cdot 10^{-2}$	$2,50\cdot 10^{-4}$	$2,50\cdot 10^{-4}$	$8,98\cdot 10^{-2}$	$4,22\cdot 10^{-3}$
¹¹⁸ Sn		0,109	0,109	0,109	0,26
¹²¹ Sb	0,212	$1,42\cdot 10^{-2}$	$1,42\cdot 10^{-2}$	0,212	$1,30\cdot 10^{-3}$
¹²⁵ Te		$8,07\cdot 10^{-2}$	$8,07\cdot 10^{-2}$	4,83	$2,69\cdot 10^{-2}$
¹³⁷ Ba	0,30	$3,25\cdot 10^{-2}$	$3,25\cdot 10^{-2}$	1,03	0,14
²⁰⁵ Tl		$8,87\cdot 10^{-3}$	$8,87\cdot 10^{-3}$	$9,49\cdot 10^{-2}$	$1,27\cdot 10^{-2}$
²⁰⁸ Pb	0,314	$3,25\cdot 10^{-2}$	$3,25\cdot 10^{-2}$	0,314	$2,39\cdot 10^{-2}$
²³⁸ U		$3,11\cdot 10^{-2}$	$3,11\cdot 10^{-2}$	0,35	$7,34\cdot 10^{-4}$

9.7 Příloha G – Fotodokumentace pilotní poloprovozní jednotky



Obrázek 29: Fotodokumentace z lokace ČOV – membrány



Obrázek 30: Fotodokumentace z lokace ČOV – řídicí jednotka



Obrázek 31: Fotodokumentace z lokace průmyslové prádelny – pilotní poloprovozní jednotka



Obrázek 32: Fotodokumentace z lokace průmyslové prádelny – řídicí jednotka