



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ÚČINNOST ÚPRAVY VODY S VYUŽITÍM MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

WATER TREATMENT EFFICIENCY USING MEMBRANE FILTRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristína Zelinová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství obcí
Studentka: **Bc. Kristína Zelinová**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby

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

Účinnost úpravy vody s využitím membránové filtrace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci diplomové práce bude provedena série experimentů s laboratorním membránovým modelem. Cílem bude ověření účinnosti úpravy vody s využitím membránové filtrace za daných podmínek v konkrétní lokalitě. Při experimentech bude používána modelová i reálná surová voda.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem je provedení laboratorní pokusů v rozsahu podle pokynů vedoucího práce a prezentace výsledků těchto pokusů.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water quality and treatment: a handbook of community water supplies. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c1990, 1194 s. ISBN 0-07-001540-6.
- [2] Operational control of coagulation and filtration processes. 2nd ed. Denver, Colo.: American Water Works Association, c2000, 103 s. ISBN 15-832-1055-5.
- [3] LIN, Shun Dar. Water and wastewater calculations manual. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2007, 945 s. ISBN 00-714-7624-5.
- [4] Water treatment plant design. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2005, 1 s. ISBN 00-714-1872-5.
- [5] Water treatment handbook. 7th [English] ed. Rueil-Malmaison, France: Degremont, 2007. ISBN 978-2-7430-0970-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2022

L. S.

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
vedoucí ústavu

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

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

ABSTRAKT

V prvej časti tejto diplomovej práce sú stručne zhrnuté požiadavky na pitnú vodu podľa súčasnej legislatívy platnej na území Českej republiky a Slovenskej republiky. Zároveň sú uvedené ich zmeny, ktoré nastanú implementáciou novej európskej smernice 2020/2184 o kvalite vody určenej na ľudskú spotrebu. Na tieto zmeny nadväzuje potreba aplikácie nových spôsobov úpravy vody, jednými z nich sú membránové technológie. Membránovým technológiám je venovaný zvyšok práce. Najprv sú zhrnuté súčasné poznatky o princípe ich fungovania a kategórie, do ktorých sú rozdelené. Ďalej sú priblížené procesy, týkajúce sa ich údržby. Uvedené sú aj konkrétne príklady úpravnej vody v Česku a na Slovensku, kde boli membránové procesy aplikované. Praktická časť práce je zameraná na otestovanie konkrétneho ultrafiltračného membránového modulu v laboratórnych podmienkach. Súčasťou je optimalizácia filtračného procesu a overenie možností odstránenia znečistenia z povrchovej vody. V závere sú vyhodnotené namerané hodnoty.

KLÍČOVÁ SLOVA

membrána, membránové procesy, mikrofiltrácia, ultrafiltrácia, nanofiltrácia, reverzná osmóza, zákal, chemická spotreba kyslíka, tvrdosť vody, úprava pitnej vody

ABSTRACT

In the first part of this thesis, current requirements for drinking water according to the legislation valid in the territory of Czech Republic and Slovak Republic are summarized. Also the changes that will come with implementation of the directive 2020/2184 of the European parliament are mentioned. Following those future changes, the importance of new technologies for water treatment comes to light. Among those technologies belong membrane processes. The rest of the thesis is dedicated to them. At first, current knowledge of their operation principles and categories, to which they can be divided into are reviewed. Then, the processes related to their maintenance are approached. Mentioned are few specific water treatment plants in Czechia and Slovakia, where membrane processes were already applied. The scientific part of this thesis consists of series of tests, executed on an ultrafiltration unit, in laboratory conditions. Including optimization of the filtration process, as well as observation of the pollutants removal efficiency from surface water. Towards the end of the thesis, recorded values are evaluated.

KEY WORDS

membrane, membrane processes, microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, turbidity, chemical oxygen demand, water hardness, water treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

ZELINOVÁ, Kristína. Účinnost úpravy vody s využitím membránové filtrace. Brno, 2023. 82 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Tomáš Kučera.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Účinnost úpravy vody s využitím membránové filtrace* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2023

Bc. Kristína Zelinová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Účinnost úpravy vody s využitím membránové filtrace* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2023

Bc. Kristína Zelinová
autor práce

POĎAKOVANIE

Rada by som sa poďakovala svojmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Tomášovi Kučerovi, Ph.D. za poskytnutie cenných rád pri spracovaní tohto zadania. Ďalej by som sa chcela poďakovať Ing. Karlovi Hrichovi, Ph.D. za pomoc v chemickej oblasti tejto práce a poskytnutie laboratórnych priestorov a Ondřejovi Karáskovi za dozor pri analytických rozboroch. Poďakovanie patrí aj Bc. Filipovi Mečřřovi za asistenciu pri odbere a prevoze surovej vody a zostrojení laboratórnej sústavy. Za asistenciu v laboratóriu by som sa chcela poďakovať aj Bc. Markéte Zikudovej.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	KVALITA VODY	5
2.1	Pitná voda	5
2.1.1	Legislatíva na území ČR a SR.....	5
2.1.2	Nová európska smernica pre pitnú vodu 2020/2184.....	6
2.2	Úprava vody	8
2.2.1	Nové technológie úpravy vody	10
3	MEMBRÁNOVÉ TECHNOLOGIE	12
3.1	Princíp membránových procesov všeobecne	12
3.1.1	Gradient chemického potenciálu (koncentrácia).....	12
3.1.2	Gradient elektrického potenciálu (elektrický náboj).....	13
3.1.3	Gradient teploty (skupenstvo)	13
3.1.4	Gradient tlaku	14
3.2	Tlakové membránové procesy	14
3.2.1	Mikrofiltrácia (MF)	15
3.2.2	Ultrafiltrácia (UF)	16
3.2.3	Nanofiltrácia (NF)	16
3.2.4	Reverzná osmóza (RO)	16
3.2.5	Porovnanie jednotlivých procesov	17
3.3	Konfigurácia membránových procesov	18
3.3.1	Režim prúdenia	18
3.3.2	Membránové moduly	20
3.3.3	Smer prúdenia	22
3.4	Charakteristika membrán	23
3.4.1	Materiál	23
3.4.2	Štruktúra	24
3.5	Zanášanie membrán	24
3.6	Čistenie membrán	27
3.6.1	Fyzické čistenie	27
3.6.2	Chemické čistenie	30
4	APLIKÁCIA MEMBRÁNOVÝCH PROCESOV PRI ÚPRAVE VODY V SLOVENSKEJ A ČESKEJ REPUBLIKE	32
4.1	Ultrafiltrácia na ÚV Březová (ČR)	32

4.2	Nanofiltrácia na ÚV Domašov nad Bystřicí (ČR)	34
4.3	Ultrafiltrácia na ÚV Jasenie (SR)	36
4.4	Reverzná osmóza na VZ Podbranč (SR)	38
5	TESTOVANIE ULTRAFILTRAČNEJ JEDNOTKY	42
5.1	Popis tetsovaného zariadenia	42
5.1.1	Membránový modul	42
5.1.2	Laboratórna jednotka.....	43
5.2	Návrh a úprava membránovej jednotky	46
5.2.1	Režim filtrácie	50
5.2.2	Režim spätného mechanického prania	51
5.2.3	Režim chemického prania	52
5.2.4	Režim oplachu po chemickom praní	53
5.3	Surová voda použitá pri testovaní	54
5.4	Sledované ukazovatele a použité metódy	55
5.4.1	Zákal.....	55
5.4.2	Chemická spotreba kyslíka.....	56
5.4.3	Tvrdosť	57
5.4.4	pH	58
5.5	Priebeh testov ultrafiltračnej jednotky	59
5.5.1	Plán meraní.....	59
5.5.2	Príprava čerpacej sústavy	61
5.5.3	Samotné testy	61
5.6	Vyhodnotenie nameraných hodnôt	65
5.6.1	Kvalita upravenej vody	65
5.6.2	Prevádzkové parametre zariadenia	68
5.6.3	Celkové posúdenie	70
6	ZÁVER	72
7	POUŽITÁ LITERATÚRA	73
	ZOZNAM TABULIEK	77
	ZOZNAM OBRÁZKOV	78
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	81
	SUMMARY	82

1 ÚVOD

Voda je základnou surovinou, potrebnou pre život na Zemi. Plní mnoho funkcií ako transport látok, premena látok, tvorí životné prostredie pre vodné živočíchy a má kľúčové postavenie v činnosti a v živote človeka. S funkciou, ktorú voda plní súvisia aj jej vlastnosti. Na základe nich sa rozlišuje niekoľko druhov vôd a jedným z nich je voda pitná.

Pitná voda by mala byť bezpečná pre pitie a prípravu jedla a nemala by pôsobiť škodlivo na ľudské zdravie pri dlhodobom požívaní. Aby tieto podmienky boli dodržané, je potrebné sledovať látky, ktoré sa vo vode nachádzajú a v akom množstve. K ochrane zdravia občanov slúži národná legislatíva, ktorá udáva povinnosti prevádzkovateľov vodovodných sietí ohľadom kvality dodávanej vody, ktorú musia splniť a v akom časovom intervale sú povinní ju sledovať. Táto legislatíva sa pravidelne aktualizuje s ohľadom na zmeny vo vlastnostiach vody a na nové poznatky.

Niektoré limity sa zvoľňujú, iné sa naopak sprísňujú. Vo všeobecnosti však platí, že úprava vody, tak aby spĺňala požadované hodnoty je čím ďalej náročnejšou úlohou. V prírodných vodách sú zaznamenávané látky, ktoré doposiaľ nebolo potrebné z nej odstraňovať a bežne používané technológie si s týmto znečistením nedokážu poradiť. Je preto dôležité hľadať nové možnosti a sledovať novinky v odbore vodárenstva v celosvetovej mierke. Jednou zo sľubných technológií budúcnosti sú membránové procesy. Ide o spôsob úpravy vody, ktorý sa už vo svete osvedčil a v posledných rokoch sa rýchlo rozširuje aj v krajinách strednej Európy. Donedávna bol považovaný za neekonomický ale s jeho rozvojom a optimalizáciou sa zlepšila dostupnosť a potreba vynaložených nákladov.

V tejto práci sú stručne zhrnuté legislatívne požiadavky na pitnú vodu a ich porovnanie pre Českú republiku a Slovenskú republiku. Uvedené sú aj legislatívne novinky v rámci Európskej únie a ako sa dotknú národných predpisov. Ďalej je práca sústredená na membránové procesy a ich využitie vo vodárenstve. Popísané sú jednotlivé kategórie membránových procesov a membránových filtrov, ako aj procesy súvisiace s ich prevádzkou. V práci sú uvedené konkrétne príklady využitia membránových filtrov ako spôsob zlepšenia kvality pitnej vody na území Česka a Slovenska.

Práca ďalej obsahuje praktickú časť, v rámci ktorej boli realizované pilotné testy na konkrétnej ultrafiltračnej jednotke v laboratórnych podmienkach. Testy zahŕňajú posúdenie účinnosti zariadenia pri úprave vody a tiež posúdenie prevádzkových parametrov zariadenia, ktorými sú najmä tlakové pomery. Sledovanými ukazovateľmi kvality upravenej vody sú zákal, $CHSK_{Mn}$ a tvrdosť. Analýza týchto ukazovateľov prebiehala vo fakultných laboratóriách a k záveru práce sú namerané hodnoty vyhodnotené. Realizovaná bola aj úprava jednotky ako súčasť optimalizácie filtračného procesu a zabezpečenia poloautomatizácie.

2 KVALITA VODY

Spojitosť medzi kvalitou pitnej vody a zdravím bola dobre známa už našim predkom. Číra voda bola považovaná za čistú a zakalená voda bola vnímaná ako choroboplná. Nežiaduce zloženie vody môže byť zapríčinené horninovým prostredím, v ktorom sa voda nachádza, biologickým oživením alebo antropogénnymi vplyvmi. Medzi najstaršie dochované spôsoby úpravy vody z obdobia 2 000 rokov p. n. l. patrí napríklad prevarenie alebo filtrácia cez uhlie. [1] Skutočnosť, že voda, ktorá sa vyskytuje v prírodných zdrojoch často nie je vhodná pre priame využitie na pitné účely, zostáva pravdivá, avšak okolnosti sa za posledné storočia mierne zmenili. Na jednej strane došlo k zlepšeniu kvality prírodných vôd odkanalizovaním miest a obcí a následným čistením odpadných vôd. No na druhej strane rozvojom poľnohospodárstva a priemyslu došlo k výskytu nových druhov znečistenia. A síce dochádza k sprísňovaniu požiadaviek na kvalitu pitnej vody, odvetvie vodárenstva tiež napreduje a prichádza s novými technológiami, ktoré sú schopné na tieto zmeny reagovať a nevyhovujúcu surovú vodu upraviť tak, aby spĺňala požadovaný štandard.

2.1 PITNÁ VODA

Voda, ktorá je čerpaná zo zdroja (povrchového alebo podzemného) sa vo všeobecnosti nazýva vodou surovou. Je určená k následnej úprave, čím vzniká voda pitná, ktorá spĺňa hygienické požiadavky dané legislatívou.

2.1.1 Legislatíva na území ČR a SR

Hygienické požiadavky pre pitnú vodu sú dané v oboch krajinách vyhláškami Ministerstva zdravotníctva. Vo všeobecnosti ide o ukazovatele organoleptické (pach, chuť), fyzikálne (napr. pH, konduktivita), chemické (napr. obsah železa, dusičnanov) a mikrobiologické (napr. počet kolónií baktérií). Väčšina ukazovateľov je obmedzená horným limitom ale vo vode sa nachádzajú aj prvky, ktorých prítomnosť je v istej miere vítaná – tieto prvky tvoria tzv. biogénnu hodnotu vody a ich obsah je stanovený v legislatíve doporučenou hodnotou. Ide o minerály (vápnik, horčík), ktoré sú zdraviu prospešné a voda bez ich obsahu je pre dlhodobé užívanie nevhodná.

Na území Českej republiky je v platnosti vyhláška č. 252/2004 Sb., ktorá je v súlade s európskou smernicou Rady 98/83/ES z roku 1998 o kvalite vody určenej k ľudskej spotrebe.[2] Slovenskou obdobou je vyhláška č. 247/2017 Z. z. Limity dané týmito dokumentami sú pre väčšinu ukazovateľov zhodné, no nachádza sa v nich aj niekoľko rozdielných požiadaviek. Tieto odlišnosti pre fyzikálne a chemické ukazovatele sú uvedené v Tab. 2.1.

Mikrobiologické a biologické ukazovatele sa tiež úplne nezhodujú, ale tieto rozdiely sú zanedbateľné. Napríklad v českej vyhláške nie sú samostatne uvedené limity pre mangánové a železité baktérie, tie sú na Slovensku obmedzené na 10 % pokryvnosti poľa (v ČR sa berú ako súčasť abiosestónu). [3, 4]

Tab. 2.1 Rozdiely v hygienických požiadavkách na pitnú vodu pre SR a ČR [3][4]

Parameter	Symbol	247/2017 SR		252/2004 ČR	
		Limit	Druh limitu	Limit	Druh limitu
Celkový organický uhlík	TOC	3 mg/l	MH	5 mg/l	MH
Chloridy	Cl ⁻	250 mg/l	MH	100 mg/l	MH
Meď	Cu	2 mg/l	MH	1 mg/l	NMH
Striebro	Ag	50 µg/l	NMH	25 µg/l	NMH
Tetrachlorethen	PCE	10 µg/l (PCE+TCE)	NMH	10 µg/l	NMH
Trichlorethen	TCE			10 µg/l	NMH
Urán	U	nie je uvedený limit		15 µg/l	NMH
Vápnik + horčík	Ca + Mg	1,1-5 mmol/l	OH	2-3,5 mmol/l	DH

skratky MH – medzná hodnota

NMH – najvyššia medzná hodnota

OH – odporúčaná hodnota (používané v SR)

DH – doporučená hodnota (používané v ČR)

2.1.2 Nová európska smernica pre pitnú vodu 2020/2184

Prvá jednotná európska smernica pre pitnú vodu bola vydaná v roku 1980 (smernica Rady 80/778/EHS). V roku 1998 ju nahradila smernica 98/83/ES. S ňou sú v súlade práve vyššie spomenuté vyhlášky. Táto smernica prešla jednou významnou novelou v roku 2015. [5]

Po 22 rokoch od vydania poslednej vyhlášky, bola 16. decembra 2020 schválená nová európska smernica Rady 2020/2184 o kvalite vody určenej na ľudskú spotrebu, ktorá nadobudla účinnosť 12. januára 2021. Obsahuje 55 preambúl, 28 článkov a 7 príloh. Nachádza sa v nej množstvo zmien, ktoré sa dotknú dodávateľov pitnej vody. Zmeny sa týkajú viacerých oblastí – manažmentu rizík systému zásobovania pitnou vodou, informovania verejnosti o kvalite vody, vyhodnocovania strát vody a niekoľko ďalších. Jednou oblasťou sú práve aj kritéria zdravotnej bezpečnosti pitnej vody. [6] V tejto kapitole budú stručne zhrnuté hlavné zmeny, ktoré nová smernica priniesla ohľadom požiadaviek na kvalitu pitnej vody.

Zákal

V novej smernici došlo k výraznému sprísneniu požiadaviek na ukazovateľ zákalu. Prvou zmenou je zavedenie intervalu, v akom musí dodávateľ vody hodnotu zákalu sledovať prevádzkovými rozbormi. Tá závisí od množstva vody vyrábanej denne (Tab. 2.2). [7]

Tab. 2.2 Minimálna frekvencia analýzy zákalu podľa 2020/2184 [7]

Objem vody vyrábanej denne [m ³]	Frekvencia odberu vzoriek a analýzy zákalu
≤ 1 000	týždenne
1 000 - 10 000	denne
> 10 000	kontinuálne

Došlo aj k sprísneniu maximálnej hodnoty. Doposiaľ Česká aj slovenská vyhláška stanovuje limit zákalu na 5 NTU (v ČR sa používa jednotka ZF, tieto jednotky sú však zameniteľné, 1 NTU = 1 ZF). Po novom, 95% odobraných vzoriek nesmie prekročiť hodnotu 0,3 NTU a žiadna z nich nesmie presiahnuť 1 NTU (nové hodnoty sa nevzťahujú na podzemnú vodu, kde je zákal spôsobený železom a mangánom). Súčasný limit je v oboch krajinách 5 NTU/ZF. K tejto zmene viedlo to, že zákal je všeobecným ukazovateľom a jeho určenie je relatívne jednoduché, rýchle a nenákladné. [7]

Keďže ide o niekoľkonásobné sprísnenie, je daných 10 rokov na zavedenie týchto požiadaviek do praxe. Otázkou zostáva, či bude táto doba dostatočná na modernizáciu mnohých úpravní, ktoré zápasia s vyššími hodnotami zákalu a taktiež na aplikáciu úpravy na zdrojoch, ktoré doposiaľ hodnotami zákalu spĺňali požiadavky, no novej smernici nevyhovujú. [7]

Chemické ukazovatele

Pribudlo 7 nových chemických ukazovateľov, ktoré sa musia v pitnej vode sledovať. Sice v predchádzajúcej európskej smernici neboli uvedené, ale pre väčšinu z nich už je stanovený limit v slovenskej aj českej vyhláške. Ďalej došlo k sprísneniu limitov pre chemické ukazovatele chróm a olovo. Zároveň u troch ukazovateľov sa limit zmiernil. Sú nimi antimón, bór a selén. V Tab. 2.3 je uvedené porovnanie hodnôt novej smernice s predchádzajúcou (98/83/ES) a s aktuálnymi vyhláškami platnými na území Slovenskej republiky a Českej republiky. [6, 7]

Tab. 2.3 Porovnanie limitov novej smernice s predchádzajúcou (98/83/ES) a s aktuálnymi vyhláškami [3][4][7]

Parameter	Symbol	98/83/ES	2020/2184	247/2017 SR	252/2004 ČR
Nové hodnoty					
Bisfenol A	BPA	-	2,5 µg/l	-	-
Halooctové kyseliny	HAA	-	60 µg/l	-	-
Chlorečnany	ClO ₃ ⁻	-	0,25 (0,70) mg/l	0,20 mg/l	0,20 mg/l
Chloritany	ClO ₂ ⁻	-	0,25 (0,70) mg/l	0,20 mg/l	0,20 mg/l
Mikrocystín-LR	MC-LR	-	1 µg/l	1 µg/l	1 µg/l
Per/Polyfluoralkylované zlučeniný - spolu	PFAS - spolu	-	0,50 µg/l	-	-
Per/Polyfluoralkylované zlučeniný - súčet vybraných	PFAS - súčet	-	0,10 µg/l	-	-
Urán	U	-	30 µg/l	-	15 µg/l
Sprísnené hodnoty					
Bromičnany	BrO ₃ ⁻	25 µg/l	10 µg/l	10 µg/l	10 µg/l
Chróm	Cr	50 µg/l	25 µg/l	50 µg/l	50 µg/l
Olovo	Pb	10 µg/l	5 µg/l	10 µg/l	10 µg/l
Zmiernené hodnoty					
Antimón	Sb	5 µg/l	10 µg/l	5 µg/l	5 µg/l
Bór	B	1 mg/l	1,5 (2,4) µg/l	1 µg/l	1 µg/l
Selén	Se	10 µg/l	20 (30) µg/l	10 µg/l	10 µg/l

V prípade chlorečnanov a chloritanov je vyššia limitná hodnota 0,70 mg/l platná v prípade, že je k hygienickému zabezpečeniu používaný prípravok, ktorý má za následok vznik týchto vedľajších produktov. Miernejšie limity pre bór (2,4 µg/l) a selén (30 µg/l) zohľadňujú vplyv geologických podmienok. [7]

Zoznam sledovaných látok

Jednou z novínok, ktoré priniesla európska smernica je aj *Zoznam sledovaných látok a zlúčenín vzbudzujúcich obavy pre vodu určenú na ľudskú spotrebu*, alebo tzv. Watch List. Látky nachádzajúce sa na tomto zozname budú monitorované a na základe nazbieraných dát, bude rozhodnuté, či je potrebné určiť ich limitnú hodnotu. Súčasťou zoznamu je doporučená hodnota, týchto zlúčenín. V januári 2022 bolo zavedené sledovanie dvoch hormonálne aktívnych látok: 17-beta-estradiol a nonylfenol. Mikroplasty, ktoré sú v odbore vodárenstva už niekoľko rokov veľmi aktuálnou témou, by mali na tento zoznam pribudnúť v roku 2024. [7]

Implementácia do národnej legislatívy

Pre členské štáty Európskej únie platí dvojročné prechodné obdobie, počas ktorého sú povinné implementovať požiadavky novej smernice do národných predpisov, teda do 12.1.2023. Výnimkami sú niektoré ustanovenia s odloženou účinnosťou (napr. sprísnený limit pre olovo a chróm je platný od r. 2036). [6]

V Slovenskej republike bol v novembri 2022 podaný návrh novely vyhlášky č. 247/2017 Z. z. V Českej republike bol podaný návrh na novelu *Zákona o vodovodech a kanalizáciách* 274/2001 Sb. a po ňom by mala nasledovať vyhláška Ministerstva zdravotníctva č. 252/2004 S. [5, 6]

Smernica Rady 2020/2184 je rozsiahla a venuje sa novým povinnostiam dodávateľov pitnej vody v rôznych smeroch. Z dôvodu veľkého objemu aktualizácií sa nemusia zmeny v požiadavkách na kvalitu pitnej vody javiť ako najzásadnejšie informácie tohto dokumentu, no pre účely tejto práce sú práve tými kľúčovými. Poukazujú na stále prísnejšie limity ukazovateľov kvality pitnej vody, a taktiež sledovanie nových látok, hlavne mikropolutantov (látky, ktoré pochádzajú z výroby, používania alebo likvidácie chemikálií, produkty ľudského a živočíšneho metabolizmu, kozmetické prípravky, parfumy, farmaceutické výrobky, zmäkčovadlá, izolačné peny...). S ich odstraňovaním sa doteraz väčšina dodávateľov pitnej vody nemusela zaoberať. No v priebehu najbližších rokov bude mnoho z nich musieť hľadať spôsoby ako zabezpečiť požadovaný štandard pitnej vody.

2.2 ÚPRAVA VODY

Pôvod samotnej úpravy vody zo surovej na pitnú siaha niekoľko tisícročí do histórie. No úpravne vody v našich zemepisných šírkach, tak ako ich definujeme v súčasnosti, majú svoj počiatok v minulom storočí. V Českej republike bola prvou úpravňou vody spustenou do prevádzky ÚV Káraný v roku 1914. V Slovenskej republike bola prvá úpravňa postavená pri meste Levoča v roku 1930. [8, 9]

Postupne pribúdali ďalšie úpravne, tie stávajúce prechádzali modernizáciou a za posledných 30 rokov bolo niekoľko z nich kompletne zrekonštruovaných. V súčasnosti prichádza ďalšia vlna

modernizácie úpravnej vody. Potreba modernizácie a doplnenia nových technológií má mnoho príčin. Niektorými z nich sú [10]:

- **Komunálne znečistenie** – síce s výstavbou kanalizácií a čistiarní odpadných vôd došlo k výraznému zníženiu tohto znečistenia, no pribúdajú látky, ktoré súčasné čistiarne nie sú schopné odstrániť (liečivá, drogy) a tie sa tak dostávajú do povrchových tokov.
- **Priemysel** – po výstavbe priemyselných čistiarní odpadných vôd už priemysel nie je, až na výnimky, zásadným zdrojom znečistenia.
- **Poľnohospodárska činnosť** – znečistenie od tohto odvetia má v súčasnosti rastúci trend a bude vyžadovať opatrenia, ktoré zabránia kontaminácii vody hnojivami a pesticídmi.
- **Klimatické zmeny** – nedostatok vody sa odzrkadľuje aj na jej kvalite, napríklad pri zníženom prietoku v tokoch sa zvyšuje koncentrácia znečistenia.
- **Sledovanie kvality vody** – zlepšovanie technológie umožňuje sledovať a analyzovať látky, ktoré v minulosti nebolo možné registrovať.
- **Vývoj poznania** – v zdrojoch vody sa stále objavujú nové látky. Môže ísť o nové liečivá, chemické prostriedky, priemyselné produkty, pesticídy. Vodárenstvo v tomto je o krok pozadu, pretože až po zachytení novej látky sa môže prejsť k zisťovaniu a overovaniu jej škodlivosti. Reaguje sa až na vzniknutú situáciu.
- **Legislatíva** – na výsledky výskumu následne reaguje legislatíva a je potrebné kvalitu vody prispôsobiť novým požiadavkám.

Vplyv týchto faktorov následne ovplyvňuje rekonštrukciu, modernizáciu, poprípade výstavbu nových úpravnej vody.

Prvou informáciou, ktorá vedie k správnej výbere technologického postupu úpravy vody je rozlíšenie podľa zdroja. Najčastejšie ide o dva typy – povrchová a podzemná voda (ďalším je napr. infiltrovaná). Každý z týchto zdrojov má svoje špecifiká vo vlastnostiach a kvalite. Napríklad podzemná voda sa vo všeobecnosti vyznačuje vyšším obsahom minerálov (teda aj vyššou tvrdosťou), vyššími koncentraciami železa a mangánu. Povrchová voda je na druhej strane zväčša viac zakalená a biologicky znečistená. Tomu odpovedajú aj najčastejšie používané technológie pre ich úpravu.

Medzi typické spôsoby úpravy podzemnej vody patrí aerácia, filtrácia, odstránenie železa a mangánu, zmäkčenie, odstránenie radónu, dezinfekcia. Mnoho podzemných zdrojov je natoľko kvalitných, že nie je potrebné ich vôbec upravovať a po dezinfekcii sú priamo využívané ako pitná voda. Povrchová voda sa konvenčne upravuje mechanickým predčistením, koaguláciou, sedimentáciou, filtráciou, stvrdzovaním, sorpciou, dezinfekciou. [11]

Úpravne je často v rámci modernizácie potrebné doplniť o ďalší separačný stupeň. Mnoho bežne používaných technológií má však svoje limity a pri sprísňovaní požiadaviek nie sú schopné zabezpečiť požadovanú kvalitu vody. Pri ich vzniku sa nepočítalo napríklad s potrebou

odstraňovania stopových koncentrácií pesticídov a mikropolutantov. Preto stále častejšie sa pri návrhu technológie úpravy vody siahajú po nových technológiách. [10, 11]

2.2.1 Nové technológie úpravy vody

Vyššie uvedené konvenčné technologické postupy úpravy vody sa používali v minulom storočí a bežne sa používajú dodnes. Majú však svoje limity. Hlavným z nich je veľkosť častíc, ktoré sú schopné odstrániť. Najrozšírenejším spôsobom separácie pevných častíc z vody je filtrácia cez pieskovú náplň. Pomocou nej je možné odstrániť z vody častice väčšie ako približne 1-10 μm , čo pre niektoré druhy znečistenia nie je postačujúce (napr. pesticídy). To viedlo k vývoju nových spôsobov ako tieto nežiadúce látky z vody eliminovať. [12]

Ako „nové“ technológie sa označujú tie, ktoré sa začali rozširovať vo svete od roku 2000. Ich väčšina sa odvtedy v zahraničí zaradila medzi štandardné postupy a bežne sa využívajú. Na území Českej a Slovenskej republiky sú tiež niektoré z nich už stabilne aplikované, iné sa začali používať v posledných rokoch. Niektoré technológie donedávna neboli zahrnuté v českej, ani slovenskej legislatíve ako technológie, ktoré je možné používať k úprave vody (napr. membránové filtre) a k ich zaradeniu do procesu úpravy bol potrebný súhlas príslušných orgánov. S poslednými novelami, prešiel aktualizáciou aj zoznam týchto technológií. [11, 12]

Na základe novej európskej smernice sa dá predpokladať, že bude potrebné tieto nové technológie naďalej aplikovať. Konkrétne do akého rozsahu, to upresnia rozborové sledované látky, hlavne per/polyfluoralkylovaných zlúčenín (PFAS), ktoré doposiaľ sledované neboli a teda nie je dostatočné množstvo údajov o ich rozšírení vo vodách na území Česka a Slovenska. Nové technológie sa uplatňujú najmä pri zdrojoch povrchovej vody, ktoré sú náchylnejšie na znečistenie pesticídmi a mikropolutantmi. No ich výskyt nie je ojedinelý ani v podzemnej vode. Membránové filtre sa preukázali ako veľmi účinné pri úprave podzemnej vody na úpravniach malých rozmerov aj z dôvodu ich nenáročných priestorových nárokov.

Ďalej budú v tejto kapitole stručne popísané vybrané spôsoby úpravy vody, ktoré sa v súčasnosti aplikujú pri modernizácii úpravni a radia sa medzi nové technológie.

Nové náplne filtrov

Najčastejším materiálom, ktorý sa používa ako náplň filtrov je kremičitý piesok. S nárastom znečistenia v povrchovej vode sa začalo s hľadáním nového materiálu s vyššou kalovou kapacitou, ktorý by ho nahradil. To viedlo k používaniu dvojvrstvových filtrov s vrstvou piesku a antracitu (ÚV Hradišče, ÚV Souš). Takýto filter má však vysoké požiadavky na intenzitu práce vody a v niektorých prípadoch bolo neekonomické ho využiť. Prelomovým bolo uvedenie na trh novej nórskej filtračnej náplne Filtralite z keramického materiálu. Najviac využívaný je dvojvrstvový typ Filtrate Mono-Multi. Tento druh náplne bol navrhnutý a prvýkrát otestovaný na ÚV Stakčín na východnom Slovensku na základe návrhu doc. Ing. Petra Dolejša (ČR). Materiál sa vyznačuje vysokou kalovou kapacitou a nízkymi nákladmi na pranie filtrov. Úspešne sa využíva napríklad v Hradci Králové, Plzni, Lomničke. [10,11]

Aktívne uhlie

Filtrácia cez aktívne uhlie je účinnou technológiou pre odstránenie mikropolutantov (napr. pesticídy, PAU). Pri použití aktívneho uhlia ako filtračnej náplne dochádza k sorpcii kontaminantov na jeho povrchu. Výrazne pomáha aj k zlepšeniu organoleptických vlastností (zápach, chuť). Dôležitá je voľba správneho typu granulovaného uhlia, preto pred jeho aplikáciou sú potrebné kvalitné poloprevádzkové skúšky. [10,11]

Pokročilé oxidačné procesy

Pokročilé oxidačné procesy, značené ako AOP (z anglického „Advanced oxidation processes“), sa využívajú k oxidácii kontaminantov (pesticídy, a k dezinfekcii vody. Sú založené na produkovani hydroxylového radikálu OH (neutrálne forma hydroxidového iónu OH⁻), ktorý je veľmi reaktívny. Najčastejšími procesmi spadajúcimi do tejto kategórie sú využitie ozónu (O₃), UV žiarenia a peroxidu vodíka (H₂O₂). Tieto metódy sa vzájomne môžu aj kombinovať. Použitie peroxidu vodíka pri úprave vody je relatívnu novinkou a predpokladá sa jeho bohaté uplatnenie najmä v kombinácii s UV žiarením. Pokročilé oxidačné procesy sú väčšinou doplnené sorpciou na aktívnom uhlí, aby po zneškodnení kontaminantov došlo aj k ich odstráneniu. Vo fáze výskumu a testovania sú ďalšie metódy, jednou z nich je napríklad oxidácia bórom dopovanými diamantovými elektródami (BDDE). [10,11]

Flotácia

Flotácia funguje na princípe jemno-bublinného prevzdušňovania, čo vedie k vyneseniu nečistôt k hladine vody, kde sú odstránené (napr. stieraním). V Českej republike sa používa ako prvý separačný stupeň pri úprave vody od roku 2005, kedy bola použitá na ÚV Mostiště ako riešenie havarijnej situácie pri výraznom znížení hladiny vo vodnej nádrži. Technológia je výhodná hlavne pri úprave povrchovej vody, pri úprave podzemnej vody sa nejaví ako dostatočne účinná. Od jej prvej aplikácie na ÚV Mostiště bola v Česku a na Slovensku aplikovaná na ďalších 13 úpravniach (napr. Klenovec, Hradec Králové, Bedřichov...). [10,11]

Ďalším novým spôsobom úpravy vody, ktorý sa v posledných rokoch začal aplikovať na území ČR a SR sú **membránové technológie**. Táto metóda úpravy sa javí ako veľmi účinná, so širokým rozsahom možností využitia. Práve membránovým filtrom sa bude venovať táto práca a preto je popisu membránových technológií venovaná nasledujúca osobitá kapitola.

3 MEMBRÁNOVÉ TECHNOLOGIE

Membránové technológie sú druhom filtrácie, pri ktorej sa ako separačný materiál využíva membrána. Tá tvorí bariéru, ktorá bráni prechodu určitých látok, vzhľadom na ich fyzikálne alebo chemické vlastnosti. V závislosti na type použitej membrány dokáže táto technológia odstrániť z vody široké spektrum znečistenia, od nerozpustených látok až po samostatné ióny. Čiže dokáže odstraňovať látky, ktoré sú štandardnými postupmi ťažko, alebo vôbec neodstrániteľné. Jej využiteľnosť potvrdzuje aj rastúci počet úpravní, ktoré túto technológiu zaradzujú do procesu úpravy vody. [10,13]

Princíp tohto mechanizmu bol známy už v 18. storočí. K jeho rozvoju došlo v priebehu 20. storočia, kedy sa rozšíril do rôznych priemyselných odvetví (elektrotechnika, farmaceutika, potravinárstvo atď.). Čo sa týka úpravy vody, tak sférou, v ktorej sa membrány doposiaľ využívali najviac je čistenie odpadných vôd (prevažne priemyselné, ale aj komunálne) a pri úprave morskej vody na pitnú. No stávajú sa veľmi atraktívnou možnosťou aj pre vnútrozemské úpravne vody, pre ich výrazné výhody oproti tradičným spôsobom úpravy. Napríklad väčšinou nie je potrebné do procesu dávkovať ďalšie chemikálie (s výnimkou využitia koagulantu pri určitých druhoch znečistenia), výraznou výhodou je priestorová nenáročnosť, modulová výroba a taktiež proces je vhodný ako pre malé, tak aj veľké úpravne. [14]

Nevýhodou je, že vo väčšine prípadov je potrebná predúprava vody, aby sa zabránilo nadmernému zanášaniam membrány, poprípade jej poškodeniu. Taktiež niektoré membránové moduly sú citlivé na prevádzkové podmienky a pri vychýlení z optimálnych parametrov môže dôjsť k ich poškodeniu. Stále však dochádza k pokroku a vývoju nových, odolnejších materiálov. Donedávna boli membránové technológie považované za investične nákladné a nevýhodné z dôvodu nízkej životnosti, no v súčasnosti sa tento prístup výrazne mení. Náklady na inštaláciu sa znižujú, životnosť zariadení sa predlžuje a tak sa k nim prikláňa stále viac investorov a prevádzkovateľov. [10, 14]

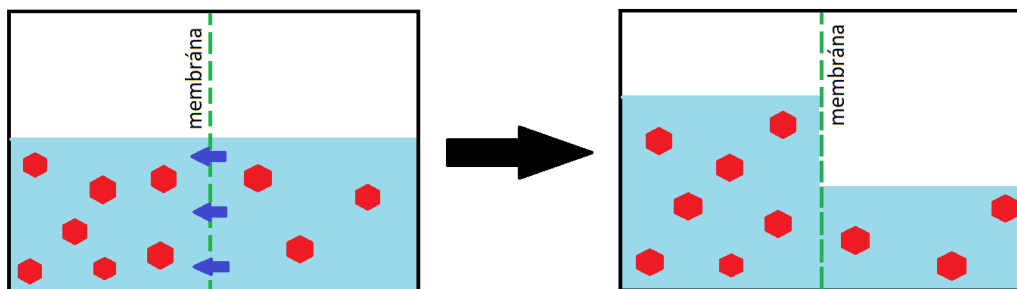
Dá sa predpokladať, že membránové technológie majú vo vodárenstve svoju budúcnosť. V zahraničí sú už bežne používané a overené. Na území Českej a Slovenskej republiky ide však stále o relatívnu novinku a niektorí miestni prevádzkovatelia naďalej preferujú konvenčné, overené spôsoby úpravy vody. So sprísňujúcimi sa požiadavkami na pitnú vodu je však pravdepodobné, že po nich budú musieť siahnuť. Je teda dôležité zbierať dáta a overovať účinnosť membránových zariadení, čo uľahčí ich aplikáciu do procesu úpravy vody, ich dimenzovanie a optimalizáciu prevádzky.

3.1 PRINCÍP MEMBRÁNOVÝCH PROVEŠOV VŠEOBECNE

Membrány sa využívajú v množstve odvetví a na rôzne účely. Tak ako bolo už zmienené, je možné si ich predstaviť ako bariéru, ktorá určité látky prepustí a iné zadrží. Tento jav môže mať niekoľko príčin – koncentráciu, elektrický náboj, teplotu alebo tlak. Táto príčina tvorí hnačicu silu procesu. Konkrétne ide o ich gradient, teda rozdiel na rôznych stranách membrány. [12]

3.1.1 Gradient chemického potenciálu (koncentrácia)

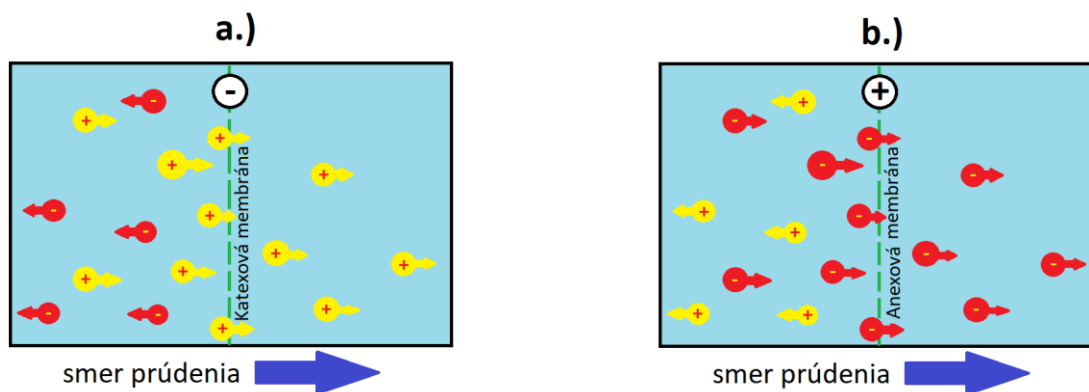
Vôbec prvým pozorovaným membránovým procesom bola osmóza, ktorú spôsobuje gradient chemického potenciálu – čo je rozdielna koncentrácia rozpustených látok na dvoch stranách membrány. Pri osmóze prechádza tekutina stenou membrány zo strany s väčšou koncentráciou rozpustených látok, na stranu s nižšou koncentráciou. Tok tekutiny sa zastaví, keď dôjde k rovnováhe koncentrácie roztoku na oboch stranách (Obr. 3.1). [12]



Obr. 3.1 Schéma koncentračného toku osmózy

3.1.2 Gradient elektrického potenciálu (elektrický náboj)

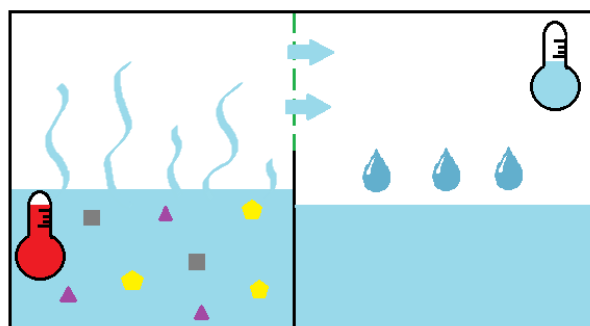
Pri potrebe odstrániť ióny alebo molekuly, ktoré nie sú elektroneutrálne sa využívajú membrány s nábojom. Katexová membrána obsahuje záporný náboj a teda odpudzuje záporné častice. Prechod membránou je umožnený len kladne nabitým časticiam. Analogicky funguje anexová membrána, ktorá obsahuje kladný náboj (Obr. 3.2). V odbornej literatúre sa hnacia sila tohto procesu nazýva gradient elektrického potenciálu. [12]



Obr. 3.2 Princíp odstraňovania iónov pomocou membrány a.) Záporne nabitá membrána, b.) Kladne nabitá membrána

3.1.3 Gradient teploty (skupenstvo)

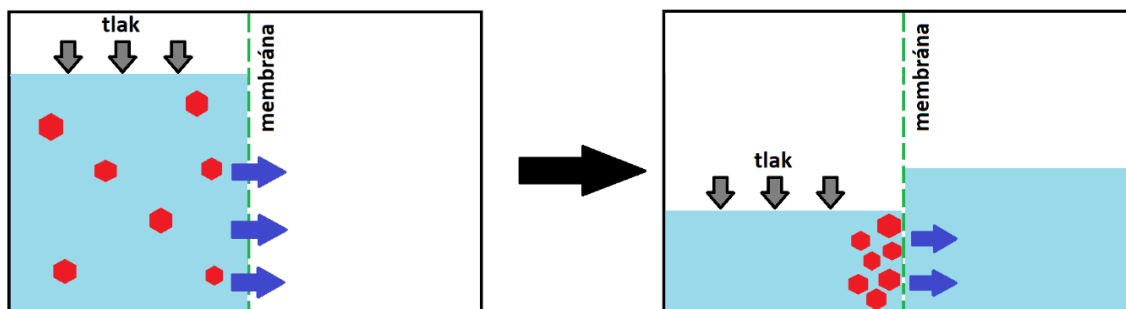
Niektoré druhy membrán sú schopné zadržať aj molekuly vody a prepúšťajú len plynné skupenstvo. Využívajú sa napríklad pri výrobe destilovanej vody. Voda je zohriata na bod varu a vyparuje sa. Vodné pary prechádzajú membránou, na jej druhej strane sú ochladené a následne kondenzované. Týmto spôsobom dochádza k odstráneniu nečistôt a ostatných látok, ktoré nie sú schopné premeniť sa na plyn. Ide o využitie rozdielu teploty, teda teplotného gradientu. [12]



Obr. 3.3 Princíp destilácie vody pomocou paroprepustnej membrány

3.1.4 Gradient tlaku

Pôsobením vyššieho tlaku na jednej strane membrány dochádza k prestupu nízkomolekulárnych látok stenou membrány, zatiaľ čo väčšie častice sú membránou zachytené. V závislosti na tom, akú veľkosť látok sú schopné odstrániť sa ďalej delia. [12] Práve tlakové membránové procesy sa využívajú vo vodárenstve na úpravu vody a bližšie opísané budú v nasledujúcich kapitolách.



Obr. 3.4 Princíp tlakových membránových procesov

V nasledujúcej tabuľke (Tab. 3.1) je zobrazený stručný prehľad konkrétnych membránových procesov, rozdelených na základe ich hnacej sily. Toto rozdelenie nie je striktné dané, v niektorých prípadoch môže byť proces poháňaný kombináciou týchto síl, v tabuľke je uvedená dominantná hnacia sila procesu.

Tab. 3.1 Zaradenie membránových procesov na základe hnacej sily [18]

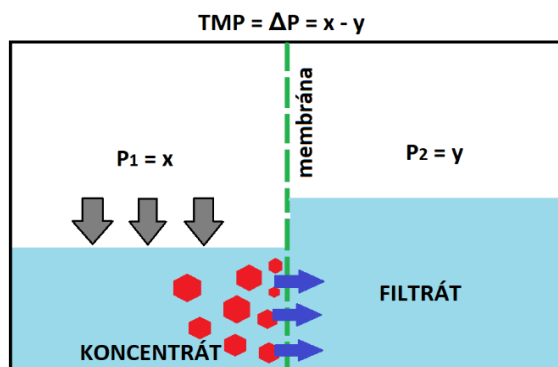
Hnacia sila	Membránový proces
Gradient chemického potenciálu	Osmóza, difúzna dialýza, separácia plynov, pervaporácia
Gradient elektrického potenciálu	Elektrodialýza, membránová elektrolyza, elektroforéza, elektroosmóza, elektrodeionizácia
Gradient teploty	Membránová destilácia a termoosmóza
Gradient tlaku	Mikrofiltrácia, ultrafiltrácia, nanofiltrácia, reverzná osmóza

3.2 TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Hlavnou úlohou úpravy vody je odstrániť z nej nežiadúce látky. V rámci vodárenstva pri membránových procesoch je teda látkou, ktorú membrána prepustí voda a zadržovaným je znečistenie. K tomuto účelu sú najčastejšie využívané tlakové membránové procesy. Používajú sa pri nich membrány, ktoré je možné si predstaviť ako bariéru s malými otvormi (pórmí), fungujúce ako jemné sitko. Na základe veľkosti týchto pórov sa rozlišujú jednotlivé kategórie procesov. Medzi základné z nich patrí mikrofiltrácia, ultrafiltrácia, nanofiltrácia a reverzná osmóza. Tieto typy budú nižšie v tejto kapitole stručne priblížené, ale pred tým je vhodné vysvetliť niekoľko základných pojmov [12]:

- **Filtrát** – Ide o prefiltrovanú vodu, ktorá prešla membránou a je zbavená nežiadúcich látok. Niekedy sa používa aj výraz permeát.
- **Koncentrát** – Je časť vody obsahujúca látky, ktoré neprenikli membránou. Taktiež nazývaná ako retentát.
- **Transmembránový tlak** – Hnacou silou pri tlakových membránových procesoch je tlakový gradient, čiže rozdielny tlak pred a za membránou. Tomuto rozdielu sa hovorí

transmembránový tlak, značí sa ako TMP (Transmembrane pressure). Môže byť vytvorený pretlakom na vstupnej strane alebo podtlakom na výstupnej strane.



Obr. 3.5 Schéma tlakového membránového procesu

- **Flux** – Pri posudzovaní množstva upravenej vody, ktoré dokáže membránové zariadenie vyprodukovať nie je vhodné používať hodnoty prietoku, keďže veľkosť modulov sa môže výrazne líšiť a nevystihuje teda vlastnosti danej membrány. Preto sa používa veličina flux, ktorá reprezentuje prietok na plochu membrány, čomu odpovedajú aj jej jednotky – napr. l/m²/h.
- **MWCO** – Celým názvom z angličtiny „Molecular weight cut off“. Používa sa pri popisovaní separačných schopností membrán, kedy z dôvodu príliš malých rozmerov (pri membránových procesoch ide rádovo o nanometre) nie sú látky, ktoré je membrána schopná zadržať popisované pomocou ich veľkosti. Používa sa najmenšia molekulová hmotnosť látky, ktorú membrána dokáže zadržať na 90 %. Jednotkou tejto veličiny je Dalton (Da), ktorý predstavuje 1/12 molekulovej hmotnosti uhlíka. Vzťah medzi veľkosťou pórov a MWCO nie je presne možné určiť ale približné hodnoty sú uvedené v Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Vzťah medzi MWCO a veľkosťou pórov membrány [16]

MWCO [Da]	Veľkosť pórov [nm]
1 000 000	100
500 000	20
100 000	10
50 000	4
10 000	2,5
5 000	1,5

Vo všeobecnosti platí, že čím menšiu substanciu je nutné odstrániť, tým je potrebná menšia veľkosť pórov a zároveň dochádza k rýchlejšiemu zanášaniam membrány zachytenými látkami, čo spôsobuje menší flux. Čím menšie sú póry membrány, tým je potrebné zabezpečiť väčší transmembránový tlak. Na základe týchto vlastností sa rozlišujú nižšie uvedené jednotlivé procesy.

3.2.1 Mikrofiltrácia (MF)

Pre proces mikrofiltrácie je potrebný relatívne nízky transmembránový tlak, preto je výhodná z pohľadu prevádzkových nákladov. Využíva sa pri nej tlak do 0,4 MPa. Veľkosť pórov sa pri mikrofiltračných membránach pohybuje v rozsahu 0,1 – 10 μm. Najbežnejším materiálom pre

výrobu týchto membrán je polymér alebo keramika. Používa sa primárne k zachyteniu suspenzií a koloidov, ale je možné pomocou nej odstrániť aj baktérie, riasy a protozoa. Čo sa týka produkcie, flux mikrofiltračných membrán je obvykle väčší ako 200 l/m²/h. [15,16]

V Českej republike bol tento proces aplikovaný na ÚV Trnová a ÚV Hrobice. V Slovenskej republike je to napríklad ÚV Klenovec. [10, 17]

3.2.2 Ultrafiltrácia (UF)

Transmembránový tlak pri ultrafiltrácii sa pohybuje v rozsahu 0,1 – 1 MPa. Ultrafiltračné membrány majú póry veľkosti 10 – 100 nm a MWCO v hodnotách 10 000 – 500 000 Da. Medzi látky, ktoré ultrafiltrácia dokáže zadržať patria suspenzie, jemné koloidy, baktérie ale aj vírusy a čiastočne huminové látky. Flux môže nadobúdať širokú škálu hodnôt 50 – 200 l/m²/h. [15, 16]

Ultrafiltrácia v Česku sa využíva napríklad na ÚV Svobodka a ÚV Březová, na Slovensku na ÚV Perlová alebo ÚV Jasenie. [10, 19]

3.2.3 Nanofiltrácia (NF)

Pri procese nanofiltrácie sa využíva transmembránový tlak 1 – 2,5 MPa. Póry membrány sú veľké 1 – 10 nm, čo jej umožňuje čiastočne odstraňovať aj niektoré rozpustené látky. Vďaka tomu je vhodná napríklad na zmäkčovanie vody, čo znamená odstránenie dvojmocných kationov vápnika Ca²⁺ a horčíka Mg²⁺. Ako bolo spomenuté v prvej kapitole tejto práce, tieto látky sú do určitej miery v pitnej vode žiadané. Na rozdiel od reverznej osmózy, nanofiltrácia ich odstráni len čiastočne, vďaka čomu nie je potrebná následná remineralizácia upravenej vody. Ďalej je nanofiltrácia schopná odstrániť baktérie, vírusy, železo, mangán a čiastočne CHSK a pesticidy. Bežná hodnota MWCO pre nanofiltračné membrány je 200 – 1 000 Da a typický flux 20 – 80 l/m²/h. [10, 17, 21]

Príkladom aplikácie v Česku je ÚV Domašov nad Bystřicí, na Slovensku nie je známa zatiaľ žiadna úpravňa s inštalovanou technológiou nanofiltrácie. [20]

3.2.4 Reverzná osmóza (RO)

Z tlakových membránových procesov je reverzná osmóza energeticky najnáročnejšia z dôvodu potrebného prevádzkového transmembránového tlaku 1,5 – 8 MPa. Veľkosť pórov je menej ako 1 nm. Týmto pórmí prechádzajú len molekuly vody a veľmi malé častice, teda produktom reverznej osmózy je takmer destilovaná voda. Umožňuje odstrániť aj tie najmenšie a najodolnejšie polutanty (okrem niektorých prchavých organických látok), zároveň však dochádza k odstráneniu aj prospešných minerálov. Takáto ochudobnená voda nie je vhodná pre pitné účely, preto pri aplikáciách reverznej osmózy na úpravniach vody dochádza následne k remineralizácii - obohateniu vody o minerály. Častejšie sa ale využíva postup, pri ktorom len časť vody prechádza membránou a potom sa riedi s vodou surovou, tak aby bol dodržaný limit koncentrácie nežiadúcich látok a zároveň aby bol zachovaný dostatok minerálov. Pri úprave vody sa k reverznej osmóze pristupuje v ojedinelých prípadoch, bohatšie uplatnenie nachádza v rôznych odvetviach priemyslu (farmaceutika, potravinárstvo, čistenie odpadných vôd z priemyslu...). Nevýhodou je relatívne malá produkcia upravenej vody v porovnaní s inými tlakovými membránovými procesmi. Flux reverznej osmózy sa v závislosti na zložení vody pohybuje v hodnotách 5 – 40 l/m²/h. [10, 17, 21]

V Českej republike sa reverzná osmóza nepoužíva na žiadnej veľkokapacitnej úpravni, ale je inštalovaná napríklad na malej úpravni v obci Pševos (okres Jičín), kde slúži na odstránenie dusičnanov a pesticídov zo surovej vody. Využíva sa spôsob následného riedenia surovou vodou. V Slovenskej republike bola reverzná osmóza využitá na vodnom zdroji Podbranč (okres Senica) k odstráneniu nadmerného množstva síranov. [22]

3.2.5 Porovnanie jednotlivých procesov

Pri výbere vhodného membránového procesu je základnou informáciou kvalita surovej vody. Čím menšiu veľkosť majú látky, ktoré je potrebné odstrániť, tým jemnejší membránový proces je potrebný. Nie je vhodnou stratégiou voliť membránu schopnú odstraňovať oveľa menšie častice ako je potrebné. So znižujúcou sa veľkosťou pórov membrány narastajú investičné aj prevádzkové náklady. Zároveň malé póry sa rýchlejšie zanášajú a je potrebné časté čistenie, čo sa tiež odzrkadlí v prevádzkových nákladoch. Problematike zanášania a čistenia membrán je venovaná samostatná kapitola.

Pre stručný prehľad sú v nasledujúcej tabuľke (Tab. 3.3) porovnané základné vlastnosti jednotlivých tlakových membránových procesov a nižšie (Tab. 3.4) sú uvedené ich separačné schopnosti pre rôzne látky, bežne sa vyskytujúce v surovej vode.

Tab. 3.3 Porovnanie základných vlastností tlakových membránových procesov [12]

Proces	Transmembránový tlak [MPa]	Veľkosť pórov [nm]	Flux [l/m ² /h]
mikrofiltrácia	< 0,4 MPa	100 - 10 000	> 200
ultrafiltrácia	0,1 - 1 MPa	10 - 100	50 - 200
nanofiltrácia	1 - 2,5 MPa	1 - 10	20 - 80
reverzná osmóza	1,5 - 8 MPa	< 1	5 - 40

Tab. 3.4 Odstraňovanie látok z vody membránovými procesmi [21]

Odstraňované látky	Membránový proces			
	MF	UF	NF	RO
Suspendované látky	C	C	C	C
Prvky	C	C	C	C
Baktérie	C	C	C	C
Vírusy	P	C	C	C
Železo, mangán	D	D	C	C
Huminové látky	-	P	C	C
CHSK	-	-	P	C
Pesticídy	-	-	P	C
Vápnik, horčík	-	-	P	C
Dusičnany	-	-	-	C
Amoniak	-	-	-	C

C – kompletne odstránenie

D – v závislosti na chemickej forme

P – čiastočné odstránenie

3.3 KONFIGURÁCIA MEMBRÁNOVÝCH PROCESOV

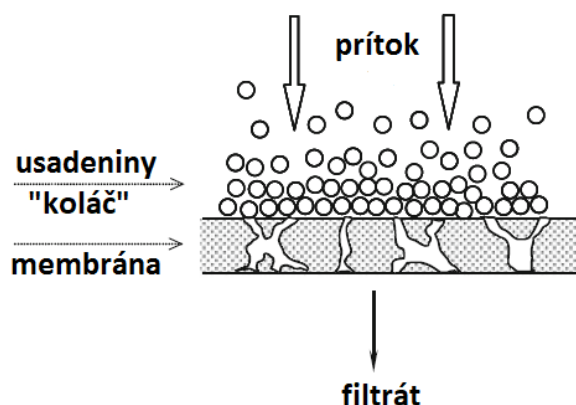
Správny výber z vyššie uvedených tlakových procesov je základným predpokladom úspešnej aplikácie membránovej filtrace. No aj v rámci jednotlivých procesov sú ďalšie parametre, ktoré ovplyvnia jej optimálne fungovanie. Dodávatelia ponúkajú širokú škálu membránových modulov rôznych tvarov, veľkostí a v rôznom prevádzkovom usporiadaní.

3.3.1 Režim prúdenia

Podľa toho v akom smere surová voda priteká na membránu sa rozlišujú dve základné metódy membránovej filtrace:

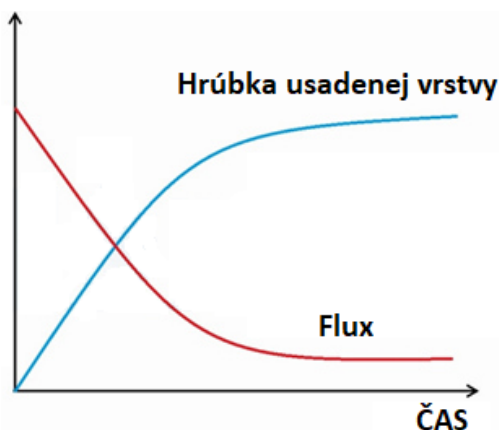
Dead-end

Filtrácii v režime dead-end sa niekedy hovorí aj priama filtrácia. Surová voda priteká kolmo na membránu, celý prítok je tlačný cez jej stenu a vzniká filtrát. Odstránené látky sa hromadia na povrchu a postupne upchávajú jej póry. Dochádza k tvorbe tzv. koláča. Počas filtrácie nevzniká koncentrát, teda odpadná voda. Schéma tejto metódy je viditeľné na Obr. 3.6. [23, 24]



Obr. 3.6 Schéma dead-end filtrace [12]

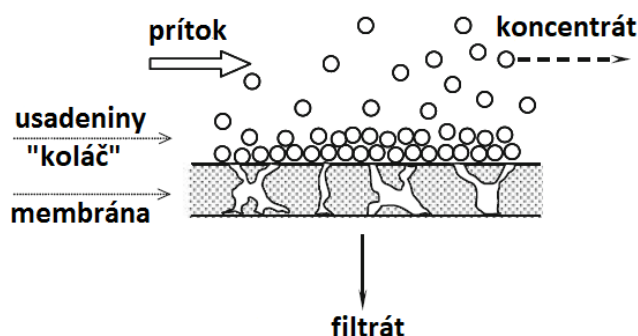
Pri využití dead-end filtrace je počiatočný flux relatívne vysoký. Postupne ako narastá hrúbka vrstvy zachytených nečistôt sa znižuje priepustnosť membrány, až môže dôjsť k jej úplnému upchaniu. Obr. 3.7 zobrazuje ilustračnú závislosť hrúbky usadenej vrstvy a toku membránou na čase. [23, 24]



Obr. 3.7 Závislosť hrúbky vrstvy usadenín, fluxu na čase pri dead-end filtrácii [23]

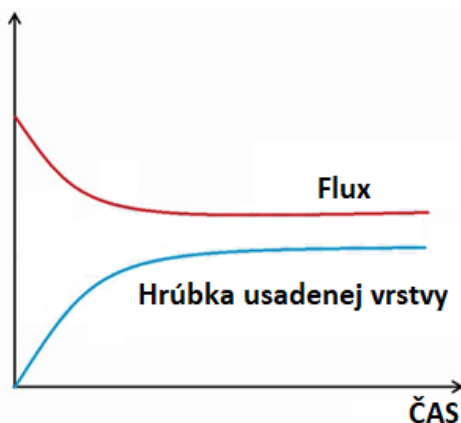
Cross-flow

V prípade cross-flow filtrácie (Obr. 3.8) je prítok surovej vody rozdelený na dve zložky. Vzniká zložka, ktorá prechádza membránou (filtrát) a časť vody (koncentrát) odchádza ako odpad spolu s látkami, ktoré membránou neprešli. Dochádza k turbulentnému prúdeniu pozdĺž steny membrány, čím je zabránené akumulácii usadenín na nej. Množstvo zachytených nečistôt je týmto spôsobom odplavených spolu s odpadnou vodou. [23, 24]



Obr. 3.8 Schéma cross-flow filtrácie [12]

Aj pri režime cross-flow čiastočne dochádza k usadeniu nečistôt na stene membrány. No tento proces je značne pomalší, pretože sú priebežne odplavované. Počiatočná produkcia filtrátu nie je tak vysoká ako pri dead-end metóde, keďže časť prítoku sa stáva odpadom. Na druhej strane pokles fluxu je výrazne miernejší a filtračný cyklus dlhší. [23, 24]



Obr. 3.9 Závislosť hrúbky vrstvy usadenín, fluxu na čase pri cross-flow filtrácii [23]

Porovnanie

Obe tieto metódy majú svoje výhody a nevýhody. Dead-end režim vyžaduje častejšie pranie membrány a má väčšie nároky na praciú vodu, čo sa týka jej množstva aj tlaku. Zároveň však pri ňom kontinuálne nevzniká odpadná voda a zdroj surovej vody sa využíva šetrnejšie. Cross-flow usporiadanie umožňuje značne predĺžiť filtračný cyklus a aj život membrány. Nevýhodou je, že časť surovej vody sa stáva odpadom. [23, 24]

Výber vhodného režimu závisí na konkrétnych podmienkach, najmä na kvalite upravovanej vody. Všeobecne sa odporúča použiť dead-end filtráciu, keď surová voda obsahuje nižšie množstvo nerozpustených látok, poprípade keď je pred samotnou membránovou filtráciou ešte upravovaná iným spôsobom a teda nebude nadmerne zanášať membránu. Niektorí dodávatelia

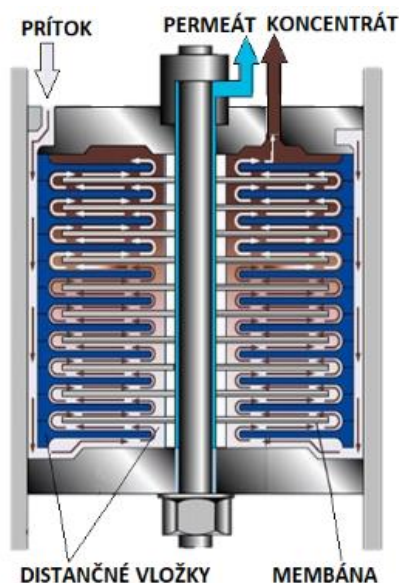
odporúčajú dead-end filtráciu pri obsahu nerozpustených látok do 0,5 %. Pri väčšom obsahu nerozpustených látok sa javí ako výhodnejší cross-flow režim. [23, 24]

3.3.2 Membránové moduly

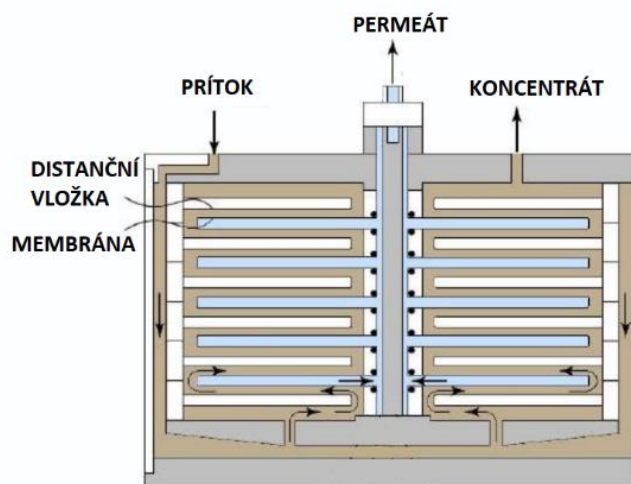
Produkcija vody upravenej membránovým zariadením sa vyjadruje veličinou flux, ktorá bola už vyššie popísaná. Najčastejšie sa uvádza v jednotkách $l/m^2/h$, čiže ide o prietok na plochu, konkrétne na plochu membrány. Z toho vyplýva, že čím väčšia je plocha použitej membrány, tým väčšia bude aj produkcia upravenej vody. To viedlo výrobcov k umiestneniu membrán do stavebných elementov alebo inak povedané puzdier, ktoré sú nazývané ako membránové moduly. Umožňujú ekonomické a priestorové úspory, pri zabezpečení dostatočnej plochy membrány. Zároveň uľahčujú manipuláciu a výmenu membrán. Široká škála využitia membrán viedla k vývoju niekoľkých základných tvarových druhov modulov, ktoré sú svojim usporiadaním vhodné pre konkrétne aplikácie. Medzi základné typy modulov patria [25]:

Doskový modul

Doskový modul je tvorený plochými listami membrán, ktoré sú uložené v rámoch. Tieto rámy sú skladané v niekoľkých vrstvách za sebou a sú prekladané distančnými vložkami. Úlohou distančných vložiek je vytvorenie priestoru pre tok surovej vody a filtrátu. V starších modeloch sa umiestňovali taktiež distančné vložky pre tok retentátu. V súčasnosti klesá využitie týchto typov modulov. Jedným z dôvodov je nedostatočná tesnosť rámov membrán. Medzi stále používané moduly patria valcové moduly typu DT (disc tube)(Obr. 3.10.a) a CD (circular disc) (Obr. 3.10.b). [18, 26]



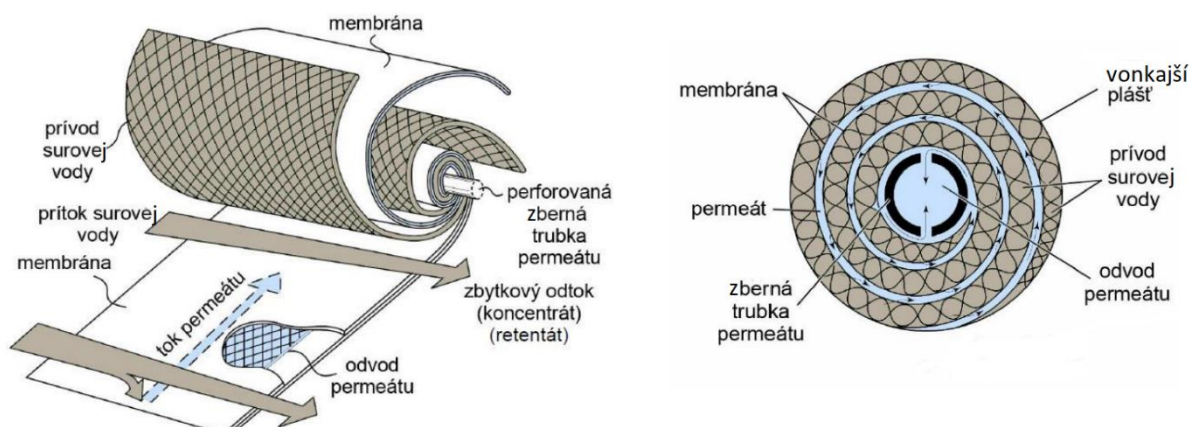
Obr. 3.10.a DT modul [27]



Obr. 3.10.b CD modul [18]

Vinutý modul

Špirálovo vinutý modul (Obr. 3.11) vznikol z doskového modulu, a to obtočením plochých listov membrány okolo perforovanej trubky, ktorou odteká filtrát. Touto úpravou je možné dosiahnuť výrazne väčšiu plochu membrány v relatívne malom module. Jednotlivé vrstvy sú taktiež oddelené distančnými vložkami, ktoré umožňujú tok filtrovanej kvapaliny. Nevýhodou je náchylnosť tohto modulu k zanášaniam a jeho komplikované čistenie. Používa sa výhradne pre nanofiltráciu a reverznú osmózu, typicky pre odsolovanie vody. [18, 26]



Obr. 3.11 Vinutý membránový modul [18]

Trubkový modul

Trubkový modul (niekedy nazývaný aj ako tubulárny, Obr. 3.12) je tvorený zväzkom niekoľkých perforovaných trubiiek z pevného plastu. Na ich vnútornej stene je upevnená membrána. Rôzne zdroje uvádzajú odlišný rozsah veľkostí používaných trubiiek ale vo všeobecnosti platí, že sa pohybujú v hodnotách 5-30 mm. V porovnaní s veľkosťou odstraňovaných látok ide o relatívne veľké rozmery a preto medzi ich výhody patrí pomalé zanášanie. Taktiež vďaka prítomnosti pevných plastových trubiiek, ktoré slúžia ako podpora pre membránu, sú odolné voči mechanickému poškodeniu. Z týchto vlastností vyplýva, že sú vhodné pre odstraňovanie väčších častíc a vyšších koncentrácií znečistenia. Teda pri ich použití nie je potrebná náročná predúprava surovej vody. [18, 26, 28]



Obr. 3.12 Trubkový membránový modul [29]

Kapilárny modul

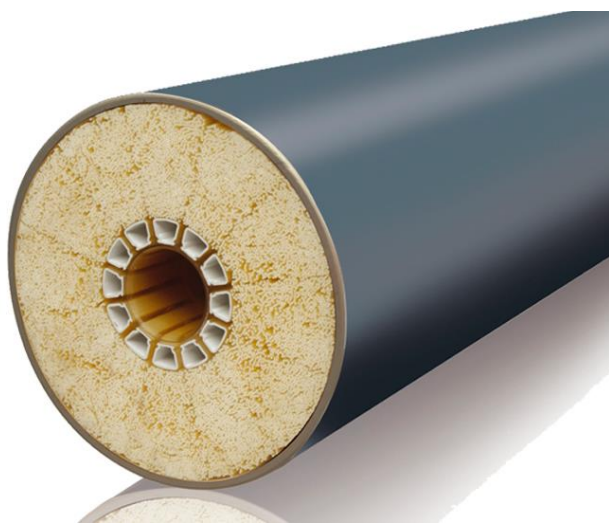
Kapilárny modul (Obr. 3.13) je konštrukčne obdobou trubkového modulu, rozdiel je vo veľkosti použitých trubiiek. V odbornej literatúre nie je ustálený konkrétny rozsah rozmeru trubičiek, ktorý sa považuje za kapiláry ale všeobecne platí, že ide o rozmery menšie ako trubkový modul, čiže približne 0,2-5 mm. Z dôvodu menšieho rozmeru trubičiek, ktorých je vďaka tomu možné do modulu umiestniť viac, vzniká veľká plocha membrány. Zároveň je však oveľa výraznejšie zanášanie a možnosť mechanického poškodenia. Je teda vhodný pre odstránenie jemných častíc a vodu je potrebné predupraviť. [26, 28]



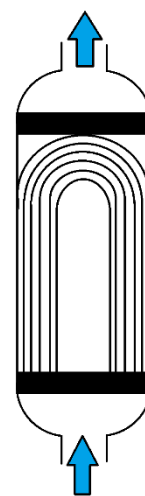
Obr. 3.13 Kapilárne membránové moduly [29]

Modul s dutými vláknami

Modul s dutými vláknami (Obr. 3.14.a) sa niekedy značí ako HF (z ang. hollow fiber). Je veľmi podobný trubkovému a kapilárnemu modulu. Rozdiel je znovu vo veľkosti použitých trubičiek a taktiež pri membránovom module s dutými vláknami sa membrána umiestňuje z vonkajšej strany trubičky. Odborná literatúra sa taktiež v tomto prípade nezhoduje aká je konkrétna veľkosť dutých vlákien ale pohybuje sa celkovo v stotínach až jednotkách milimetrov (0,02-1,5 mm). Tieto jemné vlásoknice sú vhodné pre odstránenie veľmi malých častíc a je potrebné dbať na kvalitnú úpravu vody pred samotnou membránovou filtráciou, aby sa predišlo ich poškodeniu alebo upchaniu. Celkom časté sú moduly s dutými vláknami, v ktorých sú vlákna uložené v tvare U (Obr 3.14.b). [26, 28]



Obr. 3.14.a Modul s dutými vláknami [18]

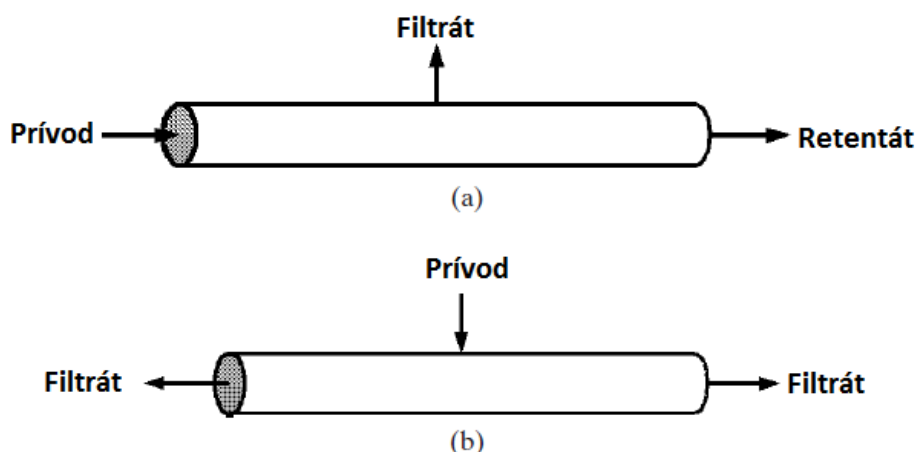


Obr. 3.14.a Modul s dutými vláknami v tvare U

3.3.3 Smer prúdenia

Vo vodárenstve sú najpoužívanejšími modulmi trubkové, kapilárne a s dutými vláknami. V praxi sa využívajú dva spôsoby, ktorými v nich môže kvapalina prúdiť [12]:

- **Inside-out** (zvnútra-von) – surová voda priteká vnútro trubičiek, prechádza membránou a odteká medzerami medzi jednotlivými trubičkami (Obr. 3.15.a).
- **Outside-in** (z von-dovnútra) – prebieha v opačnom smere, surová voda je privádzaná medzerami medzi trubičkami, prechádza membránou do ich vnútra a nimi odteká filtrát. (Obr. 3.15.b)



Obr. 3.15 Smer prúdenia v moduloch a.) Inside-Out flow, b.) Outside-In flow [12]

3.4 CHARAKTERISTIKA MEMBRÁN

V predchádzajúcich kapitolách bolo uvedených niekoľko kategórií membránových procesov a membránových modulov. Ide o základné pojmy, používané vo vodárenskej praxi. Pre správnu voľbu modulu pre konkrétnu aplikáciu je však dôležité pozrieť sa bližšie aj na samotnú membránu. Kritériá, podľa ktorých je možné deliť a charakterizovať membrány je hneď niekoľko. V tejto podkapitole sú uvedené vybrané z nich – symetria, materiál a?

3.4.1 Materiál

Membrány sa vyrábajú zo širokej škály materiálov. Ich základné delenie je na organické a anorganické. Organické materiály majú nižšiu cenu ale vyznačujú sa menšou chemickou a teplotnou odolnosťou. Naopak anorganické membrány sú síce drahšie, ale sú chemicky, mechanicky a teplotne odolné, čo umožňuje ich použitie v širšej škále podmienok a čistenie silnejšími chemikáliami. [26]

Organické membrány

Organické membrány sa vyrábajú z polymérov, čo sú makromolekulové látky, tvorené dlhým reťazcom opakujúcich sa molekúl. Pokiaľ je reťazec tvorený molekulami s rovnakou štruktúrou ide o homopolymer. Ak sa v reťazci opakuje niekoľko rôznych molekúl, nazýva sa kopolymer. [18]

Organické polyméry pre výrobu membrán sa ďalej delia na [26]:

- **Prírodné** – napr. acetáty celulózy, nitráty celulózy
- **Syntetické** – napr. polyamidy, polyetylen, polypropylen, polyakrylonitril

Anorganické membrány

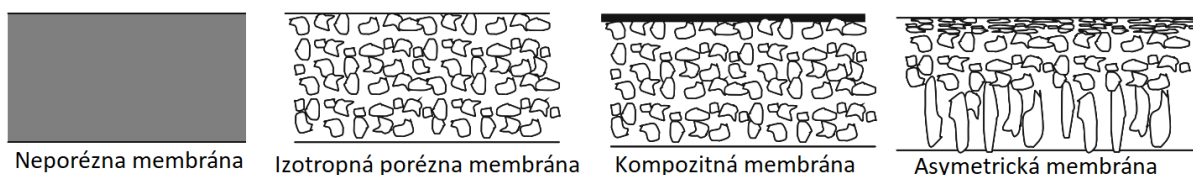
Medzi anorganické materiály, používané k výrobe membrán sú **kovy**, **keramika** a **sklo**. Membrány z kovov majú výrazné nedostatky – náročná výroba, krehkosť a únava materiálu. Sklenené membrány majú svoje využitie skôr v špecifických priemyselných a chemických odvetviach. Vo vodárenstve preukazujú najväčšiu perspektívu keramické membrány. Vyrábajú sa z prášku, ktorý je vypálený pri teplote 1 000-1 800 °C. Ide o prášok oxidov kremíku, titánu, hliníku alebo zirkónu. Do popredia sa dostávajú zeolitové keramické membrány. Zeolit je tvorený trojrozmernou mriežkou s centrálnym atómom uhlíka alebo hliníka. [18, 26]

3.4.2 Štruktúra

V odbornej literatúre sa autori presne nezhodujú v tom, ako rozdeľovať membrány podľa štruktúry. Každý z nich totiž považuje inú vlastnosť za smerodajnú pri popise štruktúry. Môže ísť o izotropiu, homogenitu alebo symetriu. Niektoré zdroje dokonca tieto kategórie navzájom kombinujú. Všeobecne však ide o to isté rozdelenie, len s iným pomenovaním. Zjednodušene je teda možné tvrdiť, že membrány sa podľa štruktúry delia na [12, 18, 26, 30]:

- **Izotropné/Symetrické/Homogénne** – pozostávajú z jedného materiálu, póry sú rovnakej veľkosti a sú rovnomerne rozmiestnené skrz celú stenu membrány.
- **Anizotropné/Asymetrické/Nehomogénne** – pozostávajú z jedného materiálu ale veľkosť a rozmiestnenie pórov je nerovnomerné.
- **Kompozitné** – niekedy sa uvádzajú tiež ako podkategória anizotropných membrán. Ide o membrány, ktoré sú tvorené niekoľkými vrstvami z rôznych materiálov. Často majú tenkú povrchovú vrstvu umiestnenú na hrubšej podkladnej vrstve. Povrchová vrstva plní separačnú funkciu, zatiaľ čo hrubá vrstva zabezpečuje mechanickú stabilitu.

Podľa štruktúry je tiež možné membrány deliť na **porézne** a **neporézne**. Porézne membrány fungujú ako jemné sitko s otvormi. Zachytávajú látky na základe ich veľkosti. Častice, ktoré sú väčšie ako póry membrány ňou neprejdú. Pri neporéznych membránach dochádza k prepúšťaniu látok z jednej strany membrány na druhú transportnými kanálíkmi. Napríklad membrány pre reverznú osmózu sú považované za neporézne. Skladajú sa z „dynamickej“ polymérnej siete, ktorá umožňuje prestup kvapaliny membránou. Keď sa hovorí o „póroch“ RO membrány, v skutočnosti ide o transportné kanáliky v hutnej membráne.



Obr. 3.16 Rôzne typy štruktúry membrán [30]

3.5 ZANÁŠANIE MEMBRÁN

Počas filtrácie, či už pomocou konvenčných filtrov alebo membrán, dochádza časom k nahromadeniu zachyteného znečistenia, čo spôsobí „upchanie“ a filtračný proces sa stane neefektívnym. Pri membránových procesoch je tento jav závažnejším problémom ako u bežných filtrov so zrnitou náplňou z dôvodu oveľa menších otvorov, ktoré sa zanášajú rýchlejšie. Ide o najvýznamnejší nedostatok membránových procesov, ktorý dlhé roky bránil ich širšiemu využitiu. Bolo realizovaných mnoho výskumov, ktorých cieľom bolo hlbšie poznať princípy zanášania membrány a ako mu zabrániť. Vďaka tomu boli posunuté možnosti využitia membránových filtrov do takej miery, že je realizovateľná ich inštalácia na veľkých úpravniach vody a dokonca aj na čistiarnach odpadných vôd. [44]

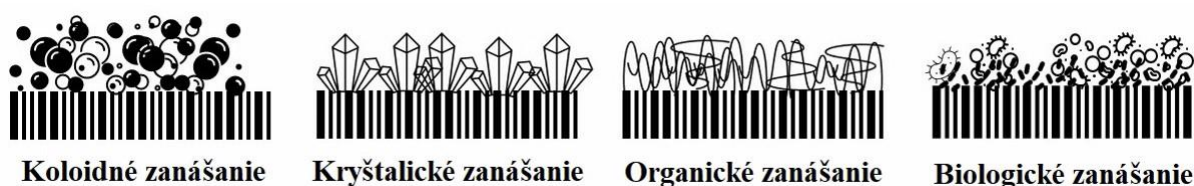
Aj napriek výraznému posunu v problematike zanášania sa nedá tento jav považovať za eliminovaný a je potrebné ho naďalej vo vedeckej sfére skúmať. V oblasti prevádzky je dôležité poznať základné princípy usádzania nečistôt na povrchu membrány, keďže zanesenie membrány spôsobuje zníženie produkcie upravenej vody, jej výslednej kvality a skrátenie životnosti membrány. Medzi hlavné mechanizmy spôsobujúce zanášanie membrány patria adsorpcia, upchávanie pórov, chemické reakcie medzi rozpustenými látkami a materiálom membrány a rast baktérií. [44]

Mechanizmy zanášania sú komplexné chemické a fyzikálne interakcie medzi zložkami surovej vody a povrchom membrány. Faktormi, ktoré významne ovplyvňujú tieto interakcie sú [46]:

- **Chemické vlastnosti a zloženie vody** – pH, iónová sila, koncentrácia znečistenia.
- **Koncentračná polarizácia** – Látky, ktoré boli membránovou zadržané sa hromadia v okolí jej povrchu, čím vzniká oblasť s výrazne odlišnou koncentráciou ako v jadre upravovanej vody. Táto vrstva sa nazýva polarizačná vrstva. Na základe koncentračného spádu dochádza k difúzii zadržaného znečistenia v opačnom smere ako je tok vody, čo zvyšuje odpor.
- **Vlastnosti membrány** – materiál, pórovitosť, hydrofóbnosť, povrchový náboj, morfológia, MWCO.
- **Prevádzkové parametre** – teplota, tlak, prevzdušnenie, flux a ďalšie hydrodynamické podmienky.

Zanášanie sa dá klasifikovať ako vnútorné alebo povrchové. Vnútorné zanesenie nastáva vnútri pórov membrány a je typické pre membrány s väčším priemerom pórov. K povrchovému zaneseniu dochádza nahromadením nečistôt na jej povrchu. Konkrétny charakter zanášania sa líši vzhľadom na druh surovej vody a prevádzkových podmienok. Na základe vlastností usadzovaných látok rozlišujeme hlavné typy zanášania (Obr. 3.17) [45, 46]:

- **Koloidné zanášanie** – Je spôsobené zadržaním koloidných látok, ktorých veľkosti sa pohybujú v rozmedzí 1 nm - 1 μ m. Medzi anorganické koloidy, bežne sa vyskytujúce v prírodných vodách, patria oxidy kovov, koloidný oxid kremičitý a ílové minerály. Na povrchu membrány sa hromadia vo forme koláčovej vrstvy.
- **Kryštalické zanášanie** – Vzniká zrážaním ťažko rozpustných minerálov na povrchu membrány. Niektoré rozpustené anorganické minerály ako uhličitaný a sírany vápnika, horčíka a železa, po prípade niektoré minerály oxidu kremičitého môžu dosiahnuť koncentráciu na hranici rozpustnosti a zrážať sa vo forme kryštálov.
- **Organické zanášanie** – Prírodné organické látky zahŕňajú produkty činnosti živých organizmov a ich rozkladu. Mnoho membrán je vyrobených z hydrofóbnych polymérov, na základe čoho má organický materiál tendenciu adsorbovať sa na povrch membrány.
- **Biologické zanášanie** – Vzniká pri transporte živých mikroorganizmov na povrch membrány, kde dochádza k ich množeniu a tvorbe biofilmu. Tento druh zanášania je nebezpečný aj z dôvodu, že niektoré mikroorganizmy sú schopné rozkladať membrány z polymérnych materiálov.



Obr. 3.17 Základné typy zanášania membrány [46]

Určité znečistenie je možné odstrániť, a teda úplne alebo čiastočne regenerovať membránu a obnoviť jej funkciu. Podľa náročnosti odstránenia usadených látok sa zanesenie membrány delí na [12] :

- **Vratné**
 - Fyzicky vratné – fyzickým čistením
 - Chemicky vratné – chemickým čistením
- **Nevratné**

Pre úspešné a efektívne využitie membránových filtrov je dôležité minimalizovať ich zanášanie. Ide o náročnú úlohu, pretože tá správna stratégia musí odpovedať konkrétnej situácii. Nižšie sú uvedené niektoré metódy, ktorými je všeobecne možné dosiahnuť, čo najmenšie prejavy zanášania membrány [44, 46] :

- **Pred-úprava surovej vody** – Slúži nie len k spomaleniu zanášania ale aj k ochrane membrány pred mechanickým poškodením. Ako pred-úprava môžu byť navrhnuté rôzne procesy, v závislosti na vlastnostiach surovej vody. Konvenčná schéma pred-úpravy bežne zahŕňa koaguláciu s následnou flokuláciou, filtráciu cez filtračnú vrstvu a dezinfekciu. Koagulácia slúži k zrazeniu rozpustených látok, ktoré sa počas flokulácie zhlukujú do väčších vločiek. Následne sú odstránené spolu s väčšími suspendovanými látkami cez filtračnú vrstvu. Úlohou dezinfekcie je zabrániť biologickému zanášaniu. Najčastejším dezinfekčným činidlom je chlór a jeho zlúčeniny. V prípade využitia reverznej osmózy sú dané prísne požiadavky na vysokú kvalitu vstupnej vody. Preto je časté predradenie iného membránového procesu (mikrofiltrácie, ultrafiltrácie alebo nanofiltrácie) ako súčasť pred-úpravy. [44, 46]
- **Optimalizácia prevádzkových parametrov** – Znížiť mieru zanášania a zlepšiť kvalitu filtrátu je možné optimalizáciou teploty, tlaku a hydrodynamických podmienok. Teplota priamo ovplyvňuje niekoľko faktorov ako rozpustnosť, viskozitu, koeficient prenosu hmoty a saturačné limity. So zvýšením teploty sa znižuje viskozita, čo vedie k vyšším hodnotám fluxu a väčšej náchylnosti k zanášaniu. Taktiež pri vyšších teplotách dochádza k rýchlejšiemu rastu biofilmu. Na základe toho sa javí výhodnejšie používať membránovú filtráciu pri nižších teplotách ale na druhej strane pri veľmi nízkej teplote sa môže flux znížiť natoľko, že proces nebude produkovať dostatočné množstvo upravenej vody. Flux, ale aj miera toku cross-flow, zohrávajú značnú rolu. Všeobecne platí, že čím je menší flux a väčší prietok cross-flow, tým menej sa membrána zanáša. Zároveň ale dochádza k nízkej produkcii filtrátu, je teda potrebné nájsť optimálny pomer, aby bol proces ekonomický. [44, 46]
- **Monitoring membrány a jej čistenie** – Ako indikátory zanášania sa využívajú prevádzkové parametre TMP, flux a kvalita filtrátu. Je potrebné zabezpečiť techniku, ktorá bude tieto parametre sledovať na mieste a v reálnom čase. Tieto hodnoty totiž tvoria podklad k návrhu vhodnej údržby zariadenia. Pri procese s konštantným tlakom sa sleduje pokles fluxu v jednotke a pri jeho poklese pod prijateľnú hodnotu je filtračný cyklus ukončený. Pri procese so stálym fluxom sa obdobne sleduje tlakový nárast. Popríklad filtračný cyklus môže byť ukončený nevyhovujúcou kvalitou filtrátu. Časté je pevné nastavenie dĺžky filtračného cyklu, na základe dlhodobého sledovania prevádzkových parametrov. Po skončení filtračného cyklu nasleduje čistenie membrány. Pri nesprávnom návrhu čistiaceho procesu a jeho načasovaní môže dôjsť k nevratnému zaneseniu a tým k nepoužiteľnosti membránového filtru. [44, 46]

- **Využitie nových materiálov** – Mnoho výskumov bolo venovaných vývoju nových materiálov pre syntézu membrán, ktoré sú odolné voči zanášaniam, osvedčili sa nanokompozitné materiály. Niektorými z nich sú nanoporézny grafén, uhlíkové nanotúrky (CNT), zwitterion a nanočastice oxidov kovov. Polymérne nanokompozitné membrány sú modifikáciou bežných polymérnych membrán, s tým rozdielom, že majú v polymérnej mriežke zakomponovaný nanomateriál. Delia sa na dva typy, s tenkým filmom (TFNC – thin-film nanocomposite) a zmiešané. U nanokompozitných membrán s tenkým filmom tvoria nanočastice povrchovú vrstvu nanosenú metódou namáčania. U zmiešaných membrán sú nanočastice dispergované v polyméri. Nevýhodou použitia týchto materiálov sú nedostatočné informácie o ich pôsobení na ľudské zdravie, keďže hrozí uvoľnenie nanočastíc do filtrovanej vody. [44, 46]
- **Úprava povrchu** – Jednou z možností ako zlepšiť vlastnosti membrány je nanosenie prídavnej vrstvy na jej povrch. Táto ochranná vrstva slúži ako inhibitor adsorpcie nečistôt na povrch membrány. Osvedčilo sa použitie dvojitej vrstvy kladne nabitého polydiallyldimetylammóniumchloridu (PolyDADMAC) a záporne nabitého polystyrénsulfonátu (PSS) alebo sulfonátovaný polyvinyl alkohol (SPVA). Nanosenie týchto ochranných vrstiev sa nazýva fyzikálnou úpravou povrchu membrány. Ďalšou kategóriou je chemická úprava, ktorá je založená na vyvolaní špecifických chemických reakcií na povrchu membrány. Metódy, ktoré spadajú do tejto kategórie sú hydrofilizačná úprava, radikálne roubovanie a úprava plazmou. [44, 46]

3.6 ČISTENIE MEMBRÁN

Je síce možné zanášanie membrány minimalizovať ale nie je reálne ho úplne eliminovať. Okrem kvalitnej pred-úpravy a optimálnych prevádzkových nastavení je dôležité zostaviť preto vhodný plán údržby. Ten pozostáva hlavne z informácií o čistení membrány. Čistenie membrány väčšinou pozostáva z fyzického čistenia, ktoré je realizované relatívne v krátkych intervaloch a taktiež z chemického čistenia, ktoré je menej časté. [12]

Pri aplikáciách na výkonnejších úpravniach vody je zväčša inštalovaná sústava niekoľkých membránových modulov, bežne aj desiatky kusov. Ich čistenie nikdy neprebíha naraz pre všetky moduly. Či už fyzické alebo chemické čistenie sa navrhuje tak, aby súčasne bolo mimo prevádzky čo najmenšie množstvo modulov. [12]

3.6.1 Fyzické čistenie

Fyzické čistenie je založené na využití fyzikálnych síl k uvoľneniu a odstráneniu usadeného znečistenia. Jeho základnými kategóriami sú čistenie mechanické, hydraulické, ultrazvukové a poprípade ďalšie nezaraďované spôsoby. [44, 46] :

Mechanické čistenie

Čistenie membrány mechanicky je ojedinelé a aplikuje sa len pri čistení veľmi znečistenej odpadnej vody s vysokým obsahom nerozpustených látok, kedy pri zanášaní membrány vznikajú hrubé vrstvy nánosov. Niektoré spôsoby je nutné realizovať ručne, niektoré je možné prevádzkať strojne a moderné spôsoby sa dajú aj automatizovať. Všeobecne sú však mechanické spôsoby prevádzkovo náročnejšie a vyžadujú prítomnosť a kontrolu obsluhy. Do tejto kategórie patria [48] :

- **Rotácia** – Rotáciu využívajú špeciálne rotujúce membránové moduly, najčastejšie ide o membránové bioreaktory. Rotujúce prevedenie je možné použiť pri všetkých druhoch

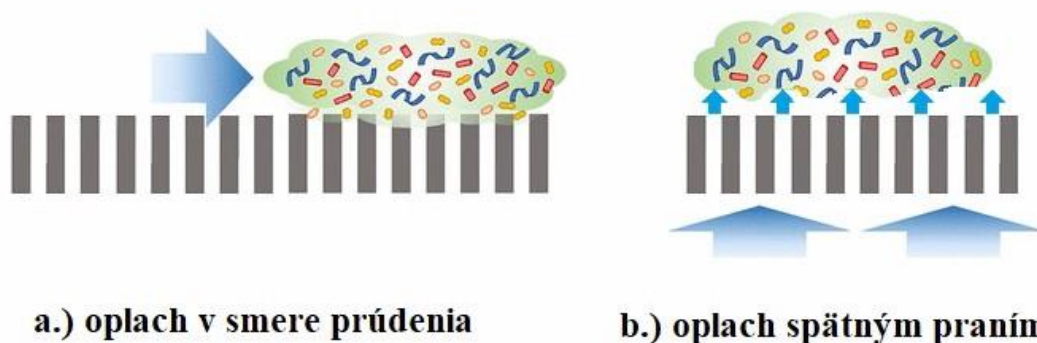
membránových modulov. Pri valcových doskových moduloch sa využíva rotácia 60 ot./min, moduly s dutými vláknami sa otáčajú v rozmedzí 5 – 20 ot./min. [48]

- **Vibrácie** – Čistenie membrány pomocou vibračného motora patrí medzi modernejšie spôsoby a nie je v praxi natoľko zastúpené. Niektoré typy sú už komerčne dostupné ale mnoho ďalších je vo výskumnej fáze. Testované sú rôzne smery vibrácií (kolmé, pozdĺžne, priečne), frekvencie a amplitúdy. V niektorých výskumoch sa preukázalo, že už pri frekvencii 8 Hz je možné dosiahnuť regeneráciu membrány viac ako 90 %. Komerčné systémy sú väčšinou vysoko frekvenčné, s frekvenciami až do 70 Hz. [48]
- **Zoškrabovanie** – Mechanické zoškrabovanie je veľmi hrubým spôsobom čistenia a môže viesť k poškodeniu membrány alebo môže zatlačiť znečistenie ešte hlbšie do pórov a zhrnúť ho. Taktiež nerieši problém s biologickým zarastaním. K zoškrabovaniu sa používajú buď škrabky a stierky alebo špongie. Čistenie pomocou špongie v tvare gule je možné použiť len pri trubkových moduloch. Najčastejšie ide o polyuretánovú špongiu, ktorá je vložená do trubky a otieraním o steny membrány odstraňuje usadené znečistenie. [44, 48]

Hydraulické čistenie

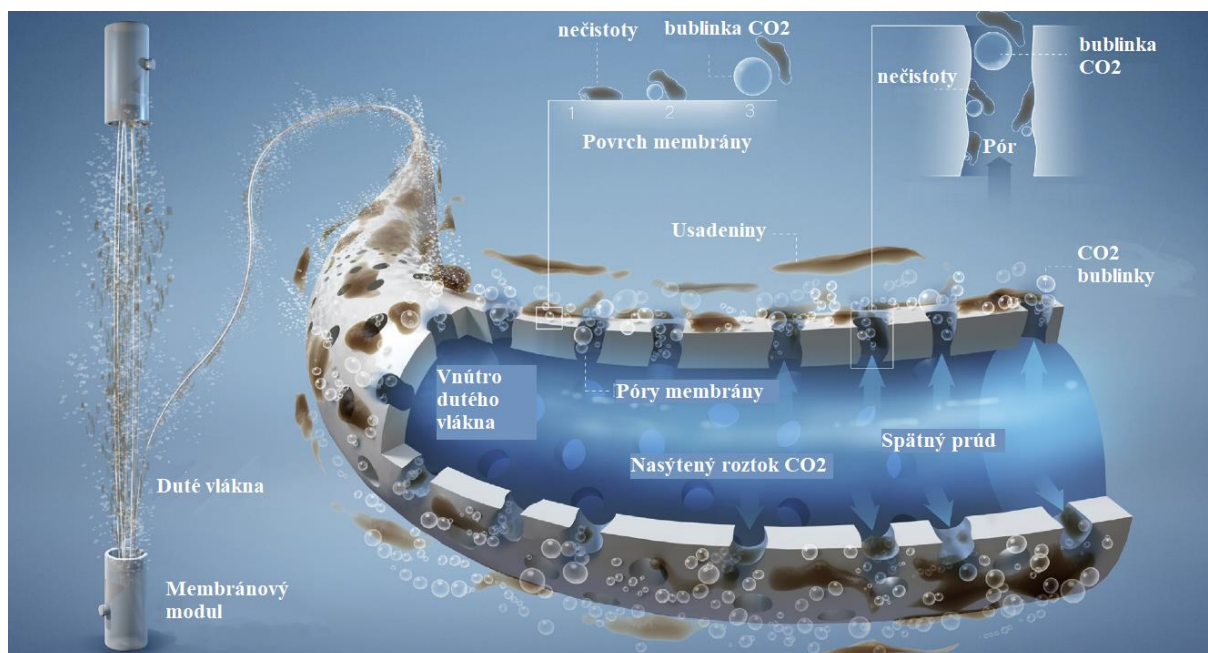
Hydraulické čistenie membrán je najpoužívanejším spôsobom fyzikálneho čistenia. Využíva silný prúd vody, poprípade vody s plynom. Výhodou je, že na rozdiel od mechanického čistenia je možné ho plne automatizovať a pri jeho realizácii nemusí byť obsluha prítomná na mieste. Možností ako ho realizovať je niekoľko [47] :

- **V smere prúdenia** (ang. forward flush) – Zmysel oplachu v smere prúdenia spočíva v odstránení vrstvy znečistenia na membráne pomocou vznikajúcich turbulencií. Je teda potrebné použiť vysoké hodnoty tlaku a zabezpečiť cross-flow režim, počas ktorého ale nevzniká filtrát (Obr. 3.18.a). [44]
- **Spätným praním** (Backward flush) – Ide o najčastejšiu metódu fyzického čistenia membrány. Princíp je obdobný ako pri praní bežných filtrov s náplňou, ale k praniu dochádza vo výrazne kratších časových intervaloch, rádovo v minútach až hodinách. K oplachu sa využíva už vyprodukovaný filtrát, ktorý je do membrány hnaný v opačnom smere pod tlakom približne 2,5 krát vyšším ako počas filtrácie. K spätnému praniu sa bežne použije 5 – 10 % filtrátu. Schematicky je tento proces zobrazený na Obr. 3.18.b. [44]



Obr. 3.18 Fyzické čistenie membrány a.) Oplach v smere prúdenia, b.) Oplach spätným praním [47]

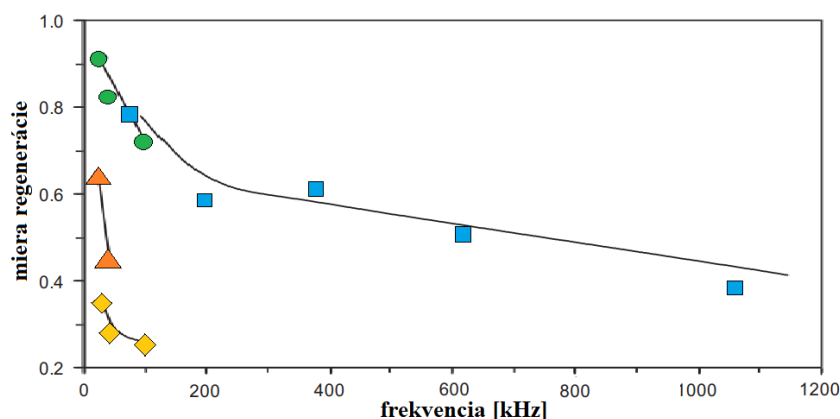
- **Vzduchom** (ang. air flush) – Usporiadanie procesu je rovnaké ako pri praní membrány v smere prúdenia ale do prúdu pracovnej vody je pridaný vzduch vo forme jemných bubliniek, čo podporuje vznik turbulencií. [45]
- **Oxidom uhličitým** – Táto metóda je vhodná pre moduly z dutých vlákien. Využíva prúd plynu oxidu uhličitého, ktorý je s vodou pod vysokým tlakom vŕhaný do vnútra vlákien (Obr. 3.19). Oxid uhličitý patrí medzi plyny, ktoré sa vo vode ľahko rozpúšťajú a jeho rozpustením vzniká kyselina uhličitá, ktorá pôsobí na znečistenie aj chemicky. [48, 49]



Obr. 3.19 Fyzikálne čistenie membrány pomocou CO₂ [49]

Ultrazvukové čistenie

Ultrazvukové čistenie je efektívne pri zmiernení účinkov koncentračnej polarizácie a odstraňovaní koláčovej vrstvy z povrchu membrány. Nedávne štúdie preukazujú, že ultrazvuk do určitej miery obmedzuje aj vznik gélovej vrstvy. Medzi jeho kľúčové parametre patria frekvencia, jeho intenzita a doba pôsobenia. Všeobecne sa pri čistení používajú nízke ultrazvukové frekvencie. Čím vyššia je frekvencia, tým klesá účinnosť (Obr. 3.20). [48]



Obr. 3.20 Závislosť účinnosti čistenia membrány na frekvencii ultrazvuku [48]

3.6.2 Chemické čistenie

Časť látok usadených na povrchu a v póroch membrány sa odstráni počas fyzikálneho čistenia, ale časť odolnejšieho znečistenia ostáva v membránovom module. To sa odstráni pomocou chemických reakcií, vyvolaných pôsobením chemických činidiel – pracích roztokov. Proces chemického čistenia sa dá podrobne rozčleniť na 6 krokov: chemické reakcie, ku ktorým dochádza pri príprave pracieho roztoku (hydrolyza, ionizácia), transport činidla k membráne, prienik činidiel do vrstvy znečistenia, rozpustenie a uvoľnenie znečistenia, transport rozpustených nečistôt s čistiacim prostriedkom preč od membrány, vypláchnutie pozostatkov činidiel z modulu. Všetky tieto kroky ovplyvňujú účinnosť chemického čistenia. [48]

Chemické činidlá, používané pri čistení membrán sa dajú rozdeliť do niekoľkých základných kategórií: kyseliny, zásady, dezinfekcia. Niektoré zdroje uvádzajú aj ďalšie kategórie ako chelatačné činidlá, povrchovo aktívne látky a enzýmy. Každé z nich sa používa pre odstránenie zanesenia s inými vlastnosťami. Vo väčšine prípadov sa kombinujú. [48]

Kyslé roztoky

Kyslé chemické činidlá sa používajú k odstráneniu anorganického zanesenia. Koloidné zanesenie je relatívne dobre odstrániteľné fyzikálnymi spôsobmi, takže väčšinou je kyselina potrebná k odstráneniu kryštalického zanesenia. Je možné ďalej rozlíšiť [45]:

- Slabé kyseliny – napr. kyselina citrónová (pH = cca. 4)
- Silné kyseliny – napr. kyselina chlorovodíková (pH = cca. 2,5)

Ďalšími bežne používanými sú kyselina dusičná, fosforečná a sírová. [48]

Zásadité roztoky

K odstráneniu organických látok, nahromadených na membráne sa používajú zásadité roztoky. Pri vysokých hodnotách pH dochádza k deprotonácii (odstránenie H^+) funkčných skupín organických látok a nadobúdajú teda záporný náboj. Dochádza k ich vzájomnému odpudzovaniu, čo spôsobí ich uvoľnenie. Znovu je možné ich deliť [45, 48]:

- Slabé zásady – napr. tripolyfosfát sodný a etyléndiamíntetraacetát sodný (pH = cca. 10)
- Silné zásady – napr. hydroxid sodný (pH = cca. 11,5)

Dezinfekčné činidlá

Ide o chemikálie, ktoré sa bežne používajú k dezinfekcii vody. Usmrcujú mikroorganizmy a tým chránia membránu pred pokrytím biofilmom. Keďže ide o silné oxidačné činidlá, ich ďalším účinkom je oxidácia funkčných skupín organických látok na ketónové, aldehydové a karboxylové skupiny. Prítomnosť týchto skupín spôsobí hydrofilnosť a teda zníženie priliehavosti látok na membránu. Ako dezinfekčné činidlá sa používajú chlorid sodný ($NaClO$), peroxid vodíka (H_2O_2) a ozón (O_3). Chlorid sodný je síce najčastejší ale v niektorých prípadoch môže jeho použitie spôsobiť vznik absorbovateľných organických halogénov (AOX) a trihalometánov, čo sú toxické látky. [48]

Ďalšie činidlá

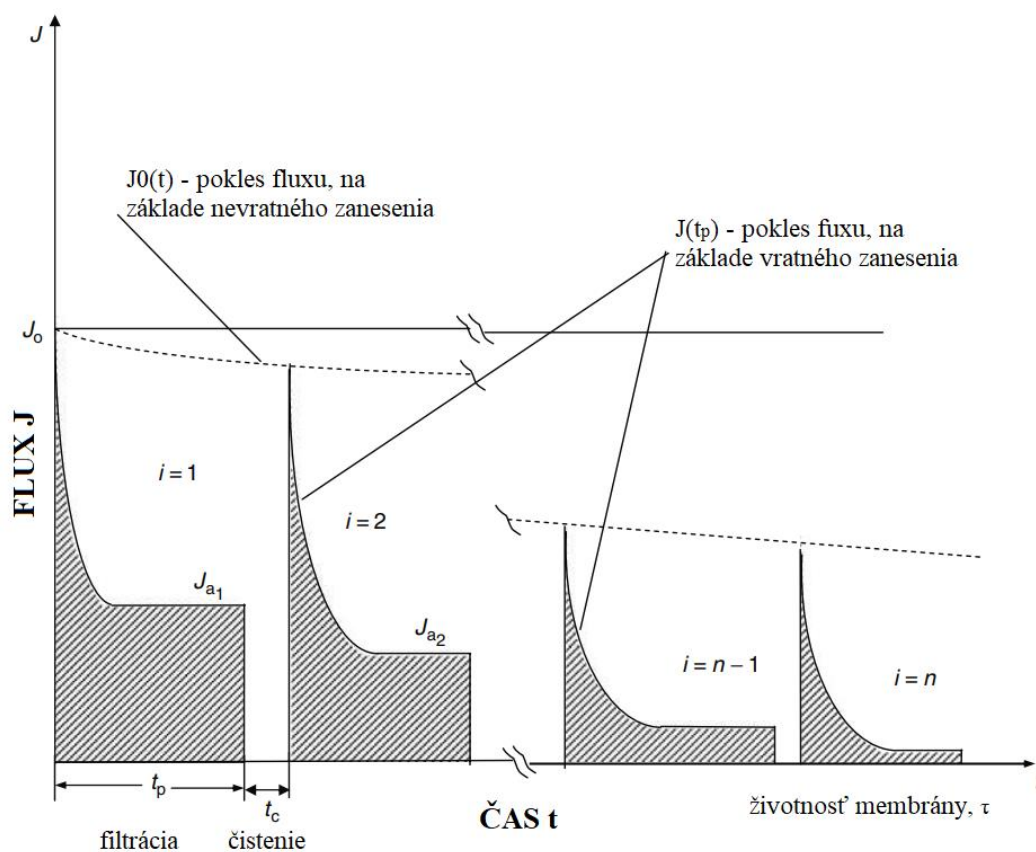
Dvojmocné kationy plnia funkciu spojiva medzi molekulami organických látok. Keď sú odstránené, dochádza k narušeniu a rozpadu organických látok, čo je priaznivým javom pri snahe ich odbúrať z membránového modulu. Odstránenie dvojmocných kationov zaručí **chelatačné činidlo**, ktoré s nimi vytvára pevné komplexy. Najznámejšími chelatačnými činidlami sú kyselina etyléndiamíntetraoctová (EDTA), kyselina dietyléntriámínpentaoctová (DTPA) a tripolyfosfát sodný (STP). [50]

Povrchovo aktívne látky vo svojej molekule obsahujú hydrofilnú aj hydrofóbnú skupinu. Sú teda polo-rozpustné vo vode aj v olejoch. Základným príkladom sú odmasťovacie prípravky, pomocou ktorých je možné zmiešať olej s vodou, látky ktoré sa bežne nemiešajú. Tento proces sa nazýva stabilizáciou emulzií. Povrchovo aktívne látky sú základnou zložkou takmer všetkých čistiacich prostriedkov. [50]

Do špeciálnej kategórie, nazývanej ako biologické alebo biochemické čistenie patrí použitie **enzýmov** ako čistiacich činidiel. Využitie má pri zanesení membrány proteínmi a lipidmi, pretože enzýmy ich dokážu rozložiť. Ich aplikácia je však náročná, pretože pre rozloženie konkrétneho proteínu alebo lipidu je potrebný špecifický enzým. Nie je teda možná všeobecné použitie. Medzi komerčne dostupné enzýmy patria Ultrasil (ECOLAB), Filzym p (REALCO) a APOBEC3. [49]

Väčšinou sa na membráne neusádza len jeden druh znečistenia a je teda potrebné použiť správne zvolenú kombináciu rôznych chemických činidiel. Najčastejšou je aplikácia kyslého a následne zásaditého pracieho roztoku. Na trhu sú dostupné aj iné špecifické prostriedky pre čistenie membrán a odstránenie buď čo najväčšieho spektra látok alebo naopak sú zamerané na kvalitné odstránenie konkrétneho druhu znečistenia. Často ich zloženie nie je známe pretože podlieha výrobnému tajomstvu. Po ukončení chemického čistenia musí nasledovať kvalitné vypláchnutie membránového modulu, aby boli odstránené pozostatky chemických činidiel. [12]

Určité percento usadeného znečistenia nie je možné odstrániť ani chemickým čistením. Aj napriek pravidelnému fyzikálnemu a chemickému čisteniu časom (t) dochádza k znižovaniu efektivity membránového modulu, ktorá sa prejavuje poklesom fluxu (J), poprípade tlakovým nárastom. Zmena fluxu v priebehu životnosti membrány je znázornená na Obr. 3.21. [44]



Obr. 3.21 Zmena fluxu v priebehu životnosti membrány [44]

4 APLIKÁCIA MEMBRÁNOVÝCH PROCESOV PRI ÚPRAVE VODY V SLOVENSKEJ A ČESKEJ REPUBLIKE

Vývoj membránových technológií má dlhú históriu v laboratórnych pomeroch, siahajúcu až do roku 1748 kedy bola Abbé Nolletom náhodou objavená osmóza. Až v 60. rokoch 20. storočia sa prejavili ich významné možnosti aplikácie v priemyselných odvetviach. Svoje miesto vo vodárenstve najprv zaujali ako spôsob odsolenia morskej vody, keď bol k tomuto účelu patentovaný prvý špirálový modul v roku 1964. Odvtedy sa využitie membránovej filtrace rozširovalo po celom svete ako spôsob úpravy aj sladkej vody. V strednej Európe ide stále o relatívne novú technológiu k tomuto účelu, ktorá sa ale rýchlo rozširuje. Výnimkou nie je ani Slovenská a Česká republika, kde každým rokom pribúdajú úpravne vody, ktoré membránovú filtráciu zaradili do svojej technológie. V tejto kapitole je uvedených niekoľko konkrétnych príkladov. [15, 51]

4.1 ULTRAFILTRÁCIA NA ÚV BŘEZOVÁ (ČR)

Oblasť vodovod Karlovarsko zásobuje 40 % obyvateľov Karlovarského kraja. Pitnú vodu dodáva do Karlových Varov, Ostrova, Chodova, Horného Slavkova, Jáchymova a ďalších 25 obcí. Hlavným zdrojom surovej vody pre tento vodovodný systém je priehradná nádrž Stanovice na Lomnickom potoku. Ide o kvalitný prírodný zdroj, nachádzajúci sa v ochrannom pásme. Voda z tohto zdroja je upravovaná v najväčšej úpravni pitnej vody na Karlovarsku – v úpravni vody Březová. Jej výstavba prebiehala v rokoch 1972 až 1982 a do prevádzky bola uvedená v roku 1984. Naprojektovaná je tak, aby zvládla vyrobiť 650 l/s pitnej vody, v súčasnosti funguje s výkonom 250 l/s. Pôvodnou technológiou tejto úpravne bola koagulácia s následnou filtráciou, zároveň na nej dochádzalo k zvyšovaniu tvrdosti. Úpravňa v rokoch 2011 až 2016 prešla rekonštrukciou. Dnes je úpravňa plne automatizovaná a doplnená o ďalší stupeň úpravy – ultrafiltráciu. Dôvodom pre pridanie tejto technológie bolo vyrovnanie sezónnych výkyvov v kvalite vody v nádrži Stanovice, kde je hlavným problémom najmä v letných mesiacoch výskyt siníc a rias. Úpravňa je v správe Vodohospodárskeho združenia obcí západných Čiech a prevádzkujú ju Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s. (Vodakva). [52, 53]

Úprava vody pred ultrafiltráciou

Stanovická nádrž má objem zásobného priestoru vody 24,2 mil. m³. Odberným objektom je odborná veža, ktorá umožňuje odber v šiestich rôznych hĺbkach, v závislosti na kvalite vody. Do úpravne je voda privedená gravitačne oceľovým potrubím dlhým 3,56 km, s priemerom 1 m. Na úpravňu je denne privedených priemerne 22 000 m³ surovej vody. Táto voda je zároveň využívaná ako zdroj energie. Na prítoku sa nachádza malá vodná elektráreň s výkonom 55 kW, ktorá vyrába elektrinu práve pre úpravňu. Osadené je tiež tepelné čerpadlo, ktoré vytápa administratívnu budovu.

Prvým stupňom úpravy je koagulácia so sedimentáciou. Ide o pridanie chemikálií, ktoré zabezpečia vyzrážanie nečistôt a ich následné zhlukovanie do väčších agregátov, ktorá sa potom usadia. V rýchlo-miešači sa pridá koagulant síran hlinitý. Dochádza k intenzívnemu krátkemu miešaniu vertikálnym miešadlom. Ďalej voda pokračuje do troch flokulačných nádrží, hlbokých 8 metrov. Po dobu 10 až 30 minút sa voda pomaly mieša pádlovým miešadlom a dochádza k vzniku veľkých vločiek nečistôt. Nasledujú tri sedimentačné nádrže, kde sa vytvorené vločky usádzajú na dne. Tieto nádrže sú rozdelené na štyri časti dierkovanými stenami a voda nimi postupne prechádza približne deväť hodín. Kal sa zo dna stiera kruhovými

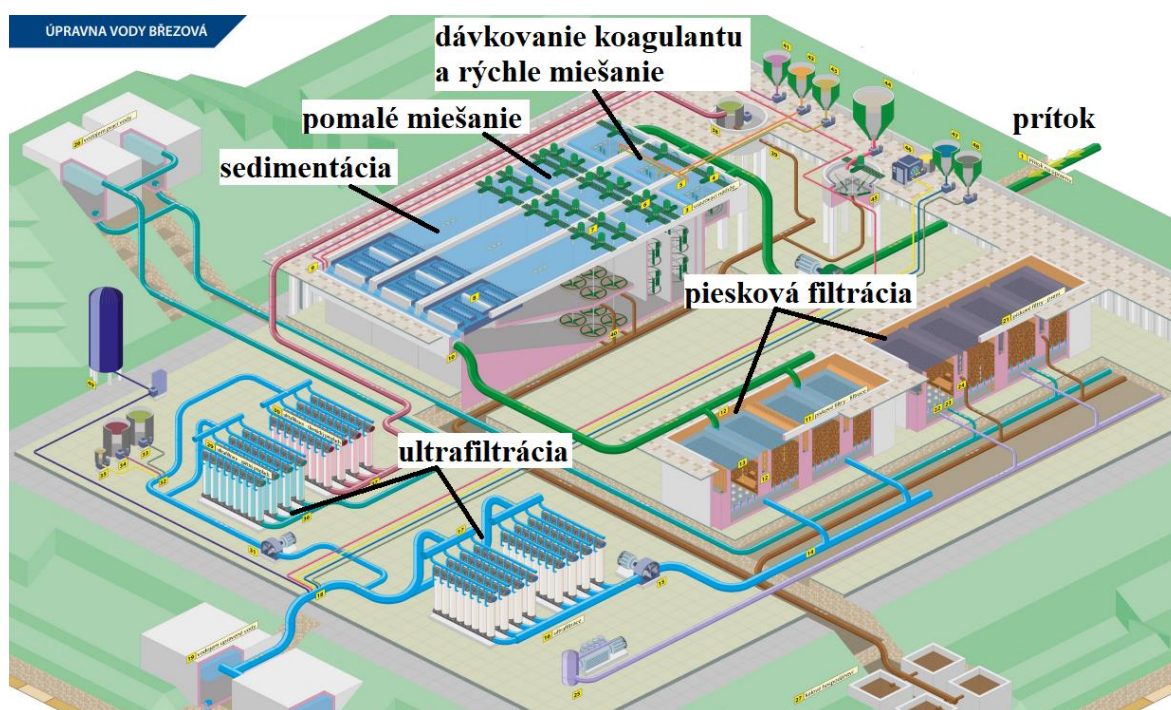
zberačmi. Na konci nádrží sa nachádzajú prepádové žľaby, do ktorých sa voda prelieva a potrubím pokračuje na osem otvorených filtrov, naplnených jemným pieskom, ktorý odstráni zvyšné nečistoty, ktoré sa neusadili v predchádzajúcom stupni. Tieto filtre majú celkovú plochu 518 m² a voda nimi prechádza jednu hodinu. Filtre sú každé štyri dni prané zospodu vodou a vzduchom. [52]

Ultrafiltrácia

Pred inštaláciou zariadenia počas modernizácie bola potrebná kvalitná príprava. Pracovníci sa zoznamovali s rôznymi typmi membránových technológií. V spolupráci s odborníkmi zo skupiny SUEZ bola navrhnutá testovacia ultrafiltračná jednotka. Na základe pilotných testov sa určili parametre potrebných ultrafiltračných modulov. Ide o kapilárny modul, s priemerom 25 cm, dlhý 2,1 m. Tenká polymérna trubička o priemere 4 milimetre má v sebe 7 kapilár, ktorými voda preteká v smere inside-out (Obr. 4.3). Póry majú rozmery 20 nm. V jednom module sa nachádza 2 600 vlákien, ich celková plocha je 70 m². Na úpravni sa nachádza 288 takýchto modulov, ktoré sú rozdelené do štyroch blokov po 72 kusoch (Obr. 4.2). Voda je do modulov čerpaná s pretlakom 0,05 – 0,15 MPa. Pranie prebieha spätným preplachom približne raz za hodinu a chemický spätný preplach raz za 1 - 3 dni. Dezinfekcia modulov je realizovaná jedenkrát mesačne roztokom chlóru. Pravidelne sa tiež kontroluje celistvosť membrány. Jednotka je ovládaná automaticky riadiacim systémom, s meraním tlaku, prietoku a pH. Súčasťou zariadenia je nádrž na praciú vodu a chemikálie. Voda zo spätného preplachu membrány sa ďalej využíva ako pracia voda pre pieskové filtre. [52, 53]

Finálna úprava

Po ultrafiltrácii sa následne ešte upravuje pH vody dávkovaním vápennej vody, ktorá sa pripravuje rozpustením vápna v sýtiči. Povrchová voda zo Stanovickej nádrže obsahuje málo minerálov, takže sa ďalej pridáva aj oxid uhličitý. Ďalším dávkovaným prípravkom je inhibítor korózie na báze kremičitanov. Na záver sa voda dezinfikuje pridaním chlórnanu sodného, ktorý sa na úpravni vyrába elektrolýzou (elektrochlorácia). [52]



Obr. 4.1 Schéma úpravne vody Březová [52]



Obr. 4.2 Membránové moduly na ÚV Březová [53]



Obr. 4.3 Detail kapilárnej membrány [53]

4.2 NANOFILTRÁCIA NA ÚV DOMAŠOV NAD BYSTŘICÍ (ČR)

Obce Domašov nad Bystřicí, Horní Loděnice, Jívová a Hraničné Petrovice, nachádzajúce sa v Olomouckom kraji, sú zásobované vodou z povrchového zdroja, ktorým je rieka Bystřice. Voda pre približne 1 500 obyvteľov, žijúcich v týchto obciach, je upravovaná na úpravni vody Domašov nad Bystřicí, s aktuálnou produkciou 3 l/s, pričom maximálny navrhnutý výkon je 5 l/s. [54]

Surová voda

Horská rieka Bystřice, ktorá je zdrojom surovej vody pre úpravňu má premenné charakteristiky, a to ako kvalitatívne, tak prietokové. Pri vyšších prietokoch po jarnom topení snehu, jesenných výdatných zrážkach ale aj po letných búrkach sa zhoršuje jej kvalita, hlavne v ukazovateľoch farba, zákal, huminové látky, TOC, CHSK_{Mn}, obsah železa, mangánu a hliníka. Okrem prirodzených prietokových pomerov sú ďalšími potencionálnymi zdrojmi znečistenia v rieke neďaleká ťažba dreva, pastva hospodárskych zvierat, nevyhovujúca čistiareň odpadných vôd, nachádzajúca sa vyššie proti prúdu rieky nad odberným objektom a vypúšťanie odpadných vôd zo závodu Ondrášovka (s vysokým obsahom železa a mangánu). Niektoré vybrané problémové ukazovatele surovej vody sú uvedené v Tab. 4.1. [54]

Tab. 4.1 ÚV Domašov nad Bystřicí - vybrané parametre surovej vody 2020 - 2021 [54]

názov	jednotka	priemer	minimum	maximum	limit
zákal	ZF	6,7	3,0	30,0	5,0
železo	mg/l	0,65	0,23	1,50	0,20
mangán	mg/l	0,075	0,025	0,203	0,050
hliník	mg/l	0,13	0,025	1,13	0,20
vápnik	mg/l	20,1	12,2	35,2	40 - 80
horčík	mg/l	3,8	2,2	6,5	20 - 30
CHSK _{Mn}	mg/l	7,5	2,4	25,0	3,0
farba	mg/l Pt	149	54	300	20

Pôvodná technológia úpravy

Základná technologická linka je tvorená dvomi separačnými stupňami. Najprv sa do vody nadávkuje niekoľko činidiel – vápenná voda, manganistan draselný a síran hlinitý, nasleduje flokulácia s rýchlym a pomalým miešaním pádlovými miešadlami. Prvým separačným stupňom je sedimentácia. Dochádza k nej v lamelovej usadzovacej nádrži veľkej 4,8 x 4,8 m, s hĺbkou 4,2 m. Potom je voda vedená na dvojicu otvorených pieskových filtrov s pôdorysnými rozmermi 3,0 x 2,7 m. K dezinfekcii vody sa používa plynný chlór. [54]

Takto zostavená linka nie je schopná zabezpečiť požadovanú kvalitu pre pitnú vodu počas celého roka, kvôli príliš veľkým kvalitatívnym výkyvom, čo je viditeľné aj v Tab. 4.2, kde sú uvedené niektoré hodnoty ukazovateľov vody, upravenej pôvodným dvojstupňovým procesom. [54]

Tab. 4.2 ÚV Domašov nad Bystřicí - Kvalita vody po dvojstupňovej úprave [54]

názov	jednotka	priemer	maximum	limit
zákal	ZF	3,4	10	5
železo	mg/l	0,39	0,84	0,2
mangán	mg/l	0,12	0,204	0,05
CHSK _{Mn}	mg/l	9,6	25	3
farba	mg/l Pt	129,5	430	20

Nanofiltrácia

Ako riešenie sezónnych výkyvov v kvalite upravenej vody bolo navrhnuté pridanie nanofiltrácie za pieskové filtre. V prvom kroku boli realizované laboratórne skúšky na dvoch typoch NF membrán HYDRACoRe 10 a HYDRACoRe 50. Pre poloprevádzkové testy bola zvolená membrána HYDRACoRe 50. Testy prebiehali v období 21.3. – 28.3. 2018. Následne bol testovaný typ membrány trvalo inštalovaný na úpravni. Ide o špirálovo vinutý modul s polymérnou membránou, konkrétne z polyétersulfónu s negatívnym nábojom. Plocha membrány je 7,4 m² a MWCO 1 000 Da. [54]

Nanofiltračná jednotka však na úpravni nie je prevádzkovaná kontinuálne. Za pieskovými filtrami je kontinuálne nepriamo spektrofotometricky meraná hodnota TOC. Pokiaľ je prekročená hodnota 3 mg/l, nanofiltračná jednotka je spustená. Pracovný tlak sa bežne pohybuje v rozmedzí 4 – 7 barov, podľa aktuálneho zanesenia membrány. Podľa pôvodného návrhu sa počítalo s prevádzkou nanofiltrácie len po dobu 10 – 20 dní za rok, počas dní so zhoršenou kvalitou vody. V roku 2020 však bolo nutné aby bola nanofiltrácia v prevádzke až 100 dní. Maximálna hodnota zákalu vody na vtok do membránového modulu je výrobcom stanovená na 5 NTU. Túto požiadavku nebolo možné vždy dodržať. Nemalo to negatívne následky na kvalitu výstupnej vody ale prejavilo sa to v častej potrebe chemického čistenia. Pri bežnej prevádzke membránových zariadení prebieha chemické čistenie rádovo po mesiacoch. Na úpravni vody Domašov nad Bystřicí bolo potrebné membránu čistiť až 3x týždenne. Konkrétne sa osvedčilo použitie kyslého činidla (Hydrex 4921) a následne zásaditého (Hydrex 4501). [54]

Nanofiltrácia na úpravni splnila svoj účel a nebolo potrebné zabezpečiť náhradné zásobovanie lokality pitnou vodou, ako tomu bývalo po minulé roky. Prevádzkové výsledky týkajúce sa kvality upravenej vody sú uvedené v Tab. 4.3. Nedostatkom, zisteným počas prevádzky je rýchle zanášanie membrány z dôvodu nedostatočnej kvality vody na vtok do zariadenia aj po

dvojstupňovej úprave a teda zvýšené náklady spojené s častým čistením zariadenia. Negatívnym javom je odstraňovanie vápnika a horčíka z upravovanej vody. Ich úbytok však nebol natoľko drastický aby bolo nutné zabezpečiť remineralizáciu upravenej vody. [54]

Tab. 4.3 ÚV Domašov nad Bystřicí - prevádzkové výsledky nanofiltrácie 2020 - 2021 [54]

parameter	jednotka	nátok	filtrát	limit	odstránenie
CHSK _{Mn}	mg/l	9,6	1,2	3,0	87,3 %
TOC	mg/l	6,8	0,7	5,0	88,5 %
farba	mg/l Pt	120	< 5	20	> 96,0 %
železo	mg/l	0,36	< 0,005	0,20	> 87,0 %
mangán	mg/l	0,11	0,05	0,05	54,6 %
vápnik	mg/l	20,5	16,4	40 - 80	19,8 %
horčík	mg/l	2,8	2,4	20 - 30	26,3 %
celková tvrdosť	mmol/l	0,63	0,51	2 - 3,5	19,0 %

4.3 ULTRAFILTRÁCIA NA ÚV JASENIE (SR)

Úpravňa vody Jasenie zásobuje pitnou vodou Skupinový vodovod Jasenie-Predajná-Nemecká. Ide o tri obce nachádzajúce sa na strednom Slovensku, s približne 4 300 obyvateľmi. Účelom úpravne je primárne zníženie obsahu arzenu (As) z miestneho podzemného zdroja Rástová. Koncentrácia arzenu sa v tomto zdroji trvale vyskytuje vo zvýšených hodnotách v rozsahu 40 až 90 µg/l. Limit daný vyhláškou pre pitnú vodu je pre arzén 10 µg/l. V ostatných ukazovateľoch voda vyhovuje legislatívnym požiadavkám pre pitnú vodu.

Pôvodná technológia

Úpravňa bola navrhnutá v roku 2002. Odstránenie arzenu bolo založené na oxidácii As³⁺ na As⁵⁺ a sorpcii hydratovanými oxidmi železa, s následnou filtráciou cez pieskový filter. Pôvodne malo k oxidácii dochádzať pomocou dávkovania roztoku KMnO₄, čo v priebehu realizácie bolo zmenené na ozonizáciu. Úprava vody pozostávala zo základných uzlov – oxidácia As³⁺ na As⁵⁺ ozónom, dávkovanie roztoku síranu železitého ako koagulantu, reaktor, vírový miešač, dávkovanie siričitanu sodného k likvidácii prebytočného ozónu, filtrácia na pieskovom filtri, úprava pH, hygienické zabezpečenie upravenej vody oxidom chloričitým. Súčasťou odpadového hospodárstva bola úprava vôd z prania filtra sedimentáciou v lamelovej usadzovacej nádrži a odvodnenie kalu na komorovom kalolise. [55]

S touto technológiou bola úpravňa uvedená do prevádzky v roku 2007 a obsah arzenu v pitnej vode sa pohyboval v rozmedzí 4,5 až 9,0 µg/l. Časom sa však začala prejavovať sekundárna kontaminácia z inkrustácií v potrubí. V koncových úsekoch siete dochádzalo k prekročeniu limitu a tento jav sa zhoršoval. V roku 2008 bolo uskutočnených 140 kontrolných meraní v koncových bodoch siete. Priemerná hodnota koncentrácie arzenu na základe týchto meraní bola 11,1 µg/l. Neuspokojivé výsledky viedli k návrhu aplikovania membránovej technológie k zabezpečeniu požadovanej kvality vody. [55]

Pilotné testy

Pilotné skúšky prebiehali v roku 2014 v období 31.1 – 11. 2. Použitie ultrafiltračné zariadenie od spoločnosti ProMinent Slovensko s. r. o. bolo plne automatizované s riadením dĺžky filtračného cyklu na základe tlakovej zmeny. Pri bežnej prevádzke jeden cyklus trval 60 – 120 minút a nasledoval spätný preplach po dobu 20 – 60 sekúnd. Skúšobná linka zložená z nádrže pre surovú vodu, automatickej chemickej predúpravy, pozostávajúcej z dávkovania koagulantu,

reakčnej nádrže a samotnej ultrafiltračnej jednotky. Filtrát získaný z tejto linky nebol zaústený do vodovodnej siete ale bol odvádzaný do kanalizácie. [55]

Použitým koagulantom bol síran železitý ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) a dávkoval sa v prepočte na Fe v množstve 1,5 mg/l. Doba zdržania upravovanej vody v reakčnej nádrži bola približne 5 minút. Cez skúšobnú linku bol vedený prietok 504 – 540 l/hod. Obsah arzénu v surovej vode sa v tomto období pohyboval v rozsahu 55 až 90 $\mu\text{g/l}$. Sledovanými hodnotami boli koncentrácia arzénu a železa v surovej a upravenej vode. Hodnoty boli určované pomocou terénnych zariadení a čiastočne aj v laboratóriu. Namerané hodnoty sú uvedené v Tab. 4.4. [55]

Tab. 4.4 ÚV Jasenie - hodnoty namerané počas pilotných testov [55]

Dátum	As surová [μg/l] terén	As surová [μg/l] lab.	As upravená [μg/l] terén	As upravená [μg/l] lab.	Fe surová [mg/l] terén	Fe surová [mg/l] lab.	Fe upravená [mg/l] terén	Fe upravená [mg/l] lab.
31.01.2014	75	-	0,00	-	1,20	-	0,01	-
03.02.2014	75	-	0,00	-	1,20	-	0,03	-
04.02.2014	60	-	0,00	-	1,61	-	0,01	-
05.02.2014	50	-	0,00	-	1,52	-	0,04	-
06.02.2014	90	64	0,00	0,5	1,76	1,5	0,02	< 0,05
07.02.2014	75	69	0,00	0,62	1,64	1,6	0,06	< 0,05
10.02.2014	55	-	0,00	-	1,31	-	0,03	-
11.02.2014	65	48	0,00	2,1	1,47	1,3	0,07	< 0,05

Na základe uspokojivých výsledkov pilotných testov, počas ktorých bola účinnosť odstránenia arzénu z vody pomocou ultrafiltrácie vždy vyššia ako 95 %, bolo v roku 2016 pristúpené k vypracovaniu projektu a v roku 2018 bola zahájená inštalácia ultrafiltračných modulov na úpravni vody. Začiatkom roka 2020 boli spustené do skúšobnej prevádzky. [55]

Skúšobná prevádzka

Dňa 19.2.2020 bola zahájená skúšobná prevádzka ultrafiltračných modulov na úpravni vody Jasenie. Pre dávkovanie koagulantu (síran hlinitý) bol využitý pôvodný systém dávkovania s čerpadlami ProMinent Gamma L. Voda s nadávkovaným koagulantom prechádza mechanickým filtrom, ktorého funkcia je preventívna, a to zachytenie prípadných hrubých nečistôt. Za mechanickým filtrom sú radené dve ultrafiltračné línie, každá z nich sa skladá zo šiestich ultrafiltračných modulov UF12.60. Ide o zariadenia s rovnakou membránou aká bola použitá počas pilotných testov. Moduly s dutými vláknami sú prevádzkované v režime inside-out. Plocha membrány jedného modulu je 60 m². Celkovo sú schopné vyprodukovať 18 l/s filtrátu, čo odpovedá fluxu 90 l/h/m². [55]

Počas skúšobnej prevádzky boli kontinuálne sledované prietokové a tlakové parametre, na základe ktorých bola optimalizovaná dĺžka filtračného cyklu a režim údržby. Taktiež bola naďalej sledovaná koncentrácia arzénu (As) a železa (Fe) v surovej a upravenej vode, zároveň aj v niekoľkých koncových úsekoch siete. Sledované hodnoty sú uvedené v Tab. 4.5. Požiadavkou prevádzkovateľa (Stredoslovenská vodárenská prevádzková spoločnosť, a. s.) bolo dosiahnutie koncentrácie arzénu vo vode na výstupe z úpravne pod hodnotou 1 $\mu\text{g/l}$, čo bolo dodržané takmer po celú dobu skúšobnej prevádzky. Priemerná hodnota účinnosti odstránenia arzénu z vody na základe nameraných hodnôt prekračuje 97,5 %. Keďže sa počas skúšobnej prevádzky ultrafiltrácia preukázala ako vhodný spôsob úpravy vody na ÚV Jasenie, prevádzka ultrafiltračných modulov bola zachovaná aj naďalej. [55]

Tab. 4.5 ÚV Jasenie - hodnoty namerané počas skúšobnej prevádzky [55]

Dátum	ÚV Jasenie						Spotrebiská		
	Surová voda		Nátok na UF		Výstup z ÚV		Jasenie	Predajná	Nemecká
	Fe [mg/l]	As [µg/l]	Fe [mg/l]	As [µg/l]	Fe [mg/l]	As [µg/l]	As [µg/l]	As [µg/l]	As [µg/l]
25.02.2020	< 0,05	50,3	1,00	48,9	< 0,05	1,8	5,7	6,3	5,6
17.03.2020	< 0,05	42,0	0,96	43,5	< 0,05	2,7	-	-	-
22.04.2020	< 0,05	44,6	2,20	44,3	< 0,05	< 1,0	5,1	1,6	1,8
12.05.2020	0,06	46,3	2,00	47,7	< 0,05	< 1,0	4,7	1,9	1,9
03.06.2020	< 0,05	57,2	1,90	59,6	0,08	< 1,0	5,8	4,4	9,5
01.07.2020	0,10	50,7	2,20	49,8	< 0,05	< 1,0	5,7	1,6	2,3
04.08.2020	< 0,05	50,5	1,90	53,2	< 0,05	< 1,0	3,6	2,0	1,6
09.09.2020	< 0,05	64,0	2,20	64,2	< 0,05	< 1,0	5,7	1,7	2,4
13.10.2020	< 0,05	48,1	2,00	53,2	< 0,05	< 1,0	1,3	3,0	1,6
23.11.2020	< 0,05	46,5	1,80	46,1	< 0,05	< 1,0	2,3	< 1,0	< 1,0
08.12.2020	< 0,05	55,0	1,80	55	< 0,05	< 1,0	< 1,0	1,2	< 1,0
13.01.2021	< 0,05	39,0	1,60	39,4	< 0,05	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

4.4 REVERZNÁ OSMÓZA NA VZ PODBRANČ (SR)

Podzemný vodný zdroj (VZ) Podbranč sa nachádza na západnom Slovensku, v Trnavskom kraji, v okrese Senica. Tento región patrí medzi niekoľko oblastí na území Slovenska, ktoré sa vyznačujú zvýšenou koncentráciou síranov v podzemnej vode.

Sírany v podzemnej vode

Sírany (SO_4^{2-}) sa prirodzene vyskytujú takmer vo všetkých typoch vôd. Patria medzi hlavné anióny prírodných vôd. Ich koncentrácia môže dosahovať veľmi široké spektrum hodnôt od jednotiek mg/l v zrážkových vodách až po jednotky g/l v podzemných vodách nasýtených sadrovcom ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Bežne sa sírany v podzemnej vode vyskytujú v rozmedzí desiatok až stoviek mg/l. Na území Slovenskej republiky je hodnota mediánu pre obsah síranov v podzemných vodách 42,75 mg/l. Koncentrácia vyššia ako 50 mg/l je typická pre oblasti ako Bratislava, Záhorská nížina, Podunajská nížina, stredné a dolné Ponitrie a Považie, dolný Hron, Juhoslovenská, Liptovská, Popradská a Košická kotlina a Východoslovenská nížina. [56]

Sírany nie sú považované za toxické. Ich zvýšené hodnoty ovplyvňujú najmä organoleptické vlastnosti ako chuť a zápach. Pri požití vody s veľmi vysokým obsahom síranov nad 1 000 mg/l sa môžu prejaviť laxatívne účinky a dehydratácia. Vyhláška Ministerstva zdravotníctva č. 247/2017 Z. z., stanovujúca hygienické požiadavky pre pitnú vodu, uvádza ako horný limit koncentrácie síranov hodnotu 250 mg/l. [56]

Vodný zdroj Podbranč, ktorý prevádzkuje Bratislavská vodárenská spoločnosť, a. s., zásobujúci miestny vodovod neprechádzal žiadnou úpravou, len hygienickým zabezpečením. Od roku 2015 však boli evidované výkyvy v kvalite dodávanej vody, konkrétne zvýšené hodnoty obsahu síranov v zimných a prechodných mesiacoch. Ďalším ukazovateľom zhoršujúcim kvalitu podzemnej vody bola celková tvrdosť, ktorá prekračovala doporučené hodnoty. Kombináciou týchto javov došlo k prekročeniu aj v ukazovateli vodivosti. Tieto problémy sa prevádzkovateľ rozhodol riešiť inštaláciou reverznej osmózy priamo na čerpacej stanici pri zdroji. Vybrané ukazovatele stanovené pred realizáciou poloprevádzkových testov sú uvedené v Tab. 4.6. [56]

Tab. 4.6 VZ Podbranč - vybrané ukazovatele surovej vody [56]

Ukazovateľ	Symbol	Stanovená hodnota	Limit
Reakcia vody [-]	pH	7,15	6,5 - 9,5
Vodivosť [mS/m]	EK	131	125
Vápnik [mg/l]	Ca	212	> 30
Horčík [mg/l]	Mg	47,4	> 10 - 30
Tvrdosť [mmol/l]	Ca + Mg	7,28	1,1 - 5
Sírany [mg/l]	SO ₄ ²⁻	435	250

Poloprevádzkové testy

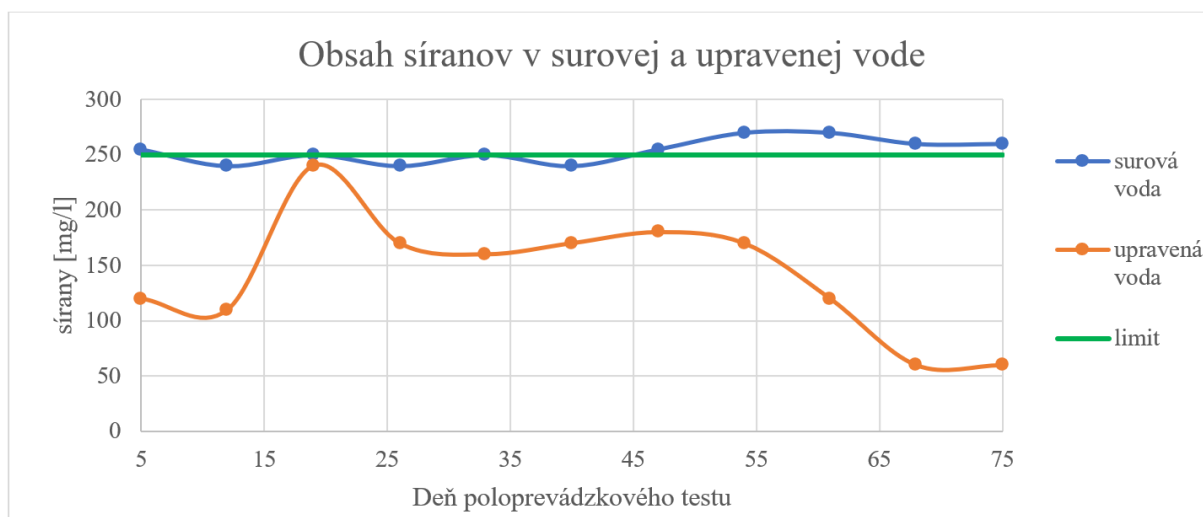
Na zníženie nadlimitných koncentrácií síranov z podzemnej vody bolo použité testovacie zariadenie reverzná osmóza RO B1-1 s membránovým modulom EW4 LOW4 (EUROWATER s. r. o., Bratislava). Ide o špirálovo vinutý modul s membránou z polyamidu a polypropylénu. Plocha membrány v membráne je 7,9 m² a maximálny prevádzkový tlak je 20,7 barov. Celá testovaná linka pozostávala z [56] :

- **Rozdelenie prúdu** – prítok surovej vody bol rozdelený do dvoch vetví. Jedna vetva prechádzala membránovou jednotkou a druhá bola vedená obtokom bez úpravy. [56]
- **Dávkovanie antiscalantu** – dávkovacím čerpadlom SmartDigital DDA (Grundfos, Dánsko) bol dávkovaný antiscalant VITECTM 3000 (Avista, USA), ktorého úlohou je zabrániť nárastu inkrustov vápnika a síry vo vnútri modulu. Antiscalant bol dávkovaný ako 25 % roztok v množstve 8 ml na 1 m³ surovej vody. [56]
- **Mechanický filter** – jemný filter z polypropylénu, s otvormi 1 μm plnil ochrannú funkciu pred hrubými nečistotami [56]
- **Samotná RO jednotka s vlastným čerpadlom** – jednotka bola prevádzkovaná v režime cross-flow s produkciou filtrátu 300 l/h, prietok koncentráту bol 140 l/h, čo predstavovalo celkový výkon systému pri spustení testov na úrovni 68 %, táto hodnota v priebehu testovania klesla na 56 %. [56]
- **Zmiešavacia armatúra** – Dochádzalo k miešaniu upravenej vody so surovou v pomere približne 1:1 (300:300 l/h). [56]

Výsledky

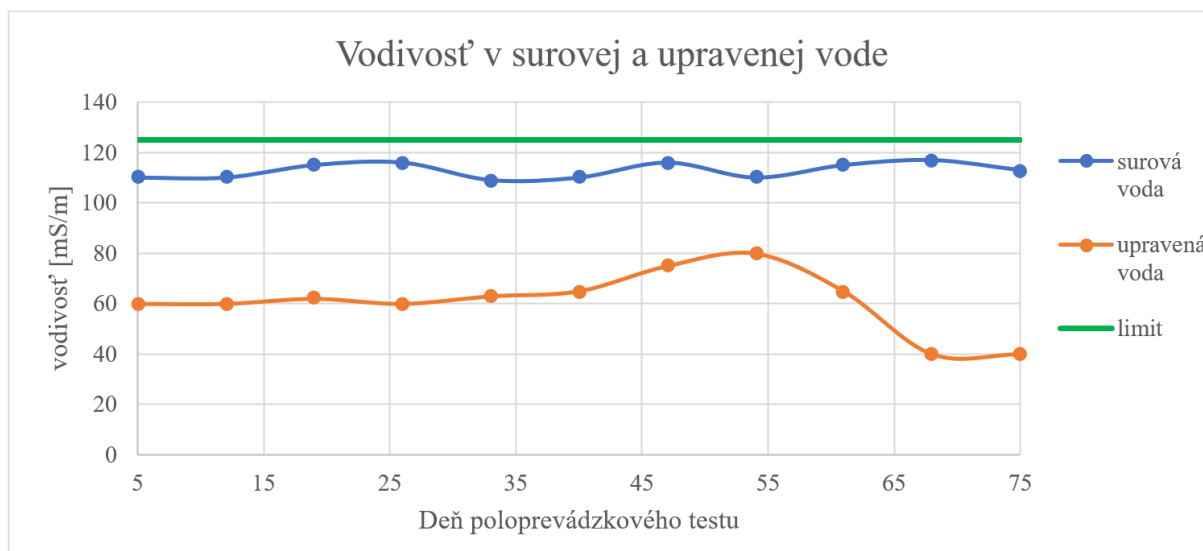
Vyššie popísaným spôsobom bola sledovaná prevádzka zariadenia reverznej osmózy po dobu 75 dní. Medzi monitorované veličiny patrí aj tlak na vstupe do mechanického filtra 1 μm. Pri tlakovej strate 1 bar sa odporúča vymeniť vložku filtra, to bolo počas testov potrebné 5-krát, čo odpovedá výmene približne raz za 15 dní. Čo sa týka transmembránového tlaku v membránovej jednotke, tak podľa očakávaní dochádzalo k jeho nárastu. Tento jav pravdepodobne súvisel so zanášaním membrány a tvorbou zrazenín na jej povrchu, najmä síranu vápenatého, čo nebolo možné úplne eliminovať aj napriek dávkovaniu antiscalantu. [56]

Hlavným dôvodom vykonania poloprevádzkového testu boli zvýšené koncentrácie síranov v surovej vode. Počas celej doby trvania testu bola účinnosť odstraňovania nadlimitných koncentrácií síranov dostačujúca, o čom svedčia hodnoty ich koncentrácií vo výstupnej upravenej vode (Obr. 4.4). Priemerná koncentrácia síranov v surovej vode bola 248,43 mg/l a v upravenej vode 144,60 mg/l, po zmiešaní s vodou surovou. [56]



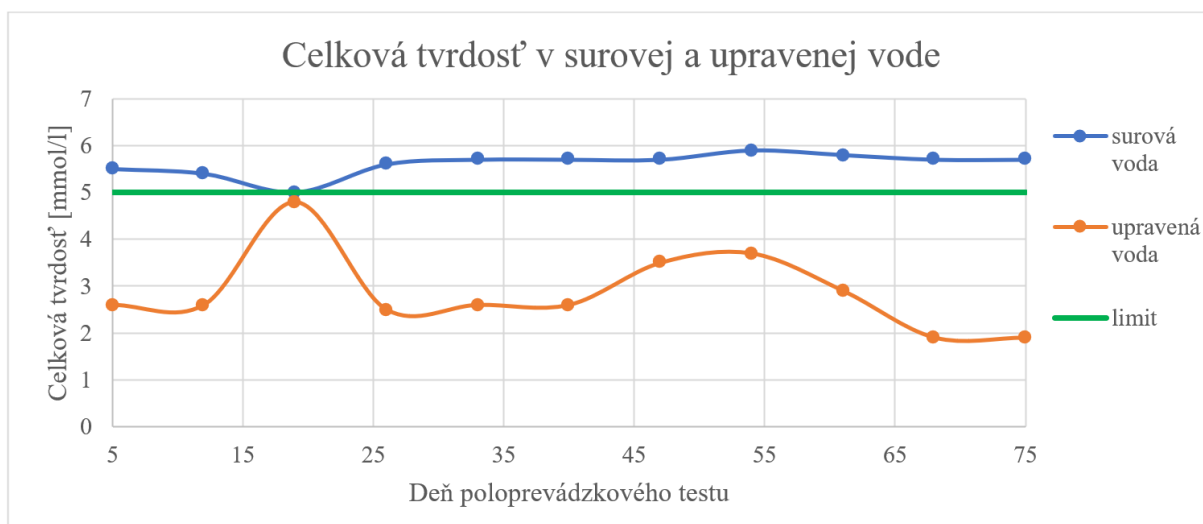
Obr. 4.4 VZ Podbranč - obsah síranov v surovej a upravenej vode [56]

Ďalším nevyhovujúcim parametrom surovej vody bola vodivosť. Potreba zníženia vodivosti súvisí s predpokladom, že voda, ktorá má vyššiu vodivosť ako je stanovená medzná hodnota sa považuje za minerálnu a nie je vhodná na každodennú konzumáciu. Vodivosť bola v čase poloprevádzkových testov sledovaná v surovej a upravenej vode po zmiešaní (Obr. 4.5). Priemerná hodnota vodivosti bola v surovej vode na úrovni 112,00 mS/m a v upravenej vode 64,26 mS/m. [56]



Obr. 4.5 VZ Podbranč - vodivosť v surovej a upravenej vode [56]

Rozbor kvality podzemnej vody preukázal aj nadlimitné koncentrácie celkovej tvrdosti vody. Nejedná sa o problém pre ľudské zdravie, práve naopak, ale vysoká tvrdosť spôsobuje technologické problémy pre distribučnú sieť a domáce spotrebiče. Celková tvrdosť vody upravenej reverznou osmózou po zmiešaní s vodou surovou spĺňala odporúčané hodnoty (Obr. 4.6). Priemerná koncentrácia celkovej tvrdosti v surovej vode dosahovala 5,61 mmol/l a v upravenej vode 2,94 mmol/l. [56]



Obr. 4.6 VZ Podbranč - celková tvrdosť v surovej a upravenej vode [56]

Na základe dosiahnutých výsledkov poloprevádzkového testu bolo možné konštatovať, že reverzná osmóza splnila požiadavky a javí sa ako vyhovujúca technológia pri znižovaní nadlimitných koncentrácií síranov prítomných v podzemnej vode VZ Podbranč. [56]

5 TESTOVANIE ULTRAFILTRAČNEJ JEDNOTKY

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je otestovanie konkrétnej ultrafiltračnej membránovej jednotky, ktorú pre výskumné účely zaobstaral Ústav vodného hospodárství obcí, Fakulty stavebnej, na univerzite Vysoké učení technické v Brne. Túto membránovú jednotku dodala firma ASIO TECH spol. s r. o. Doposiaľ neboli na tomto zariadení v rámci univerzity realizované žiadne testy, ide o pilotné otestovanie. Zámerom je teda celkové všeobecné zhodnotenie fungovania zaobstaraného modulu a prípadná optimalizácia ultrafiltračného procesu pre ďalšie možnosti využitia pri nadväzujúcich výskumoch.

V nasledujúcich podkapitolách bude popísané samotné zariadenie a úpravy, ktoré na ňom boli realizované pre efektívnejšiu prevádzku, tak ako aj priebeh samotných testov.

5.1 POPIS TESTOVANÉHO ZARIADENIA

Tak ako už bolo vyššie uvedené, ultrafiltračný modul dodala firma ASIO TECH spol. s r. o. Súčasťou zariadenia je samotný membránový modul, čerpadlo, riadiaca jednotka a potrubné vedenie. V prípade potreby je možné jednotlivé membránové moduly v zariadení zamieňať podľa potreby. Výhodné by bolo mať k dispozícii sadu modulov pre jednotlivé tlakové membránové procesy – mikrofiltráciu, ultrafiltráciu, nanofiltráciu a reverznú osmózu, čím by vznikla možnosť tieto procesy vzájomne porovnávať. V súčasnosti je na fakulte k dispozícii len ultrafiltračný modul, popísaný nižšie.

5.1.1 Membránový modul

Testovaným membránovým modulom je typ UFXS50 (Obr. 5.1). Ide o ultrafiltračnú membránu, z hydrofilného PVC. Modul je v prevedení s dutými vláknami. Veľkosť pórov nie je udávaná v rozmerových jednotkách ale je uvedená ako MWCO, konkrétne 5 000 Da, čo po prevedení približne odpovedá veľkosti pórov 1,5 nm. Modul pracuje v režime inside-out, čiže surová voda je privádzaná vnútom dutých vlákien, prechádza stenou membrány a filtrát je odvádzaný priestorom medzi vláknami. Plocha membrány v module je 0,4 m². Modul je dlhý 280 mm a jeho priemer je 75 mm. Ďalšie špecifikácie sú uvedené v Tab. 5.1. [31]

Ide o modul malých rozmerov, ktorý nie je vhodný pre aplikáciu na výkonných úpravniach vody. Je však ideálny práve pre testy v laboratórnych podmienkach, pri nižších prietokoch a tlakoch.



Obr. 5.1 Ultrafiltračný modul UFXS50 [31]

Tab. 5.1 Špecifikácie ultrafiltračného modulu UFXS50 [31]

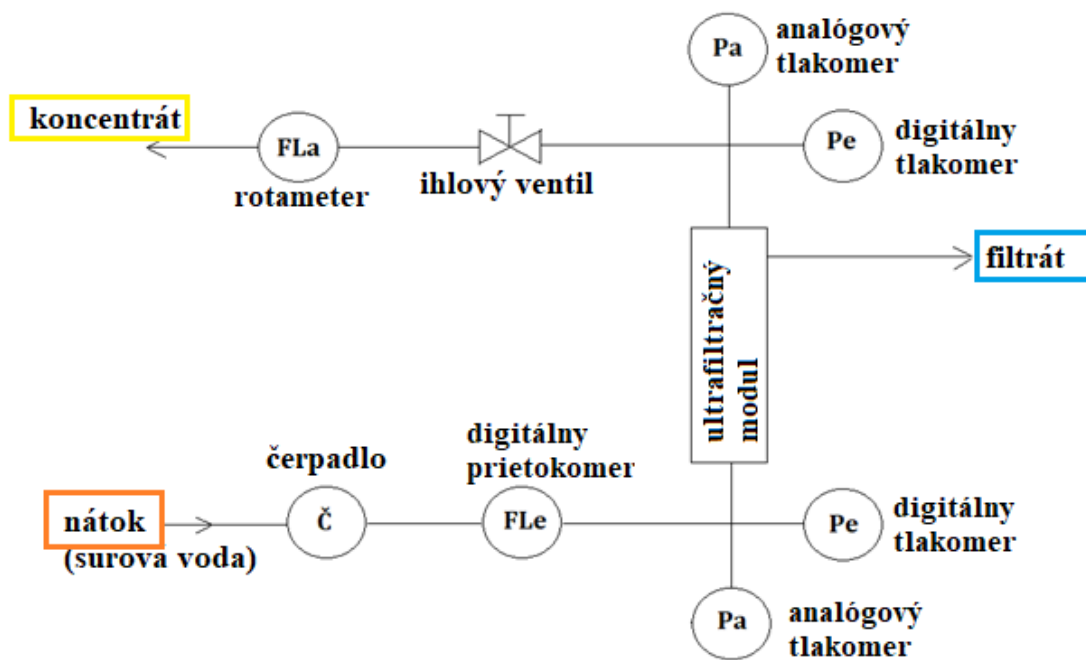
Špecifikácie	Rozmery výška/priemer	280/Ø75 mm
	Priemer vlákien vonkajší/vnútorý	1,7/0,9 mm
	Materiál membrány	PVC
	Veľkosť pórov/MWCO	5 000 Da
	Efektívna plocha membrány	0,4 m ²
Aplikácia	Prevádzkový režim	Inside-out
	pH	2-12
	Teplota	5-45°C
	Zákal na vstupe	<15 NTU
Chemické čistenie	Kyslé činidlo	kyselina citrónová, kyselina chlorovodíková (pH=2)
	Zásadité činidlo	0,5% hydroxid sodný + 0,1% chlorid sodný (pH=12)

5.1.2 Laboratórna jednotka

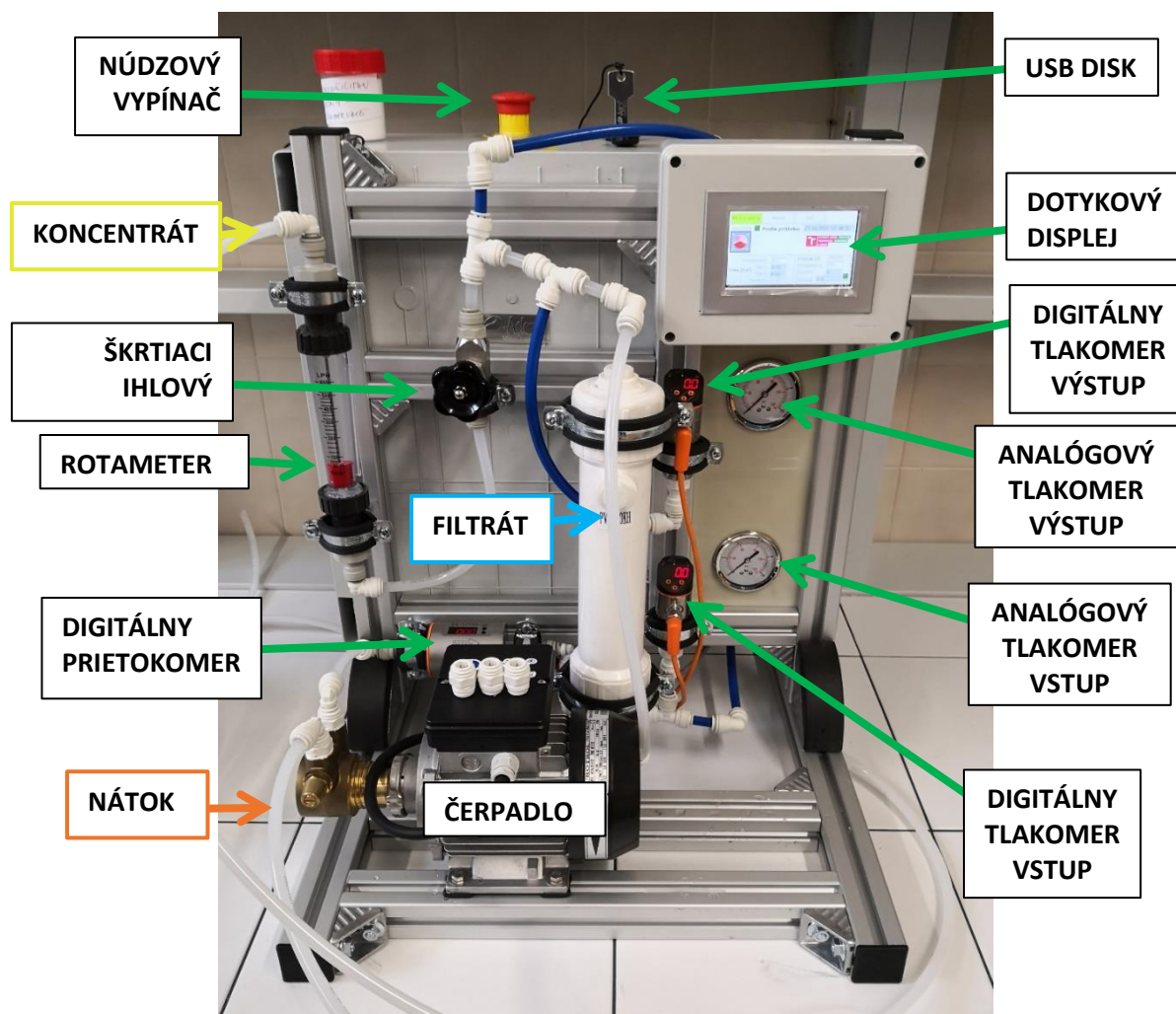
Dodaný membránový modul je inštalovaný v komplexnej laboratórnej jednotke, napájanej zo zdroja s napätím 230V. Celý proces je ovládaný riadiacou jednotkou, ktorá je vybavená dotykovým displejom. Súčasťou zariadenia je zubové čerpadlo, zabezpečujúce dostatočný tlak na vstupe do membrány. Čerpadlo je vybavené frekvenčným meničom, riadiacim otáčky čerpadla, vďaka čomu je možné sa pohybovať v hodnotách prietoku na vstupe do membrány v rozsahu 20-250 l/h. [32]

Čerpadlo dopravuje vodu do spodnej časti modulu, výstupy z membrány sú umiestnené v hornej časti. Konkrétne ide o dva výstupy – pre filtrát a koncentrát. Na výstupnej hadičke pre koncentrát je inštalovaný ihlový ventil, ktorý slúži pre reguláciu odtoku koncentráta. Pri jeho otvorení dochádza teda k filtrácii v režime cross-flow a pri jeho úplnom uzavretí je možná filtrácia v režime dead-end. Ku kontrole miery otvorenia tohto ventilu je za ním inštalovaný plavákový prietokomer (rotameter). Okrem toho je na zariadení niekoľko bodov, v ktorých dochádza k meraniu sledovaných veličín. Digitálny prietokomer je umiestnený za čerpadlom, pomocou neho je možné sledovať prietok surovej vody na vstupnej strane membrány. Zároveň je pre vstupom do membrány meraný tlak a to digitálnym aj analógovým tlakomerom. Ďalej je tlak meraný na výstupe na strane koncentráta, a to znovu digitálnym aj analógovým tlakomerom. Schéma celého laboratórneho zariadenia je na Obr. 5.2. [32]

Hodnoty veličín nameraných digitálnymi prístrojmi sú automaticky ukladané na USB disk, vložený do riadiacej jednotky. Dôležité je po ukončení merania najprv vypnúť zariadenie a až následne odstrániť USB disk, údaje sa uložia až po vypnutí jednotky. Po ukončení meraní je takto možné hodnoty stiahnuť do počítača. Každé meranie vytvorí nový súbor v programe Excel, kde je zaznamenaný dátum a čas s odpovedajúcimi hodnotami aktuálneho prietoku na vstupe do membrány, celkového pretečeného množstva (možno ľubovoľne vyresetovať) a hodnotami tlaku na vstupe do membrány a jej výstupe v baroch. Interval, v ktorom sú dané veličiny sledované je možné v riadiacom paneli zmeniť, neodporúča sa však voliť intenzívnejšie sledovanie ako v intervale 10 sekúnd, aby nedochádzalo k zbytočnému zaťažovaniu riadiacej jednotky a rýchlemu naplneniu pamäte USB disku. [32]



Obr. 5.2 Schéma membránovej jednotky [32]

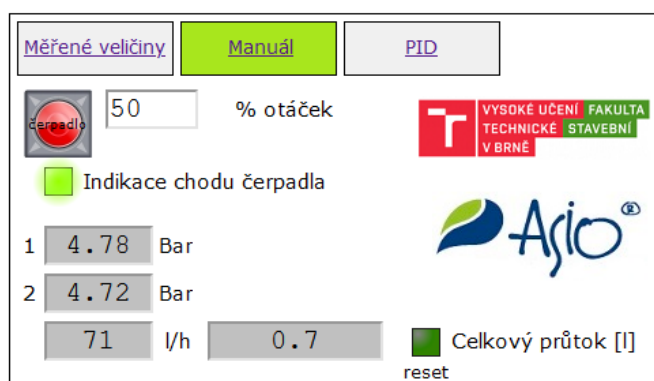


Obr. 5.3 Fotografia membránovej jednotky [32]

K ovládnutiu riadiacej jednotky slúži dotykový displej, ktorý je rozdelený na tri základné obrazovky – Měřené veličiny, Manuál a PID, volia sa dotykým v hornej časti displeja. Tieto jednotlivé obrazovky slúžia k ovládnutiu režimov, v ktorých je zariadenie schopné fungovať. Je to režim manuálny a poloautomatický.

Manuálny režim

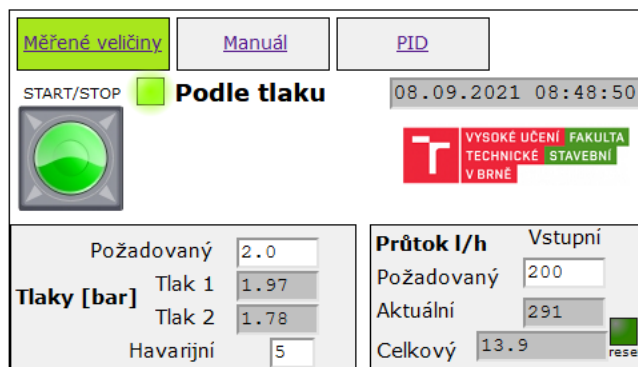
Manuálny režim sa volí stlačením možnosti „Manuál“ v hornej časti displeja. Je založený na tom, že sa nastaví výkon čerpadla v %. Na obrazovke je zároveň zobrazený tlak na vstupe do membrány a na výstupe. Zároveň je zobrazený aktuálny prietok čerpadlom a celkové množstvo prečerpanej vody. Pre ochranu membrány je potrebné zadať na obrazovke „Měřené veličiny“ limitný tlak, pri ktorom sa vypne čerpadlo. Táto hodnota sa líši pre každý typ membrány. Rozhranie obrazovky „Manuál“ je zobrazené na Obr. 5.4. [32]



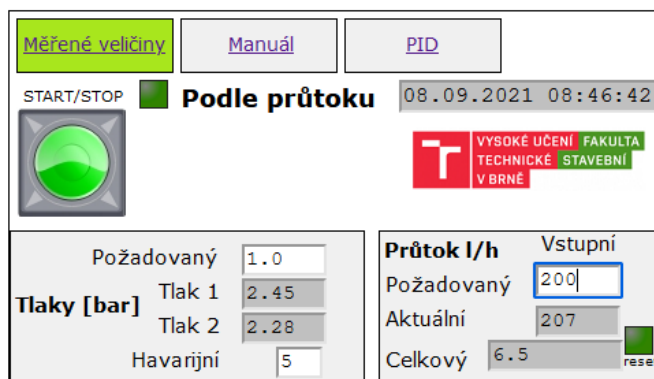
Obr. 5.4 Rozhranie obrazovky pre manuálny režim [32]

Poloautomatický režim

Poloautomatický režim umožňuje riadiť filtráciu na základe požadovaného konštantného prietoku alebo tlaku. Zvolí sa prepnutím na obrazovku „Měřené veličiny“. Zelený štvorec slúži ako tlačidlo, ktorým sa prepína konštantná veličina – tlak (Obr. 5.5) alebo prietok (Obr. 5.6). Následne je možné zadať požadovanú hodnotu. Pred spustením filtrácie je potrebné v rozhraní obrazovky „PID“ nastaviť konštantu pod názvom „Gain“, ktorá zabezpečuje správne riadenie otáčok čerpadla. Pri režime filtrácie s konštantným tlakom je odporúčaná hodnota 0,2 a pri konštantnom prietoku 0,005. Na základe prevádzkových skúseností je však žiadúce túto hodnotu prispôbiť aj s ohľadom na veľkosť prietoku. Pri menších prietokoch (do 100 l/h) je hodnota 0,005 adekvátna, no pri vyšších hodnotách (150-250 l/h) je vhodné tento parameter zvýšiť na 0,03. Zároveň je potrebné nastaviť hodnotu havarijného tlaku, aby nedošlo k poškodeniu membrány. [32]



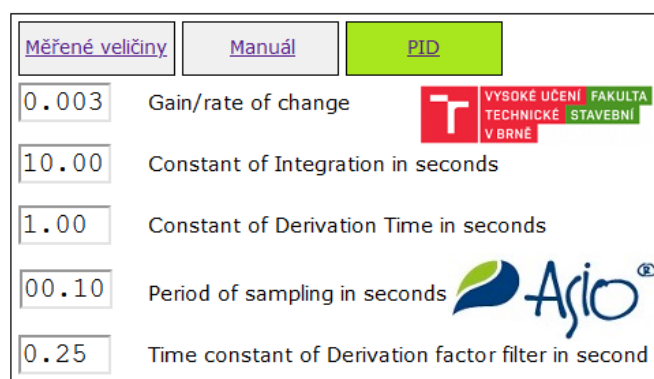
Obr. 5.5 Rozhranie obrazovky pri riadení na základe tlaku [32]



Obr. 5.6 Rozhranie obrazovky v poloautomatickom režime - na základe prietoku [32]

Rozhranie obrazovky PID

PID je skratka pre proporcionálne integračne derivačnú reguláciu. Služi k nastaveniu chodu čerpadla. Princípom je kontinuálne porovnávanie aktuálnej hodnoty prietoku s požadovanou hodnotou a následná regulácia k daným podmienkam. Základným parametrom tejto regulácie je hodnota „Gain/rate of change“. Tú je potrebné nastaviť podľa konkrétnej situácie. Určité doporučené hodnoty sú uvedené vyššie, je vhodné však sluchom kontrolovať optimálnu hodnotu - pri nesprávnom nastavení sa otáčky čerpadla výrazne rýchlo menia z minima na maximum, pri správnom nastavení je chod čerpadla plynulý. [32]



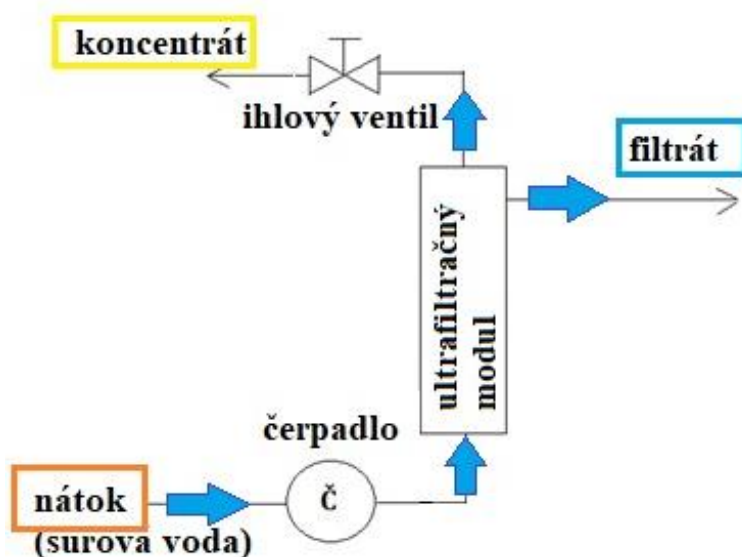
Obr. 5.7 Rozhranie obrazovky PID [32]

5.2 NÁVRH A ÚPRAVA MEMBRÁNOVEJ JEDNOTKY

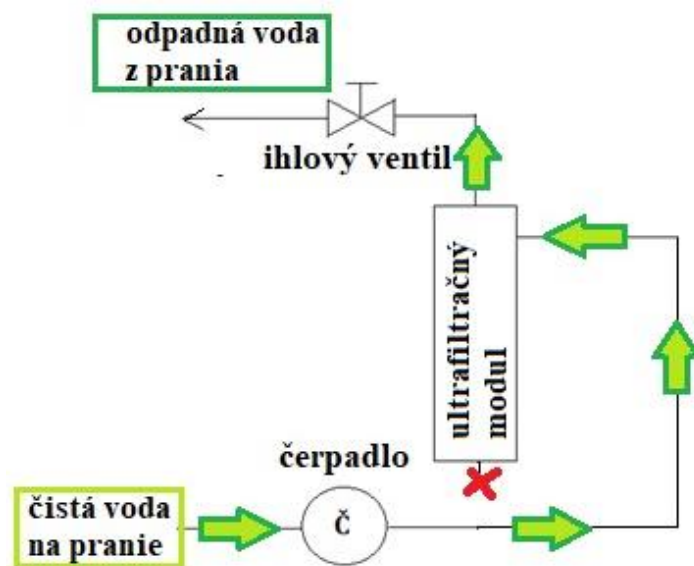
Membránová jednotka v stave, v akom je popísaná v predchádzajúcej kapitole umožňuje laboratórne testy v malom rozsahu, nie je vhodná pre kontinuálnu prevádzku. Hlavným nedostatkom je chýbajúca možnosť prania, či už mechanického alebo chemického. Jednotky, využívané v praxi sú schopné samé riadiť filtračný cyklus a čistenie membrány. Je niekoľko spôsobov, ktoré sa využívajú. Jedným z nich je možnosť napevno zadať dobu filtračného cyklu a dobu mechanického prania. Riadiaca jednotka potom automaticky po danom čase prepína smer prúdenia v module. Ďalším spôsobom je riadenie na základe nárastu transmembránového tlaku. Zadá sa hodnota TMP, po ktorej prekročení sa spustí režim prania.

Tieto možnosti v posudzovanej jednotke nie sú integrované. Riadiaca jednotka neumožňuje nastavenie doby cyklu a vôbec neuvažuje s možnosťou prania. Taktiež zapojenie je značne jednoduché a prispôbené len na režim filtrácie. Súčasťou je len jedno čerpadlo, zapojené tak, že umožňuje čerpanie do modulu len jednosmerne. Ďalším faktorom, ktorý komplikuje pranie

membrány je nedostatok potrubných vedení. Pri potrebe mechanického prania spätným výplachom je nutné rozpojiť existujúce zapojenie a ručne prepojiť hadičky, tak aby čerpadlo vháňalo čistú vodu do membrány v opačnom smere. Na Obr. 5.8 je ilustrované pôvodné jednoduché zapojenie membránového modulu a na Obr. 5.9 jeho potrebná úprava pre režim prania. Pre prehľadnosť nie je na schéme zaznačená meracia technika (prietokomery, tlakomery).



Obr. 5.8 Pôvodné jednoduché zapojenie jednotky v režime filtrácie



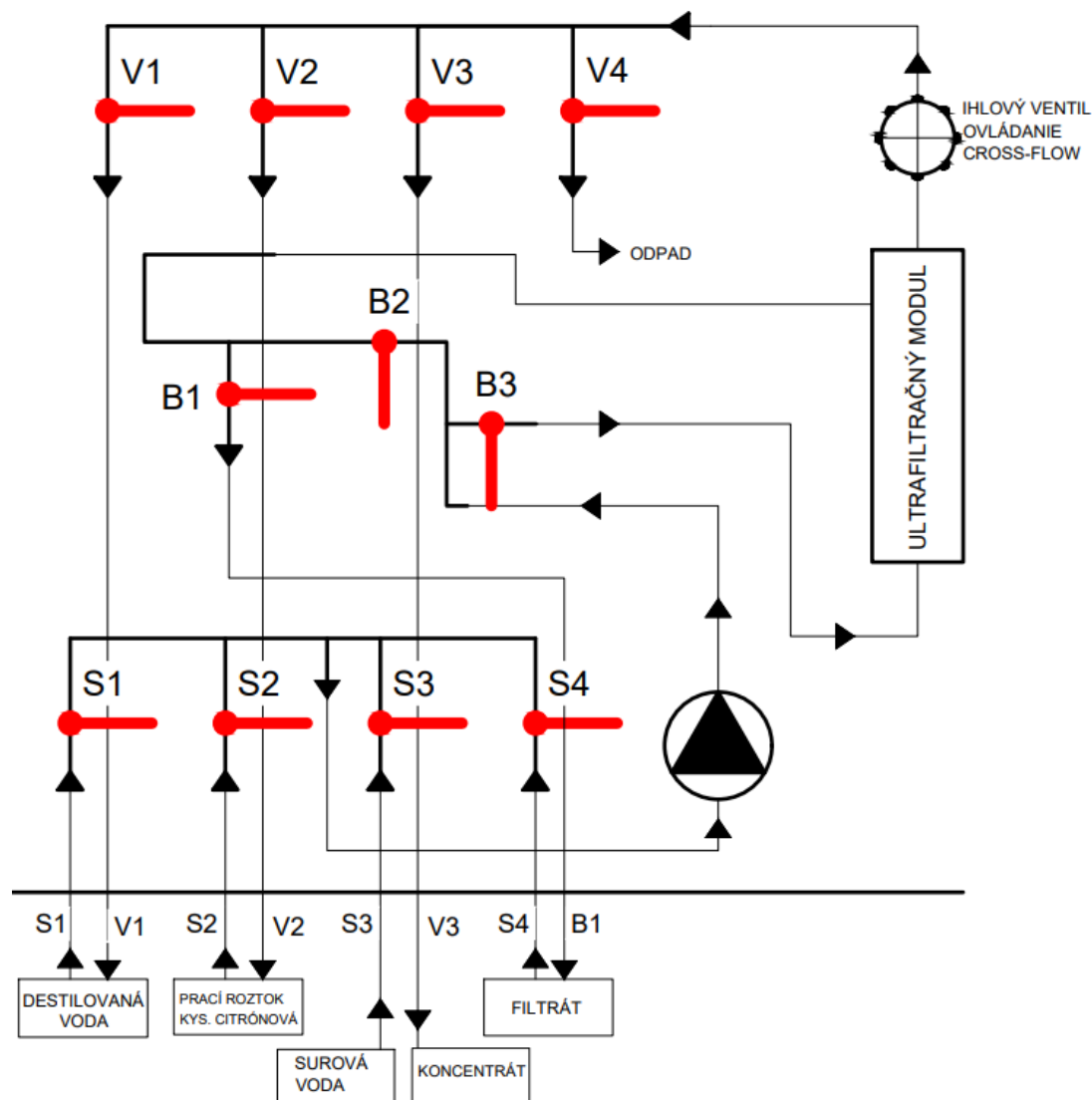
Obr. 5.9 Zapojenie membrány v režime prania

Táto potreba ručného zapájania potrubí je značne nepraktická a komplikuje sa potrebou chemického prania a oplachu po chemickom praní. Tieto problémy viedli k návrhu sofistikovanejšieho zapojenia, ktoré by čiastočne kompenzovalo nedostatočnú automatizáciu membránovej jednotky. Návrh je založený na pridaní niekoľkých potrubí, ktoré je možné kombinovať otváraním a zatváraním uzáverov na nich inštalovaných.

Požiadavkou je aby po úpravách bolo možné bez potreby ručného zapájania potrubí prevádzkovať membránovú jednotku v niekoľkých režimoch:

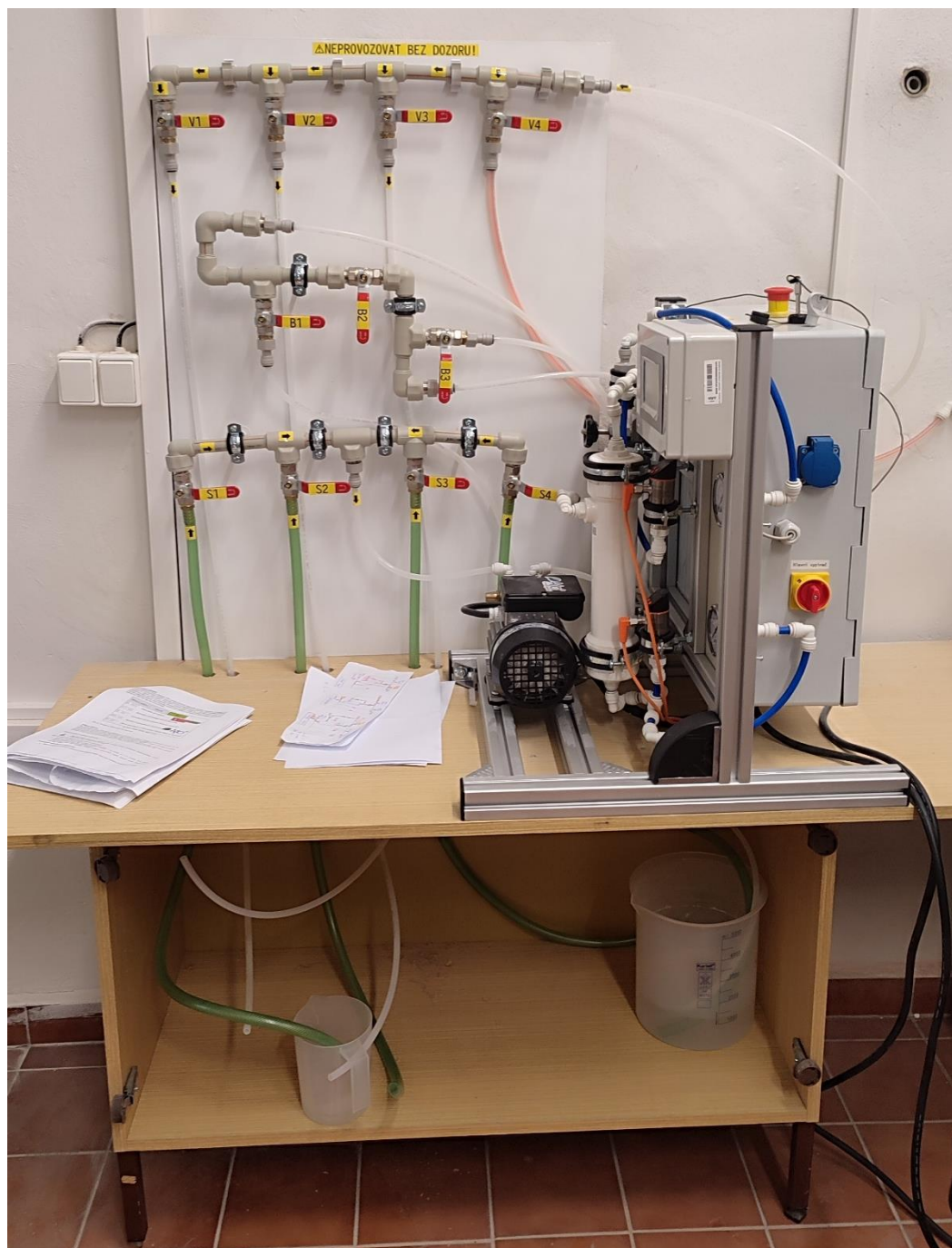
- Filtrácia
 - Cross-flow
 - Dead-end
- Mechanické spätné pranie
- Chemické pranie čistiacim roztokom
- Oplach po chemickom praní

Na sacej strane čerpadla boli navrhnuté 4 potrubia pre rôzne kvapaliny, ktoré je možné do modulu čerpať – surovú vodu, filtrát, prací roztok a destilovanú vodu. V schéme sú značené písmenom S (satie). Na výstupe z membrány v smere koncentrátu boli tiež navrhnuté 4 potrubia – pre koncentrát, odpadnú praciú vodu, prací roztok a destilovanú vodu. Značené písmenom V (výtlak). Ďalej bola potrebná inštalácia obtoku, ktorý výtlačné potrubie čerpadla napojí na vstupnú stranu membrány a zároveň v prípade potreby umožní čerpať vodu do membrány v opačnom smere. Toto potrubie je v schéme zaznačené písmenom B (bypass). Schéma navrhnutého zapojenia sa nachádza na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Schéma návrhu zapojenia membránovej jednotky

K realizácii bola využitá kombinácia niekoľkých materiálov. Na pôvodnej jednotke boli ako potrubie inštalované potravinárske hadice, tento materiál bol naďalej zachovaný na väčšine vedenia. Z dôvodu lepšej dostupnosti a inštalácie boli T-kusy realizované na polypropylénovej (PP) časti potrubia, ktorá bola zváraná. Guľové uzávery sa umiestnili v mieste prechodu medzi potrubím PP a potravinárskymi hadicami. Na časť sacích potrubí sa využili záhradné hadice. Táto konštrukcia sa umiestnila na nosnú dosku pre prehľadnosť a uzávery boli označené podľa schémy na Obr. 5.10. Realizácia navrhnutého zapojenia je viditeľná na Obr. 5.11.



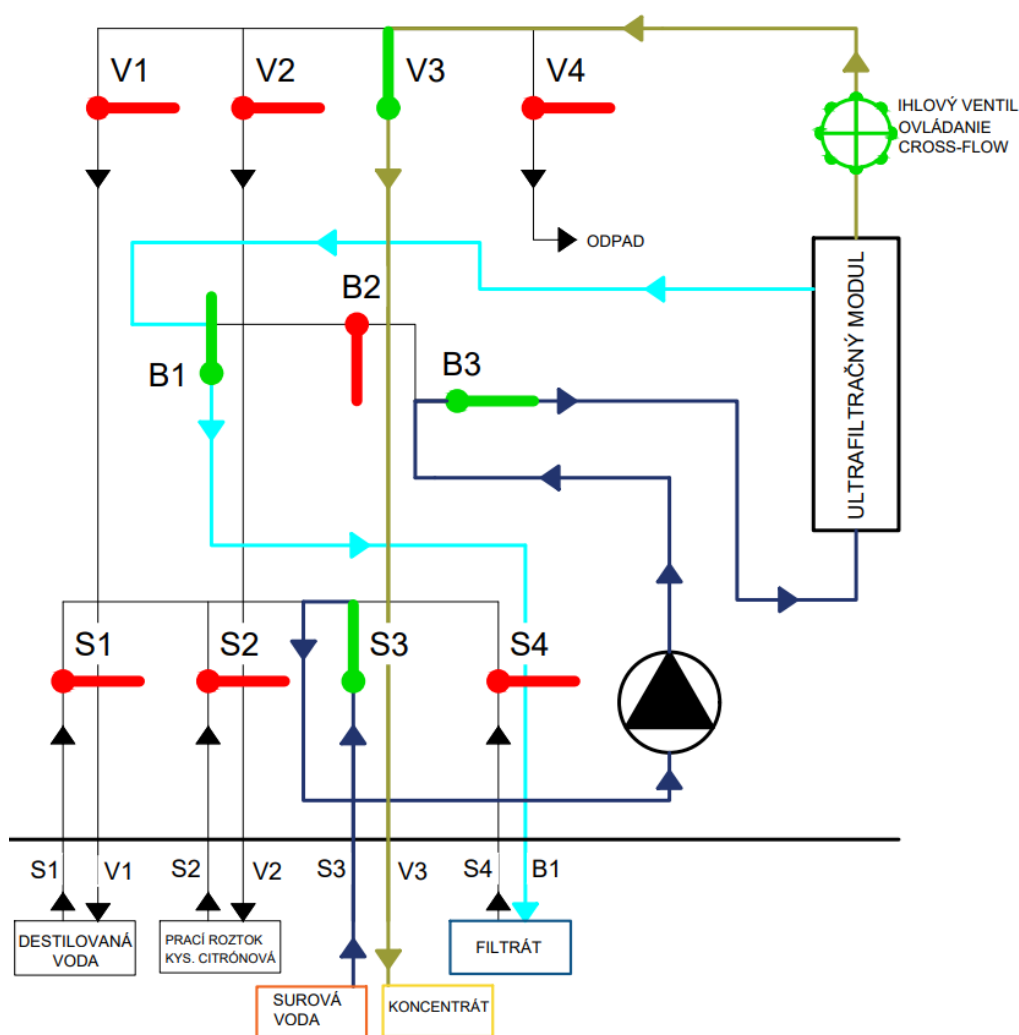
Obr. 5.11 Realizácia návrhu zapojenia membránovej jednotky

5.2.1 Režim filtrácie

Pred spustením samotnej filtrácie je dôležité skontrolovať správne umiestnenie nádob pre surovú vodu, filtrát a koncentrát. Schéme procesu sa nachádza na Obr. 5.12. Uzávery, ktoré musia byť otvorené sú:

- S3 – nasatie surovej vody do čerpadla
- B3 – výtlak surovej vody na vstupnú stranu modulu
- B1 – odtok filtrátu z výstupnej strany modulu
- V3 – odtok koncentráту do nádoby, v prípade, že nie je potrebné sledovať množstvo a kvalitu koncentráту, je možné namiesto uzáveru V3 otvoriť uzáver V4 a koncentrát bude odtekať priamo do odpadu.
- Ihlový ventil – pôvodne slúži k regulácii cross-flow režimu. Pri jeho úplnom zatvorení dochádza k dead-end filtrácii. Avšak ventil je predimenzovaný a pri nižších prietokoch je náročné nastaviť požadovanú hodnotu prietoku koncentráту. Efektívnejšie je ihlový ventil ponechať plne otvorený a k regulácii použiť ventil V3 (popríklad V4).

Obzvlášť veľkú pozornosť si vyžaduje sledovanie hladiny v nádobe pre surovú vodu, aby nedošlo k nasatiu vzduchu čerpadlom. Aj v prípade dead-end filtrácie sa odporúča spúšťať zariadenie s plne otvoreným ventilom na strane koncentráту a následne ho pomaly uzatvárať.



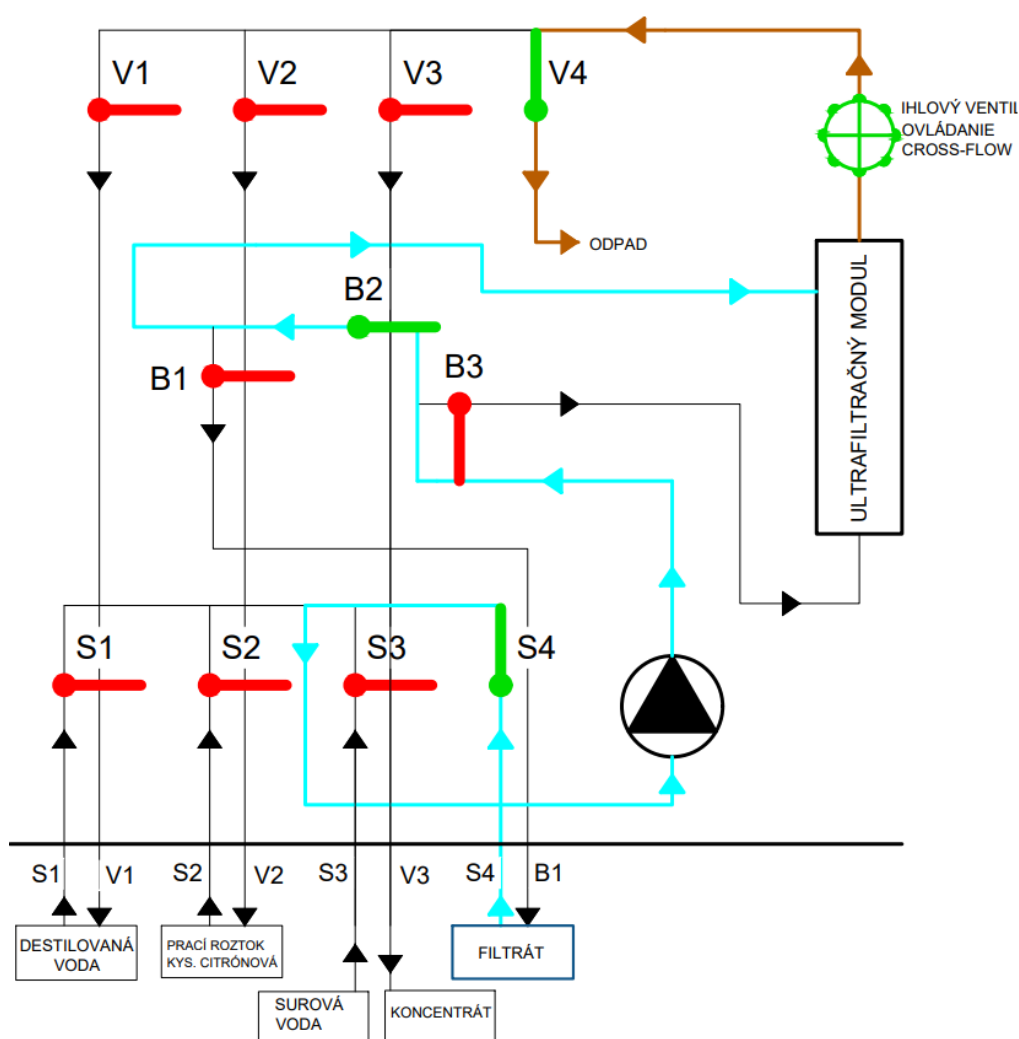
Obr. 5.12 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime filtrácie

5.2.2 Režim spätného mechanického prania

Pre spätné prepláchnutie membrány je možné použiť už prefiltrovanú vodu priamo z nádoby na filtrát. Uzávery otvorené v tomto režime sú:

- S4 – nasatie filtrátu čerpadlom
- B2 – obtok, výtlak filtrátu do výstupu modulu, prúdenie v spätnom smere
- V4 – odtok znečistenej pracovnej vody do odpadu
- Ihlový ventil – plne otvorený, umožňuje odtok pracovnej vody

Intenzitu a dobu trvania mechanického prania je potrebné voliť v závislosti na prevádzkových skúsenostiach a s ohľadom na použitú membránu. Je vhodné týmto spôsobom membránu prečerpať minimálne 20 litrov čistej vody. K záveru pracovného cyklu sa javí ako prospešné dať uzávery do polohy ako pri filtrácii ale použiť namiesto surovej vody filtrát. Týmto spôsobom dôjde k prepláchnutiu aj ostatných potrubí.



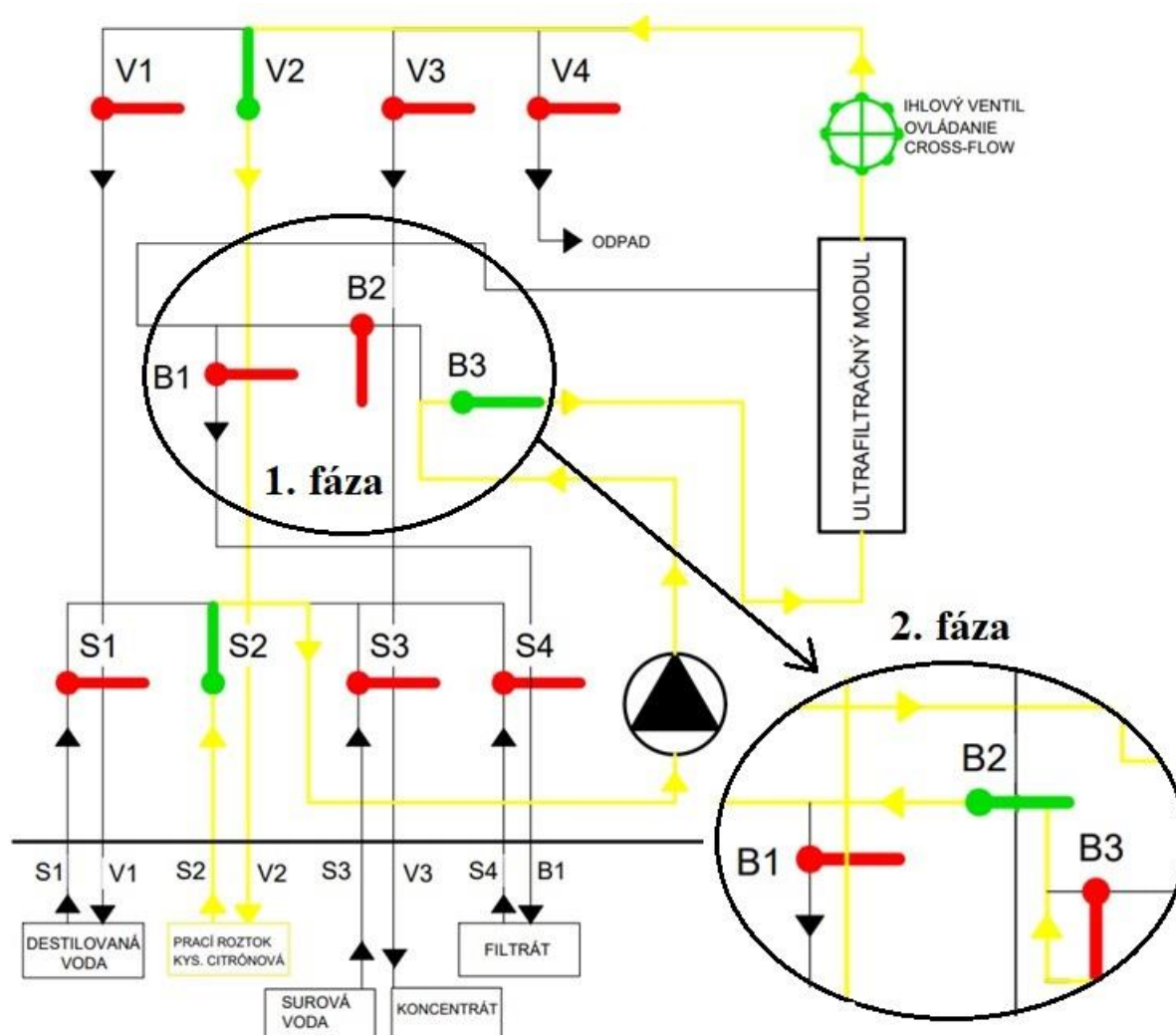
Obr. 5.13 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime spätného prania

5.2.3 Režim chemického prania

Dodávateľ ako čistiaci roztok pre chemické pranie membrány odporúča roztok kyseliny citrónovej pri pH=5,5. Na základe prevádzkových skúseností sa osvedčil roztok vytvorený navážkou 2 g monohydrátu kyseliny citrónovej do 5 l destilovanej vody. Takto pripravený čistiaci roztok sa umiestni tak, aby do neho bola zavedená hadica S2 a V2 a nechá sa 20 minút cirkulovať jednotkou nasledujúcim spôsobom, pozostávajúcim z dvoch fáz [32]:

- Prvá fáza – otvorené sú uzávery S2, B3, V2 a ihlový ventil. Odporúčaná doba trvania tejto fázy je 10 minút. Čistiaci roztok neprechádza membránou ale uvoľňuje nečistoty nahromadené na povrchu membrány a odplavuje ich.
- Druhá fáza – po 10 minútach sa uzavrie uzáver B3 a namiesto neho sa otvorí uzáver B2. Znovu sa nechá cirkulovať ďalších 10 minút. V tejto fáze dochádza k prestupu roztoku membránou a uvoľňovaniu nečistôt aj na výstupnej strane membrány.

Kyslé roztoky sú účinné na odstránenie anorganického znečistenia. Pre zvýšenie efektivity by bolo vhodné zakomponovať do procesu čistenia aj chemické čistenie zásaditým roztokom pre kvalitné odstránenie organického znečistenia.



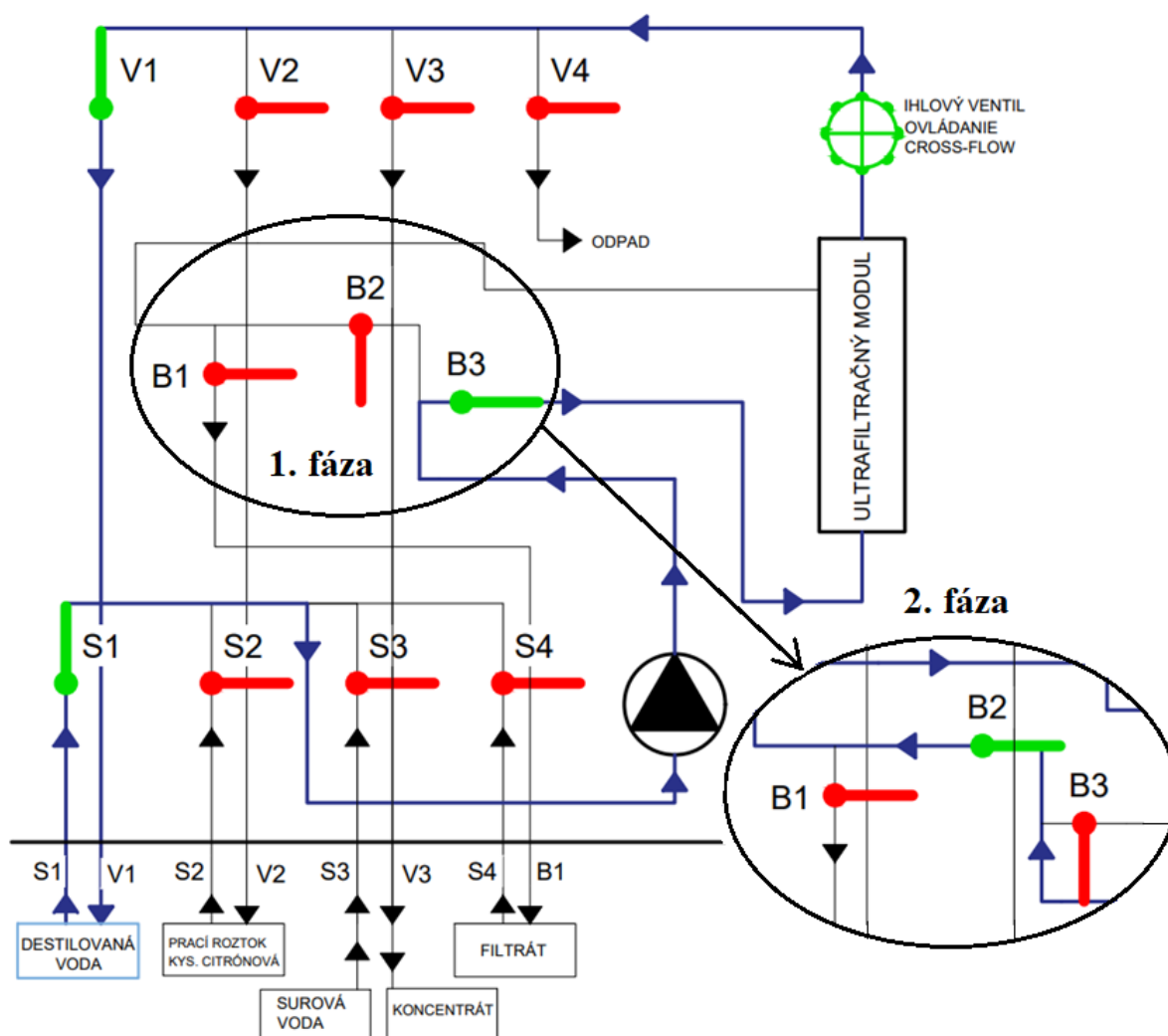
Obr. 5.14 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime chemického prania

5.2.4 Režim oplachu po chemickom praní

Po praní chemickým činidlom je potrebné zariadenie opláchnuť destilovanou vodou, aby sa vyplavili pozostatky činidla zo systému. Postup je obdobný režimu chemického prania. Potrebne je pripraviť si nádobu s 5 l destilovanej vody a umiestniť ju tak, aby do nej boli zaústené hadičky S1 a V1. Režim znovu prebieha v dvoch fázach:

- Prvá fáza – potrebné je otvorenie uzáverov S1, B3, V1 a ihlového ventilu. Takto prebieha cirkulácia destilovanej vody v systéme 10 minút.
- Druhá fáza – po uplynutí 10 minút sa otvorí uzáver B2 a zatvorí sa B3. Destilovaná voda sa ponechá takto cirkulovať v spätnom smere ďalších 10 minút.

Po vyčistení membrány je možné pokračovať vo filtrácii. V prípade, že je filtrácia ukončená a modul sa nebude niekoľko dní používať je potrebné ho zakonzervovať. To sa prevedie napustením modulu konzervačným roztokom – 2 % roztok metabisulfidu sodného. Modul sa uzavrie, aby nedochádzalo k úniku roztoku. V prípade dlhodobej odstrávky je potrebné konzervačný roztok v module vymeniť každé 3 mesiace. [32]



Obr. 5.15 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime oplachu

5.3 SUROVÁ VODA POUŽITÁ PRI TESTOVANÍ

Cieľom tejto práce je posúdiť samotnú ultrafiltračnú jednotku, zhodnotiť jej prevádzkové parametre a všeobecne posúdiť možnosti využitia tohto zariadenia pri úprave vody. Z toho dôvodu nie je žiadúce zamerať sa na úpravu vody z konkrétneho vodného zdroja. Jedná sa o laboratórne testy a je dôležité odsledovať funkčnosť zariadenia pri rôznej kvalite surovej vody. Membránové procesy sa v praxi využívajú na úpravu vody vysokej kvality, poprípade na doúpravu vody, ktorá už prešla konvenčnými technológiami úpravy. V rámci otestovania zariadenia boli zvolené extrémnejšie podmienky ako tie, pri ktorých sa membránové filtre bežne aplikujú. Ako hlavný predbežný ukazovateľ kvality vody bol použitý zákal. Na základe potreby vyšších hodnôt zákalu v surovej vode bolo rozhodnuté, že zariadenie bude otestované povrchovou vodou. Voda bola odobratá z rieky Svratky, na jej 52,8 riečnom kilometri pod haťou Brno-Komín (Obr. 5.16).



Obr. 5.16 Mapa so zaznačeným miestom odberu surovej vody [33]

Kvalita povrchovej vody sa líši v priebehu roka a je závislá na mnohých vplyvoch. Koncentrácia nerozpustených látok v neznečistených tečúcich vodách sa pohybuje v jednotkách mg/l. Samočistiace procesy v toku súvisia s koncentráciou rozpusteného kyslíku, ktorá je funkciou niekoľkých faktorov – teplota, hydraulika toku, obsah organických látok, fotosyntézy. V letnom období sa pohybuje v rozmedzí 8 – 12 mg/l a v zime v rozmedzí 6 – 8 mg/l. Hodnota pH neznečistených povrchových tečúcich vôd sa pohybuje v hodnotách od 6,0 do 8,5. Zmeny v zložení povrchových vôd však môžu byť veľmi výrazné a to či už pôsobením krátkodobého znečistenia, tak aj dlhodobého. Kvalita vody v rieke Svratke je priemerná, ale miestami silne znečistená. [34, 35]

Odber surovej vody prebehol 28.11. 2022, pre zvýšenie zákalu bola voda mierne rozvírená a následne nabraená do kanistrov. Priamo na mieste prebehla analýza hodnoty zákalu, ktorý bol v čase odberu po rozvírení 16,4 NTU. Z dôvodu prekročenia limitnej hodnoty zákalu pre surovú vodu danou výrobcom testovanej membrány bola voda pro premiestnení do laboratória zriedená pitnou vodou z vodovodu, so zákalom 1,02 NTU, a to v troch rôznych pomeroch aby boli dosiahnuté tri kvalitatívne odlišné typy modelovej vody. Podrobnosti sú uvedené v kapitole popisujúcej samotný priebeh testov.

5.4 SLEDOVANÉ UKAZOVATELE A POUŽITÉ METÓDY

Pre komplexné vyhodnotenie účinnosti ultrafiltračnej jednotky pri úprave vody by bolo ideálne realizovať úplné rozborové ukazovateľmi mikropolutantov pre surovú a upravenú vodu. Pre účely pilotného otestovania zariadenia a s prihliadnutím na rozsah diplomovej práce budú v modelovej surovej vode a upravenej vode sledované len vybrané ukazovatele.

5.4.1 Zákaly

Základným sledovaným ukazovateľom v rámci testovania membrány bol zákaly, a to hneď z niekoľkých dôvodov. Jeho analýza je ekonomicky a realizačne nenáročná, prebieha pomocou zariadenia, dostupného v laboratóriu Ústavu vodného hospodárství obcí, kde sa jednotka testovala. Zároveň patrí medzi ukazovatele, ktoré budú v budúcnosti potencionálne problémové pre mnoho prevádzkovateľov vodovodných systémov. Jeho hodnota bola novou európskou smernicou niekoľkonásobne sprísnená a novú požadovanú hodnotu spĺňa len malé percento v súčasnosti využívaných vodných zdrojov. V súčasnosti je limit zákalu pre pitnú vodu daný v Česku aj na Slovensku hodnotou 5 ZF. Nová smernica vyžaduje, aby 95 % vzoriek nepresiahlo 0,3 ZF a žiaden z nich neprekročil hodnotu 1 ZF. Ako perspektívne riešenie tohto budúceho problému sa javí práve membránová filtrácia. [7]

Zákaly patrí medzi zmyslové charakteristiky vody (ďalšími sú farba, chuť a zápach). Je charakterizovaný ako zníženie priehľadnosti. Považuje sa za jednoduchý a jeden zo základných ukazovateľov kvality vody. Spôsobujú ho suspendované a rozpustené látky organického alebo anorganického pôvodu. Jeho zdroje môžu byť teda veľmi rozmanité a mnoho jeho zložiek ako íl a hlina sú po zdravotnej stránke neškodné. Zároveň však zvýšený zákaly môže indikovať prítomnosť nebezpečných chemických a mikrobiologických kontaminantov. [36]

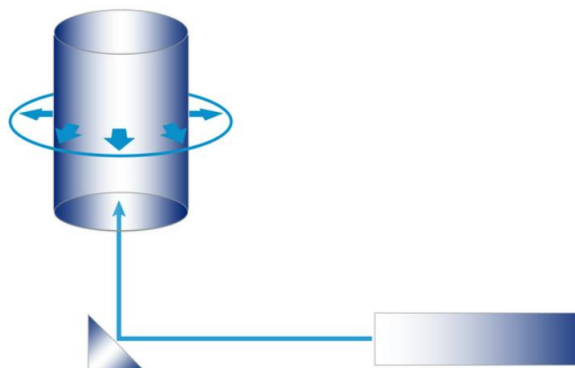
Vyššie hodnoty zákalu sú typické pre povrchové zdroje vody, kde sa vo väčšej miere vyskytujú sedimenty, organický materiál, sinice a riasy. K zvýšeným hodnotám zákalu dochádza najmä po výdatných zrážkach, keď dochádza k splachovaniu nečistôt zo zemského povrchu do tokov. Do istej miery ide o prirodzený jav, no prejavuje sa aj antropologický vplyv pri zvýšenej erózii pôdy nevhodnými poľnohospodárskymi postupmi alebo pri úniku chemikálií spôsobujúcich zákal. Tento problém sa týka aj podzemných zdrojov vody, aj keď pri nich nie je tak výrazný. Po výdatných zrážkových udalostiach môže dochádzať k vyplaveniu pôdných častíc do hlbších vrstiev podložia a teda do podzemnej vody. Príkladom je prípad zo stredného Slovenska, kde za bežných podmienok kvalitný zdroj podzemnej vody pre obec Poniky, po výdatných dažďoch preukazoval hodnoty zákalu cez 100 ZF. Zákaly podzemnej vody môže byť ďalej spôsobený vysokým obsahom železa alebo mangánu. [12, 36, 37]

Zákaly je možné merať relatívne jednoduchými a nenákladnými prenosnými zariadeniami, aj napevno inštalovanými kontinuálnymi zákalomerami. Sú založené na snímaní prechodu svetla analyzovanou vodou. Historicky sa zákaly určoval pomocou Jacksonovej metódy, ktorá prebieha tak, že do špeciálneho kalibrovaného valca sa naleje skúmaná voda a sleduje sa prienik svetla od zapálenej sviečky. Pôvodnou jednotkou zákalu bola na základe tejto metódy JTU (Jackson turbidity unit). Novšie metódy sú založené na roztokoch formazínu so štandardizovanými hodnotami zákalu. Jednotlivé moderné metódy majú navzájom určité odlišnosti (uhol, pod ktorým prechádza lúč svetla, počet lúčov a pod.). Z toho vyplýva niekoľko najpoužívanejších jednotiek pre zákaly – NTU (nephelometric turbidity unit), FTU (formazin turbidity unit), FNU (formazin nephelometric unit). V českej norme je použitá jednotka ZF (formazinová jednotka). Keďže všetky tieto jednotky sú vyjadrené pomocou rovnakých štandardných formazinových roztokov, sú vzájomne zameniteľné. Platí teda: 1 NTU = 1 FTU = 1 FNU = 1 ZF. [36]

Pri analýze vzoriek v priebehu testov ultrafiltračnej jednotky bol používaný turbidimeter (zákalomer) Hach TU5200 (Obr. 5.17). Obdobné prístroje používajú snímanie lúča prechádzajúceho vzorkou pod uhlom 90° . Tento prístroj je vybavený technológiou $360^\circ \times 90^\circ$ DetectionTM, čo znamená že sníma prechod lúča po celom obvode, nie len v jednom bode (Obr. 5.18). Meria zákal v rozsahu 0 – 600 NTU, s presnosťou 0,01 NTU. [38]



Obr. 5.17 Turbidimeter Hach TU5200 [38]



Obr. 5.18 Technológia $360^\circ \times 90^\circ$ DetectionTM [38]

5.4.2 Chemická spotreba kyslíka

V prírodných vodách sa vyskytuje bohaté spektrum organických látok. Môže ísť o látky prirodzeného pôvodu alebo antropogénneho. Prírodnými sú humus, výluhy z listia a dreva a produkty životných činností organizmov. Antropogénne organické látky, vyskytujúce sa vo vode pochádzajú zo splaškových a priemyselných odpadných vôd a z poľnohospodárstva. Mnoho z nich je značne škodlivých. Medzi časté znečisťujúce organické látky patria napríklad fenoly, pesticídy, ropné látky a tenzidy. Existuje niekoľko spôsobov, ktorými je možné popísať celkovú koncentráciu organických látok obsiahnutých vo vode. Základné metódy sú založené na poznatku, že organické látky sa rozkladajú oxidáciou a je potrebné zistiť aké množstvo kyslíku je potrebné k oxidácii všetkých organických látok v analyzovanej vode. Na tomto princípe sú založené nasledujúce metódy [39, 40]:

- **Teoretická spotreba kyslíka (TSK)** – je založená na teoretickom výpočte. Pre použitie tejto metódy je potrebné poznať množstvo a zloženie obsiahnutých organických látok. Nie je teda vhodná pre analytické účely.
- **Biochemická spotreba kyslíka (BSK)** – oxidácia organických látok môže nastať aj pôsobením aeróbnych baktérií, ktoré organickú hmotu rozkladajú. Tie k tomu procesu potrebujú kyslík. Metóda sleduje úbytok kyslíku vo vzorku za určitý čas, za predpokladu, že kyslík bol spotrebovaný baktériami. Najčastejšie sa používa doba pôsobenia 5 dní, pri 20°C – značí sa BSK_5 .
- **Chemická spotreba kyslíka (CHSK)** – pri tejto metóde sa k oxidácii organickej hmoty využívajú chemické činidlá. Sleduje sa spotreba týchto činidiel a následne sa prepočíta na ekvivalentné množstvo kyslíku. Pri analýze prírodných a pitných vôd sa ako oxidačné činidlo používa manganistan draselný pri analýze odpadnej vody dichroman draselný. Hodnoty chemickej spotreby kyslíka sú rôzne pri použití inej oxidačnej látky. Je preto potrebné rozlišovať použité činidlo – v prípade použitia manganistanu sa používa značenie CHSK_{Mn} , pri použití dichromanu CHSK_{Cr} . Legislatívna požiadavka na najvyššiu hodnotu CHSK_{Mn} pre pitnú vodu je 3 mg/l.

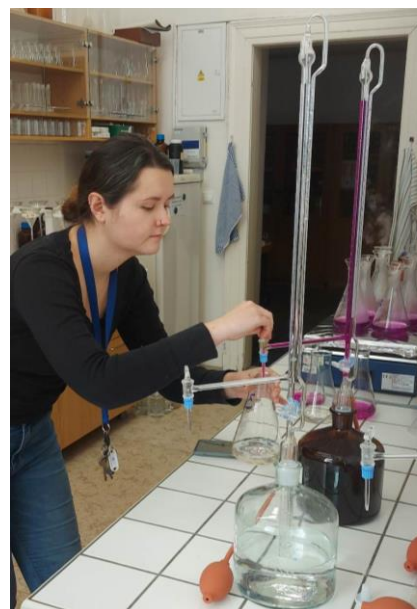
Pri analýze vzoriek pri testovaní ultrafiltračnej jednotky bol ako oxidačné činidlo použitý manganistan draselný. Analýza prebiehala v laboratóriu Ústavu chémie, na Fakulte stavebnej, VUT v Brne, pod dozorom skúsených laborantov. Hodnota $CHSK_{Mn}$ sa určovala pre rovnakú vzorku vždy dvakrát, následne sa ako tieto hodnoty spriemerovali.

Stručný popis analýzy je nasledovný. Do predom vyvarenej Erlenmeyerovej banky sa odmeria 100 ml vzorky. Oxidačná reakcia prebieha v kyslom prostredí, čo sa zabezpečí pridaním 5 ml zriedenej kyseliny sírovej (1+2). Ďalej sa pridá 20 ml odmerného roztoku $KMnO_4$ s koncentráciou približne 0,002 mol/l a faktorom f . Roztok sa následne zahrieva a privedie sa k varu. Doba varu je presne 10 minút. K teplému roztoku sa pridá 20 ml kyseliny šťavelovej o koncentrácii 0,005 mol/l a za tepla (teplota roztoku nesmie klesnúť pod 80 °C) sa titruje roztokom $KMnO_4$ (koncentrácia 0,002 mol/l, faktor $f = 1,02585$) do trvalého ružového sfarbenia. Spotreba $KMnO_4$ sa značí b . Ak je spotreba väčšia ako 12 ml, je potrebné postup opakovať so zriedenou vzorkou. Hodnota $CHSK_{Mn}$ sa vypočíta pomocou vzťahu 5.1. [41] Fotografie z priebehu rozborov sú vyobrazené na Obr. 5.19 a Obr. 5.20.

$$CHSK_{Mn} = [(20 + b) \cdot f - 20] \cdot 0,8 \quad [mg/l] \quad (5.1)$$



Obr. 5.19 Var vzoriek po dobu 10 minút



Obr. 5.20 Titrácia roztokom $KMnO_4$

5.4.3 Tvrdosť

Tvrdosť vody je definovaná ako celková koncentrácia divalentných iónov kovov (s oxidačným číslom 2^+). Vo vode sa v nezanedbateľnej koncentrácii vyskytujú len dva prvky, ktoré patria do tejto skupiny, a to vápnik (Ca^{2+}) a horčík (Mg^{2+}). Tvrdosť sa teda určuje ako súčet ich koncentrácie vo vode. Tieto minerály sú v pitnej vode do istej miery žiadané. Vo vyhláške stanovujúcej hygienické limity pre pitnú vodu (v ČR Vyhláška č. 252/2004 Sb., v SR Vyhláška č. 247/2017 Z. z.) sú limity týchto prvkov dokonca dané minimálnou hodnotou (vápnik 30 mg/l, horčík 10 mg/l). Majú prospešné účinky na ľudské zdravie a priaznivo ovplyvňujú chuť vody. Problémovými sa stávajú pri vyšších koncentráciách z dôvodu zrážania na uhličitan vápenatý ($CaCO_3$), ktorý spôsobuje technické komplikácie v potrubí a domácich spotrebičoch. Doporučená celková tvrdosť pitnej vody je v českej vyhláške 2 - 3,5 mmol/l a v slovenskej vyhláške 1,1 - 5 mmol/l. [3, 4, 32]

Tradičnými spôsobmi odstraňovania tvrdosti z vody je využitie iónovej výmeny. Medzi moderné spôsoby patrí využitie nanofiltračie (poprípade reverznej osmózy). Testovaná membrána je ultrafiltračná ale s relatívne malou veľkosťou pórov, ktorá sa blíži k veľkosti udávanej pre nanofiltračné membrány. Tvrdosť bola teda zaradená do sledovania s očakávaním, že by sa výrazne nemala meniť. Zároveň je analytický spôsob určenia tvrdosti relatívne nenáročný. [42]

Postup analýzy je nasledovný. Odmeria sa 100 ml vzorky (poprípade objem V sa zriedi do 100 ml destilovanou vodou). Pridá sa 5 ml amoniakálneho tlmivého roztoku a indikátor eriochromová čerň T do fialového sfarbenia roztoku. Následne sa titruje roztokom Chelatónu (disodná soľ kyseliny ethylendiamintetraoctovej) s koncentráciou $c(\text{Chelatón})$ v mol/l do zmeny farby na blankytne modrú. Spotreba Chelatónu sa značí y ml. Výsledná tvrdosť sa vypočíta vzťahom 2.2. [43]

$$c(\text{Ca} + \text{Mg}) = \frac{c(\text{chelaton}) \cdot y \cdot 1000}{V} \quad [\text{mmol/l}] \quad (5.2)$$

5.4.4 pH

Stupnica pH vyjadruje kyslosť alebo zásaditosť roztokov. Pohybuje sa v rozmedzí hodnôt 0 – 14, pričom hodnota 7 je považovaná za neutrálnu. Parameter, ktorý určuje hodnotu pH je rovnováha medzi iónmi H^+ a OH^- . Napríklad deionizovaná voda, obsahuje len molekuly vody (H_2O), ktoré disociáciou vytvárajú páry molekúl H^+ a OH^- . Sú teda v rovnováhe a pH je neutrálne. Kyslé roztoky majú pH nižšie ako 7 a majú nadbytok molekúl H^+ . Napríklad kyselina chlorovodíková (HCl), disociuje na H^+ a Cl^- . Čím viac týchto prebytočných iónov látka obsahuje, tým je pH nižšie. Miera kyslosti sa označuje aj ako acidita (acidne roztoky = kyslé roztoky). Pri nadbytku molekúl OH^- , sa roztok pohybuje v zásaditej oblasti pH stupnice, nad hodnotou 7. Typickým príkladom je hydroxid sodný (NaOH), ktorý uvoľňuje ióny Na^+ a OH^- . Synonymum pre zásaditosť je alkalita (alkalické roztoky = zásadité roztoky). [44]

Hodnota pH sa vypočíta ako záporný logaritmus koncentrácie iónov vodíka v roztoku. Je dôležitá pretože ovplyvňuje priebeh chemických reakcií. Určité reakcie prebiehajú v kyslom prostredí, niektoré v zásaditom. Hodnota pH teda môže pôsobiť ako katalyzátor alebo inhibítor. V povrchových vodách sa pH pohybuje v rozmedzí 6 – 8, u podzemných vôd 5,5 – 7,5. Vyhlášky pre pitnú vodu stanovujú požadované pH 6,5 – 9,5. [3, 4, 39, 44]

Prístroje určené k meraniu pH sa nazývajú PH metre. Fungujú na princípe potenciometrického merania. Nachádza sa na nich elektróda, ktorá po ponorení do roztoku meria aktivitu iónov. Pri určovaní pH pri testovaní membrány bol použitý prenosný pH meter XS (Obr. 5.21). [44]



Obr. 5.21 pH meter XS

5.5 PRIEBEH TESTOV ULTRAFILTRAČNEJ JEDNOTKY

Realizované testy prebiehali niekoľko dní v laboratóriu Ústavu vodného hospodárství obcí na Fakulte stavebnej VUT v Brne. Samotnému testovaniu predchádzala plánovacia fáza, ktorá je popísaná nižšie.

5.5.1 Plán meraní

Ako už bolo uvedené, surová voda bola odobraná z rieky Svratky, pod haťou Brno-Komín. Jej zákal v čase odberu bol 16,4 NTU. V tejto kvalite nebolo možné vodu púšťať priamo do membránového modulu. Výrobcom uvedená maximálna hodnota zákalu surovej vody je 15 NTU. Vysoká hodnota ale bola žiadúca pretože táto surová voda slúžila ako základ pre tvorbu modelovej surovej vody v niekoľkých koncentráciách. Surová voda z rieky bola riedená pitnou vodou z vodovodnej siete vo viacerých pomeroch. Znovu bol ako hlavný parameter hodnotený zákal, na základe možnosti ho určiť pomocou prístroja v reálnom čase priamo na mieste. Naplánované bolo namiešanie troch druhov modelovej surovej vody, približne v nasledujúcich požadovaných hodnotách zákalu:

- **2,5 NTU** – najnižšia hodnota zákalu bola navrhnutá tak, aby vyhovovala súčasným požiadavkám legislatívy (<5 NTU), ale nevyhovovala požiadavkám na prevádzkové rozbery podľa novej európskej smernice 2020/2184 (<0,3 NTU).
- **5 NTU** – prostredná hodnota bola volená na hranici limitu súčasnej legislatívy.
- **7 NTU** – najvyššia hodnota bola navrhnutá tak, aby otestovala zariadenie v extrémnejších podmienkach, no s prihliadnutím na to, že membránové filtre sa nepoužívajú pri úprave veľmi znečistených vôd a aby nedošlo k nadmernému zaneseniu/poškodeniu membrány, čo by bránilo jej ďalšiemu využitiu.

Ďalším zámerom bolo odsledovať tlakové pomery a zanášanie membrány. Pre tento účel je vhodné sledovať filtračné cykly pri rôznych hodnotách prietoku. Proces bude teda prevádzkovaný v poloautomatickom režime s nastavením konštantného prietoku. Znovu boli navrhnuté tri rôzne hodnoty čerpaného množstva a boli volené s ohľadom na čerpadlo. Prietok bol následne prepočítaný na odpovedajúcu hodnotu fluxu, pri ploche membrány 0,4 m². Zvolené hodnoty prietoku pre testovanie zariadenia:

- **100 l/h** (0,1 m³/h) – táto hodnota bola navrhnutá ako najnižšia z dôvodu, že čerpadlo malo pri nižších prietokoch problémy s reguláciou otáčok.
- **150 l/h** (0,15 m³/h)
- **200 l/h** (0,2 m³/h) – dodávateľ membrány uvádza túto hodnotu ako maximálny prietok filtrátu pre danú membránu.

Pre kompletne vyhodnotenie je potrebné zariadenie otestovať vo všetkých režimoch, v ktorých je schopné fungovať. Je teda žiadúce, aby boli všetky cykly realizované dvakrát, a to v režime:

- **cross-flow** s pootvoreným ventilom pre koncentrát.
- **dead-end** pri ventile plne zatvorenom.

Miera pootvorenia ventilu v režime cross-flow bola navrhnutá na 30 %, aby bolo zachovaná efektívnosť procesu a vznikalo viac filtrátu ako koncentráta.

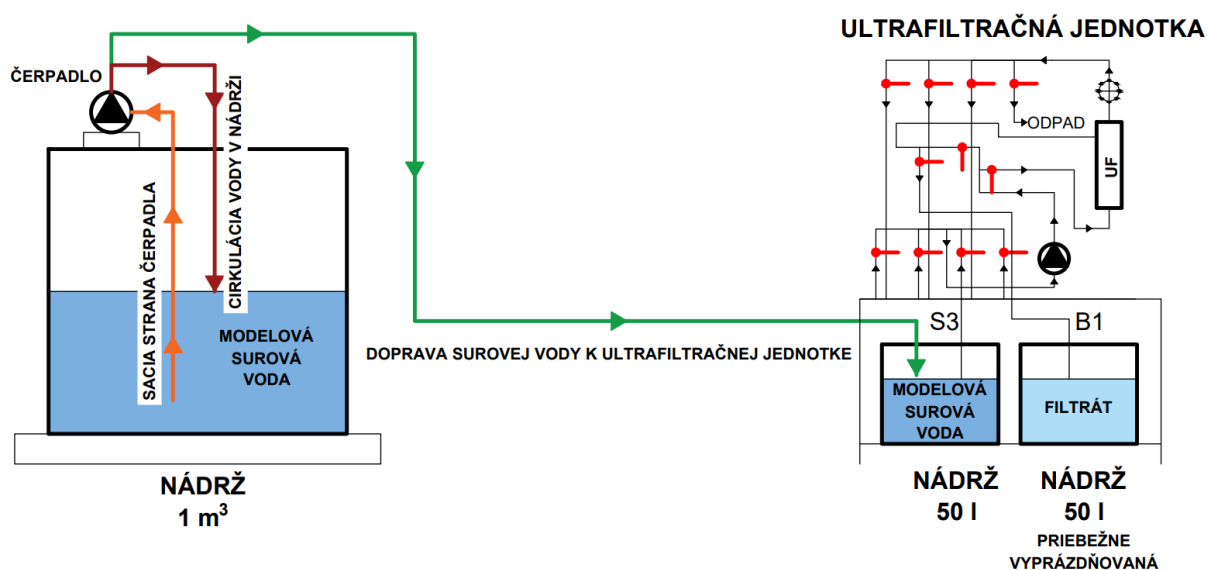
Kombináciou všetkých vyššie zmienených parametrov, vznikne potreba 18 filtračných cyklov pri rôznom znečistení, prietoku a režime. Doba trvania jedného filtračného cyklu bola navrhnutá na 30 minút. Ak by došlo k prípadnému náhlemu nárastu tlaku na vstupe do zariadenia nadmerným zanášaním, cyklus by bol prerušený. Medzi jednotlivými cyklami bolo navrhnuté mechanické pranie spätným prúdom pri prietoku 150 l/h, po dobu 10 minút. Chemické pranie roztokom kyseliny citrónovej bolo naplánované po každých troch cykloch, aby nedochádzalo k ovplyvňovaniu výsledkov na základe predchádzajúceho zanesenia. Schéma návrhu testovacích cyklov je uvedená v Tab. 5.2 aj s výpočtom potreby množstva modelovej surovej vody.

Tab. 5.2 Plán merania

Cyklus	Zákal [NTU]	Režim	Prietok surovej vody [l/h]	Prietok koncentrátu [l/h]	Flux [l/m ² /h]	Potreba surovej vody na 30 min cyklus [l]	
1	cca. 2,5	Cross - flow (30 %)	100	30	175	50	
2			150	45	262,5	75	
3			200	60	350	100	
-		Chemické čistenie					
4		Dead-end	100	0	250	50	
5			150	0	375	75	
6	200		0	500	100		
-	Chemické čistenie						
Cyklus	Zákal [NTU]	Režim	Prietok surovej vody [l/h]	Prietok koncentrátu [l/h]	Flux [l/m ² /h]	Potreba surovej vody na 30 min cyklus [l]	
7	cca. 5	Cross - flow (30 %)	100	30	175	50	
8			150	45	262,5	75	
9			200	60	350	100	
-		Chemické čistenie					
10		Dead-end	100	0	250	50	
11			150	0	375	75	
12	200		0	500	100		
-	Chemické čistenie						
Cyklus	Zákal [NTU]	Režim	Prietok surovej vody [l/h]	Prietok koncentrátu [l/h]	Flux [l/m ² /h]	Potreba surovej vody na 30 min cyklus [l]	
13	cca. 7	Cross - flow (30 %)	100	30	175	50	
14			150	45	262,5	75	
15			200	60	350	100	
-		Chemické čistenie					
16		Dead-end	100	0	250	50	
17			150	0	375	75	
18	200		0	500	100		
-	Chemické čistenie						

5.5.2 Príprava čerpacej sústavy

Pre zabezpečenie homogenity modelovej surovej vody bolo potrebné celé množstvo pre danú koncentráciu znečistenia pripraviť v jednej várke. Jeden druh modelovej surovej vody bol použitý podľa tabuľky na predchádzajúcej strane pre 6 cyklov pri rôznych prietokoch a režimoch. Objem vody jednotného znečistenia, potrebnej pre realizáciu týchto šiestich cyklov bol 450 litrov + rezerva aby bola sacia strana čerpadla vždy ponorená. Tri druhy modelovej surovej vody sa pripravovali postupne v nádrži o objeme 1 m³. V tejto nádrži bolo potrebné zabezpečiť miešanie, aby nedochádzalo k sedimentácii nečistôt. K tomu účelu bolo použité malé čerpadlo, ktoré vodu v nádrži cirkulovalo. Zároveň bolo čerpadlo využité pre dopravu surovej vody k ultrafiltračnej jednotke. Schéma zapojenia je uvedená na Obr. 5.22.



Obr. 5.22 Schéma čerpacej sústavy pre dopravu surovej vody k ultrafiltračnej jednotke

5.5.3 Samotné testy

Keďže k testom boli použité tri druhy modelovej surovej vody, ktoré bolo potrebné pripraviť, testy boli rozdelené na tri fázy. Jednému druhu surovej vody odpovedá jedna fáza, ktorá pozostáva zo šiestich filtračných cyklov.

Na začiatku každej fázy sa pripravila modelová surová voda v nádrži o objeme 1 m³, zmiešaním surovej vody z rieky Svratky a pitnej vody z vodovodu. Neboli dodržané presné pomery riedenia, voda bola priebežne miešaná a bol kontrolovaný jej zákal. Do nádrže sa následne pridávala voda surová alebo pitná, tak aby boli približne dosiahnuté požadované hodnoty zákalu – 1. fáza 2,5 NTU, 2. fáza 5 NTU a 3. fáza 7 NTU.

Vzorky pre určenie zákalu, boli odoberané a vyhodnocované priebežne. Zákal vo filtráte/koncentráte sa určoval na výstupe z membrány každé 3 minúty. Zákal surovej vody sa určoval priebežne v rámci jednej fázy, každých 10 minút, pre kontrolu homogenity v nádrži. Vzorky pre analýzu CHSK_{Mn} a tvrdosti sa odoberali ako zlievané vzorky. Každé 3 minúty sa odobralo 150 ml filtrátu a každých 10 minút sa odobralo 150 ml modelovej surovej vody. Teplota modelovej surovej vody bola po celú dobu relatívne stála, keďže bola uchovávaná v interiéri laboratória a teplota upravenej vody sa nelíšila. Teplota vody sa pohybovala počas testov v rozmedzí 16,8 – 18,2°C. Taktiež hodnota pH sa po úprave vody nezmenila a v dobre trvania testov nadobúdala hodnoty 7,3 – 7,57.

1. Fáza

Požadovanou približnou hodnotou zákalu pre modelovú surovú vodu v prvej fáze bolo 2,5 NTU. V priebehu testov zákal mierne kolísal ale priemerná hodnota v prvej fáze bola 2,31, čo spĺňa podmienku, že voda vyhovuje súčasnému limitu pre pitnú vodu ale novej európskej smernici by nevyhovela. Nižšie v tabuľke sú uvedené hodnoty zákalu a transmembránového tlaku, ktoré boli v priebehu prvej fázy testovania namerané v šiestich cykloch a hodnoty $CHSK_{Mn}$ a tvrdosti surovej a upravenej vody, určené analyticky pre zlievané vzorky.

Tab. 5.3 Namerané hodnoty zákalu v prvej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	Zákal [NTU]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100	Nátok	2,64	-	-	-	2,15	-	-	2,16	-	-	2,26
		Filtrát	0,44	0,16	0,13	0,13	0,05	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
		Koncentrát	2,44	3,14	2,61	2,32	2,43	2,30	2,08	2,98	2,38	2,08	2,69
	150	Nátok	2,17	-	-	-	2,45	-	-	2,23	-	-	2,49
		Filtrát	0,85	0,31	0,09	0,08	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,07	0,04
		Koncentrát	2,47	1,80	2,37	2,00	2,04	2,20	2,03	2,15	2,09	1,93	2,03
	200	Nátok	2,25	-	-	-	1,90	-	-	1,94	-	-	1,98
		Filtrát	0,92	0,47	0,42	0,53	0,53	0,35	0,34	0,39	0,45	0,52	0,60
		Koncentrát	3,40	2,76	2,60	2,61	1,96	1,93	1,90	1,94	2,11	2,73	2,02
Dead-end	100	Nátok	2,34	-	-	-	2,43	-	-	2,32	-	-	2,21
		Filtrát	1,10	1,08	1,06	1,03	1,13	1,15	1,10	1,10	1,09	1,05	1,18
	150	Nátok	2,31	-	-	-	2,58	-	-	2,39	-	-	2,33
		Filtrát	1,25	1,28	1,21	1,14	1,15	1,14	1,22	1,22	1,20	1,18	1,28
	200	Nátok	2,61	-	-	-	2,47	-	-	2,46	-	-	2,29
		Filtrát	1,92	1,26	1,29	1,23	1,23	1,20	1,24	1,26	1,29	1,10	1,23

Tab. 5.4 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v prvej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	TMP [bar]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100		0,50	1,87	2,19	2,13	2,34	1,97	1,99	1,99	2,12	1,81	1,99
	150		0,85	3,17	3,20	3,47	3,51	3,2	3,53	3,21	3,39	3,67	3,5
	200		0,96	4,21	4,18	4,39	4,37	4,23	4,29	4,16	4,36	4,39	4,42
Dead-end	100		0,62	2,04	2,39	2,44	2,22	2,52	2,36	2,22	2,34	2,39	2,37
	150		0,77	3,35	3,55	3,59	3,62	3,48	3,52	3,61	3,64	3,68	3,75
	200		0,86	4,63	4,88	4,75	4,63	4,44	4,68	4,72	4,78	4,79	4,63

Tab. 5.5 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v prvej fáze testovania

Vzorka	$CHSK_{Mn}$ [mg/l]	Tvrdosť [mmol/l]	Vzorka	$CHSK_{Mn}$ [mg/l]	Tvrdosť [mmol/l]
Modelová surová voda 1	2,39	2,80			
1.Cross-flow 100 l/h	2,47	2,70	1.Dead-end 100 l/h	2,51	2,75
1.Cross-flow 150 l/h	2,42	2,70	1.Dead-end 150 l/h	2,74	2,59
1.Cross-flow 200 l/h	2,38	2,70	1.Dead-end 200 l/h	2,90	2,75

2. Fáza

V druhej fáze bola žiadúca cieľová hodnota zákalu modelovej surovej vody približne 5 NTU. V skutočnosti sa podarilo pripraviť modelovú surovú vodu s hodnotou zákalu priemerne 4,47 NTU. Táto hodnota je na hranici limitnej hodnoty zákalu súčasnej legislatívy stanovujúcu požiadavky pre pitnú vodu. Analogicky ako pre prvú fázu, nižšie sú v tabuľkách zobrazené hodnoty pre sledované ukazovatele v rámci šiestich cyklov druhej fázy testovania.

Tab. 5.6 Namerané hodnoty zákalu v druhej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	Zákal [NTU]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100	Nátok	4,63	-	-	-	5,43	-	-	4,70	-	-	4,14
		Filtrát	2,95	2,69	2,48	2,60	2,40	2,60	2,50	2,42	2,08	1,93	1,61
		Koncentrát	7,75	6,33	6,21	6,51	5,35	5,63	6,03	5,90	7,48	5,44	4,63
	150	Nátok	4,37	-	-	-	3,98	-	-	3,81	-	-	5,66
		Filtrát	2,08	1,75	1,80	1,92	2,07	2,03	2,25	2,27	2,04	1,98	2,05
		Koncentrát	5,57	4,08	3,91	4,05	3,83	4,95	4,07	3,72	4,23	4,15	4,37
	200	Nátok	4,14	-	-	-	4,12	-	-	5,03	-	-	4,41
		Filtrát	2,15	2,25	2,24	2,12	1,90	1,96	2,15	1,92	2,24	2,35	2,10
		Koncentrát	3,96	4,74	4,17	4,01	4,51	5,27	4,58	4,56	5,82	4,90	4,80
Dead-end	100	Nátok	4,89	-	-	-	4,25	-	-	4,55	-	-	4,50
		Filtrát	2,07	1,98	1,99	2,10	2,09	2,06	1,94	1,96	2,14	2,19	2,46
	150	Nátok	4,75	-	-	-	4,17	-	-	4,58	-	-	4,28
		Filtrát	2,18	2,08	1,95	1,96	1,98	2,50	2,22	2,01	2,02	2,07	1,97
	200	Nátok	4,17	-	-	-	4,25	-	-	4,39	-	-	4,07
		Filtrát	2,37	2,02	2,04	2,02	2,09	2,08	2,09	2,14	2,04	1,94	2,08

Tab. 5.7 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v druhej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	TMP [bar]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100		0,66	2,14	1,98	1,99	2,06	2,11	2,18	2,22	2,35	2,36	2,44
	150		0,78	3,25	3,36	3,65	3,77	3,71	3,72	3,53	3,74	3,72	3,55
	200		0,98	4,21	4,29	4,38	4,2	4,29	4,63	4,37	4,39	4,5	4,78
Dead-end	100		0,68	1,92	2,24	2,29	2,46	2,41	2,62	2,45	2,55	2,63	2,59
	150		0,89	3,34	3,72	3,87	3,77	3,86	3,92	3,75	3,72	3,84	3,44
	200		0,86	4,78	4,46	4,72	4,65	4,55	4,63	4,49	4,53	4,73	4,79

Tab. 5.8 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v druhej fáze testovania

Vzorka	CHSK _{Mn} [mg/l]	Tvrdosť' [mmol/l]	Vzorka	CHSK _{Mn} [mg/l]	Tvrdosť' [mmol/l]
Modelová surová voda 2	2,71	2,59			
2.Cross-flow 100 l/h	2,83	2,59	2.Dead-end 100 l/h	2,71	2,59
2.Cross-flow 150 l/h	2,42	2,64	2.Dead-end 150 l/h	2,75	2,54
2.Cross-flow 200 l/h	2,88	2,49	2.Dead-end 200 l/h	2,51	2,64

3. Fáza

V tretej, poslednej, fáze bola vyžadovaná najvyššia koncentrácia znečistenia. Navrhnutá hodnota zákalu pre modelovú surovú bola približne 7. Namiešať sa podarilo v nádrži vodu kolísajúcu okolo hodnoty 6,63 NTU. Namerané hodnoty zákalu a transmembránového tlaku v priebehu filtračných cyklov, ako aj analýzou určené ukazovatele zo zlievaných vzoriek sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tab. 5.9 Namerané hodnoty zákalu v tretej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	Zákal [NTU]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100	Nátok	6,97	-	-	-	6,94	-	-	6,28	-	-	6,48
		Filtrát	2,08	1,17	0,98	1,01	1,08	1,20	1,06	1,13	1,00	1,20	0,99
		Koncentrát	7,49	5,57	5,57	5,75	5,68	6,27	5,80	6,06	6,47	6,60	6,65
	150	Nátok	6,50	-	-	-	6,81	-	-	6,92	-	-	6,36
		Filtrát	2,70	1,40	1,14	1,10	1,35	1,30	1,36	1,26	1,33	1,33	1,40
		Koncentrát	6,40	6,35	5,91	6,10	8,30	7,80	7,62	7,20	6,78	7,14	6,83
	200	Nátok	7,11	-	-	-	6,93	-	-	6,54	-	-	6,93
		Filtrát	2,29	1,85	1,66	2,40	2,18	2,16	2,14	2,15	2,15	2,23	2,20
		Koncentrát	7,13	6,38	6,33	9,50	8,34	8,35	7,27	7,29	7,48	7,70	7,55
Dead-end	100	Nátok	6,85	-	-	-	6,40	-	-	5,95	-	-	6,48
		Filtrát	1,86	1,65	1,52	1,60	1,63	1,63	1,66	1,70	1,73	1,80	1,78
	150	Nátok	6,22	-	-	-	6,12	-	-	6,34	-	-	6,42
		Filtrát	2,09	1,96	2,02	2,30	2,33	2,26	2,21	2,27	2,24	2,24	2,28
	200	Nátok	6,12	-	-	-	7,45	-	-	7,49	-	-	6,51
		Filtrát	2,42	2,26	2,65	2,71	2,88	3,25	3,25	3,15	3,38	3,27	3,40

Tab. 5.10 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v tretej fáze testovania

Režim	Prietok [l/h]	TMP [bar]	Čas cyklu [min]										
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Cross-flow	100		0,45	2,39	2,44	2,19	2,49	2,4	2,41	2,39	2,35	2,29	2,48
	150		1,26	3,69	3,75	3,44	3,41	3,68	3,72	3,65	3,67	3,69	3,86
	200		0,66	4,67	4,72	4,59	4,63	4,65	4,75	4,43	4,71	4,79	4,64
Dead-end	100		0,64	2,26	2,45	2,61	2,59	2,65	2,68	2,84	2,77	2,49	2,59
	150		0,72	3,78	3,82	3,86	3,9	3,88	3,85	3,97	3,99	3,82	3,84
	200		1,09	4,83	4,78	4,66	4,89	4,91	4,77	4,96	4,92	4,93	4,75

Tab. 5.11 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v tretej fáze testovania

Vzorka	CHSK _{Mn} [mg/l]	Tvrdosť' [mmol/l]	Vzorka	CHSK _{Mn} [mg/l]	Tvrdosť' [mmol/l]
Modelová surová voda 3	3,16	2,49			
3.Cross-flow 100 l/h	2,51	2,49	3.Dead-end 100 l/h	3,08	2,54
3.Cross-flow 150 l/h	2,51	2,44	3.Dead-end 150 l/h	3,37	2,54
3.Cross-flow 200 l/h	2,71	2,54	3.Dead-end 200 l/h	3,37	2,49

5.6 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Vyhodnotenie sa týka dvoch hlavných sfér, a to kvalitatívnych ukazovateľov vody a prevádzkových parametrov jednotky. Tieto kategórie boli vyhodnotené v prvom kroku osobitne a následne boli posúdené ich vzájomné vzťahy.

5.6.1 Kvalita upravenej vody

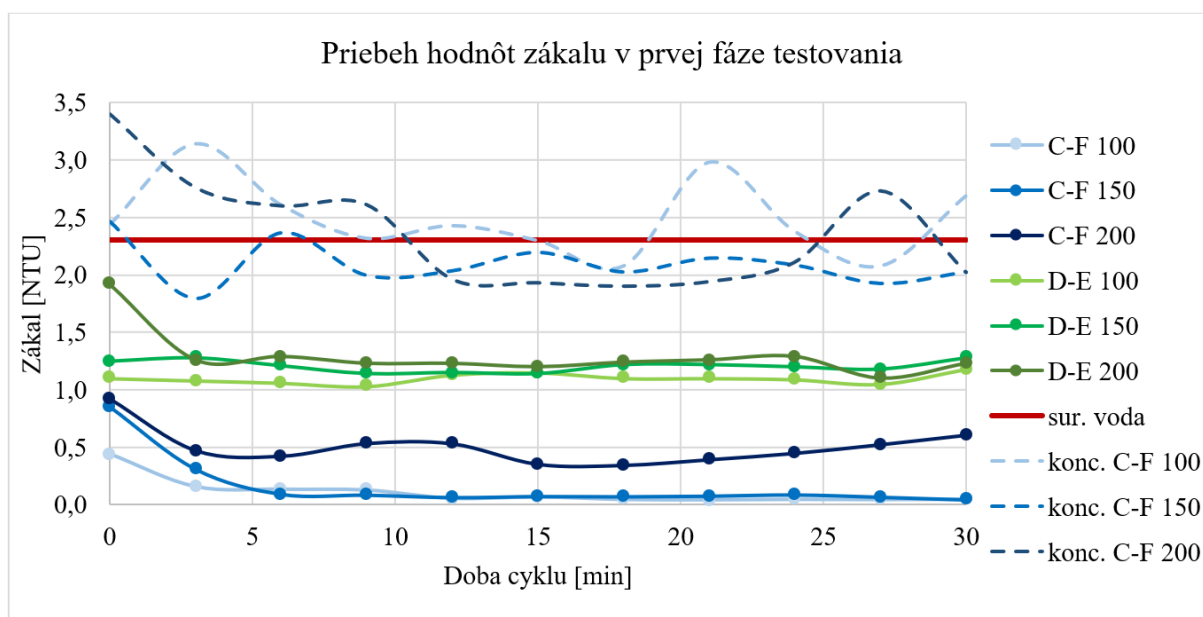
Pre prehľadnosť sú výsledky vyhodnocované v rámci jednotlivých fáz, v ktorých meranie prebiehalo. Filtračné cykly sú v grafoch značené skratkou C-F (cross-flow) a D-E (dead-end) a príslušné číslo značí hodnotu prietoku v l/h.

1. Fáza

Testy boli v prvej fáze prevedené na vode s najnižšou koncentráciou vstupného znečistenia. Modelová surová voda mala zákal priemerne 2,31 NTU, $CHSK_{Mn}$ 2,39 mg/l a tvrdosť 2,80 mmol/l. Vo všetkých sledovaných ukazovateľoch teda spĺňala hygienické limity pre pitnú vodu.

Hodnota tvrdosti sa prakticky vôbec nezmenila, došlo len k miernemu poklesu počas všetkých šiestich cyklov prvej fázy priemerne z 2,80 mmol/l na 2,70 mmol/l (zníženie o 3,5 %), ide o očakávaný výsledok. Hodnota $CHSK_{Mn}$ vykazuje dokonca mierne zhoršenie, ktoré sa v rámci prvej fázy priemerne zmenilo z hodnoty 2,39 mg/l na 2,57 mg/l. S ohľadom na nízke hodnoty a presnosť analytickej metódy je možné uvažovať s tým, že hodnota $CHSK_{Mn}$ sa po ultrafiltrácii nezmenila. Bolo síce očakávané mierne zníženie tejto hodnoty ale ani jej takmer žiadna zmena nie je prekvapivá.

Najvýraznejšie zmeny sú viditeľné v hodnotách zákalu, ktoré sú zobrazené na Obr. 5.23. V režime cross-flow pri prietoku 100 l/h bola zaznamenaná najvyššia účinnosť odstránenia zákalu a to 95,4 % priemerne za cyklus, pri prietoku 150 l/h to bolo 92,9 %. Prvé dva cykly cross-flow pri prietoku 100 l/h a 200 l/h vykazujú výrazne priaznivejšie výsledky ako tretí cross-flow cyklus s hodnotou prietoku 200 l/h, pri ktorom klesla účinnosť odstránenia zákalu na 78,3 %. Filtračné cykly realizované v režime dead-end odstránili priemerne len 48,1 % zákalu.



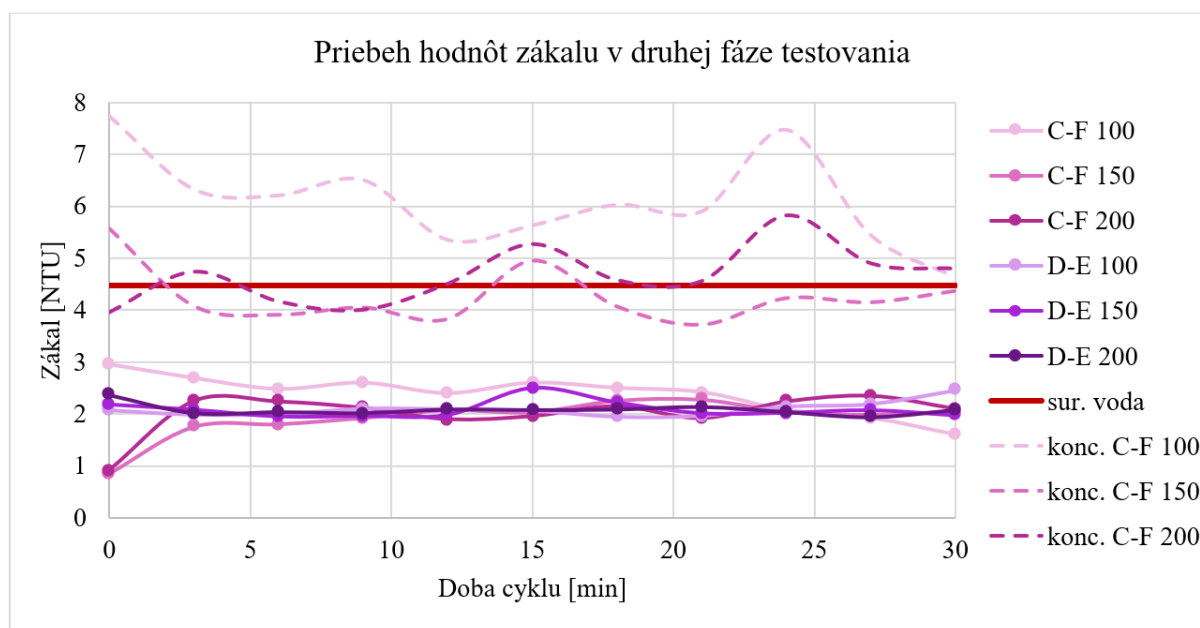
Obr. 5.23 Priebeh hodnôt zákalu v prvej fáze testovania

2. Fáza

Počas druhej fázy bola použitá modelová surová voda tesne pod hranicou limitov súčasnej legislatívy pre pitnú vodu. Jej zákal mal hodnotu 4,47 NTU, obsah organických látok daný ukazovateľom $CHSK_{Mn}$ 2,71 mg/l a jej tvrdosť bola 2,59 mmol/l.

Znovu očakávaným výsledkom je takmer žiadna zmena tvrdosti vody po prechode ultrafiltračnou membránou. V jednotlivých vzorkách hodnota mierne kolísala ale v priemere došlo v druhej fáze k zmene tvrdosti na 2,58 mmol/l, čo je zníženie o 0,01 mmol/l (0,3 %). Ide teda o zanedbateľnú hodnotu. Hodnoty $CHSK_{Mn}$ oscilovali okolo pôvodnej hodnoty surovej vody, priemerná výsledná hodnota je 2,68 mg/l, čo odpovedá poklesu o 1 %. Takže zmena v ukazovateli $CHSK_{Mn}$ je taktiež zanedbateľná.

Tak ako v prvej fáze, aj v druhej fáze sa hodnota zákalu menila zo všetkých sledovaných ukazovateľov najvýraznejšie a jej priebeh zobrazuje Obr. 5.24. Účinnosť odstránenia zákalu je značne nižšia ako v prvej fáze testovania so surovou vodou s nižším počiatočným zákalom ale je relatívne vyrovnaná počas všetkých šiestich cyklov. Filtračné cykly v režime cross-flow v priemere odstránili 52,0 % zákalu a v režime dead-end 54,1 %. Došlo teda k zlepšeniu kvality vody, ktorá mala po úprave zákal približne 2 NTU ale nepodarilo sa znížiť zákal pod limit 0,3 NTU, požadovaný novou európskou smernicou.



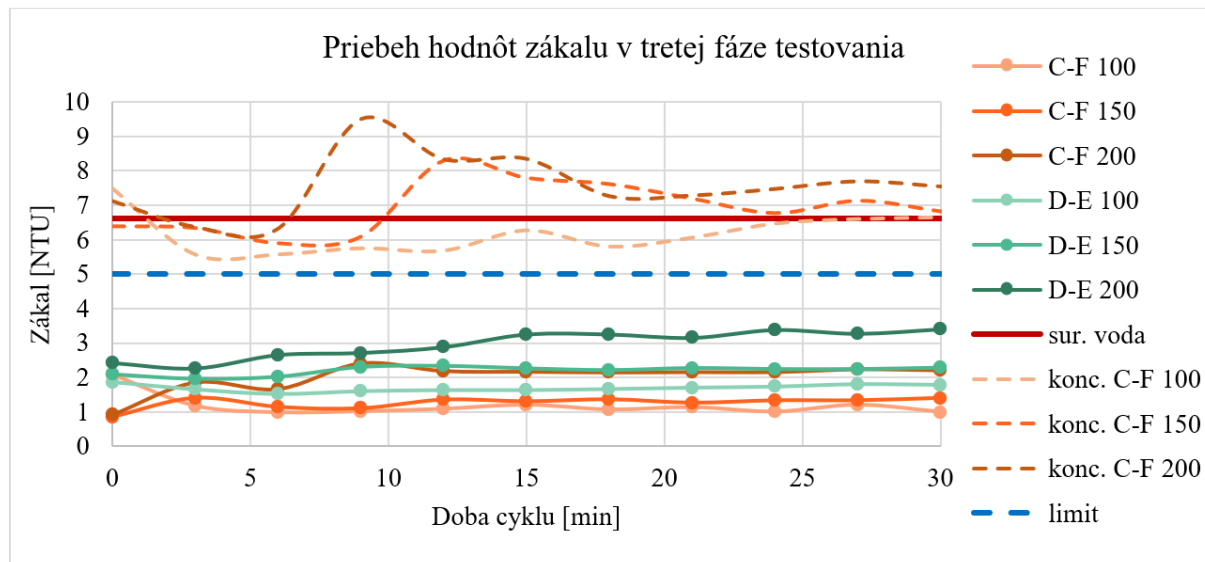
Obr. 5.24 Priebeh hodnôt zákalu v druhej fáze testovania

3. Fáza

Surová voda s najvyšším testovaným zákalom 6,63 NTU mala hodnotu $CHSK_{Mn}$ 3,16 mg/l a tvrdosti 2,49 mmol/l. V hodnotách zákalu a $CHSK_{Mn}$ sa nachádza nad hornou hranicou limitov pre pitnú vodu.

Tak ako v predchádzajúcich fázach, tvrdosť vody nebola ultrafiltráciou znížená. Dokonca vykazuje mierne zanedbateľné zvýšenie v priemere o 0,7 % na hodnotu 2,51 mmol/l. Ukazovateľ $CHSK_{Mn}$ dosahoval po úprave priemernú hodnotu 2,92 mg/l, čo odpovedá odstráneniu 7,6 % organického znečistenia. Týmto sa voda v tom ukazovateli dostala pod limit pitnej vody. Celkovo však ide stále o bezvýznamnú hodnotu odstránenia.

Čo sa týka zmeny zákalu, tak tiež sa vo všetkých prípadoch dostal pod limitné hodnoty 5 NTU pre pitnú vodu. Priemerný výsledný zákal v druhej fáze bol 1,93 NTU. Nepodarilo sa znížiť zákal pod prevádzkový limit 0,3 NTU novej európskej smernice. Režim cross-flow vykazuje priaznivejšie výsledky s účinnosťou odstránenia zákalu priemerne v troch cykloch 76,2 %, zatiaľ čo v režime dead-end to bolo priemerne 65,5 %.



Obr. 5.25 Priebeh hodnôt zákalu v tretej fáze testovania

Chronológia

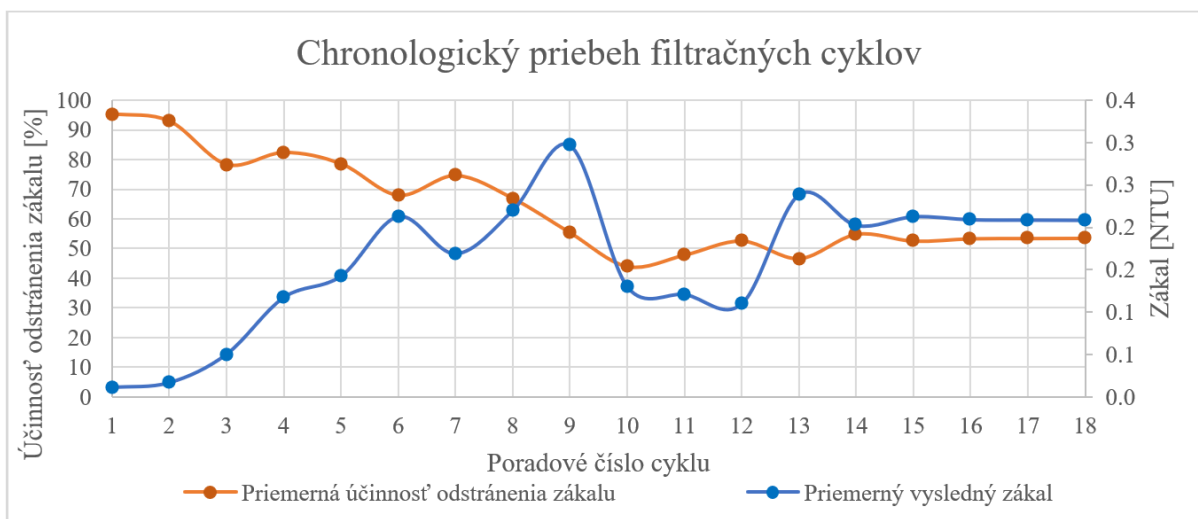
Aby bolo zahrnutých viac situácií, v ktorých bola pozorovaná prevádzka zariadenia, neboli všetky testy v jednotlivých fázach realizované v rovnakom chronologickom poradí. Z dôvodu výrazných rozdielov v účinnosti odstránenia zákalu je prínosné zoradiť priemernú účinnosť odstránenia zákalu počas filtračného cyklu a výslednú kvalitu vody (Obr. 5.27) chronologicky, podľa toho ako boli cykly testované v čase. Hodnoty tvrdosti a $CHSK_{Mn}$ sa výrazne nemenili a preto nie sú zahrnuté v chronologickom rozbere.

V nasledujúcej tabuľke je uvedené chronologické poradie filtračných cyklov tak, ako v skutočnosti prebiehali.

Tab. 5.12 Chronologické poradie filtračných cyklov

Poradie	Fáza	Režim	Prietok [l/h]
1.	1.	Cross-flow	100
2.	1.	Cross-flow	150
3.	1.	Cross-flow	200
4.	3.	Cross-flow	100
5.	3.	Cross-flow	150
6.	3.	Cross-flow	200
7.	3.	Dead-end	100
8.	3.	Dead-end	150
9.	3.	Dead-end	200

Poradie	Fáza	Režim	Prietok [l/h]
10.	1.	Dead-end	200
11.	1.	Dead-end	150
12.	1.	Dead-end	100
13.	2.	Cross-flow	100
14.	2.	Cross-flow	150
15.	2.	Cross-flow	200
16.	2.	Dead-end	100
17.	2.	Dead-end	150
18.	2.	Dead-end	200

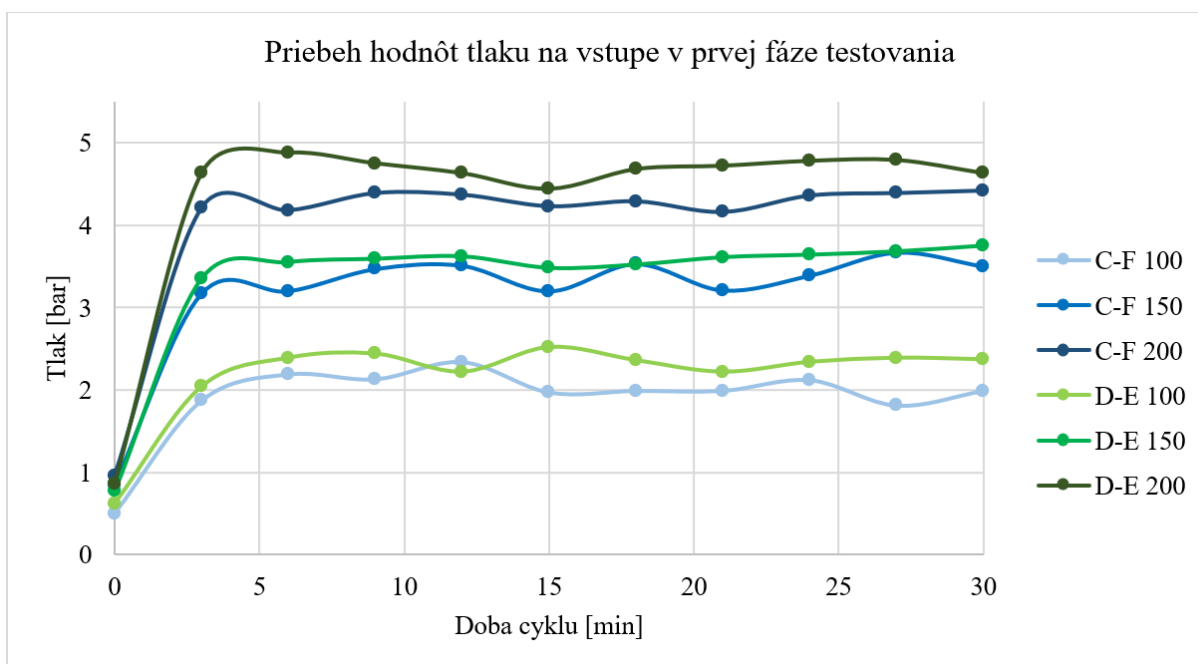


Obr. 5.26 Chronologický priebeh filtračných cyklov

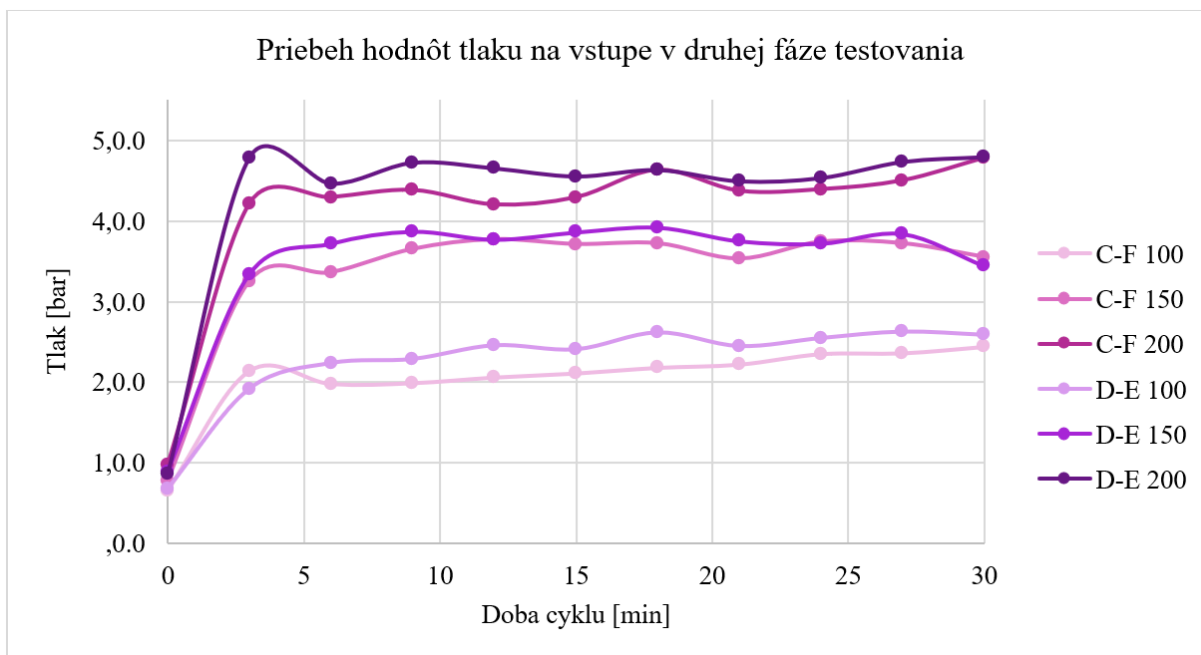
Na základe tohto usporiadania je viditeľný vplyv doby prevádzky na účinnosť zariadenia pri odstránení zákalu. Hodnoty výsledného zákalu upravenej vody sú síce kolísavé ale je zreteľné niekoľkonásobné zhoršenie kvality výslednej vody z hodnôt pod 0,1 NTU na približne 2 NTU. Ešte jasnejší je pokles účinnosti, ktorá v priebehu testov klesla o viac ako 50 %. Možné odôvodnenia tohto javu sú rozvedené v podkapitole 6.6.3 Celkové posúdenie.

5.6.2 Prevádzkové parametre zariadenia

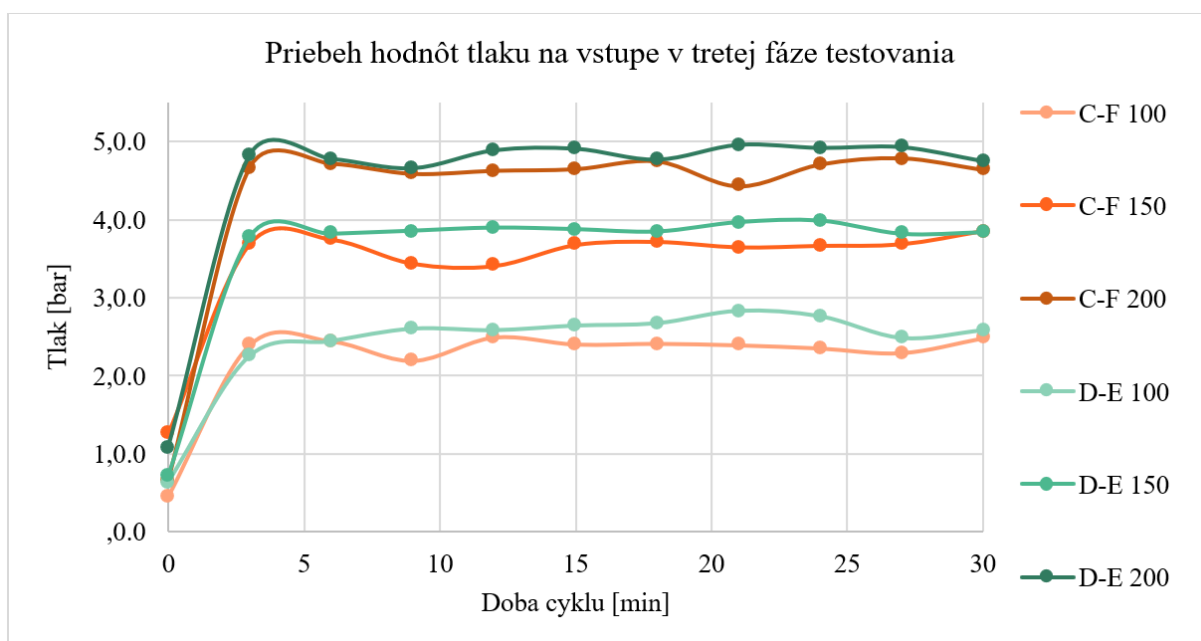
Hlavným sledovaným prevádzkovým parametrom bol tlak na vstupe do membrány. Z dôvodu poruchy systému automatického ukladania hodnôt tlaku na USB disk riadiacou jednotkou bola hodnota tlaku zaznamenávaná ručne počas filtračného cyklu každé 3 minúty, obdobne ako hodnoty zákalu. Zostavené boli tri grafy, ktoré znázorňujú priebeh tlaku na vstupe do membrány pre každú fázu merania.



Obr. 5.27 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v prvej fáze testovania



Obr. 5.28 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v druhej fáze testovania



Obr. 5.29 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v druhej fáze testovania

Zo zostavených grafov sa dá vyčítať, že priebeh tlakových pomerov na vstupe do membrány má obdobný priebeh v každej fáze merania. Faktorom, ktorý má na ich hodnotu najvýraznejší vplyv je nastavený prietok. Pri zvyšovaní prietoku sa zároveň zvyšuje tlak na membráne, čo je očakávaný a logický jav. Zaujímavé je, že typ režimu cross-flow alebo dead-end výrazne tlak neovplyvňuje. Režim dead-end sa vyznačuje mierne vyššími hodnotami ale rozdiel je minimálny. Taktiež miera znečistenia na vstupe nie je v pozorovaných hodnotách kľúčovým faktorom.

Pri zvýšení znečistenia zo zákalu 2,31 NTU v prvej fáze na 4,47 NTU v druhej fáze išlo takmer o dvojnásobnú hodnotu (nárast 93,5 %). Hodnoty tlaku sa však priemerne zväčšili len o 3,8 %.

O niečo väčšia zmena nastala pri tretej fáze keď bol nárast hodnoty zákalu 48,3 % a tlak vzrástol o 5,2 %. Ide však stále o nevýznamnú zmenu.

Pri porovnaní režimov cross-flow a dead-end je potrebné brať do úvahy, že režim cross-flow bol posudzovaný len pri 30 % otvorení uzáveru pre koncentrát, takže existuje ešte mnoho ďalších pomerov prietoku, pri ktorých by zariadenie mohlo fungovať výrazne odlišne. Pri pozorovanom otvorení bol v režime dead-end zaznamenaný o 7,3 % vyšší tlak ako v režime cross-flow.

Najvýraznejší je nárast tlakových pomerov pri zmene prietoku zo 100 l/h na 150 l/h (50 % zvýšenie prietoku), čomu odpovedá zvýšenie tlaku na vstupe do membránového modulu o 56,7 %. Priemerná hodnota tlaku pri prietoku 100 l/h bola 2,2 barov (0,22 MPa) a pri prietoku 150 l/h 3,4 barov (0,34 MPa). Pri 25 % prírastku hodnoty prietoku zo 150 l/h na 200 l/h tlak narástol o 25,7 %. Priemerná hodnota vstupného tlaku pri prietoku 200 l/h bola 4,3 barov (0,43 MPa).

5.6.3 Celkové posúdenie

Na základe prevedených testov je možné skonštatovať niekoľko poznatkov o posudzovanej ultrafiltračnej jednotke. Na hodnotu vstupného tlaku má najväčší vplyv prietok, pri ktorom je zariadenie prevádzkované, hodnota zákalu surovej vody a voľba režimu cross-flow alebo dead-end ovplyvňujú tlakové pomery minimálne. V parametri tlaku nebol pozorovaný výrazný jav zvyšovania tlaku na základe doby prevádzky, čiže nevratného zanášania membrány.

Čo sa týka kvality upravenej vody, tak podľa očakávaní nedošlo k výrazným zmenám v ukazovateli $CHSK_{Mn}$ a takmer žiadnym zmenám v tvrdosti vody. Hodnotu zákalu sa úspešne podarilo značne znížiť vo všetkých pozorovaných cykloch. Zákal upravenej vody sa vo všetkých prípadoch nachádzal v limitoch daných vyhláškou o hygienických požiadavkách pre pitnú vodu (<5 NTU). V priebehu testov však došlo k výraznému poklesu účinnosti procesu úpravy o 50 % a výsledná voda parametrami neodpovedá očakávaným hodnotám pre vodu, ktorá prešla ultrafiltráciou. Predpokladom bolo, že ultrafiltrácia sa osvedčí ako vhodný spôsob úpravy vody pre dodržanie sprísnených hygienických limitov novej európskej vyhlášky, z čoho najväčšie sprísnenie postihuje práve požiadavky na zákal, ktorý musí byť v 95 % prevádzkových rozborov pod hodnotou 0,3 NTU a v žiadnom nesmie prekročiť 1 NTU. To sa nepodarilo dosiahnuť, výsledný zákal upravenej vody bol priemerne 2 NTU. Kvalita upravenej vody sa ale v priebehu testov v hodnote zákalu výrazne chronologicky zhoršovala. Tento jav môže mať niekoľko vysvetlení:

- **Ultrafiltrácia nie je vhodná pre úpravu surovej povrchovej vody** – Je známe, že membránové procesy sú vhodné pre úpravu vody vysokej kvality alebo doúpravu vody, ktorá už prešla predradenými procesmi úpravy. Nie je vhodná pre vysoké koncentrácie znečistenia, ktoré sa bežne vyskytujú vo väčšine povrchových zdrojov. Tento vplyv mal byť odstránený značným nariadením použitej surovej povrchovej vody pitnou vodou z vodovodu. Je možné, že ani zriadenie nebolo dostatočné pre úpravu vlastností surovej vody a preto zariadenie nepracovalo podľa očakávaní.
- **Charakter surovej vody sa v priebehu testov zmenil** – Surová voda z rieky Svratky bola odobratá a následne skladovaná v laboratóriu. Testovanie prebiehalo niekoľko dní, počas ktorých mohlo dôjsť k spusteniu chemických, biologických a fyzikálnych procesov v surovej vode (napr. rozpad znečistenia na menšie častice, mikrobiologický nárast). To mohlo spôsobiť rozdielny charakter odstraňovaného znečistenia v priebehu trvania testov.

- **Čistenie membránového modulu je nevhodne navrhnuté** – Membránové moduly by mali byť čistené dvoma druhmi čistiacich roztokov – kyslým pre odstránenie anorganického znečistenia a zásaditým pre odstránenie organického znečistenia. Dodávateľ testovanej jednotky uvádza v návode inštrukcie pre chemické čistenie len kyselinou citrónovou, čo je relatívne slabá kyselina. Zároveň chýba pokyn k čisteniu zariadenia zásaditým roztokom. Môže teda dochádzať k hromadeniu znečistenia v membráne, ktoré nie je dostatočne pri chemickom praní odstraňované a vyplavuje sa do filtrátu.
- **Zapojenie membránového modulu je nevhodne navrhnuté** – Ďalšou možnosťou prečo dochádza k poklesu kvality upravenej vody je spôsob zapojenia jednotky. Navrhnutá a realizovaná úprava sústavy potrubí s inštalovanými uzávermi pre zjednodušenie ovládania jednotlivých režimov je relatívne komplikovaná a spleť. Pri uzatvorení niektorých uzáverov vznikajú slepé úseky, kde sa vzniká priestor pre hromadenie znečistenej vody, či už surovej alebo pracej. Táto voda sa následne pri zmene režimu uvoľní. Slepé úseky tvoria možné miesta akumulácie znečistenia, ktoré sa postupne môže uvoľňovať do upravenej vody.
- **Pri testovaní došlo k poškodeniu membrány** – Jednou z možností je, že membrána bola počas testovania mechanicky poškodená. Ak by došlo k pretrhnutiu membrány, dochádzalo by postupne k prepusteniu väčšieho a väčšieho znečistenia so zväčšovaním praskliny. Pred mechanickým poškodením by membrána mala byť chránená dodržaním požadovanej kvality surovej vody a maximálnym tlakom. Výrobca membrány udáva na surovú vodu požiadavku maximálneho zákalu 15 NTU, čo bolo dodržané. Zároveň sací kôš čerpadla slúžil ako zábrana proti prieniku pevných látok väčších rozmerov. Dodávateľ uvádza maximálny vstupný tlak na membráne 10 barov (1 MPa), čo bolo taktiež dodržané. Väčšina výrobcov ultrafiltračných membrán s podobnými charakteristikami a materiálom ale uvádza najvyšší vstupný tlak 3 bary (0,3 MPa). Ak by platila táto hodnota, znamenalo by to, že havarijná hodnota tlaku bola prekročená už počas druhého testovacieho cyklu, ktorého priemerná hodnota bola 3,2 barov (0,32 MPa). To by odpovedalo náhlemu zhoršeniu kvality filtrátu. Zvyšných 16 testovacích cyklov by v tom prípade bolo bezpredmetných. Priemerná hodnota zákalu filtrátu počas prvých dvoch cyklov bola 0,14 NTU, čo odpovedá očakávanej kvalite výslednej vody, ktorá zároveň spĺňa požiadavky Európskej Smernice 2020/2184. Tejto teórii však odporuje fakt, že nebola zaznamenaná žiadna výrazná tlaková zmena, ktorá by mala poškodenie membrány sprevádzať. Zároveň pri opakovanom filtrovaní už prefiltrovanej vody dochádzalo k ďalšiemu zníženiu zákalu približne v rovnakom pomere.

Pre vyšetrenie všetkých vyššie uvedených možností, je potrebné naďalej pokračovať v testovaní zariadenia v iných situáciách a za rozdielnych podmienok. Poznatkami, ktoré vyplývajú z tohto realizovaného merania je, že ultrafiltrácia nie je vhodný spôsob pre úpravu surovej povrchovej vody ako jediný stupeň úpravy ale aj napriek výsledkom, ktoré nie sú dostačujúce pre dodržanie požiadaviek novej Európskej Smernice Rady 2020/2184 bolo dosiahnuté pomocou ultrafiltračnej jednotky značné zlepšenie hodnôt zákalu a upravenej voda v sledovaných ukazovateľoch zákal, $CHSK_{Mn}$, tvrdosť a pH spĺňa limity pre pitnú vodu dané v Českej republike Vyhláškou č.252/2004 Sb. (Vyhláška, ktorou sa stanoví hygienické požiadavky na pitnú a teplou vodu a četnosť a rozsah kontroly pitnej vody) a v Slovenskej republike Vyhláškou č. 247/2017 Z. z. (Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o kvalite pitnej vody, kontrole kvality pitnej vody, programe monitorovania a manažmente rizík pri zásobovaní pitnou vodou).

6 ZÁVER

Membránové procesy sa radia medzi tzv. moderné technológie pre úpravu vody a v prvej kapitole je potreba takýchto technológií uvedená do kontextu novej Európskej Smernice Rady 2020/2184 pre pitnú vodu. Následne je zvyšok teoretickej časti venovaný poznatkom o membránových procesoch a možnostiach ich využitia v rámci vodárenstva, s konkrétnymi príkladmi na území Česka a Slovenska.

Praktická časť tejto diplomovej práce pozostávala z realizácie testov na ultrafiltračnej jednotke. Pred samotnými testami boli navrhnuté úpravy na stávajúcom zariadení pre zlepšenie prevádzky a umožnenie jednoduchšieho ovládania jednotlivých režimov. Pôvodne bola jednotka schopná fungovať len jednosmerne v režime filtrácie a v prípade potreby iného zapojenia bolo nutné potrubia rozmontovať a zapojiť v inom zložení. Pridaním niekoľkých potrubných vedení, ich vzájomným prepojením a inštaláciou uzáverov bolo umožnené kombináciou polôh uzáverov prevádzkovať jednotku v niekoľkých režimoch, bez potreby zásahu do zapojenia. Režimy, ktoré po tejto úprave jednotka umožňuje je filtrácia, mechanické pranie spätným oplachom, chemické pranie pracím roztokom a oplach po chemickom praní.

Na takto optimalizovanom zariadení bola v rámci testov upravovaná povrchová voda z rieky Svratky nariadená pitnou vodou z vodovodného systému v troch odlišných koncentráciách. Pre určenie pomeru riedenia bol smerodajným ukazovateľom zákal. Podľa neho boli pripravené tri druhy modelovej surovej vody s hodnotami zákalu 2,31 NTU, 4,47 NTU a 6,63 NTU. Každá z týchto troch typov vôd s rôznou koncentráciou znečistenia bola upravovaná pomocou ultrafiltračnej jednotky v šiestich 30 minútových cykloch, pri troch rôznych hodnotách prietoku (100 l/h, 150 l/h, 200 l/h), v režime cross-flow a dead-end. Celkovo bolo teda pozorovaných 18 filtračných cyklov.

Počas filtračných cyklov bola každé tri minúty odobraná vzorka pre okamžité určenie hodnoty zákalu prenosným zákalomerom a tiež odobraná zlievaná vzorka pre analýzu hodnoty $CHSK_{Mn}$ a tvrdosti pre každý cyklus. Následne boli vzorky analyzované vo fakultnom chemickom laboratóriu. Každé tri minúty bola zaznamenaná aj okamžitá hodnota tlaku na vstupe do membránového modulu.

V ukazovateľoch $CHSK_{Mn}$ a tvrdosť došlo len k zanedbateľným rozdielom v hodnotách pre surovú a upravenú vodu. V ukazovateli zákal došlo k výraznému zlepšeniu s mierou odstránenia v rozsahu 48,1 – 95,4 %. Všetky vzorky upravenej vody v sledovaných ukazovateľoch spĺňali limity pre pitnú vodu podľa súčasnej legislatívy. V priebehu testov bol však pozorovaný rázny pokles v kvalite upravenej vody a len vo dvoch cykloch sa podarilo dosiahnuť hodnoty zákalu aké požaduje Európska Smernica Rady 2020/2184 (<0,3 NTU). Možné dôvody tohto javu sú rozvedené v kapitole 6.6.3 Celkové posúdenie.

Cieľom tejto diplomovej práce bolo otestovať jednotku pre membránovú filtráciu v laboratórnych podmienkach a vyhodnotiť výsledky pokusov, čo bolo úspešne splnené. Sice namerané hodnoty nevykazujú vo všetkých ukazovateľoch očakávané výsledky a je potrebné naďalej zariadenie hodnotiť a optimalizovať, realizované testy poskytli cenné poznatky pre možnosti ďalšieho využitia ultrafiltračného zariadenia a môžu slúžiť ako podklad pre nadväzujúci výskum.

7 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] History of water disinfection. Lenntech [online]. Holandsko: Lenntech B.V., 2022 © [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/processes/disinfection/history/history-drinking-water-treatment.htm>
- [2] Co obsahuje a v čem je odlišná Vyhláška č.252/2004 Sb. Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje [online]. Ostrava: Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje, 2004 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.khsova.cz/obcanum/detail/31?lang=en%3F1595550380>
- [3] SLOVENSKO. Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o kvalite pitnej vody, kontrole kvality pitnej vody, programe monitorovania a manažmente rizík pri zásobovaní pitnou vodou. In: Vyhláška č. 247/2017 Z. z.
- [4] ČESKO. Vyhláška, ktorou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnosť a rozsah kontroly pitnej vody. In: Vyhláška č. 252/2004 Sb.
- [5] KOŽÍŠEK, František. S novou evropskou směrnicí se opět změnila i česká legislativa pitnej vody. Hygiena. 2021, 66(1), 3. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.21101/hygiena/a1777>
- [6] VALOVIČOVÁ, Zuzana a Klára PAGANOVÁ. Aké zmeny čakajú dodávateľov pitnej vody po transpozícii novej európskej smernice pre pitnú vodu. Bratislava: Úrad verejného zdravotníctva, 2022. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [7] ILAVSKÝ, Ján a Danko BARLOKOVÁ. Všeobecný pohľad na nové ukazovatele pre pitnú vodu. Bratislava: Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, SvF STU, 2022. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [8] JÁSEK, Jaroslav a kol. Vodárenství v Čechách, na Moravě a ve Slezsku. 1. Praha: Milpo Média, 2000. ISBN 80-86098-15-X.
- [9] História úpravy vody. SAVE [online]. Bratislava: Slovenská asociácia vodárenských expertov, 2018, 9.11.2018 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://savesk.sk/wp-content/uploads/2019/02/Historia-upravy-vody-final-1.pdf>
- [10] DRBOHLAV, Josef, Lukáš PÍSEK a Jiří KRATĚNA. Modernizace úpravy vody: Zodpovedne řízený proces předprojektové a projektové přípravy. Bratislava: TYPOCON spol. s r.o., 2022. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [11] DRDA, Milan a Dita FOJTÍKOVÁ. Technologický a ekonomický pohľad na současné a nově používané technologie úpravy vody. Bratislava: TYPOCON spol. s r.o., 2022. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [12] ZELINOVÁ, Kristína. Vyhodnocení účinnosti poloprovodní ultrafiltrační jednotky. Brno, 2021. 58 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
- [13] MAJUMDAR, Ria, Umesh MISHRA a Biswanath BHUNIA. Advanced Functional Membranes for Microfiltration and Ultrafiltration. Materials Research Foundations. 2022, (120), 43-71. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.21741/9781644901816-2>
- [14] KARABELAS, Anastasios a Konstantinos PLAKAS. Membrane Treatment of Potable Water for Pesticides Removal. In: Herbicides: Theory and Applications. 1. Londýn: IntechOpen, 2011. ISBN 978-953-307-975-2.

- [15] WANG, Lawrence K., Jiaping Paul CHEN, Yung-Tse HUNG a Nazih K. SHAMMAS, ed. Membrane and Desalination Technologies: A Handbook of Environmental Engineering. Totowa, NJ, USA: Humana Press, 2011. ISBN 978-1-58829-940-6.
- [16] ŠKORVAN, Ondřej. Tlakové membránové procesy ve vodním hospodářství. In: Asio.cz [online]. 2013 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/264.tlakove-membranove-procesy-ve-vodnim-hospodarstvi>
- [17] HRUŠKOVÁ, Petra a Kryštof HNOJNA. Výsledky ze zkušebního provozu první keramické membránové úpravny vody na Slovensku. Vodní hospodářství. 2021, 71(10), 13-16.
- [18] KÉDL, Martin. Membránové technologie v průmyslu. Praha, 2020. Bakalárska práca. ČVUT v Praze.
- [19] GALÍK, Matúš a Janka SEDLÁKOVÁ. Aktuálne spôsoby úpravy vody v podmienkach PVPS, a. s. Poprad. SAVE [online]. Bratislava: Slovenská asociácia vodárenských expertov, 2020 [cit. 2022-08-23]. Dostupné z: https://savesk.sk/wp-content/uploads/2020/09/Aktuálne-sposoby-upravy-vody-v-PVPS-SAVE_22.9.2020.pdf
- [20] FENDRYCH, Adam, Marta URBÁNKOVÁ, Tomáš LÁSKA a Michal DLASK. 2 roky provozu nanofiltrace na ÚV Domašov – provozní zkušenosti. In: VODA ZLÍN 2022. Olomouc: Moravská vodárenská, 2020, s. 75 - 80. ISBN 978-80-905716-9-3.
- [21] DOLEJŠ, Petr, Nataša KALOUSKOVÁ a Zuzana NOGOVÁ. Využití membránových procesů při úpravě pitné vody. Moravská Vodárenská, a.s. [online]. Olomouc: Moravská vodárenská, 2006 [cit. 2022-08-23]. Dostupné z: <https://www.smv.cz/res/archive/014/001646.pdf>
- [22] ZAKHAR, Ronald, Jakub JURÍK, Michal GATYÁŠ a Marián DLUHÝ. Využitie reverznej osmózy pri odstraňovaní síranov z podzemnej vody VZ Podbranč. Bratislava: TYPOCON spol. s r.o., 2022. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [23] Dead End Filtration Vs Cross Flow Filtration [online]. Tamil Nadu, India: Theway Scholar, 2020 [cit. 2022-09-16]. Dostupné z: <https://www.thewaymembranes.com/post/dead-end-filtration-vs-cross-flow-filtration>
- [24] Comparison Between Dead End and Cross Flow Filtration [online]. Huizhou: Hongtek Filtration Co., 2020 [cit. 2022-09-16]. Dostupné z: <https://www.hongtekfiltration.com/news/comparison-of-dead-end-and-cross-flow-filtration.html>
- [25] SCOTT, K. Handbook of Industrial Membranes: INTRODUCTION TO MEMBRANE SEPARATIONS. Elsevier Science, 1995. ISBN 9781856172332.
- [26] MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. Chemické inženýrství II. Praha, 1993. Vysoká škola chemicko-technologická. ISBN 80-7080-170-0
- [27] DT (Disk Tubular) Membrane Technology [online]. Schwabmünchen: Memsys, 2017 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.memsys.eu/technology/dt-membrane-technology.html>
- [28] HÁDKOVÁ, Kristýna. Energie z biomasy XIV: Membránové moduly a jejich využití pro úpravu bioplynu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. ISBN 978-80-214-4775-2.
- [29] Koch Membrane Systems Introduces Inducor™ Tubular Modules [online]. Wilmington: WaterOnline, 2006 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.wateronline.com/doc/koch-membrane-systems-introduces-inducor-tubu-0001>

- [29] HyMem tubular membrane [online]. Eningen, Nemecko: The MBR Site, 2020 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.thembrsite.com/directories/membrane-products/hymem-tubular-membranes/>
- [30] WANG, Lawrence K., Jiaping Paul CHEN, Yung-Tse HUNG a Nazih K. SHAMMAS, ed. Membrane and Desalination Technologies: A Handbook of Enviromental Engineering. Totowa, NJ, USA: Humana Press, 2011. ISBN 978-1-58829-940-6.
- [31] Specifikace - Ultrafiltrační membrána UFXS60, WaterLife s.r.o.
- [32] ASIO TECH SPOL. S R. O. Návod k použití: Laboratorní jednotka UF. Brno, 2021.
- [33] Řeka Svratka [online]. mapy.cz, 2021 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?q=Svratka&source=osm&id=1017106942&ds=1&x=16.5503139&y=49.2179490&z=16&base=ophoto>
- [34] MARTINEC, Marek. Interpretace parametrů podzemních a povrchových vod. Praha, 2016. Dostupné také z: https://uchop.vscht.cz/files/uzel/0037768/0004~88wrSS0qKEotSUxOVShILerMTS0pOrpeoSA_pSo1N_w2uQMhUQgr6woOSO_7PBeILcsPwUA.pdf?redirected
- [35] TŮMOVÁ, Jitka. Hydromorfologický průzkum a hodnocení Svratky v severozápadním sektoru města Brna. Brno, 2011. Bakalárska práca. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [36] WORLD HEALTH ORGANIZATION, et al. Water quality and health-review of turbidity: information for regulators and water suppliers. 2017.
- [37] MINNESOTA POLLUTION CONTROL AGENCY. Turbidity: Description, Impact on Water Quality, Sources, Measures: General overview. Minnesota, 2008.
- [38] TU5200 Laboratory Laser Turbidimeter with RFID, EPA Version [online]. Hach, ©2022 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.hach.com/p-tu5200-laboratory-laser-turbidimeter-with-rfid-epa-version/LPV442.99.03012>
- [39] HLAVÍNEK, Petr a Jaromír ŘÍHA. Jakost vody v povodí: Studijní opory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.
- [40] MALÁ, Jitka. Chemie a technologie vody: Chemie přírodních a pitných vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.
- [41] BURIANOVÁ, Tereza. Stanovení organických látek ve vodě. Brno, 2015. Bakalárska práca. Mendelova univerzita v Brne.
- [42] HESSLER, Jack R. a Noel D.M. LEHNER. Planning and Designing Research Animal Facilities. Elsevier, 2009. ISBN 978-0-12-369517-8.
- [43] HLAVATÁ, Daniela. Studium syntézy ethylesteru kyseliny mléčné z jejích solí. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [44] GOOSEN, Mattheus FA; SABLANI, S. S.; ROQUE-MALHERBE, R. Membrane fouling: recent strategies and methodologies for its minimization. Handbook of membrane separations: Chemical, pharmaceuticals, food and biotechnological applications. CRC press, Taylor and Francis, 2008, 325-341.
- [45] SONG, Lianfa; TAY, Kwee Guan. Advanced membrane fouling characterization in full-scale reverse osmosis processes. In: Membrane and desalination technologies. Humana Press, Totowa, NJ, 2011. str. 101-134.

- [46] ALSAWAFTAH, Nour, Waad ABUWATFA, Naif DARWISH a Ghaleb HUSSEINI. A Comprehensive Review on Membrane Fouling: Mathematical Modelling, Prediction, Diagnosis, and Mitigation. *Water*. 2021, 13(9). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/w13091327>
- [47] KIM, Caroline Y., Xiaobo ZHU, Moshe HERZBERG, Sharon WALKER a David JASSBY. Impact of Physical and Chemical Cleaning Agents on Specific Biofilm Components and the Implications for Membrane Biofouling Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018, 57(9). Dostupné z: doi:[10.1021/acs.iecr.7b05156](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b05156)
- [48] WANG, Zhiwei, Jinxing MA, Chuyang Y. TANG, Katsuki KIMURA, Qiaoying WANG a Xiaomeng HAN. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*. 2014, (468), 276-307. ISSN 0376-7388. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.060>.
- [49] AL-GHAMDI, Mohanned A., Abdulsalam ALHADIDI a Noredine GHAF FOUR. Membrane backwash cleaning using CO₂ nucleation. *Water Research*. 2019, (165). ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114985>.
- [50] ANG, Wui Seng, Ngai Yin YIP, Alberto TIRAFERRI a Menachem ELIMELECH. Chemical cleaning of RO membranes fouled by wastewater effluent: Achieving higher efficiency with dual-step cleaning. *Journal of Membrane Science*. 2011, (382). ISSN 0376-7388. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.07.047>.
- [51] PETERS, Thomas. Membrane Technology for Water Treatment. *Chemical Engineering Technology*. 2010, 33(8), 1233-1240. Dostupné z: doi:[10.1002/ceat.201000139](https://doi.org/10.1002/ceat.201000139)
- [52] Úpravna Březová má další unikátní technologii Zdroj: <https://pr.denik.cz/doporuujeme/upravna-brezova-ma-dalsi-unikatni-technologie.html> [online]. Praha: © VL-TAVA LABE MEDIA, 2019 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://pr.denik.cz/doporuujeme/upravna-brezova-ma-dalsi-unikatni-technologie.html>
- [53] Projekt ultrafiltrace na úpravně Březová [online]. Karlovy Vary: Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, 2016 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.vsoz.cz/images/novinky/Dvojlist%20Ultrafiltrace%202016.pdf>
- [54] FENDRYCH, Adam, Marta URBÁNKOVÁ, Tomáš LÁSKA a Michal DLASK. 2 roky provozu nanofiltrace na ÚV Domašov: Provozní zkušenosti. In: VODA ZLÍN 2022. Olomouc: Moravská vodárenská, a.s., 2022, s. 75 - 80. ISBN 978-80-905716-9-3.
- [55] ĎURČEK, Pavol. ÚV Jasenie, odstraňovanie arzénu z pitnej vody ultrafiltráciou. In: Nové trendy v úprave vody a v systémoch zásobovania pitnou vodou. Bratislava: TYPOCON, 2022, s. 152 - 161. ISBN 978-80-570-3877-1.
- [56] ZAKHAR, Ronald, Jakub JURÍK, Michal GATYÁŠ a Marián DLUHÝ. Využitie reverznej osmózy pri dodstraňovaní síranov z podzemnej vody VZ Podbranč. In: Nové trendy v úprave vody a v systémoch zásobovania pitnou vodou. Bratislava: TYPOCON, 2022, s. 162 - 169. ISBN 978-80-570-3877-1.

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1 Rozdiely v hygienických požiadavkách na pitnú vodu pre SR a ČR [3][4]	6
Tab. 2.2 Minimálna frekvencia analýzy zákalu podľa ES 2020/2184 [7].....	6
Tab. 2.3 Porovnanie limitov novej smernice s predchádzajúcou (98/83/ES) a s aktuálnymi vyhláškami [3][4][7]	7
Tab. 3.1 Zaradenie membránových procesov na základe hnacej sily [18].....	14
Tab. 3.2 Vzťah medzi MWCO a veľkosťou pórov membrány [16]	15
Tab. 3.3 Porovnanie základných vlastností tlakových membránových procesov [12]	17
Tab. 3.4 Odstraňovanie látok z vody membránovými procesmi [21]	17
Tab. 4.1 ÚV Domašov nad Bystřicí - vybrané parametre surovej vody 2020 - 2021 [54]	34
Tab. 4.2 ÚV Domašov nad Bystřicí - Kvalita vody po dvojstupňovej úprave [54].....	35
Tab. 4.3 ÚV Domašov nad Bystřicí - prevádzkové výsledky nanofiltračie 2020 - 2021 [54].	36
Tab. 4.4 ÚV Jasenie - hodnoty namerané počas pilotných testov [55]	37
Tab. 4.5 ÚV Jasenie - hodnoty namerané počas skúšobnej prevádzky [55]	38
Tab. 4.6 VZ Podbranč - vybrané ukazovatele surovej vody [56]	39
Tab. 5.1 Špecifikácie ultrafiltračného modulu UFXS50 [31]	43
Tab. 5.2 Plán merania.....	60
Tab. 5.3 Namerané hodnoty zákalu v prvej fáze testovania.....	62
Tab. 5.4 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v prvej fáze testovania	62
Tab. 5.5 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v prvej fáze testovania	62
Tab. 5.6 Namerané hodnoty zákalu v druhej fáze testovania.....	63
Tab. 5.7 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v druhej fáze testovania	63
Tab. 5.8 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v druhej fáze testovania	63
Tab. 5.9 Namerané hodnoty zákalu v tretej fáze testovania.....	64
Tab. 5.10 Namerané hodnoty transmembránového tlaku v tretej fáze testovania	64
Tab. 5.11 Hodnoty sledovaných analytických ukazovateľov v tretej fáze testovania	64
Tab. 5.12 Chronologické poradie filtračných cyklov	67

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 3.1 Schéma koncentračného toku osmózy	13
Obr. 3.2 Princíp odstraňovania iónov pomocou membrány a.) Záporne nabitá membrána, b.) Kladne nabitá membrána.....	13
Obr. 3.3 Princíp destilácie vody pomocou paroprepustnej membrány	13
Obr. 3.4 Princíp tlakových membránových procesov	14
Obr. 3.5 Schéma tlakového membránového procesu	15
Obr. 3.6 Schéma dead-end filtrácie [12]	18
Obr. 3.7 Závislosť hrúbky vrstvy usadenín, fluxu na čase pri dead-end filtrácii [23]	18
Obr. 3.8 Schéma cross-flow filtrácie [12]	19
Obr. 3.9 Závislosť hrúbky vrstvy usadenín, fluxu na čase pri cross-flow filtrácii [23]	19
Obr. 3.10.a DT modul [27].....	20
Obr. 3.10.b CD modul [18]	20
Obr. 3.11 Vinutý membránový modul [18].....	21
Obr. 3.12 Trubkový membránový modul [29].....	21
Obr. 3.13 Kapilárne membránové moduly [29]	22
Obr. 3.14.a Modul s dutými vláknami [18].....	22
Obr. 3.14.a Modul s dutými vláknami v tvare U.....	22
Obr. 3.15 Smer prúdenia v moduloch a.) Inside-Out flow, b.) Outside-In flow [12]	23
Obr. 3.16 Rôzne typy štruktúry membrán [30]	24
Obr. 3.17 Základné typy zanášania membrány [46]	25
Obr. 3.18 Fyzické čistenie membrány a.) Oplach v smere prúdenia, b.) Oplach spätným praním [47].....	28
Obr. 3.19 Fyzikálne čistenie membrány pomocou CO ₂ [49]	29
Obr. 3.20 Závislosť účinnosti čistenia membrány na frekvencii ultrazvuku [48].....	29
Obr. 3.21 Zmena fluxu v priebehu životnosti membrány [44].....	31
Obr. 4.1 Schéma úpravne vody Březová [52]	33
Obr. 4.2 Membránové moduly na ÚV Březová [53].....	34
Obr. 4.3 Detail kapilárnej membrány [53]	34

Obr. 4.4 VZ Podbranč - obsah síranov v surovej a upravenej vode [56]	40
Obr. 4.5 VZ Podbranč - vodivosť v surovej a upravenej vode [56]	40
Obr. 4.6 VZ Podbranč - celková tvrdosť v surovej a upravenej vode [56]	41
Obr. 5.1 Ultrafiltračný modul UFXS50 [31]	42
Obr. 5.2 Schéma membránovej jednotky [32]	44
Obr. 5.3 Fotografia membránovej jednotky [32]	44
Obr. 5.4 Rozhranie obrazovky pre manuálny režim [32]	45
Obr. 5.5 Rozhranie obrazovky pri riadení na základe tlaku [32]	45
Obr. 5.6 Rozhranie obrazovky v poloautomatickom režime - na základe prietoku [32]	46
Obr. 5.7 Rozhranie obrazovky PID [32]	46
Obr. 5.8 Pôvodné jednoduché zapojenie jednotky v režime filtrácie	47
Obr. 5.9 Zapojenie membrány v režime prania	47
Obr. 5.10 Schéma návrhu zapojenia membránovej jednotky	48
Obr. 5.11 Realizácia návrhu zapojenia membránovej jednotky	49
Obr. 5.12 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime filtrácie	50
Obr. 5.13 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime spätného prania	51
Obr. 5.14 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime chemického prania	52
Obr. 5.15 Schéma membránovej jednotky s polohou uzáverov v režime oplachu	53
Obr. 5.16 Mapa so zaznačeným miestom odberu surovej vody [33]	54
Obr. 5.17 Turbidimeter Hach TU5200 [38]	56
Obr. 5.18 Technológia 360°x90° Detection™ [38]	56
Obr. 5.19 Var vzoriek po dobu 10 minút	57
Obr. 5.20 Titrácia roztokom KMnO ₄	57
Obr. 5.21 pH meter XS	58
Obr. 5.22 Schéma čerpacej sústavy pre dopravu surovej vody k ultrafiltračnej jednotke	61
Obr. 5.23 Priebeh hodnôt zákalu v prvej fáze testovania	65
Obr. 5.24 Priebeh hodnôt zákalu v druhej fáze testovania	66
Obr. 5.25 Priebeh hodnôt zákalu v tretej fáze testovania	67

Obr 5.26 Chronologický priebeh filtračných cyklov	68
Obr. 5.27 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v prvej fáze testovania	68
Obr. 5.28 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v druhej fáze testovania	69
Obr. 5.29 Priebeh hodnôt tlaku na vstupe v druhej fáze testovania	69

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

NTU	****	Nephelometric Turbidity Units
ZF	****	Formazínová jednotka
ÚV	****	Úpravňa vody
PFAS	****	Per/polyfluoralkylované zlúčeniny
PAU	****	Polycyklické aromatické uhlovodíky
UV	****	Ultrafialové žiarenie
TMP	****	Transmembránový tlak [MPa, bar...]
P	****	Tlak [MPa]
MWCO	****	Molecular weight cut off [Da]
MF	****	Mikrofiltrácia
UF	****	Ultrafiltrácia
NF	****	Nanofiltrácia
RO	****	Reverzná osmóza
HF	****	Hollow fiber - duté vlákna
t	****	Čas [hod, min, s]
J	****	Flux [l/h/m ²]
VZ	****	Vodný zdroj
PID	****	Proporcionálne integračne derivačná regulácia
CHSK	****	Chemická spotreba kyslíka
CHSK _{Mn}	****	Chemická spotreba kyslíka – s použitím manganistanu draselného
CHSK _{Cr}	****	Chemická spotreba kyslíka – s použitím dichromanu draselného
TSK	****	Teoretická spotreba kyslíka
BSK	****	Biochemická spotreba kyslíka
b	****	Spotreba manganistanu draselného [ml]
f	****	Faktor manganistanu draselného
V	****	Objem [ml]
y	****	Spotreba chelatónu [ml]
C-F	****	Cross-flow
D-E	****	Dead-end

SUMMARY

Membrane processes belong to the group of modern technologies for municipal water treatment. In the first chapter of this thesis, it is explained why they are needed more than ever, in the context of a new directive 2020/2184 of the European parliament and of the council on the quality of water intended for human consumption. The following theoretical chapters are dedicated to reviewing the current knowledge about membrane processes and the possibilities of their application in water treatment, including specific examples of their usage in Czech Republic and Slovak Republic.

The scientific part of this thesis consists of executing series of pilot tests of an ultrafiltration unit. Before the actual testing, some alterations were designed and implemented for more effective operation and automatization of the unit. The ultrafiltration unit was originally able to work only in one direction, allowing only filtration mode to be used. In the need of another mode, physical disassembly was necessary. By adding a few more pipe lines and valves, it is possible to combine them in a way that allows several operation modes without the need to take apart the unit. The available modes include filtration, mechanical cleaning by backwashing, chemical cleaning and rinsing after chemical cleaning.

After optimalization, the pilot tests were launched, by filtrating surface water from the river Svatka. This water was diluted with drinking water in three different ratios. Turbidity was the main indicator used for monitoring the experiment. Three different types of model raw water were synthesized, with turbidity of 2,31 NTU, 4,47 NTU and 6,63 NTU. Each one of them was treated using an ultrafiltration unit in six filtration cycles, each one lasting 30 minutes, with three different flow rates (100 l/h, 150 l/h, 200 l/h), in a cross-flow and also dead-end mode. So in total, 18 filtration cycles were tested.

A permeate sample was taken every three minutes during filtration cycle to determine an immediate turbidity value and one sample for each cycle to determine COD and water hardness. Input pressure values were also recorded every three minutes.

COD values and water hardness were only slightly affected by the ultrafiltration. The removal rate for turbidity was significant, in a range of 48,1 – 95,4 %. All samples of the water treated with ultrafiltration satisfied the requirements for drinking water, given by the national legislation in Czech Republic and Slovak Republic. However, during the tests, considerable decline in the water quality was observed and only two samples reached the new turbidity requirements given by the directive 2020/2184 of the European parliament (<0,3 NTU).

The main goal of this thesis was to test an ultrafiltration unit in laboratory conditions and evaluate the observed results, which was successfully executed. Even though the recorded values did not satisfy all the expectations and it is needed to continue further testing and optimalization, the tests results provide valuable information for future applications of the ultrafiltration unit and they can serve as a foundation for follow-up research.