



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

NÁVRH KONTEJNEROVÉ ÚPRAVNY VODY S VYUŽITÍM MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

DESIGN OF A CONTAINER WATER TREATMENT PLANT USING MEMBRANE FILTRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kučera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Renata Biela, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství obcí
Student: **Bc. Jakub Kučera**
Vedoucí práce: **Ing. Renata Biela, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26
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:

Návrh kontejnerové úpravy vody s využitím membránové filtrace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V úvodní části práce bude zpracována krátká rešerše zaměřená na úpravu vody včetně kontejnerové. V praktické části diplomové práce bude vypracován návrh kontejnerové úpravy vody s využitím některého z membránových procesů. Zdroj úpravy vody bude povrchový, technologická linka bude integrována do kontejneru určité velikosti podle návrhové kapacity úpravy. Technologie bude řešena od mechanického předčištění až po dezinfekci vody. Součástí práce bude projektová dokumentace kontejnerové úpravy vody.

Cíle a výstupy diplomové práce:

- Rešerše zaměřená na úpravu vody včetně kontejnerové.
- Návrh kontejnerové úpravy vody s využitím membránového procesu, projektová dokumentace.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] CRITTENDEN, John, et al. Water Treatment: Principles and Design. 2nd Edition. John Wiley and Sons, 2005. 1948 p. ISBN 0-471-11018-3.
- [2] PEINEMANN, K. V., NUNES, S. P. Membranes for Water Treatment. Volume 4. Wiley –VCH, 2010. 237 p. ISBN 978-3-527-31483-6.
- [3] PALATÝ, Zdeněk. Membránové procesy. 1. vydání. Praha: VŠCHT v Praze, 2012. 282 s.
- [4] BIELA, R., BERÁNEK, J. Úprava vody a balneotechnika. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 164 s. ISBN 80-214-2563-6.
- [5] GRÜNWARD, Alexander. Zdravotně inženýrské stavby 40: Úprava vody. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 103 s. ISBN 80-01-01658-7.

[6] HLAVÁČ, Jaroslav et al. Vodárenství - Jímání a úprava vody, procesy, výpočty, konstrukce. Multimediální učebnice. 1. vydání. Brno: VAS, a.s., 2003.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 11. 3. 2025

L. S.

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

Ing. Renata Biela, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou úpravy vody s využitím mobilních kontejnerových technologií. Teoretická část práce shrnuje obecné přehledy technologií úpravy vody, dostupné zdroje surové vody a popisuje řešení kontejnerových úpraven, včetně využití membránových procesů, jako jsou ultrafiltrace nebo reverzní osmóza. Praktická část se zaměřuje na hydraulický návrh jednotlivých komponent technologie kontejnerové úpravy vody. Výstupem práce je projektová dokumentace, jejíž součástí je také navržené technologické schéma úpravy a specifikace celkového technického řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Úprava vody, kontejnerová úpravna vody, ultrafiltrace, návrh úpravy vody

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of water treatment using mobile container technologies. The theoretical part of the thesis summarizes general overviews of water treatment technologies, available sources of raw water, and describes container treatment solutions, including the use of membrane processes such as ultrafiltration or reverse osmosis. The practical part focuses on the hydraulic design of individual components of container water treatment technology. The output of the thesis is project documentation, which also includes a proposed technological diagram of the treatment plant and specifications of the overall technical solution.

KEYWORDS

Water treatment, container water treatment plant, ultrafiltration, water treatment plant design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, Jakub. *Návrh kontejnerové úpravy vody s využitím membránové filtrace*. Brno, 2026. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí Ing. Renata Biela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Návrh kontejnerové úpravny vody s využitím membránové filtrace* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2026

Bc. Jakub Kučera
autor

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval především vedoucí diplomové práce paní Ing. Renatě Biele, Ph.D., za odborné vedení, připomínky, cenné rady a veškerý věnovaný čas. Dále bych rád poděkoval Ing. Lucii Báborské a Ing. Vojtěchu Černému za poskytnuté podklady a cenné rady při konzultacích.

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
1.1	Cíl práce	1
2	PŘEHLED TECHNOLOGIÍ ÚPRAVY VODY	2
2.1	Varianty technologických schémat úpravy vody	2
2.1.1	Úpravna vody bez separačního stupně	2
2.1.2	Úpravna vody s jednostupňovou separací	3
2.1.3	Úpravna vody s dvoustupňovou separací	4
2.1.4	Úpravna vody s vícestupňovou separací	5
2.2	Zdroje surové vody	6
2.2.1	Podzemní voda.....	6
2.2.2	Povrchová voda	8
2.3	Procesy úpravy vody.....	9
2.3.1	Mechanické předčištění	9
2.3.2	Koagulace.....	10
2.3.3	Sedimentace	11
2.3.4	Čiřiče	12
2.3.5	Flotace	14
2.3.6	Filtrace	15
3	KONTEJNEROVÉ ÚPRAVNÝ VODY	21
3.1	Využití kontejnerových úpraven vody	21
3.2	Konstrukční řešení kontejnerových úpraven vody	22
3.3	Technologie kontejnerových úpraven vody.....	23
3.3.1	Hydrocyklony	24
3.3.2	Diskové filtry	25
3.3.3	Tlakové filtry	26
3.3.4	Adsorpce na aktivním uhlí	27
3.3.5	Dezinfekce.....	29
4	MEMBRÁNOVÉ PROCESY ÚPRAVY VODY	32
4.1	Typy membránových procesů	32
4.1.1	Mikrofiltrace.....	34

4.1.2	Ultrafiltrace	35
4.1.3	Nanofiltrace	41
4.1.4	Reverzní osmóza	42
4.2	Konstrukční uspořádání membránových modulů	44
4.2.1	Deskové moduly.....	45
4.2.2	Spirálně vinuté moduly	45
4.2.3	Trubkové moduly	46
4.2.4	Kapilární moduly	47
4.2.5	Moduly s dutými vlákny	47
5	NÁVRH KONTEJNEROVÉ ÚPRAVY VODY.....	48
5.1	Vstupní parametry	48
5.1.1	Kapacitní údaje	48
5.1.2	Kvalitativní parametry	48
5.2	Hydraulický návrh potrubí.....	48
5.3	Návrh podávacího čerpadla.....	49
5.3.1	Stanovení dopravní výšky H	50
5.3.2	Návrh čerpadla	54
5.4	Návrh předčištění	55
5.4.1	Hydrocyklon.....	55
5.4.2	Diskový filtr	56
5.4.3	Svíčkový filtr	56
5.5	Návrh reakčně-akumulační nádrže	56
5.6	Návrh ultrafiltrační jednotky	57
5.6.1	Dimenzování membránové plochy.....	58
5.6.2	Návrh potrubí zpětného proplachu.....	58
5.6.3	Návrh čerpadel pro zpětný proplach	59
5.6.4	Ověření návrhu softwarem výrobce.....	60
5.7	Návrh vyrovnávací nádrže	60
5.8	Návrh automatické tlakové stanice	61
5.8.1	Stanovení dopravní výšky	61
5.8.2	Návrh čerpadla	62
5.9	Návrh velikosti filtrů s granulovaným aktivním uhlím	63
5.9.1	Výpočet objemu náplně a kontaktní doby.....	64

5.9.2	Regenerace filtračního lože	64
5.10	Návrh UV lampy	66
5.11	Návrh cirkulačního čerpadla	67
5.12	Dávkování chemie	68
5.12.1	Dávkování koagulantu	68
5.12.2	Úprava pH	68
5.12.3	Dávkování chlornanu sodného	68
5.12.4	Návrh dávkovacích čerpadel	69
5.13	Návrh odpadního potrubí	69
6	TECHNICKÁ ZPRÁVA.....	71
6.1	Identifikační údaje a koncepce řešení.....	71
6.2	Funkční popis technologie	71
6.2.1	Hrubé předčištění a chemická úprava	72
6.2.2	Membránová separace	72
6.2.3	Doúprava a akumulace	72
6.2.4	Hygienické zabezpečení	73
6.3	Parametry úpravny vody	73
6.3.1	Projektované parametry	73
6.3.2	Parametry upravené vody	74
6.3.3	Odběr vzorků vody	74
6.3.4	Množství upravené vody	74
6.4	Technicko – technologický popis zařízení úpravny vody	75
6.4.1	Všeobecné informace.....	75
6.4.2	Podávací čerpadlo.....	75
6.4.3	Hydrocyklon.....	76
6.4.4	Diskový filtr	76
6.4.5	Chemické hospodářství.....	76
6.4.6	Reakčně – akumulační nádrž.....	77
6.4.7	Ultrafiltrační jednotka.....	77
6.4.8	Vyrovňovací nádrž.....	78
6.4.9	Cirkulační okruh s dezinfekcí.....	78
6.4.10	Automatická tlaková stanice.....	78
6.4.11	Filtry s granulovaným aktivním uhlím	79

6.4.12	UV lampa.....	79
6.4.13	Odpadní potrubí a kanalizace	79
6.5	Zkoušky vodotěsnosti.....	79
6.5.1	Tlakové zkoušky potrubního vstrojení	79
6.6	Komplexní vyzkoušení.....	81
6.7	Provozní náklady.....	81
6.7.1	Spotřeba elektrické energie.....	81
6.7.2	Spotřeba provozních chemikálií.....	81
6.7.3	Spotřeba vody a produkce odpadních vod	82
6.7.4	Náklady na obsluhu a údržbu	82
6.8	Elektrická instalace	83
6.9	Vzduchotechnika a tepelně-technické vlastnosti kontejneru	85
6.9.1	Tepelná izolace.....	85
6.9.2	Větrání	85
6.9.3	Klimatizace a vytápění.....	86
6.10	Požadavky na stavební připravenost	86
6.11	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci.....	87
7	ZÁVĚR.....	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK.....	99
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	100
	SEZNAM PŘÍLOH	102

1 ÚVOD

Dostupnost kvalitní pitné vody je v současné době jedním z nejvýznamnějších globálních témat. S rostoucími nároky na kvalitu vody a s proměnlivostí vodních zdrojů roste i potřeba efektivních a především flexibilních technologických řešení. Zatímco velké úpravy vody tvoří páteř vodohospodářské infrastruktury, v mnoha situacích od krizového zásobování, přes odlehlé lokality až po průmyslové aplikace se jako ideální řešení jeví mobilní kontejnerové úpravy vody.

Tato diplomová práce se zaměřuje právě na problematiku kontejnerových úpraven, které představují moderní trend v oblasti vodního hospodářství díky své kompaktnosti, rychlé instalaci a možnosti modularity. Klíčovým aspektem moderních úpraven je pak volba vhodné separační technologie, přičemž stále větší význam získávají membránové procesy, které umožňují dosáhnout vysoké kvality výstupní vody i při horších parametrech surové vody.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je návrh kontejnerové úpravy vody s využitím membránového procesu a vypracování příslušné projektové dokumentace. Práce je koncipována do dvou částí. První částí je rešerše zaměřená na obecné technologie úpravy vody a specifika mobilních kontejnerových řešení. Na ni navazuje praktická část, jejímž cílem je hydraulický a technologický návrh jednotlivých komponent systému. Hlavním výstupem práce je kompletní projektová dokumentace včetně technologického a technického řešení kontejnerové úpravy vody.

2 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ ÚPRAVY VODY

Úprava vody představuje soubor technologických procesů, jejichž cílem je zajistit požadovanou kvalitu vody pro konkrétní účel – nejčastěji pro výrobu pitné vody, ale také pro průmyslové nebo nouzové využití. Volba vhodné technologie závisí na charakteru zdrojové vody, požadovaných výstupních parametrech a ekonomických či prostorových možnostech. [1]



Obr. 2.1 Úpravna vody Švařec – ilustrační foto [2]

2.1 VARIANTY TECHNOLOGICKÝCH SCHÉMÁT ÚPRAVY VODY

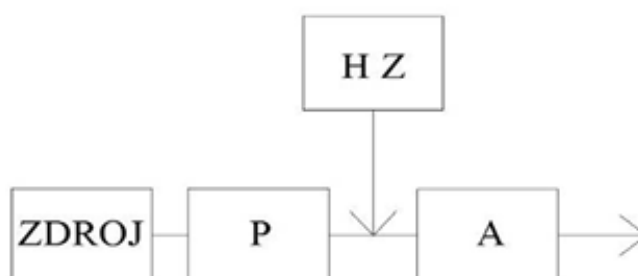
Složitost procesů úpravy vody a výběr vhodných technologických postupů závisí na kvalitě vstupní (surové) vody a na účelu, pro který má být voda upravena. Na základě rozsahu úpravy lze úpravny vody rozdělit do čtyř základních kategorií, které budou popsány v následujících kapitolách. [3]

2.1.1 Úpravna vody bez separačního stupně

Úprava bez separačního stupně se navrhuje pro vody ze zdrojů s minimálním znečištěním, tedy u podzemních vod s minimálním obsahem dvojmocného železa a manganu. Rovněž musí mít i vhodné množství aniontů, které odpovídají požadavkům na upravenou vodu. [1]

V této technologické variantě se voda upravuje aerací z důvodu odstranění nežádoucích plynů (volného oxidu uhličitého, sirovodíku, metanu apod.) a pachů. Provzdušnění může být navrženo i s opačným cílem, a to zvýšit obsah kyslíku ve vodě, která je na něj chudá. Nedostatek kyslíku negativně ovlivňuje chuť a pach vody a může způsobovat problémy s korozí potrubí a zařízení. Z těchto důvodů se v praxi nazývají tyto úpravy jako "odkyselovací stanice". Jako hygienické zabezpečení vody před akumulací a distribucí do spotřebiště se používá dezinfekce. [3]

Blokové schéma jednoduché úpravy vody je zobrazeno na Obr. 2.2.



P – provzdušnění vody, A – akumulace vody, HZ – hygienické zabezpečení

Obr. 2.2 Schéma úpravy vody bez separačního stupně [3]

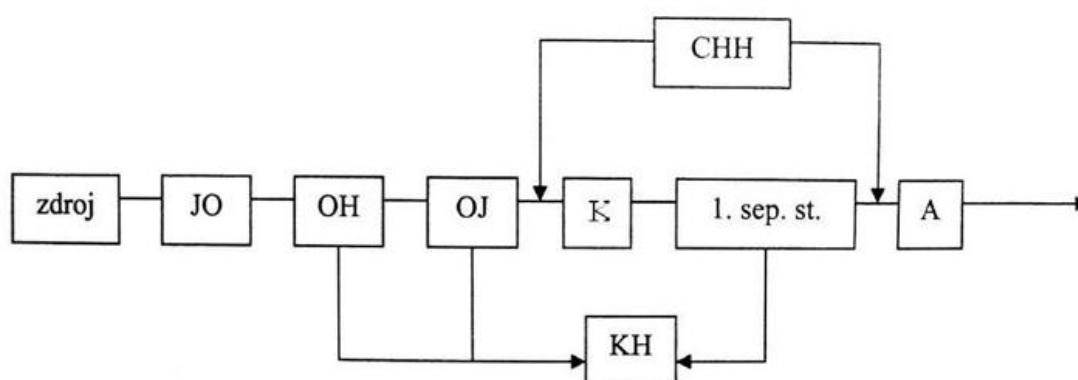
2.1.2 Úprava vody s jednostupňovou separací

Jednostupňová separace představuje technologii, při níž se nežádoucí látky odstraňují z vody pouze na jednom separačním zařízení. Separace zahrnuje eliminaci přírodních složek obsažených v surové vodě, látek vzniklých v důsledku antropogenního znečištění a také chemických prostředků použitých při úpravě, jako jsou koagulanty nebo látky pro úpravu pH. V jednostupňových úpravách je tímto separačním prvkem zpravidla filtrační zařízení. Nejčastěji se využívá pomalá biologická filtrace, mechanická filtrace bez aplikace koagulantu nebo koagulační filtrace, při níž se dávkuje koagulant pro zlepšení účinnosti procesu. Přestože jde o jednoduché řešení, je obvykle nutné provést určitou formu předúpravy, například odstranění hrubých nečistot nebo úpravu chemických

parametrů vody. Tento typ technologie se uplatňuje zejména tam, kde je zdrojová voda méně znečištěná a není nutné zařazovat více separačních stupňů. [3]

Technologické řešení jednostupňové separace se liší podle charakteru zdrojové vody. U podzemních vod se zpravidla uplatňuje prostá mechanická filtrace, zatímco u povrchových vod je často nutné zařadit koagulační filtraci pro odstranění jemných suspendovaných částic. [1]

U podzemních vod se před akumulací a distribucí provádí zušlechťení a vždy dezinfekce. V případě povrchových vod může po separaci následovat alkalizace pro úpravu pH a dezinfekce, která je nezbytná pro zajištění mikrobiologické bezpečnosti vody. [1]



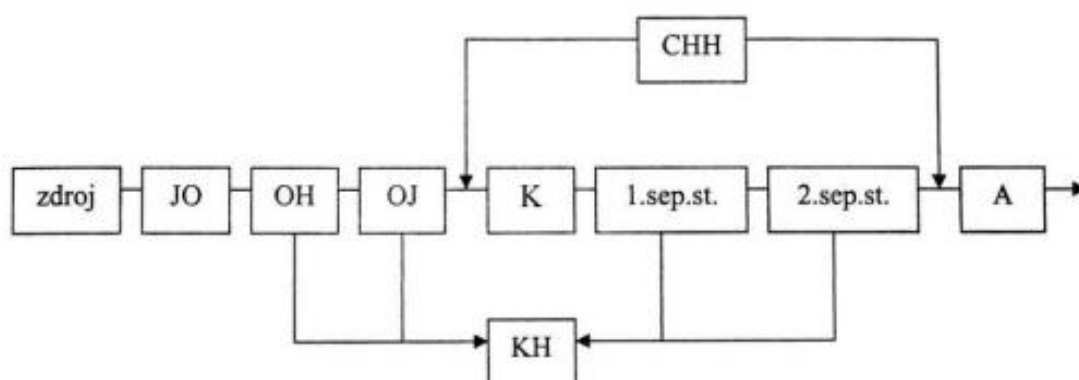
JO – jímací objekt, OH – odlučovače hrubé, OJ – odlučovače jemné, K – koagulace, flokulace,
A – akumulace, CH H – chemické hospodářství, KH – kalové hospodářství

Obr. 2.3 Schéma úpravy vody s jednostupňovou separací [4]

2.1.3 Úprava vody s dvoustupňovou separací

Dvoustupňová separace se používá v případech, kdy surová voda obsahuje vyšší koncentrace suspendovaných, koloidních nebo rozpuštěných látek, případně vyžaduje vyšší dávku koagulantu. V takových situacích je nutné zařadit dva separační stupně, aby byla dosažena požadovaná kvalita vody. Druhým stupněm je u pitné vody vždy filtrace, zatímco prvním stupněm může být mikrofiltr, sedimentační nádrž, čistič s vločkovým mrakem, flotace nebo další filtrační zařízení (dvoustupňová filtrace). Volba konkrétního řešení závisí na druhu a množství

znečištění. Kritéria pro rozhodnutí o počtu separačních stupňů jsou dána kvalitou zdrojové vody. U podzemních vod se používá jednostupňová úprava při součtu koncentrací železa a manganu pod $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, zatímco u povrchových vod je hraniční dávka koagulantu do $20\text{--}25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Dvoustupňová technologie tak představuje kompromis mezi jednoduchostí a účinností, kdy první stupeň výrazně snižuje zatížení filtračního zařízení a zlepšuje celkovou efektivitu procesu. [3]



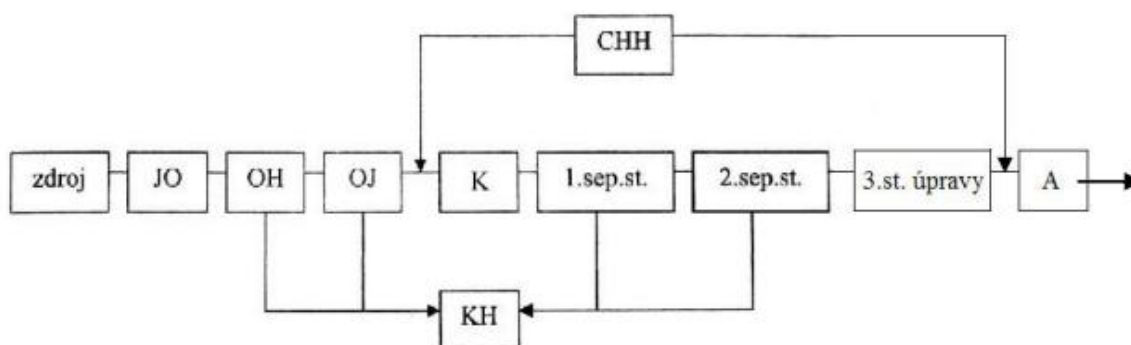
JO – jímací objekt, OH – odlučovače hrubé, OJ – odlučovače jemné, K – koagulace, flokulace,
A – akumulace, CH H – chemické hospodářství, KH – kalové hospodářství

Obr. 2.4 Schéma úpravny vody s dvoustupňovou separací [4]

2.1.4 Úpravna vody s vícestupňovou separací

Vícestupňová separace se uplatňuje u značně znečištěných vod nebo tam, kde jsou kladeny mimořádné požadavky na kvalitu upravené vody. Tento typ technologie zahrnuje tři a více separačních stupňů, případně kombinaci dvoustupňové separace s následnou doúpravou, která nahrazuje třetí stupeň. Typické schéma pro podzemní vody zahrnuje sedimentaci jako první stupeň, odželezovací filtr jako druhý a odmanganovací filtr jako třetí stupeň. U povrchových vod se často používá sedimentace, čiření nebo flotace, následovaná pískovou filtrací a doúpravou pomocí filtrace s aktivním uhlím nebo pomalé biologické filtrace. V některých případech může být třetí stupeň nahrazen procesy bez separace, například ozonizací nebo provzdušněním vody. Vícestupňová úprava zajišťuje vysokou

účinnost odstranění suspendovaných, koloidních i rozpuštěných látek a je vhodná pro zdroje s vysokým obsahem organických látek či kovů. [1; 3]



JO – jímací objekt, OH – odlučovače hrubé, OJ – odlučovače jemné, K – koagulace, flokulace, A – akumulace, CH H – chemické hospodářství, KH – kalové hospodářství, 3.stupeň úpravy – (3.stupeň separace, douprava vody, zušlechťování vody)

Obr. 2.5 Schéma úpravný vody s víceúrovňovou separací [3]

2.2 ZDROJE SUROVÉ VODY

Zdroje surové vody jsou základem pro zajištění zásobování obyvatelstva pitnou vodou. Ačkoliv je voda v přírodním cyklu považována za obnovitelný zdroj, z globálního hlediska se jedná o surovinu vyčerpateľnou a nerovnoměrně dostupnou, přičemž absolutní většinu celosvětových zásob tvoří voda slaná, která není bez energeticky náročného odsolovacího procesu přímo využitelná. Surová voda ve svém přírodním stavu ne vždy vyhovuje hygienickým požadavkům pro přímou spotřebu, neboť může obsahovat široké spektrum kontaminantů, které mohou být fyzikální, chemické, biologické nebo radiologické povahy. [5]

Specifika jednotlivých typů vodních zdrojů a jejich odlišné nároky na úpravu budou blíže specifikovány v následujících podkapitolách.

2.2.1 Podzemní voda

Podzemní voda je definována jako voda nacházející se pod zemským povrchem v nasycené zóně. Tento typ vodního zdroje je ceněn především pro svoji plošnou

dostupnost a přirozenou ochranu před znečištěním, kterou mu poskytují nadložní vrstvy hornin. Díky tomu vykazuje podzemní voda ve srovnání s povrchovými zdroji výrazně vyšší stabilitu kvalitativních parametrů, minimální sezónní výkyvy teploty a nižší mikrobiální oživení. Z ekonomického hlediska je její využívání často atraktivnější kvůli nižším nákladům spojeným s její úpravou a produkcí. Na druhé straně s sebou nese využívání podzemních zdrojů specifické nevýhody. Podzemní vody často vykazují vyšší mineralizaci, tvrdost a často obsahují zvýšené koncentrace anorganických polutantů, jako jsou železo a mangan, které mohou způsobovat inkrustace potrubí a vyžadují specifické technologické postupy pro jejich odstranění. Navíc v případě kontaminace tohoto zdroje je jeho sanace, na rozdíl od povrchových vod, technicky náročná a dlouhodobá. [5; 6]



Obr. 2.6 Příklad podzemního zdroje – jímací studny [autor]

V posledních desetiletích se ukazuje, že podzemní voda je vysoce citlivá na dlouhodobé změny v krajině i na antropogenní činnosti. Intenzivní zemědělství, spojené s aplikací pesticidů a průmyslových hnojiv, spolu s průmyslovými aktivitami způsobují, že se do podzemních zdrojů infiltrují dusičnany, těžké kovy a organické polutanty. Zásadním problémem je však časová prodleva transportu těchto látek. Výzkumy potvrzují, že polutanty, zejména dusičnany, se mohou nenasycenou zónou k hladině podzemní vody dostávat desítky let, takže aktuálně pozorované znečištění je často důsledkem historických zemědělských praktik z minulého století. [7; 8]

2.2.2 Povrchová voda

Povrchová voda je definována jako voda otevřená atmosféře, jejíž objem a kvalita jsou přímo závislé na srážkové činnosti a povrchovém odtoku. Zahrnuje vodní toky, přirozená jezera a umělé nádrže. Ačkoliv jsou tyto zdroje často snáze dostupné a vykazují zpravidla nižší mineralizaci než vody podzemní, jejich využití pro vodárenské účely je technologicky výrazně náročnější. Studie upozorňují především na vysokou zranitelnost povrchových vod vůči antropogennímu znečištění a mikrobiální kontaminaci, která je dána absencí ochranných horninových vrstev typických pro podzemní zdroje. Kritickým faktorem pro provoz úpraven vody je nestabilita kvalitativních parametrů v čase. V praxi to znamená, že na rozdíl od stabilních podzemních zdrojů dochází u povrchové vody k výrazným sezonním výkyvům teploty, zkalu a obsahu přírodních organických látek, což vyžaduje flexibilní řízení technologických procesů schopných reagovat na náhlé změny kvality surové vody, například v důsledku přívalových srážek nebo tání sněhu. [5; 6]



Obr. 2.7 Příklad povrchového zdroje – vodárenská nádrž Šance [9]

Povrchové toky slouží jako recipienty vyčištěných odpadních vod, což z nich dělá primární cestu pro šíření tzv. nově se objevujících polutantů (emerging contaminants). Studie upozorňují, že i přes pokročilé čištění odpadních vod se do povrchových zdrojů dostávají rezidua léčiv, hormonů, pesticidů a prostředků

osobní péče. Tyto mikropolutanty se vyskytují v nanogramových koncentracích a představují pro konvenční technologie úpravy vody obtížně odstranitelnou zátěž a mohou mít dlouhodobé ekotoxikologické dopady. [10]

Další specifickou výzvou pro povrchové zdroje, zejména pro nádrže se stojatou vodou, představuje proces eutrofizace, způsobený nadprůměrným přísunem živin (dusíku a fosforu) z povodí. Tento stav vede k rozvoji fytoplanktonu a sinic, které mohou produkovat cyanotoxiny a látky negativně ovlivňující chuť a pach vody. Podle studie Paerl a Otten (2013) tento problém zhoršuje globální oteplování, neboť vyšší teploty vody a stabilní stratifikace nádrží zvýhodňují dominanci toxických kmenů sinic, což klade vyšší nároky na separační stupně úpraven vody. [11]

2.3 PROCESY ÚPRAVY VODY

Proces úpravy vody představuje soubor navzájem navazujících technologických postupů, jejichž cílem je přeměnit surovou vodu proměnlivé kvality na vodu splňující požadované hygienické a provozní parametry. [1]

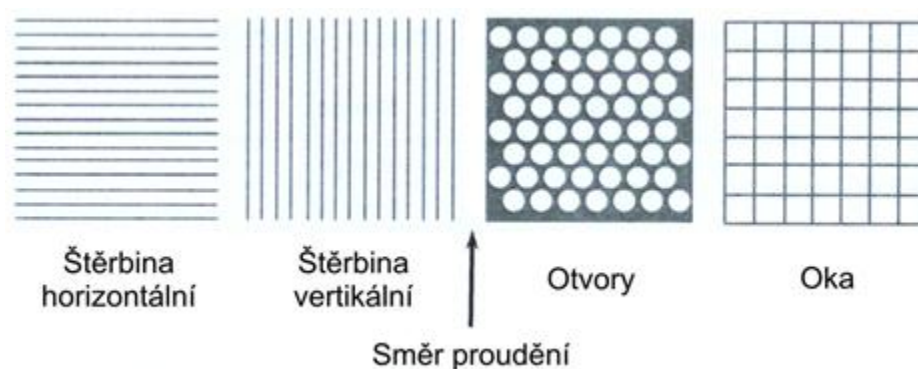
2.3.1 Mechanické předčištění

Mechanické předčištění vody se z velké části využívá u povrchových vod, které obvykle bývají znečištěné jednak plovoucími látkami (např. listí, tráva, větve apod.) nebo látkami, které se ve vodě sunou (např. písek apod.). U podzemních vod bývá mechanické předčištění zpravidla méně rozsáhlé, protože surová voda je chráněna horninovým prostředím. [12]

Česle

Česle mohou být součástí odběrného objektu, ale mohou i patřit k úpravě vody. Využívají se především při úpravě vody z povrchového zdroje. U podzemních vod jejich funkci z části nahrazuje sací koš čerpadla, navzdory tomu se doporučuje osazovat česle nebo odpovídající mřížku (viz Obr. 2.8) na přítok do úpravy vody

(nebo na jiné vhodné místo) kvůli zabránění vtoku náhodně se vyskytujících předmětů v jímacím objektu. [1; 13]



Obr. 2.8 Geometrie česlí a sít [13]

2.3.2 Koagulace

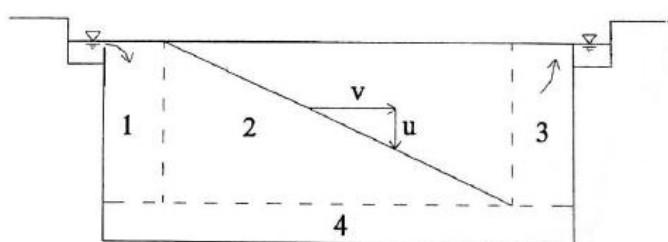
Koagulace představuje klíčovou fází v technologickém procesu úpravy vody, jejímž cílem je odstranění zákalu, barvy, mikroorganismů a přírodních organických látek. Tímto procesem je přidáván chemický koagulant do vody, což vede k destabilizaci suspendovaných, koloidních a rozpuštěných látek a umožňuje jejich následné shlukování do větších celků odstranitelných sedimentací a filtrací. K destabilizaci dochází prostřednictvím čtyř hlavních mechanismů – komprese elektrické dvojvrstvy, adsorpce a neutralizace náboje, adsorpce a mezičásticové můstkování a zachycení částic do sraženiny. Celková účinnost koagulace je závislá na optimalizaci několika parametrů, zejména na vlastnostech surové vody, typu použitého koagulantu, hodnotě pH a správném dávkování koagulantu. [14; 15]

Aktuální studie se zaměřují na optimalizaci dávkování koagulantu, která představuje důležitý faktor pro ekonomickou efektivitu a provozní spolehlivost úpraven vody. Podle Sheng et al. (2022) mohou náklady na chemikálie tvořit až 20 % celkových provozních výdajů. Přesné řízené dávkování je nezbytné pro eliminaci rizik spojených s poddávkováním, které vede k nedostatečné destabilizaci koloidů, ale i předdávkováním, které způsobuje restabilizaci částic, zvýšení zákalu a produkci nadměrného množství kalu. Vzhledem k tomu, že vztah

mezi kvalitou vody a potřebnou dávkou koagulantu je nelineární a kvalita surové vody podléhá rychlým sezonním změnám, klasické metody řízení často selhávají. Moderní přístupy proto směřují k implementaci pokročilých strategií řízení v reálném čase, které kombinují dopředné a zpětné vazby. Také mohou využívat metody umělé inteligence, jako jsou umělé neuronové sítě a fuzzy logika, k přesnější predikci optimální dávky koagulantu na základě historických a aktuálních dat. [15]

2.3.3 Sedimentace

Sedimentace představuje základní a nejrozšířenější separační proces v úpravě vody, přičemž principem je gravitační usazování nerozpuštěných látek a agregátů (vloček) vytvořených předcházející koagulací a flokulací. Přes svoji technologickou historii je sedimentace stále klíčovým, často primárním separačním stupněm, zajišťujícím odstranění až 90 % suspendovaných látek. [14]



1- vtokový prostor; 2- vlastní usazovací prostor;
3- výtokový prostor; 4- prostor usazeného kalu



Obr. 2.10 Sedimentační nádrž
[autor]

Vzhledem k rostoucím nárokům na kvalitu vody a kolísavosti vstupních parametrů povrchových zdrojů však současný výzkum posouvá hranice chápání tohoto procesu z pouhé empirie směrem k pokročilemu modelování. Studie Banaš a Hilger (2024) se například soustředí na implementaci fraktální geometrie do Stokesova vzorce. Stokesův zákon funguje dobře pro jednoduché, kompaktní

částice ("zrnité suspenze"), ale selhává u složitějších shluků částic (vloček), které vznikají během procesů koagulace a flokulace. Tato implementace umožňuje přesnější predikci koncové rychlosti usazování vloček a optimalizaci návrhu sedimentačních nádrží. [16]

Další studie Juraev et al. (2022) se zabývala možnostmi intenzifikace provozu horizontálních usazovacích nádrží prostřednictvím instalace systémů pro tenkovrstvou sedimentaci. Autoři se zaměřili na klíčový problém hydraulické nerovnoměrnosti přítoku, která u běžných lamelových vestaveb snižuje jejich efektivitu při vyšším zatížení. Výzkum prokázal, že pro dosažení maximálního výkonu není vhodné mít horní hrany desek v jedné rovině, nýbrž je nutné je uspořádat do specificky vypočtené křivky vycházející z teorie proudění tekutin s proměnnou hmotností. Experimentální ověření potvrdilo, že tato geometrická úprava zajišťuje rovnoměrnou distribuci vody po celé délce modulu, což umožňuje zvýšit hydraulické zatížení nádrže trojnásobně až čtyřnásobně při zachování vysoké účinnosti odstranění zákalu nad 90 %. [17]

Ačkoli je sedimentace stále spolehlivá, její účinnost je kriticky závislá na optimalizaci předúpravy. Tato závislost na kinetice tvorby vloček a jejich charakteristice (velikost, hustota) je hlavním limitujícím faktorem, který v moderních technologických linkách vedl k odklonu k efektivnějším membránovým procesům, jenž poskytují fyzikální bariéru, která není závislá na gravitaci a rychlosti proudění. [15; 18]

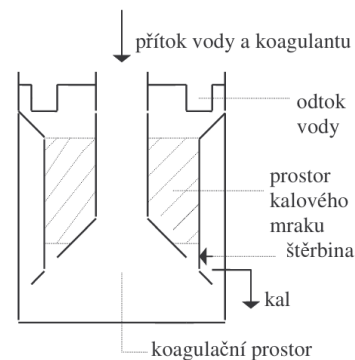
2.3.4 Čiřiče

Čiřiče jsou zařízení určená k separaci vloček pomocí kalového mraku. Ve srovnání se sedimentačními nádržemi vyžadují menší půdorysnou plochu i stavební prostor. Jejich hlavní nevýhodou je citlivost na výraznější kolísání průtoků a obtížnější zajištění přerušovaného provozu. V současnosti existuje široká škála konstrukčních uspořádání a typových řešení. Kalový mrak je tvořen vrstvou

vločkovitých částic, které vznikly chemickým srážením. Jedná se o dynamicky suspendovanou vrstvu vloček, která slouží jako reakční zóna, kde dochází ke srážení menších vloček přitékajících s vodou. Mrak je udržován v rovnováze mezi vzestupnou rychlostí vody a sedimentační rychlostí vloček. [1]



Obr. 2.11 Čiřič na UV Znojmo [autor]



Obr. 2.12 Schéma čiřiče s vločkovým mrakem [14]

Aktuální výzkumy se zaměřují na optimalizaci hydraulických podmínek uvnitř technologických jednotek čiřičů. Například studie, kterou publikovali Xu et al. (2022), se zabývala komplexní CFD simulací proudění a distribucí nerozpuštěných látek v reálném měřítku vysokorychlostního čiřiče. Autoři reagovali na provozní problémy spojené s nestabilitou procesu a nejasnými hydraulickými charakteristikami, které často vedly ke snížení účinnosti separace. Jejich model, ověřený na experimentálních datech z úpravy vody, ukázal, že rozhodujícím faktorem pro účinné snížení zákalu je správně nastavená hydrodynamika v reakční zóně, kde probíhá míchání. Simulace odhalily, že optimalizací nátoků a míchacích elementů lze dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení kalového mraku, což přímo minimalizuje únik vloček do odtoku. Výsledky této práce potvrzují, že v případě moderních intenzifikovaných čiřičů nelze spoléhat pouze na empirické návrhy. Pro popis a predikci chování vícefázového toku je nutné využívat pokročilé numerické modely. [19]

2.3.5 Flotace

Další možnou alternativou pro první separační stupeň při úpravě vody je flotace. Flotační proces využívá vztahové síly k separaci znečištění, kdy jsou agregované vločky vynášeny k hladině díky své snížené hustotě. Tento efekt vzniká spojením pevných částic s mikrobublinami vzduchu, čímž se tvoří lehčí agregáty stoupající vzhůru. Na hladině se pak vytváří vrstva kalu, která je mechanicky stírána a odváděna do kalového hospodářství. [14]

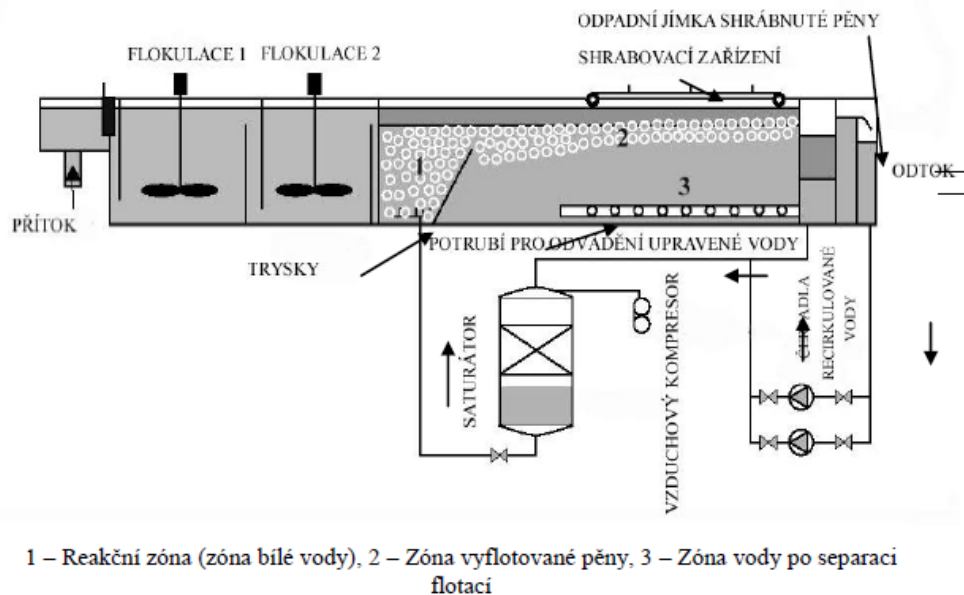
Mezi hlavní přednosti této technologie patří výrazná úspora zastavěné plochy, která vyplývá z možnosti aplikovat vysoké povrchové zatížení v rozmezí $5,0 - 20,0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Pro srovnání, u běžných čističů se tato hodnota pohybuje okolo $4,0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ a u sedimentace dokonce jen mezi $0,5 - 2,5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Další výhodou je produkce kalu s relativně vysokou sušinou (0,2 – 6 %). Naopak limitujícím faktorem flotace zůstává vyšší energetická náročnost, spojená především s procesem přípravy bílé vody (směs vody a vzduchu). [20; 21]

Tvorba agregátů může probíhat několika způsoby: [22]

- aeroflotace,
 - flotace dispergovaným vzduchem,
 - flotace rozpuštěným vzduchem,
- elektroflotace,
- chemická flotace.

Ve vodárenství je obecně nejpoužívanější flotace s rozpuštěným vzduchem (DAF). Je vhodná zejména v případech, kdy surová voda obsahuje specifické znečištění, jako jsou huminové látky nebo produkty eutrofizace (řasy a sinice). Toto provedení je založené na fyzikálním principu uvolňování plynu z kapaliny při náhlém poklesu tlaku. Voda, která je nejprve přesycena vzduchem, vytváří při změně saturovanou vodu (tzv. bílou vodu) obsahující mikrobubliny o velikosti v řádu mikrometrů ($7\text{-}9\cdot 10^{-6} \text{ m}$). Tyto bubliny jsou přibližně o dva řády menší než u běžných aeračních

metod, což zvyšuje efektivitu procesu. Příprava nasycené vody probíhá buď v saturátoru za pomoci kompresoru, nebo s využitím speciálních čerpadel, která umožňují přímé přísávání vzduchu, což se v praxi často jeví jako ekonomicky výhodnější provedení. [22]



1 – Reakční zóna (zóna bílé vody), 2 – Zóna vyflocované pěny, 3 – Zóna vody po separaci flotaci

Obr. 2.13 Schéma klasického uspořádání zařízení flotace [22]

Studie González-Galvise et al. (2024) se zaměřila na porovnání účinnosti flotace rozpuštěným vzduchem (DAF) a konvenční sedimentací při úpravě vody s nízkým zákalem, konkrétně vody z nádrže na menším toku. Jejich experimenty prokázaly, že při optimalizovaném dávkování koagulantu (síranu hlinitého) dosahovala technologie DAF mírně vyšší či srovnatelné účinnosti (85 – 88%) oproti sedimentaci (84 – 86%). Studie tak potvrzuje, že DAF představuje pro vody s nízkým obsahem suspendovaných látek vysoce efektivní alternativu ke klasickým usazovacím procesům. [23]

2.3.6 Filtrace

Filtrace je ve vodárenství nejpoužívanějším technologickým procesem. Představuje jeden z klíčových separačních procesů, jehož účelem je odstranění suspendovaných, koloidních a nerozpuštěných látek ze surové vody. Jako součást

skupiny separačních procesů bývá filtrace zařazena buď jako samostatný jednostupňový prvek, nebo častěji jako koncový stupeň vícestupňové úpravy následující po procesech předúpravy, jako jsou oxidace, koagulace nebo sedimentace. V některých technologických konfiguracích lze využít i dvoustupňovou filtraci, kde oba separační stupně tvoří filtrační jednotky s odlišnými parametry. [1; 3]

Základní rozdělení filtrace je na filtraci náplavnou a filtraci objemovou. Náplavná filtrace se především využívá v průmyslových aplikacích, spočívá v zachycování nečistot na tenké vrstvě naplaveného materiálu na nosné filtrační přepážce. Při výrobě pitné vody je však dominantní objemová filtrace. Princip spočívá v průchodu vody skrze lože tvořené zrnitým filtračním materiálem, nejčastěji křemičitým pískem, antracitem, nebo aktivním uhlím. Tento materiál musí splňovat přísné technické požadavky na chemickou stálost a mechanickou odolnost proti otěru. [1]

Podle filtrační rychlosti se objemová filtrace dělí na dvě hlavní kategorie: [1]

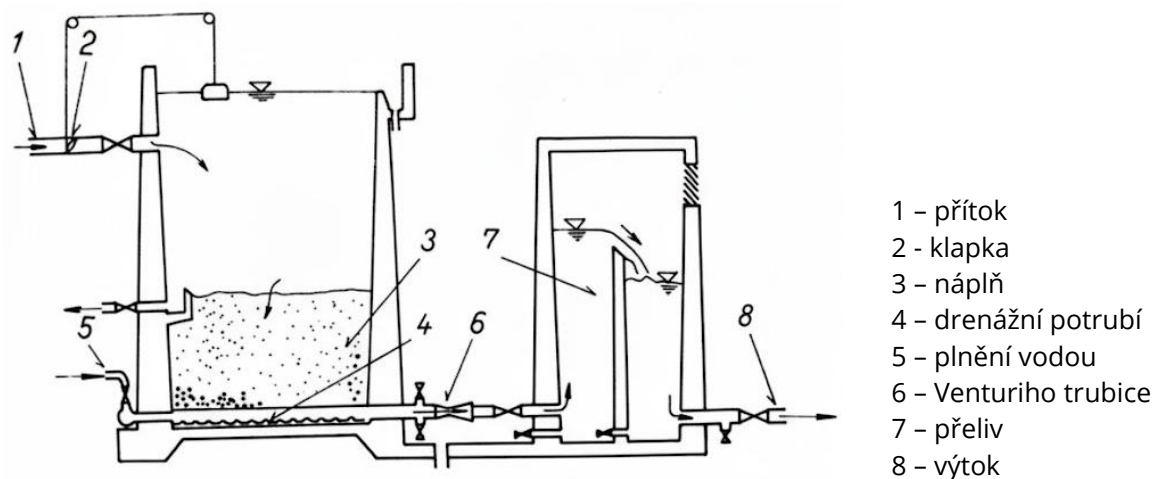
- pomalá biologická filtrace,
- rychlofiltrace.

Filtrace je komplexní děj založený na základě působení několika mechanismů. Hlavními procesy je mechanické cezení částic větších, než jsou mezery mezi zrny a adsorpce, které je dosaženo působením van der Waalsových sil a elektrostatických Coulombových sil. Dalšími procesy jsou chemické působení filtrační vrstvy u aktivních materiálů a biologické působení oživené filtrační vrstvy. [14]

Pomalá biologická filtrace

Pomalá biologická filtrace představuje technologický postup, který v umělých podmínkách úpravy vody maximálně napodobuje přirozené samočisticí procesy probíhající v přírodě. Největší předností je komplexní mechanismus odbourávání

nečistot, který v sobě integruje procesy fyzikální, chemické a především biologické. Základním funkčním prvkem je biologická filtrační blána, která se přirozeně vytváří na povrchu a v horních vrstvách filtračního lože. Tato vrstva je tvořená organickými i anorganickými nečistotami a je oživena aerobními mikroorganismy, řasami a prvky. Tato biologická vrstva odstraňuje dusitany, amonné sloučeniny i nežádoucí mikroby a koliformní zárodky. Mikrobiální osídlení sahá obvykle do hloubky 30 – 40 cm pod povrch lože. Pro zachování životaschopnosti těchto mikroorganismů je nezbytný dostatečný přísun kyslíku v upravované vodě. V případě, že hodnota nasycení kyslíku neodpovídá teplotě vody, využívá se před filtrací jednoduché provzdušnění vody jako je např. hydraulický skok. [1; 24]



Obr. 2.14 Schéma otevřeného pomalého filtru [1]

V okamžiku, kdy tlaková ztráta při průchodu vody přes biologickou blánu a filtrační lože dosáhne kritické hodnoty, nastává fáze regenerace pomalého filtru. Tento stav signalizuje značné zanesení horní vrstvy filtru, kdy se blána stává nepropustnou pro filtrovanou vodu a hrozí vznik nepřípustného podtlaku ve spodních vrstvách náplně. Vzhledem k současnému využívání pomalé filtrace zejména pro menší úpravy vody se regenerace provádí manuálně. Vlastní proces regenerace začíná mechanickým seškrábnutím znečištěné horní vrstvy v tloušťce přibližně 2 – 4 cm, která v sobě koncentruje suspendované látky. Jelikož při každém

takovém zásahu dochází k úbytku materiálu, je nutné doplnit filtrační písek na původní filtrační výšku. Následně se filtr opětovně naplní vodou spodem, čímž dojde k efektivnímu vytlačení vzduchu z mezer mezi zrny. Dále nastává fáze zapracování, během níž se postupně vytváří nová biologická blána. Po celou dobu zapracování je nezbytné provádět zafiltrování, kdy se první filtrovaná voda, nesplňující hygienické parametry, odvádí přímo do odpadu. [1]

Z provozního hlediska je zásadní kontinuita filtrace. Mikroorganismy v biologické bláně jsou aerobní a snesou přerušení dodávky kyslíku po dobu maximálně jednoho dne. Z tohoto důvodu se v případě potřeby snížení dodávek vody nedoporučuje úplné odstavení filtru, nýbrž pouze redukce jeho výkonu. [3]

Aktuální studie se zaměřují na sledování mikropolutantů a schopnost pomalé filtrace eliminovat tyto environmentální hrozby. Výzkumy ukazují, že biologicky aktivní vrstva filtru vykazuje značný potenciál při odstraňování reziduí léčiv, pesticidů a produktů osobní hygieny, které se do vodních zdrojů dostávají v nízkých koncentracích. Díky vysoké mikrobiální diverzitě a dlouhé době zdržení vody v loži dochází k efektivní biodegradaci i u látek, které jsou pro konvenční fyzikálně-chemické úpravy obtížně odbouratelné. Výzkum se nyní zaměřuje na moderní genetické metody, které pomáhají určit konkrétní bakterie schopné rozkládat mikropolutanty. Tyto poznatky umožní záměrně upravovat složení bakterií ve filtru tak, aby lépe zachycovaly i velmi odolné látky. [25]

Rychlofiltrace

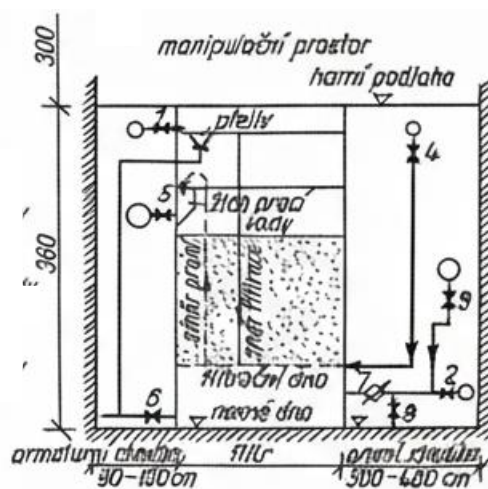
Rychlá filtrace představuje v současném vodárenství nejrozšířenější a nejpoužívanější technologii separace suspendovaných látek při úpravě vody. Na rozdíl od pomalé filtrace, která využívá biologických procesů, je rychlofiltrace založená primárně na fyzikálních a chemických procesech. Díky chemické předúpravě koagulací je možné dosáhnout vyšší filtrační rychlosti, která je pro tento proces charakteristická. Z konstrukčního hlediska se rychlofiltry dělí

na otevřené (gravitační) a uzavřené (tlakové) jednotky. U nejběžnějších otevřených rychlofiltrů s průtokem směrem shora dolů se doporučena filtrační rychlost pohybuje v rozmezí $3,6 - 7,2 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, přičemž za optimální hodnotu je považována rychlost $5,0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Jako filtrační materiál se nejčastěji využívá křemičitý písek nebo antracit o zrnitosti $0,5 - 2,0 \text{ mm}$. Tyto filtrační materiály musí splňovat požadavky na chemickou stálost a odolnost proti otěru. [24]



Obr. 2.15 Otevřené rychlofiltry na úpravě vody Znojmo [autor]

Filtrační cyklus je v porovnání s pomalou filtrací řádově kratší a trvá zpravidla jeden až několik dní. Provoz filtru je ukončen při dosažení limitní tlakové ztráty, která je u otevřených rychlofiltrů přibližně 2 metry, nebo v okamžiku zhoršení kvality filtrátu. [3; 24]



- 1 - uzávěr surové vody
- 2 - uzávěr čisté vody
- 3 - uzávěr prací vody
- 4 - uzávěr pracovního vzduchu
- 5 - odpad prací vody
- 6 - výpust
- 7 - regulátor filtrační rychlosti
- 8 - zafiltrování

Obr. 2.16 Uspořádání otevřeného rychlofiltru [1]

Regenerace rychlofiltrů se provádí praním v opačném směru proudění vody. V tuzemské praxi se používá tzv. evropský způsob praní, který kombinuje praní vodou a vzduchem a sestává se ze tří po sobě jdoucích fází. V první fázi dochází k praní tlakovým vzduchem o intenzitě $15 - 22 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu 3 - 5 minut, který vyvolává mechanický otěr zrn a rozrušuje usazený kal. Následuje fáze kombinovaného praní vodou o intenzitě $4-5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a vzduchem o intenzitě $10 - 15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu 5 - 6 minut, jež vede k expanzi filtrační náplně a uvolňování nečistot z mezizrnových prostor. Celý prací cyklus je zakončen dopíráním samotnou vodou, která vyplavuje uvolněné nečistoty do odpadního žlabu. Po ukončení regenerace se musí filtrační náplň zafiltrovat, kde se první podíl filtrované vody odvádí do odpadu, do té doby, než náplň dostatečně neusedne a kvalita filtrátu nedosáhne požadovaných parametrů. [1; 3]

V současné době se výzkumné studie v oblasti rychlofiltrace zaměřují na integraci udržitelných a nízkonákladových filtračních materiálů, které by dokázaly nahradit nebo zefektivnit konvenční filtrační materiály. Příkladem tohoto trendu je hodnocení biocharu vyrobeného z odpadní biomasy eukalyptu a bambusu, u kterého bylo zjištěno, že při vyšších filtračních rychlostech ($120 \text{ až } 240 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$) vykazuje vyšší účinnosti při odstraňování zákalu a barvy než filtrační písek nebo antracit. Studie konkrétně uvádí, že bambusový biochar dosahuje při filtraci flokulované vody účinnosti až 93,9 % u zákalu a 90,75 % u barvy. Zároveň je efektivní při odstraňování železa (95,7 %) a celkových koliformních bakterií (94,3 %). Kromě zvýšení kvality filtrátu přispívá biochar ve filtrační loži, díky své nízké hustotě a specifické porézní struktuře, k nižším objemům prací vody. [26]

3 KONTEJNEROVÉ ÚPRAVY VODY

Kontejnerové úpravy vody, známé také jako mobilní vodohospodářské systémy, představují moderní a flexibilní přístup k vodnímu hospodářství, zejména v situacích, kdy jsou tradiční vodní zdroje omezené nebo došlo k jejich znečištění. Tyto systémy kombinují různé technologie úpravy vody do kompaktní formy, která může být snadno nasazena v terénu, což je zvláště užitečné v nouzových situacích a v oblastech s nízkou dostupností pitné vody. [27; 28]



Obr. 3.1 Kontejner 20' pro úpravnu vody [29]

Voda pro účely úpravy může být odebírána jak z povrchového zdroje, tak i ze zdroje podzemního. Hlavním cílem úpravy je odstranění zákalu, zbarvení, patogenních mikroorganismů a rozpuštěných látek. U podzemní vody se navíc odstraňuje železo a mangan. Dále lze eliminovat těžké kovy, ropné látky a pesticidy. [27]

3.1 VYUŽITÍ KONTEJNEROVÝCH ÚPRAVEN VODY

Kontejnerové úpravy vody se využívají především v krizových situacích, jako jsou povodně, zemětřesení nebo válečné konflikty pro potřeby záchranných složek i obyvatelstva. Slouží také jako dočasné řešení v případech, kdy je z různých důvodů mimo provoz stávající zdroj pitné vody (například při havárii, rekonstrukci nebo při neočekávaných změnách kvality surové vody nebo vydatnosti zdroje). [27; 28]

Kontejnerové úpravný vody se uplatňují také při zásobování menších vodovodních systémů, kde často vznikají problémy se zajištěním požadované kvality pitné vody, a to jak z finančního, tak z odborného hlediska (např. nároky na obsluhu). Další využití těchto zařízení zahrnuje úpravu vody pro zemědělství, potravinářské provozy a drobný průmysl, stejně jako zásobování pitnou vodou pro rekreační objekty, hotely či sportovní akce. [27]

3.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KONTEJNEROVÝCH ÚPRAVEN VODY

Kontejnerové úpravný vody jsou navrženy tak, aby splňovaly požadavky na mobilitu, kompaktnost a provozní flexibilitu. Základem je standardizovaný ISO kontejner (nejčastěji 20' nebo 40'), který slouží jako nosná konstrukce i ochranný obal technologie. Vnitřní uspořádání je optimalizováno pro snadný servisní přístup a bezpečné oddělení jednotlivých funkčních zón – technologické části, prostoru pro chemikálie a ovládacího systému. Energetické řešení je navrženo s ohledem na provozní podmínky, kromě napájení z elektrické sítě je často integrován dieselový agregát nebo přípojky pro obnovitelné zdroje (solární panely). Kontejnery bývají vybaveny tepelnou izolací, klimatizací a systémem odvětrání, aby byla zajištěna funkčnost technologie i v extrémních klimatických podmínkách. [30; 27]



Obr. 3.2 Ukázka možného uložení kontejneru [31]



Obr. 3.3 Vystrojení kontejnerové úpravný vody [29]

Jednou z nejvýznamnějších předností kontejnerových řešení je skutečnost, že podle platného stavebního zákona nepodléhají klasickému stavebnímu povolení. Tento aspekt výrazně zkracuje dobu realizace projektu. Zatímco u běžné stavby budovy úpravy vody je nutné počítat s povolovacím procesem, který může trvat i více než rok a půl, kontejnerová úprava vody může být kompletně vyrobena, dopravena a instalována přibližně do čtyř měsíců od objednání. Časová úspora je dána nejen absencí složité administrativy, ale také jednoduchostí montáže. Na místě se pak provádějí pouze drobné stavební úpravy, jako je např. základová deska a výkopy pro potrubí. Tento přístup minimalizuje riziko zdržení způsobeného legislativními změnami nebo zdražováním stavebních prací, které v minulosti dosahovalo až 30 %. [28]

3.3 TECHNOLOGIE KONTEJNEROVÝCH ÚPRAVEN VODY

V této kapitole budou popsány především separační stupně, které budou následně využity v praktické části této diplomové práce.

Kontejnerové úpravy obvykle obsahují následující technologie a jejich různé kombinace, které mohou být řazeny v odlišném pořadí: [27]

- čiření,
- filtrace (diskové filtry, tlakové filtry s výměnnými náplněmi, rychlofiltrace, ultrafiltrace, reverzní osmóza),
- dezinfekce (chlor, ozón, UV),
- aerace,
- iontová výměna,
- adsorpce na granulovaném aktivním uhlí,
- změkčování,
- a další.

3.3.1 Hydrocyklony

Hydrocyklon je jednoduché separační zařízení fungující na principu odstředivé síly, které slouží k separaci nerozpuštěných látek s hustotou větší, než je hustota vody. Konvenční hydrocyklon se skládá z válcové komory s navazujícím kónickým dnem. Voda je přivedena do válcové části tangenciálně pod zvýšeným tlakem, čímž vzniká rotační pohyb a odstředivé pole. Tím dochází k posunu částic s vyšší hustotou směrem ke stěnám, odkud jsou gravitačně vedeny do spodní části a odváděny spodním výstupem. Vyčištěná voda naopak odtéká středovým odtokem z horní části zařízení. Pokud voda obsahuje částice s hustotou nižší než voda (např. oleje), tyto se hromadí ve středu víru a odtékají středovým výstupem, zatímco voda je odváděna spodní částí. Tento princip umožňuje využití hydrocyklonu nejen pro separaci pevných částic, ale i pro odstranění olejů a podobných látek. [32]



Obr. 3.4 Průběh proudění vody
v hydrocyklonu [33]



Obr. 3.5 Ukázka průmyslového
hydrocyklonu [33]

Hydrocyklon je určen k odstraňování nerozpuštěných částic o průměru přibližně 5–1000 μm . Tyto částice musí být dostatečně kompaktní, aby odolaly odstředivým silám působícím uvnitř zařízení, což znamená, že hydrocyklon není vhodný pro separaci vločkovitých suspenzí. Velikost částic, které lze účinně odstranit, závisí na průměru hydrocyklonu – čím menší je průměr komory, tím menší částice dokáže separovat. Průměr zařízení zároveň ovlivňuje průtok: menší hydrocyklony umožňují nižší průtoky, zatímco větší průměry jsou vhodné pro vyšší kapacity. [32]

3.3.2 Diskové filtry

Diskové filtry využívají filtrační bariéru tvořenou sloupcem plochých disků s povrchovou strukturou, která určuje jemnost filtrace. Hlavní výhodou oproti síťovým filtrům je vysoká účinnost čištění při zanesení, protože konstrukce filtrační plochy umožňuje snadný proplach i u nečistot, jako jsou papír, vlákna, piliny, špony, řasy a jiné organické materiály, pro které jsou síťové filtry méně vhodné. Zanesené disky lze jednoduše vyčistit tlakovým proplachem vody. V případě silného zanesení například železem nebo organickými usazeninami je možné disky vyjmout a chemicky vyčistit ponořením do roztoku kyseliny nebo zásady. [34]



Obr. 3.6 Poloautomatický diskový filtr [34]



Obr. 3.7 Manuální diskový filtr [34]

Princip funkce diskového filtru

Filtrace probíhá směrem od vnější strany filtračních disků dovnitř. Kromě samotné mechanické filtrace se uplatňuje i separační efekt, který napomáhá oddělování částic anorganického původu. Tento efekt prodlužuje intervaly mezi čištěním filtru. Díky tvaru horní části filtračního pouzdra a dostatečnému průtoku dochází k tomu, že těžší anorganické nečistoty (větší než přibližně 70 μm) se vlivem odstředivých sil koncentrují po obvodu pouzdra dále od filtrační bariéry a shromažďují se v jeho horní části. Odtud lze rychle odstranit pomocí odkalovacího ventilu, obvykle během několika sekund. [34]

Zpětný proplach diskového filtru

Filtrační pouzdro obsahuje modul pro zpětný proplach, který může pracovat v poloautomatickém nebo automatickém režimu. Poloautomatický proplach se

spouští manuálně pomocí kulových ventilů, zatímco automatický proplach řídí elektronická jednotka na základě časového intervalu nebo tlakové ztráty. Řídicí jednotka ovládá membránové ventily prostřednictvím solenoidů a to hydraulicky nebo pneumaticky. Při automatickém proplachu dá řídicí jednotka pokyn k přechodu do režimu čištění. Tok vody se obrátí, tlaková voda z výstupu filtru je přivedena do pístů, které uvolní sevření disků. Voda vedená uvnitř hřídele je směřována tryskami tangenciálně k diskům, což způsobí jejich rotaci a mechanické uvolnění zachycených nečistot. Ty jsou následně odplaveny do drenáže. Pro zpětný proplach lze využít buď surovou vodu předčištěnou přes samo-proplachovací předfiltr, vlastní vyčištěnou výstupní vodu (u sestav s minimálně dvěma moduly), nebo externí prací vodu z vodovodního řádu nebo akumulární nádrže. [34]

3.3.3 Tlakové filtry

Filtrace v uzavřených tlakových nádobách je obdobným procesem otevřené rychlofiltrace (viz kapitola 2.3.6), s tím rozdílem, že probíhá v tlakovém režimu. Na rozdíl od otevřených rychlofiltrů, kde voda protéká filtrační vrstvou pouze vlastní silou, využívají tlakové filtry přetlak, který umožňuje dosáhnout vyšších filtračních rychlostí (obvykle $10 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, ale také až $40 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$). Upravovaná voda vstupuje do nádoby v horní části, prochází směrem dolů skrz filtrační náplň, která bývá vysoká 1,5 – 3,0 m. Upravená voda je následně sbírána v dolní části nádoby soustavou filtračních trysek umístěných na mezidnu. Kolem tlakových filtrů musí být zajištěn dostatečný prostor nejen pro obsluhu a údržbu, ale i demontáž, protože tlakové filtry bývají zhotoveny z kovových nebo sklolaminátových materiálů a jejich životnost je kratší. [1; 35]

Výhodou tlakové filtrace je, že uzavřený systém neposkytuje tolik příležitostí pro riziko druhotné kontaminace upravované vody. Nevýhodou tohoto systému

je obtížná kontrola vnitřní náplně filtru, účinnost praní filtrační náplně a celkového funkčního stavu zařízení. [1]

3.3.4 Adsorpce na aktivním uhlí

V kontejnerových úpravách vody probíhá proces adsorpce na aktivním uhlí v tlakových filtračních nádobách (viz kapitola 3.3.3).

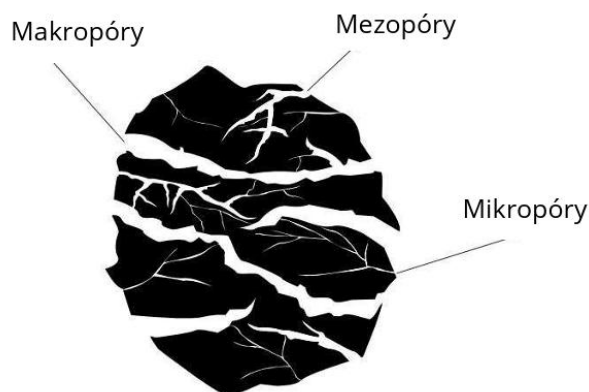
Aktivní uhlí představuje vysoce porézní materiál vznikající tepelnou nebo chemickou úpravou surovin s vysokým obsahem uhlíku. V oblasti úpravy pitné vody slouží především k eliminaci organického znečištění, reziduí léčiv, pesticidů a k eliminaci nežádoucích pachů či chutí. Samotný proces čištění probíhá skrze systém transportních pórů, které vedou molekuly kontaminantů k aktivním místům na povrchu uhlí, kde dochází k jejich zachycení. [36]



Obr. 3.8 Granulované aktivní uhlí Silcarbon S1240 [autor]

Aktivní uhlí funguje primárně jako nepolární adsorbent, což z něj dělá ideální prostředek pro zachycování látek podobného charakteru, zejména nepolárních organických sloučenin a neelektrolytů. Přestože je jeho přirozená povaha nepolární, díky svému velkému vnitřnímu povrchu může při interakci s vodním prostředím vykazovat i určité polární vlastnosti. Tato specifická vlastnost

umožňuje účinné vázání polárních polutantů, jako jsou například ionty různých kovů, u nichž proces adsorpce dosahuje vysoké efektivity přesahující 90 %. [37]



Obr. 3.9 Druhy pórů v aktivním uhlí [38]

Ve vodárenství se pro úpravu vody nejčastěji používá granulované aktivní uhlí. Dále se pro nárazové odstraňování organických polutantů používá práškové aktivní uhlí. [39]

V následující tabulce (Tab. 3.1) je uvedena doba zdržení a životnosti náplně aktivního uhlí v různých aplikacích při úpravě vody.

Tab. 3.1 Kontaktní doba a životnost aktivního uhlí v různých aplikacích [40]

	Kontaktní doba [min]	Životnost [roky]
Zlepšování organoleptických vlastností	6 - 12	2 - 4
Odstraňování pesticidů	10 - 15	1 - 3
Odstraňování huminových látek a trihalomethanu	15 - 30	1,5 - 3
Odstraňování chlorovaných uhlovodíků	10 - 20	0,5 - 1,5
Dechlorace	4 - 8	1 - 2

Výroba aktivního uhlí

K výrobě aktivního uhlí lze využít široké spektrum materiálů s vysokým obsahem uhlíku. Mezi nejčastěji využívané suroviny se řadí černé a hnědé uhlí, dřevo nebo skořápky kokosových ořechů. Volba konkrétní suroviny má klíčový význam pro výslednou vnitřní strukturu materiálu, tedy pro uspořádání jeho mikropórů

a transportních pórů. Kromě použité suroviny jsou také charakteristiky aktivního uhlí definovány zvolenou metodou aktivace. [39]

Regenerace aktivního uhlí

Poté, co aktivní uhlí naplní svou adsorpční kapacitu zachycenými látkami, je nutné provést jeho regeneraci. Tento proces slouží k obnovení schopnosti materiálu opětovně na sebe vázat polutanty. Existuje několik základních přístupů, jak toho docílit: [41]

- Termální regenerace – aktivní uhlí se vystaví teplotám okolo 800 °C, čímž dojde k desorpci zachycených látek z jeho povrchu.
- Chemická regenerace – k regeneraci povrchu se využívají specifické roztoky, například kyselina chlorovodíková (HCl) nebo hydroxid sodný (NaOH).
- Mikrobiální regenerace – využívá mikroorganismy, které rozkládají adsorbované znečištění přímo na povrchu uhlí.
- Vakuová regenerace – regenerace probíhá za působení sníženého tlaku, který napomáhá desorpci nečistot.

3.3.5 Dezinfekce

Dezinfekce vody představuje nejběžnější způsob úpravy povrchových i podzemních vod, jehož hlavním cílem je zajistit hygienickou nezávadnost. Přestože surová voda prochází procesem úpravy, může stále obsahovat patogenní organismy, jako jsou bakterie, viry nebo prvoci. Dezinfekce tyto organismy usmrcuje a slouží jako nezbytná prevence proti šíření infekčních chorob. [14]

Podle působení lze rozdělit metody dezinfekce na: [14]

- působení látek silně oxidačních a současně baktericidních (chlorace, ozonizace atd.),
- působení látek s oligodynamickým účinkem (využití stříbra a mědi),
- působení fyzikálně chemického účinku (UV záření).

Tab. 3.2 Výhody a nevýhody některých způsobů dezinfekce pitné vody [1]

Dezinfekční prostředek	Výhody	Nevýhody
Cl ₂ (NaClO)	Menší provozní náklady	Závislost účinnosti na pH, vznik THM a senz. závadných látek
Chloraminace	Menší tvorba THM a senz. závadných látek	Menší dezinfekční účinnost ve srovnání s Cl ₂
ClO ₂	Nezávislost účinnosti na pH, menší tvorba THM	Větší provozní náklady, komplikovanější provoz
O ₃	Vysoká oxidační a dezinfekční účinnost	Větší provozní náklady, možnost sekundární kontaminace
UV záření	Nevznikají hygienicky závadné produkty	Možnost sekundární kontaminace

Dezinfekce na bázi chlóru

Dezinfekce upravené vody u menších úpraven vody a zdrojů vody se využívá roztok chlornanu sodného NaOCl. Využívá se z důvodu menší náročnosti na odbornou obsluhu. Pro lepší hygienické zabezpečení je potřebná delší doba kontaktu než u dezinfekce například plynným chlórem. Chlornan sodný se po zředění zásobního roztoku dávkuje pomocí dávkovacích čerpadel. [14]

Bezchlorová dezinfekce

Mezi nejčastěji používané způsoby bezchlorové dezinfekce se řadí dezinfekce ozonem a dezinfekce UV zářením. [3]

Ozon, který se používá při úpravě vody, je vyráběn přímo v místě provozu za pomoci ozonizátorů buď ze vzduchu zbaveného vlhkosti nebo kyslíku. Jedná se o nejúčinnější oxidační a dezinfekční činidlo, které vyžaduje pouze krátkou dobu kontaktu s vodou v ejktorech nebo kontaktních nádržích. Vzhledem k toxicitě ozonu je nezbytné rozložit přebytečný ozon a během celého procesu dodržovat bezpečnostní předpisy. [14]

Při dezinfekci UV zářením jsou využívány UV lampy, jejichž záření způsobuje fotochemické poškození buněk mikroorganismů a jejich následný úhyn. Významnou předností této technologie je, že omezuje vznik vedlejších produktů

dezinfekce. Nevýhodou je však absence reziduálního účinku, což znamená, že voda není chráněna po výstupu z úpravy. Norma ČSN 75 5050 stanovuje požadovanou radiační dávku na $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Protože samotná deklarace výkonu zářiče nemusí zaručit dostatečnou dávku na konci životnosti lampy, je nezbytné provádět validaci UV záření v souladu s uvedenou normou. [42]



Obr. 3.10 UV lampy na úpravě vody Znojmo [autor]

4 MEMBRÁNOVÉ PROCESY ÚPRAVY VODY

Membránové procesy jsou separační technologie, které využívají polopropustné membrány k zachycení částic určité velikosti nebo určitého elektrického náboje. Zatímco klasické filtrační procesy přes zrnitý materiál spoléhají především na prostý mechanický záchyt částic větších, než je velikost pórů, membránové procesy představují zásadní technologický posun. Díky použití polopropustných membrán umožňují absolutní vyloučení i nejmenších koloidních látek, virů a bakterií s vysokou reprodukovatelnou účinností. Pohonnou silou pro separaci je nejčastěji tlakový spád, ale také to může být koncentrační nebo potenciálový rozdíl. [14; 43]

4.1 TYPY MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

Na základě velikosti separovaných částic a aplikované hnací síly se membránové procesy dělí do čtyř základních kategorií. Hlavní skupinou, která využívá tlakový spád jako primární hnací sílu, je mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace a reverzní osmóza. Tyto procesy se především liší mezní retenční velikostí membrány, čímž umožňují spektrum separací od suspenzí až po rozpuštěné soli. Další skupinou patřící mezi membránové procesy je elektrodialýza, která nevyužívá tlakový spád, ale elektrický potenciál k selektivnímu transportu iontů na základě jejich náboje. [14]

Tab. 4.1 Rozdělení membránových procesů [43]

Proces	Pohonná síla	Velikost zachyc. částic	Tlakový rozdíl
Mikrofiltrace	Tlakový spád	> 0,1 μm	100 – 400 kPa
Ultrafiltrace	Tlakový spád	10 – 100 nm	500 – 1000 kPa
Nanofiltrace	Tlakový spád	1 – 10 nm	2 – 4 MPa
Reverzní osmóza	Tlakový spád	0,1 – 1 nm	3 – 6 MPa
Elektrodialýza	Elektrický pot.	Ionty	-

Procesy mikrofiltrace a ultrafiltrace fungují na principu mechanického záchytu nečistot a jsou účinné při odstraňování nerozpuštěných látek, koloidů, mikroorganismů a celkového zákalu. Díky těmto vlastnostem se často uplatňují

jako efektivní stupeň předúpravy pro další procesy úpravy. Pro separaci na molekulární úrovni, jako je odstranění rozpuštěných solí, síranů či jiných iontů, se poté využívají procesy nanofiltrace nebo reverzní osmózy. [44]

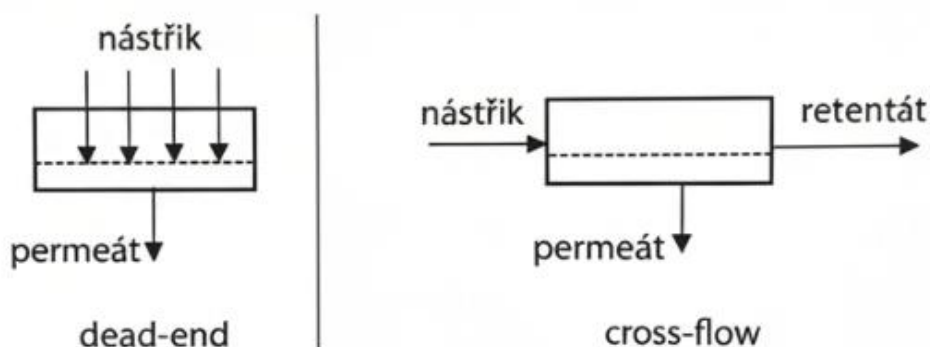
Následující tabulka (Tab. 4.2) shrnuje, které membránové technologie lze využít a jak efektivně dokážou eliminovat konkrétní typy znečištění.

Tab. 4.2 Látky odstraňované z vody membránovými procesy [4]

Odstraňované látky / Membránový proces	MF	UF	NF	RO
Suspendované látky	C	C	C	C
Prvoci	C	C	C	C
Bakterie	C	C	C	C
Viry	P	C	C	C
Železo, mangan	D	D	C	C
Huminové látky	-	P	C	C
CHSK	-	-	P	C
Syntetické org. látky – pesticidy	-	-	P	C
Vápník + hořčík	-	-	P	C
Dusičnany	-	-	-	C
Amoniak	-	-	-	C

C – kompletní odstranění, D – odstranění v závislosti na chemické formě, P – částečné odstranění

Membránové procesy lze provozovat ve dvou základních režimech, z nichž prvním je režim DEF (dead-end filtration). Tento proces funguje analogicky k běžné filtraci, kdy vstupní médium proudí kolmo na povrch membrány. Filtrát tak musí prostupovat nejen samotnou membránou, ale i narůstající vrstvou zachycených částic. To s sebou nese nevýhodu v podobě zanášení membrány a snižování její průtlačnosti. Proto se tento režim využívá primárně tam, kde je malá koncentrace částic ve vstupním médiu. Druhým možným provozním režimem je CFF (cross-flow filtration). Na rozdíl od předchozí metody zde vstupní médium proudí rovnoběžně s povrchem membrány. Tento dynamický režim zajišťuje, že koncentrovaný retentát je neustále odváděn pryč z povrchu membrány. Tím se výrazně omezuje tvorba usazenin, což vede k delší životnosti membrány a vyšší energetické efektivitě. Díky absenci silné filtrační vrstvy, která by brzdila průtok, je tento způsob ideální pro kapaliny s vysokou koncentrací suspendovaných částic. [43]



Obr. 4.1 Schématické znázornění separace v uspořádání DEF a CFF [43]

4.1.1 Mikrofiltrace

Mikrofiltrace stojí na začátku hierarchie tlakově řízených membránových procesů z hlediska velikosti zachycených částic. Mikrofiltrace se uplatňuje v různých průmyslových odvětvích včetně úpravy pitné vody. Tato metoda využívá membránu s velikostí pórů od 0,1 do 10 μm a pracuje s nízkými pracovními tlaky, obvykle tlak dosahuje maximálně hodnoty 0,4 MPa. Mikrofiltrační membrány umožňují efektivní odstranění suspendovaných látek a koloidů s velkou molekulovou hmotností, ale současně umožňují průchod rozpuštěných organických látek a makromolekul. Při úpravě vody se mikrofiltrace využívá jako stupeň předčištění před vyspělejšími procesy, jako je nanofiltrace nebo reverzní osmóza. [4]

Membrány mikrofiltrace se nejčastěji vyrábí z polymerních a keramických materiálů. Pro výrobu membrán z polymerních materiálů se nejčastěji využívá polypropylen a polyethylen, pro výrobu keramických membrán se využívá materiál $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Při volbě materiálu pro membránu je nutné zohlednit řadu faktorů, mezi které patří selektivita membrány, mechanická a chemická stabilita nebo výrobní náklady. V praxi se často využívají polymerní membrány, které vynikají nižší cenou a snazší zpracovatelností. Pro aplikace ve specificky náročných podmínkách jsou však vhodnější keramické membrány, které nabízejí vyšší tepelnou a chemickou odolnost. [43]

Mikrofiltrační membrány jsou z hlediska konstrukce a uspořádání řazeny do různých typů modulů. Membránové moduly mohou být trubkové, deskové nebo kapilární, ty se dále liší uspořádáním i způsobem proudění média systémem. Výhodou mikrofiltrace je nízká energetická náročnost díky relativně nízkým provozním tlakům. Hlavní nevýhodou je nízké spektrum odstranitelných částic z vody. [43]

4.1.2 Ultrafiltrace

Ultrafiltrace představuje další separační technologii v rámci membránových procesů, která se řadí mezi tlakově řízené procesy. Tato metoda efektivně odstraňuje suspendované látky, koloidní částice, mikroorganismy a makromolekuly z kapalného média, ale v permeátu zanechává nízkomolekulární látky a ionty. Na rozdíl od reverzní osmózy a nanofiltrace, membrány ultrafiltrace pracují s výrazně nižšími tlaky ($1-10 \cdot 10^5$ Pa) a jsou charakterizovány většími póry (1-100 nm). Membrány jsou nejčastěji vyrobeny z organických polymerních materiálů, patří mezi ně například polysulfony (PS, PES), polyakrylonitrily, polyamidy a acetáty celulózy. Kromě těchto polymerů se pro specifické, chemicky a teplotně náročné aplikace používají i anorganické keramické materiály, jako jsou například oxidy hliníku a zirkonia. Konstrukčně se ultrafiltrační membrány vyznačují asymetrickou strukturou. [45; 43]



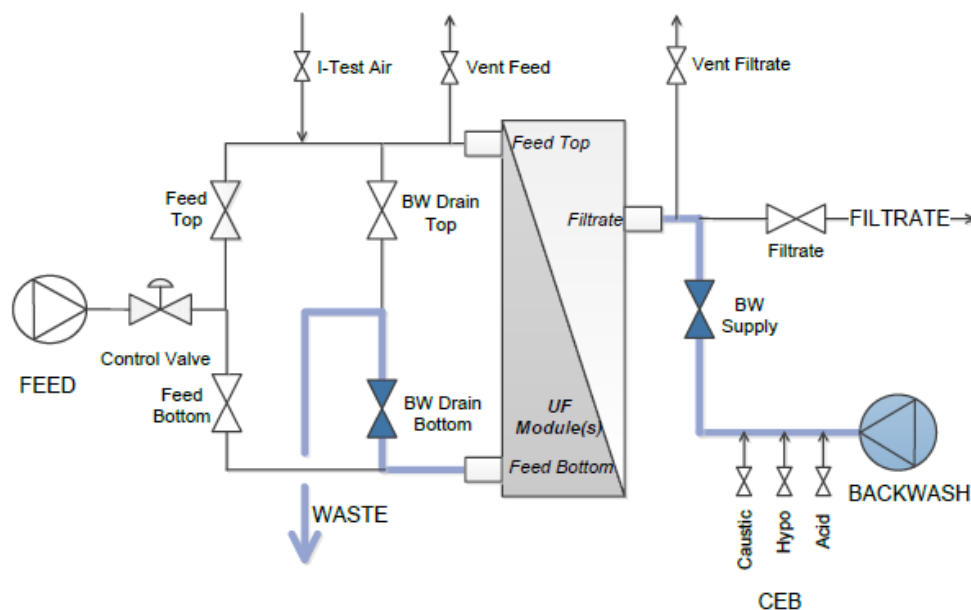
Obr. 4.2 Příklad ultrafiltrační jednotky [46]

Filtrace

Ve filtračním režimu dochází k úpravě surové vody jejím protlačováním přes ultrafiltrační membránu ze strany přívodu na stranu filtrátu. Znečištění obsažené v surové vodě, které je blokováno filtračním povrchem membrány, se shromažďuje na vnitřním povrchu membránových kapilár. Filtrát, tedy upravená voda, proudí buď do nádrže pro filtrát, která slouží jako zásobník pro vodu určenou k dalšímu zpracování nebo může být alternativně potrubím přiveden přímo ke konečným spotřebitelům. V druhém případě se nádrž využívá výhradně jako zásobník pro proplachovací vodu. Celkové množství vyčištěné vody produkované UF modulem je podmíněno řadou faktorů, které zahrnují původ zdrojové vody (např. povrchová, podzemní nebo odpadní voda), její složení (např. zákal, koncentrace pevných látek, rozpuštěných organických nebo anorganických látek, teplota) a zvolenou nákladovou strategii (investiční a provozní náklady). [47]

Zpětný proplach

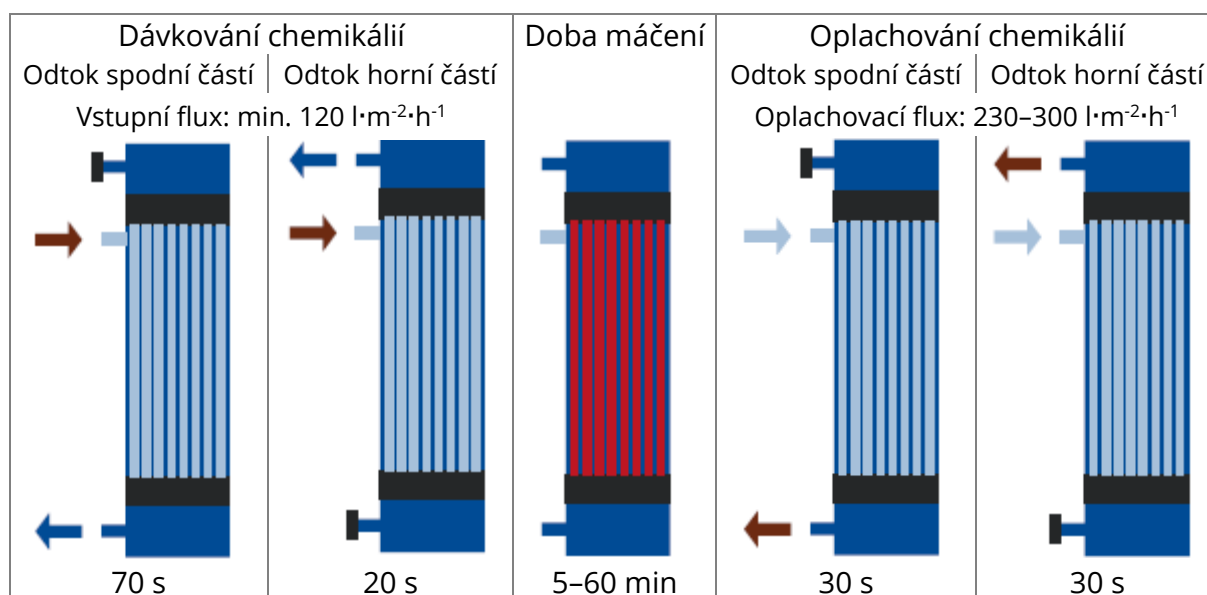
V průběhu filtračního cyklu dochází k akumulaci znečišťujících látek na povrchu membrány a vzniku tzv. filtračního koláče. Tento nános zvyšuje hydraulický odpor, který se projevuje nárůstem transmembránového tlaku (TMP). Pro obnovení permeability membrány a snížení transmembránového tlaku je nutné v pravidelných intervalech provádět zpětný proplach (backwash – BW). Zpětný proplach využívá vodu z nádrže permeátu, kterou pomocí čerpadel tlačí skrz membránu v opačném směru než při filtraci, tedy ze strany odtoku permeátu na stranu nátoky upravované vody. Tím dojde k odtržení filtračního koláče od povrchu membrány a vypláchnutí nečistot do odpadního potrubí. Pro efektivní odstranění nečistot se doporučuje tok zpětného proplachu (backwash flux) v rozmezí $230\text{--}300\text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, přičemž standardní doba trvání proplachu se pohybuje mezi 30 a 60 sekundami v závislosti na kvalitě vstupní vody. [47]



Obr. 4.3 Schéma zpětného proplachu do spodní části nátoky [47]

Chemicky posílený zpětný proplach (CEB)

Chemicky posílený proplach (Chemically enhanced backwash – CEB) se provádí po definovaném počtu provozních cyklů ke zvýšení účinnosti zpětného proplachu. CEB se provádí v podstatě podobným způsobem jako zpětný proplach, tedy proplachovaná voda proudí ze strany odtoku permeátu na stranu nátoky upravované vody, avšak s přidáním chemikálií a zařazením fáze míchání. Chemikálie jsou dávkovány do proudu proplachované vody. Dávkování probíhá při nižším toku (obvykle $120 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) než je standardní proplach, aby bylo zajištěno rovnoměrné zaplnění modulu chemickým roztokem. Po naplnění modulu chemikáliemi se uzavřou všechny ventily a čerpadla se vypnou. Následuje fáze máčení, která umožňuje chemikáliím reagovat s nečistotami na povrchu a v pórech membrány. Délka doby míchání se pohybuje v rozmezí 5 až 60 minut. Po uplynutí doby máčení jsou chemikálie a uvolněné nečistoty vypláchnuty z modulu čistým filtrátem. Tento proces probíhá při standardním toku pro zpětný proplach ($230\text{--}300 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). [47]



Obr. 4.4 Proces chemicky posíleného proplachu [47]

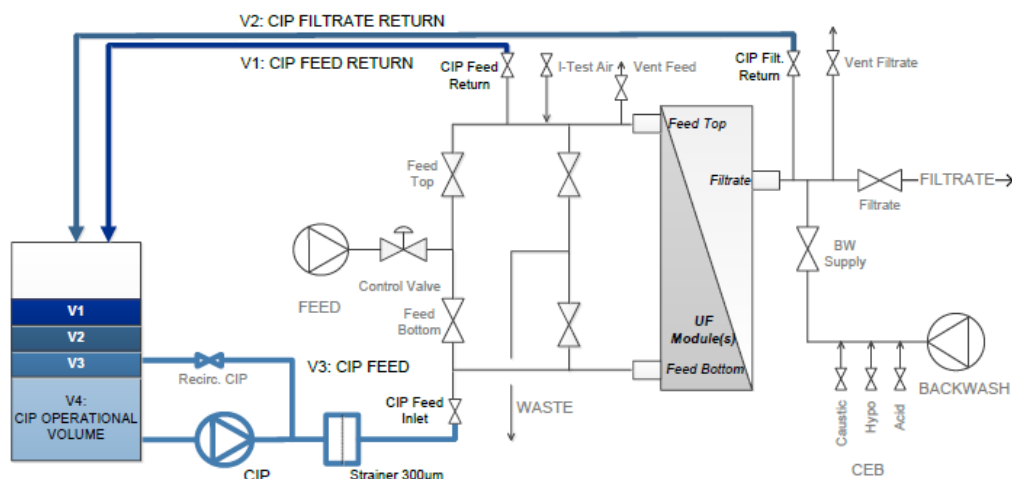
Výběr chemikálie závisí na typu znečištění membrány, pro většinu aplikací se využívá kombinace kyselého a alkalického prostředí. Alkalický CEB využívá nejčastěji hydroxid sodný (NaOH), často v kombinaci s chlornanem sodným (NaOCl) jako oxidantem, který je nejúčinnější pro odstranění organického znečištění a biologického nárustu. Doporučené pH je obvykle 12, s koncentrací NaOCl do $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Pro kyselý CEB se využívá kyselina chlorovodíková (HCl) nebo kyselina sírová (H_2SO_4), která slouží k odstranění anorganických usazenin a zbytků koagulantu na bázi železa nebo hliníku. Doporučené pH roztoku je mezi 1 až 2,5. Pokud je prováděný alkalický CEB, měl by následovat vždy kyselý CEB (buď bezprostředně nebo s odstupem jednoho filtračního cyklu). Kyselý proplach neutralizuje zbytky zásad a zabraňuje srážení uhličitánů, ke kterému by mohlo dojít při styku zásaditého prostředí s tvrdou vodou. [47]

Chemické čištění na místě (CIP)

Chemické čištění na místě (Clean in place) představuje intenzivní regenerační proces membránového systému, který se používá v případech, kdy standardní zpětný proplach ani chemicky posílený proplach (CEB) nedokážou obnovit původní výkonnost membrány. Na rozdíl od chemicky posíleného proplachu, který

je krátkodobý a provádí se často, je čištění na místě dlouhodobější procedura zahrnující recirkulaci chemikálií a prodlouženou dobu máčení. CIP se provádí “podle potřeby”, nikoliv podle pevně stanoveného časového rozvrhu (ačkoliv může být součástí preventivní údržby). Hlavním indikátorem pro zahájení CIP je pokles permeability systému pod definovanou mez (např. $100\text{--}150 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$), kterou již nelze zvrátit provedením CEB. Cílem procesu je obnovit permeabilitu alespoň na 70–80 % referenční hodnoty zaznamenané po uvedení do provozu. [47]

Proces aplikace chemikálií CIP se zásadně liší od CEB. Zatímco CEB využívá jednorázovou injekci a následně máčení, CIP vyžaduje recirkulaci roztoku přes speciální CIP nádrž. CIP nádrž se naplní vodou (ideálně permeátem) a rozmíchají se v ní chemikálie. Voda musí být bez mechanických nečistot, proto je vyžadována filtrace přes ochranné síto ($< 300 \mu\text{m}$). Chemický roztok je čerpán do modulu vždy ze strany nátoky ve směru filtrace. Je zakázáno provádět CIP v režimu zpětného toku, aby nedocházelo k zavlečení nečistot na čistou stranu filtrátu. Tento proces obvykle začíná recirkulací pouze na straně nátoky (cca 60 minut) a následně se zapojí i strana filtrátu. Po fázi recirkulace následuje statické máčení, kdy chemikálie působí na usazeniny. Celková doba trvání CIP (recirkulace + máčení) může dosahovat až 12 hodin. Pro zvýšení účinnosti lze roztok zahřát (max. $40 \text{ }^\circ\text{C}$). Po dokončení chemického čištění musí být systém důkladně propláchnut čistou vodou. Proplach se provádí sekvencí proplachů do odpadu, dokud není z roztoku odstraněna veškerá chemie. Úspěšnost CIP se ověřuje kontrolním měřením permeability. [47]

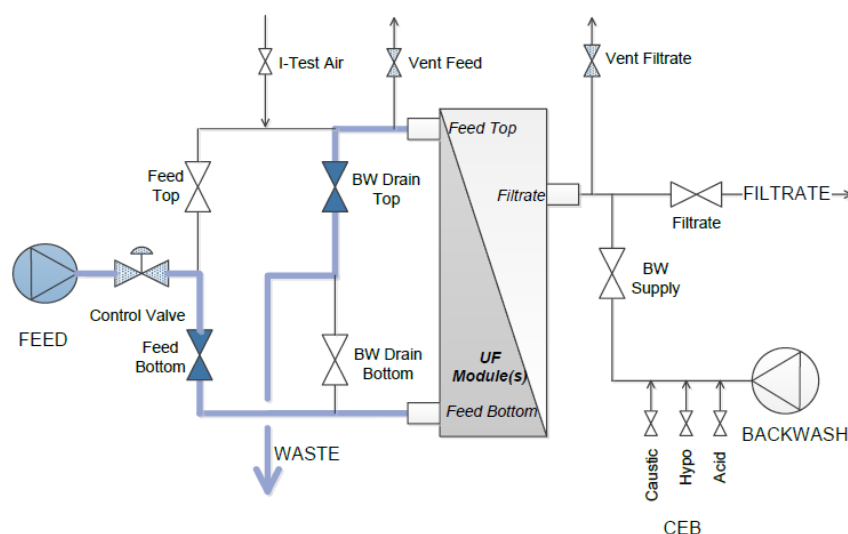


Obr. 4.5 Schéma zapojení CIP [47]

Podobně jako u CEB se volí chemikálie podle typu znečištění, avšak pro CIP se mohou používat vyšší koncentrace nebo specifické sekvence. [47]

Dopředný proplach (FF)

Dopředný proplach (Forward flush) představuje volitelný hydraulický krok při provozu ultrafiltrace a obvykle se zařazuje před anebo po zpětném proplachu. Ačkoli ve většině aplikací není tento krok nezbytný, jeho použití je výhodné zejména při úpravě surové vody s vysokou koncentrací pevných látek. Hlavní funkcí dopředného proplachu je efektivní odvedení částicového znečištění a minimalizace zanášení membrány. [47]



Obr. 4.6 Schéma dopředného proplachu horní částí [47]

4.1.3 Nanofiltrace

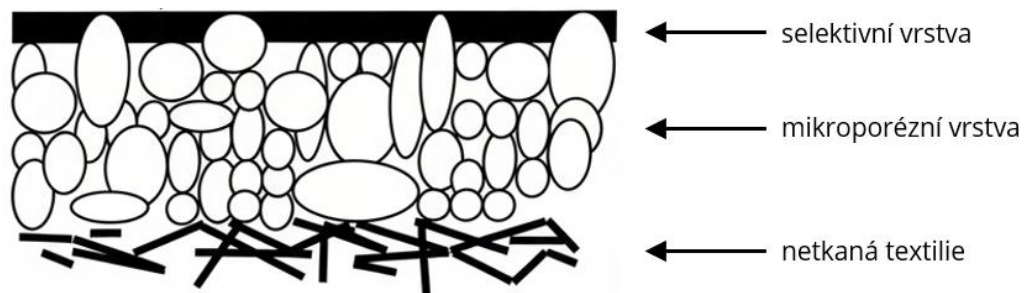
Nanofiltrace je membránový separační proces, jehož separační schopnosti se pohybují na rozhraní mezi ultrafiltrací a reverzní osmózou. Velikost pórů membrány se typicky pohybuje v řádu jednotek nanometrů (< 2 nm), což umožňuje efektivní odstraňování organických mikropolutantů a virů, ale i vícemocných iontů, čehož se využívá především při změkčování vody. Hnací silou je tlakový spád, který je výrazně nižší než u reverzní osmózy, z toho vyplývá, že je proces energeticky méně náročný. [45]

Proces separace nanofiltrací je založen na kombinaci dvou fyzikálně – chemických principů, a to síťového efektu a elektrostatické repulze. Síťový efekt zajišťuje zachycení nenabitých organických molekul, jejichž velikost nepřekračuje průměr pórů membrány, typicky 1–10 nm. Specifikem nanofiltrace je však Donnanův efekt, kdy elektrický náboj na povrchu membrány způsobuje odpuzování iontů. Díky tomu dochází k účinnému odstranění vícemocných iontů, zatímco jednomocné ionty membránou částečně procházejí. Transport látek je pak realizován difuzí a konvekcí na základě aplikovaného spádu. [43; 48]

Tab. 4.3 Charakteristika vody upravené nanofiltrací [1]

Ukazatel	Surová voda	Upravená voda	Účinnost [%]
Organické látky			
C _{org} celkový [mg·l ⁻¹]	4,0	-	-
C _{org} rozp. [mg·l ⁻¹]	3,6	0,4	89
C _{org} biodegr. [mg·l ⁻¹]	1,1	0,1	91
Absorbance [270 nm]	7,2	0,3	96
Pesticidy			
Atrazin [μg·l ⁻¹]	0,7	0,07	90
Simazin [μg·l ⁻¹]	0,4	<0,05	>85
Rozpuštěné soli			
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ [mmol·l ⁻¹]	3,0	0,8	73
Na ⁺ [mg·l ⁻¹]	19,0	10,0	47

Materiálem pro výrobu nanofiltračních membrán jsou syntetické polymery, přičemž se nejčastěji využívá struktura tenkovrstvých kompozitních membrán. Tyto membrány se skládají z porézní nosné vrstvy, zpravidla polysulfon nebo polyethersulfon, na kterou je metodou mezifázové polymerace nanosená tenká selektivní vrstva, nejčastěji na bázi polyamidu. Právě chemická struktura této svrchní vrstvy uděluje membráně její specifický záporný povrchový náboj a hydrofilní vlastnosti. Pro aplikace s extrémními provozními podmínkami, jako jsou například vysoké teploty nebo agresivní pH, se alternativně využívají anorganické keramické membrány na bázi oxidu hliníku, titanu nebo zirkonia, které mají vysokou chemickou a mechanickou odolnost. [49; 45]

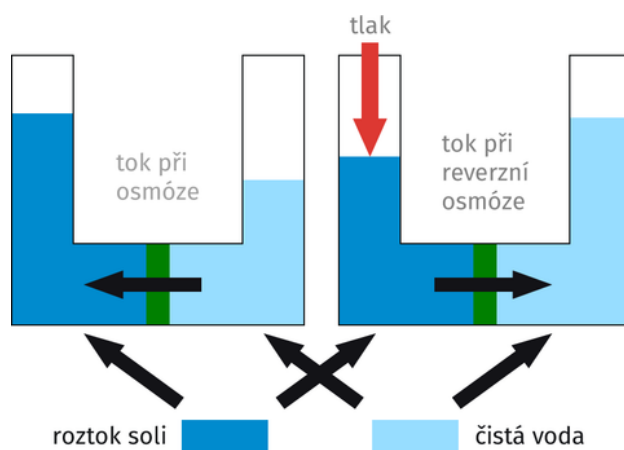


Obr. 4.7 Schématický řez kompozitní nanofiltrační membránou [43]

4.1.4 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza představuje nejpokročilejší stupeň ze skupiny tlakových membránových procesů. Na rozdíl od mikrofiltrace a ultrafiltrace, kde separace probíhá primárně na principu síťového efektu, využívá reverzní osmóza husté asymetrické nebo kompozitní membrány. Proces separace zde probíhá principem rozpouštění a difuze, kdy molekuly vody prostupují polymerní strukturou membrány rychleji než rozpuštěné látky. [45]

Hnací silou procesu je vysoký tlakový gradient v řádu $15 - 80 \cdot 10^5$ Pa, který musí překonat přirozený osmotický tlak upravovaného roztoku, aby došlo k obrácení přirozeného toku vody, tedy od koncentrovanějšího roztoku k zředěnému. [43]



Obr. 4.8 Princip reverzní osmózy [50]

Z hlediska separační účinnosti je reverzní osmóza schopna odstranit částice a molekuly menší než 1 nm. Jak vyplývá z přehledu účinnosti membránových procesů (Tab. 4.2), jedná se o jedinou metodu schopnou efektivně odstranit jednomocné ionty, rozpuštěné soli, dusičnany, amoniak a nízkomolekulární syntetické organické látky, jako jsou pesticidy. V technologických linkách je proto reverzní osmóza řazena až za procesy ultrafiltrace nebo nanofiltrace, které slouží jako předúprava chránící membrány reverzní osmózy před ucpáváním. [51]

Na rozdíl od mikrofiltračních a ultrafiltračních membrán, které jsou nejčastěji vyráběny jako symetrické nebo asymetrické z jednoho materiálu, jsou moderní membrány pro reverzní osmózu převážně kompozitní. Tyto membrány se skládají z několika funkčních vrstev optimalizovaných pro různé účely. Nosnou částí je porézní vrstva, obvykle z polysulfonu (PS) nebo polyethersulfonu (PES), která zajišťuje pevnost. Na ní je nanesena ultratenká separační vrstva z aromatického polyamidu (PA), která vzniká procesem mezifázové polymerace. Právě polyamidová vrstva je zodpovědná za vysokou selektivitu membrány a schopnost zadržet ionty solí. I když polyamidové membrány vykazují vynikající separační vlastnosti a stabilitu v širokém rozsahu pH, jejich hlavní nevýhodou je vysoká citlivost na oxidační činidla, zejména na volný chlór. I nízké koncentrace mohou

způsobovat degradaci polyamidové struktury, což vede k nezvratnému poškození membrány. [52]

Historicky starším typem, který se dnes využívá méně, jsou membrány z acetátu celulózy. Ty jsou sice tolerantnější vůči chlóru a méně náchylné k zanášení díky hladšímu povrchu, avšak vyžadují vyšší provozní tlaky a jsou nestabilní při vyšších teplotách a v extrémních oblastech pH. [53]

4.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ MEMBRÁNOVÝCH MODULŮ

Samotná membrána tvoří v separačním procesu pouze aktivní bariéru. Pro využití musí být membrány instalovány do vhodných provozních modulů. Konstrukce modulu má vliv na hydrodynamické podmínky procesu, energetickou náročnost, náchylnost k zanášení a možnost čištění. Hlavním kritériem pro hodnocení efektivity modulu je hustota uspořádání membrány, která udává poměr plochy membrány k objemu modulu [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]. Cílem je dosáhnout nejvyšší možné hustoty při zachování dobré hydrauliky. [44]

V současné praxi se nejčastěji setkáváme s pěti základními typy modulů: [43]

- deskové moduly,
- spirálně vinuté moduly,
- trubkové moduly,
- kapilární moduly,
- moduly s dutými vlákny.

Volba vhodného konstrukčního uspořádání membránového modulu je klíčovým faktorem pro efektivitu separačního procesu. Na základě technických parametrů a provozních zkušeností lze pro jednotlivé membránové procesy doporučit specifické typy modulů, jak shrnuje následující tabulka.

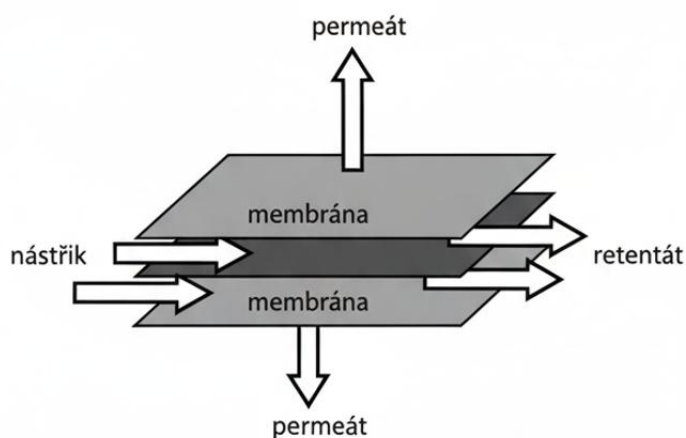
Tab. 4.4 Volba typu modulu [44]

Membránový proces	Typ modulu				
	Trubkový	Kapilární	S dutými vlákny	Deskový	Vinutý
Mikrofiltrace	++	+	-	-	-
Ultrafiltrace	++	+	-	++	+
Nanofiltrace	+	0	+	+	++
Reverzní osmóza	+	-	++	+	++

++ doporučuje se; + lze použít; 0 nejsou informace; - nelze použít

4.2.1 Deskové moduly

Základní konstrukční princip deskového modulu vychází ze sendvičového uspořádání, které je schematicky znázorněno na Obr. 4.9. Dvě ploché membrány jsou umístěny v nosné konstrukci, přičemž mezi nimi se nachází rozdělovač toku, nazývaný spacer. Tato základní jednotka se zpravidla opakuje v mnoha sekcích za sebou, čímž vzniká filtrační svazek. Z hlediska efektivity využití prostoru dosahuje tento typ modulů hustoty uložení v rozmezí 100 až 400 m²·m⁻³. [54]

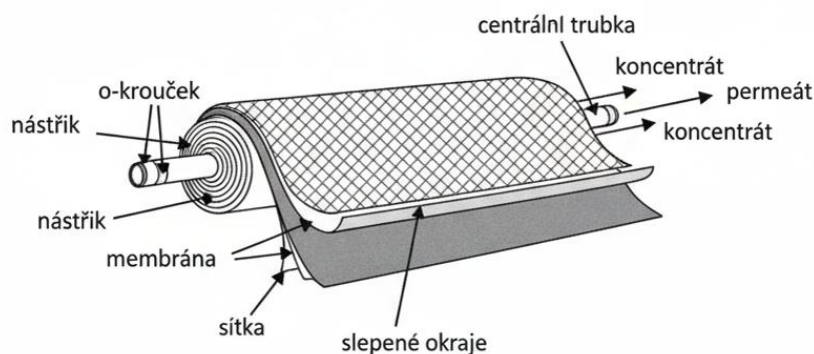


Obr. 4.9 Schématické znázornění deskového modulu [43]

4.2.2 Spirálně vinuté moduly

Základem konstrukce je navinutí membrány spolu s rozdělovací sítčkou na centrální sběrnou trubici. Základní stavební jednotkou je dvojice membrán, které jsou přiloženy permeátovou stranou k sobě a po okrajích slepeny. Tím vzniká uzavřená kapsa, která je spolu s distanční vložkou pro přívod nástržiku spirálovitě navinuta kolem centrální perforované trubky. Tok médií v modulu funguje tak, že je nástržik

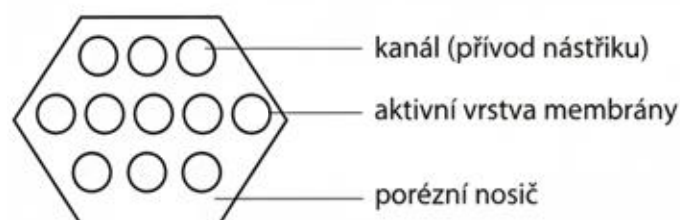
přiváděn do modulu axiálně a proudí kanálky vymezenými distanční sítkou. Permeát prostupuje membránou dovnitř a následně proudí radiálně spirálou směrem do středu, kde je odváděn centrální trubkou. Hustota uložení se u tohoto typu pohybuje v rozmezí 300 až 1 000 m²·m⁻³. [45]



Obr. 4.10 Schématické znázornění spirálně vinutého modulu [43]

4.2.3 Trubkové moduly

Základním prvkem jsou trubice o průměru větším než 10 mm, které musí být umístěny v pevném ochranném pouzdře. Ty jsou v modulu sdruženy do svazků, přičemž jeden modul obvykle obsahuje 4 až 18 trubek, v některých případech i více. Tyto trubičky jsou nejčastěji vyráběny z keramických materiálů, konkrétně z oxidu hlinitého (Al₂O₃) nebo oxidu zirkoničitého (ZrO₂). Ve srovnání s ostatními typy dosahují tyto moduly velmi malé hustoty uložení, která je obvykle menší než 300 m²·m⁻³. Specifickou variantou tohoto konstrukčního řešení je tzv. monolitický (multikanálový) modul, který integruje více kanálů do jednoho keramického bloku, viz Obr. 4.11. [54]



Obr. 4.11 Průřez multikanálovým keramickým modulem [43]

4.2.4 Kapilární moduly

Konstrukce těchto modulů spočívá ve sdružení velkého množství úzkých trubiček do jednoho svazku, přičemž jejich volné konce jsou pevně fixovány v epoxidové pryskyřici. Tento typ uspořádání nabízí flexibilitu v provozním režimu, tedy filtraci lze provádět buď tokem zevnitř kapiláry ven (inside-out), nebo opačně z vnějšího prostředí dovnitř (outside-in). Z hlediska efektivity dosahují kapilární moduly hustoty uložení v rozmezí 600 až 1 200 m²·m⁻³. [43]

4.2.5 Moduly s dutými vlákny

Tento typ modulů pracuje na podobném principu jako moduly kapilární, liší se však výrazně menším průměrem použitých vláken. Díky tomu představují konfiguraci s nejvyšší hustotou uložení, která může dosahovat hodnot 20 000 až 30 000 m²·m⁻³. Vzhledem k extrémní hustotě a malým průtočným profilům jsou však náchylné na ucpání, a proto je jejich použití (např. při odsolování mořské vody) podmíněno velmi důkladnou předúpravou nástřiku, aby se zamezilo vstupu nečistot. [43]

5 NÁVRH KONTEJNEROVÉ ÚPRAVY VODY

Následující kapitola se věnuje technickému návrhu a dimenzování jednotlivých technologických stupňů kontejnerové úpravy vody. Výpočty vycházejí ze stanovených kapacitních požadavků.

5.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Základním podkladem pro návrh technologie kontejnerové úpravy vody je požadovaná kapacita výroby.

5.1.1 Kapacitní údaje

Výpočet všech následujících technologických stupňů vychází z maximálního hodinového průtoku.

- Maximální hodinový průtok: $Q_{h,max} = 1,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 5,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$

5.1.2 Kvalitativní parametry

Jelikož nejsou stanoveny konkrétní rozborů surové vody, bude návrh koncipován jako univerzální víceúčelová sestava, která je schopná si poradit s běžným znečištěním povrchových vod.

5.2 HYDRAULICKÝ NÁVRH POTRUBÍ

Vnitřní průměr potrubí byl navržen na základě rovnice kontinuity (5.1) [55] pro zadaný maximální průtok a zvolenou optimální rychlost proudění. Pro výtlačná potrubí menších dimenzí se doporučuje volit ekonomickou rychlost proudění v rozmezí $0,8\text{--}1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aby bylo dosaženo kompromisu mezi průměrem potrubí a tlakovými ztrátami. Pro návrh byla zvolena rychlost $v = 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$Q = S \cdot v \quad (5.1)$$

Kde:

Q ... objemový průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

S ... průtočná plocha [m^2]

v ... rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Úpravou rovnice (5.1) a dosazením vztahu pro obsah kruhu $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ získáme vztah pro výpočet vnitřního průměru potrubí (5.2):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (5.2)$$

Kde:

d ... vnitřní průměr potrubí [m]

Q ... objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

v ... rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Po dosazení do vzorce (5.2):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00139}{\pi \cdot 1,2}} = 0,0384 \text{ m}$$

Na základě vypočteného průměru byla zvolena nejbližší vyšší standardizovaná dimenze potrubí PVC-U se jmenovitým tlakem (PN) 16.

- Vnější průměr: 50 mm
- Tloušťka stěny: 3,7 mm
- Vnitřní průměr: $d_{skut} = 50 - 2 \cdot 3,7 = 42,6 \text{ mm} = 0,0426 \text{ m}$

Kontrola skutečné rychlosti:

$$v_{skut} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,00139}{\pi \cdot 0,0426^2} = 0,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná rychlost $0,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ leží v doporučeném intervalu. Tato jmenovitá světlost/dimenze (DN 40 / d50) bude použita pro hlavní technologické rozvody úpravy.

5.3 NÁVRH PODÁVACÍHO ČERPADLA

Podávací čerpadlo je klíčovým prvkem hydraulického systému kontejnerové úpravy. Jeho úkolem je zajistit transport surové vody ze zdroje přes všechny stupně předúpravy (hydrocyklon, diskový filtr, svíčkové filtry) a následně protlačit vodu skrz ultrafiltrační membrány až do vyrovnávací nádrže.

5.3.1 Stanovení dopravní výšky H

Celková dopravní výška čerpadla představuje energii, kterou musí čerpadlo dodat kapalině k překonání výškových rozdílů a všech hydraulických odporů v systému. Je dána rovnicí (5.3): [55]

$$H = H_{geo} + H_s + \Sigma H_z \quad (5.3)$$

Kde:

H ... celková dopravní výška [m]

H_{geo} ... geodetická výška [m]

H_s ... sací výška [m]

ΣH_z ... součet místních ztrát a ztrát po délce [m]

Geodetická výška H_{geo} :

Geodetická výška je rovna výšce mezi podávacím čerpadlem a maximální výškou ve vyrovnávací nádrži, tedy 3,0 m.

Sací výška H_s :

Pro sací výšku, jelikož není přesně definováno umístění kontejneru, je uvažována maximální výška sání 5,0 m.

Místní tlakové ztráty H_m :

Místní ztráty se vyjadřují jako výšková ztráta v metrech vodního sloupce. Vypočítají se na základě dynamického tlaku a součinitele místní ztráty ζ , který je specifický pro každý typ tvarovky. [55]

$$H_m = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5.4)$$

Kde:

H_m ... místní tlaková ztráta [m]

ζ ... součinitel místní ztráty [-]

v ... rychlost proudění v potrubí [$m \cdot s^{-1}$]

g ... tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Výpočet celkových tlakových ztrát na výtlačném potrubí podávacího čerpadla zahrnuje jak ztráty v potrubních tvarovkách a armaturách, tak i výrazné ztráty na technologických zařízeních. Zatímco u běžných armatur je ztráta počítána pomocí součinitele ζ , u specifických komponent (hydrocyklon, filtry, membrány) jsou uvažovány fixní hodnoty tlakových ztrát deklarované výrobcem při jmenovitém průtoku $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Přehled všech uvažovaných prvků a jejich hydraulických odporů je uveden v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Výpočet místních tlakových ztrát pro podávací čerpadlo

Tvarovka	n	ξ	h_m	$h_{m, celkem}$
	[ks]	[-]	[m]	[m]
Zpětná klapka	1	1,5	0,073	0,073
Manuální kulový ventil	6	0,15	0,007	0,044
Třícestný ventil s elektropohonem	2	1,0	0,048	0,097
Dvoucestný ventil s elektropohonem	2	1,0	0,048	0,097
Membránový ventil	2	1,5	0,073	0,145
Rotametr	2	*	1,50	3,000
Průtokoměr	1	0,2	0,010	0,010
Hydrocyklon	1	*	7,0	7,0
Diskový filtr	1	9	1,0	1,0
Svíčkový filtr	2	*	8,0	16,0
Membrána ultrafiltrace	1	*	10,0	10,0
Koleno 90°	20	1,0	0,048	0,968
			Σ	38,43

* údaje o tlakových ztrátách uvedené výrobcem

Místní ztráty v potrubních rozvodech kontejneru činí přibližně 38,43 m.

Tlakové ztráty po délce H_f :

Tlakové ztráty po délce vznikají v důsledku viskozity kapaliny a drsnosti vnitřního povrchu potrubí. Pro výpočet je použita Darcy-Weisbachova rovnice (5.5). [55] Vzhledem k materiálu potrubí (PVC-U) a charakteru proudění se jedná o hydraulicky hladké potrubí.

$$H_t = \lambda \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5.5)$$

Kde:

H_t ... tlaková ztráta po délce [m]

λ ... součinitel tření [-]

L ... celková délka potrubí [m]

d_i ... vnitřní průměr potrubí [m]

v ... rychlost proudění v potrubí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

g ... tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

Před stanovením samotných ztrát třením byl určen součinitel tření λ . Vzhledem k charakteru proudění bylo nutné stanovit Reynoldsovo číslo, které určuje charakter proudění. [55]

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu} \quad (5.6)$$

Kde:

Re ... Reynoldsovo číslo [-]

v ... rychlost proudění v potrubí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

d_i ... vnitřní průměr potrubí [m]

ν ... kinematická viskozita vody při 20 °C [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

Po dosazení do rovnice (5.6):

$$Re = \frac{0,97 \cdot 0,0426}{1,0 \cdot 10^{-6}} \approx 41\,327$$

Vzhledem k materiálu potrubí (PVC-U) a vypočtenému Reynoldsovu číslu $Re \approx 41\,327$ je režim proudění v oblasti turbulentního proudění po hladkých stěnách. Pro výpočet součinitele tření byl zvolen Blasiovův vztah [55], který je definován pro podmínku $Re < 10^5$, což je v tomto případě splněno.

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (5.7)$$

Kde:

λ ... součinitel tření [-]

Re ... Reynoldsovo číslo [-]

Dosazení:

$$\lambda = \frac{0,3164}{41327^{0,25}} = \frac{0,3164}{14,25} \approx 0,0222$$

Vypočtená hodnota $\lambda = 0,0222$ bude následně použita v Darcy-Weisbachově rovnici pro stanovení ztrát třením v potrubí.

Dosazením do rovnice (5.5):

$$H_t = 0,022 \cdot \frac{25}{0,0426} \cdot \frac{0,97^2}{2 \cdot 9,81} = 0,625 \text{ m}$$

Ztráty třením v potrubí PVC-U d50 při celkové délce trasy 25,0 m činí přibližně 0,625 m.

Celková tlaková ztráta systému H_z je dána součtem místních ztrát technologických prvků a ztrát třením v potrubí.

$$\Sigma H_z = H_m + H_t \quad (5.8)$$

Kde:

ΣH_z ... celková tlaková ztráta [m]

H_m ... místní ztráty [m]

H_t ... ztráty třením [m]

Dosazením do rovnice (5.8):

$$\Sigma H_z = 38,43 + 0,625 = 39,055 \text{ m}$$

Dosazením do rovnice 5.3 dostaneme celkovou dopravní výšku, kterou musí čerpadlo překonat:

$$H_{celk} = 3,0 + 5,0 + 39,055 = 47,055 \text{ m}$$

5.3.2 Návrh čerpadla

Pro stanovené parametry ($Q = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $H = 57,1 \text{ m}$) byl proveden výpočet potřebného výkonu. Užitečný výkon předaný kapalině se vypočte dle rovnice (5.9): [56]

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (5.9)$$

Kde:

P ... výkon [W]

ρ ... hustota vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g ... tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Q ... průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

H ... dopravní výška [m]

Po dosazení do rovnice (5.9):

$$P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,00139 \cdot 47,055 \approx 642 \text{ W}$$

Pro určení celkového elektrického příkonu P byla uvažována kombinovaná účinnost hydraulické části a elektromotoru $\eta = 0,65$. [56]

$$P_0 = \frac{P}{\eta} \quad (5.10)$$

Kde:

P_0 ... příkon [W]

P ... výkon [W]

η ... účinnost [-]

Po dosazení do vzorce (5.10):

$$P = \frac{642}{0,65} = 988 \text{ W}$$

Na základě vypočtených hodnot je navrženo vícestupňové odstředivé čerpadlo v nerezovém provedení, které je odolné proti korozi a vhodné pro styk s pitnou vodou.

Doporučeno je např. čerpadlo Calpeda MXH 408 (nebo ekvivalent) s následujícími parametry:

- Jmenovitý průtok: $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Dopravní výška: max. 60 m
- Příkon motoru: 1,5 kW

Čerpadlo bude vybaveno frekvenčním měničem, který umožní regulovat výkon dle aktuálního zanesení filtrů a udržovat konstantní průtok i při měnící se tlakové ztrátě systému.

5.4 NÁVRH PŘEDČIŠTĚNÍ

Vzhledem k tomu, že zdrojem surové vody je povrchová voda, která může vykazovat proměnlivou kvalitu a nárazové zvýšení zákalu či obsahu pevných částic (písek), je systém navržen jako třístupňový. Cílem je postupná separace částic od nejhrubších po nejjemnější, aby byla zajištěna maximální ochrana citlivých ultrafiltračních membrán před mechanickým poškozením.

5.4.1 Hydrocyklon

V rámci předčištění je navržen hydrocyklon pro odstranění anorganických částic s vysokou měrnou hmotností (písek, štěrk), které by mohly způsobit abrazi potrubí a následných filtrů. Návrh vychází z požadavku na účinnou separaci při průtoku $Q = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Dle technických listů výrobce (např. řada Alfa Turbo) je pro tento průtok zvolen model s přípojevací dimenzí 1".

Návrhové parametry:

- Průtok: $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- Separační schopnost: částice $> 400 \mu\text{m}$.
- Tlaková ztráta: 0,7 bar (7,0 m).
- Odkalování: Automatické časové (pomocí elektropohonu).

5.4.2 Diskový filtr

Další jednotkou předčištění tvoří automatický diskový filtr. Jeho úkolem je zachytit lehčí organické nečistoty a částice, které nezachytil hydrocyklon. Tento filtr je pro ochranu před náhlým zanesením jemnějších svíčkových filtrů. Je zvolena filtrační jemnost 130 μm , která je standardním doporučením výrobců pro předúpravu povrchových vod.

Návrhové parametry:

- Filtrační plocha: min. 800 cm^2 .
- Jemnost filtrace: 130 μm .
- Tlaková ztráta: 0,1 bar (1,0 m).
- Regenerace: Zpětný proplach na základě tlakové ztráty (ΔP).

5.4.3 Svíčkový filtr

Jako finální bezpečnostní bariéra před vstupem na ultrafiltraci jsou navrženy dva paralelně zapojené svíčkové filtry. Tento stupeň slouží k zachycení částic, které by mohly ucpat vstupní otvory kapilár membrán (dutých vláken).

Návrhové parametry:

- Počet jednotek: 2 ks (provoz 1+1 nebo paralelně).
- Typ vložky: Vinutá nebo extrudovaná polypropylenová patrona.
- Jemnost filtrace: 80 μm .
- Tlaková ztráta: uvažováno 0,8 bar (8,0 m).

5.5 NÁVRH REAKČNĚ-AKUMULAČNÍ NÁDRŽE

Pro zajištění účinnosti chemické předúpravy před ultrafiltrací je do systému zařazena tlaková reakční nádrž. Hlavním účelem tohoto stupně není tvorba velkých sedimentujících vloček, nýbrž zajištění tzv. in-line koagulace. Cílem je destabilizace koloidních částic a tvorba mikrovloček, které jsou následně efektivně

separovány na povrchu membrány, aniž by docházelo k nevratnému ucpávání pórů.

Objem nádrže se stanoví na základě jmenovitého průtoku a požadované doby zdržení. Pro in-line koagulaci před membránovou filtrací se doporučuje doba zdržení v rozmezí 0,5 až 2 minuty. Pro návrh je zvolena doba $t = 1$ minuta.

$$V = Q \cdot t \quad (5.11)$$

Kde:

V ... objem reakčně – akumulární nádrže [m^3]

Q ... jmenovitý průtok [$m^3 \cdot h^{-1}$]

t ... doba zdržení [h]

Dosazením do vzorce (5.11):

$$V_{RAN} = 5,0 \cdot 0,0167 = 0,0835 \text{ m}^3$$

Převedeno na litry:

$$V_{RAN} = 0,0835 \text{ m}^3 = 83,5 \text{ l}$$

Na základě vypočteného objemu je navržena vertikální tlaková nádoba z kompozitních materiálů (sklolaminát s vnitřní vložkou z PE), která je odolná vůči korozivním účinkům chemikálií.

Technické parametry lahve:

- Typ: Tlaková kontaktní nádrž (např. WellMate)
- Jmenovitý objem: 95 litrů (nejbližší vyšší standardizovaná řada)
- Provozní tlak: PN 10
- Materiál: Polyethylen / Sklolaminát

5.6 NÁVRH ULTRAFILTRAČNÍ JEDNOTKY

Vzhledem k neznámému přesnému složení surové vody byl návrh ultrafiltrační jednotky (UF) koncipován konzervativně.

5.6.1 Dimenzování membránové plochy

Pro výpočet byla zvolena hodnota specifického filtračního toku (fluxu) $J = 50 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, což odpovídá standardům pro úpravu mírně znečištěných povrchových vod. [43]

$$S = \frac{Q}{J} \quad (5.12)$$

Kde:

S ... plocha membrány [m^2]

Q ... jmenovitý průtok [$\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$]

J ... flux [$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]

Dosažením do rovnice (5.12) dostaneme výslednou plochu membrány:

$$S = \frac{5000}{50} = 100 \text{ m}^2$$

Zvoleny jsou dva tlakové moduly s plochou 55 m^2 (celkem 110 m^2), čímž je zajištěna rezerva pro pokles propustnosti vlivem zanášení.

5.6.2 Návrh potrubí zpětného proplachu

Zpětný proplach (Backwash) je klíčový pro udržení životnosti membrán. Dle teoretických předpokladů (viz 4.1.2) je doporučený flux pro zpětný proplach $J_{BW} = 250 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Proplach se provádí vždy pro jeden modul samostatně, aby se snížily nároky na okamžitý průtok a velikost čerpadla.

$$Q_{BW} = S_{modul} \cdot J_{BW} \quad (5.13)$$

Kde:

Q_{BW} ... jmenovitý průtok [$\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$]

S_{modul} ... plocha membrány [m^2]

J_{BW} ... flux zpětného proplachu [$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]

Dosažením do rovnice (5.13):

$$Q_{BW} = 55 \cdot 0,250 = 13,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,00382 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Dimenze potrubí se vypočte pro dovolenou rychlost proudění při proplachu $v = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (krátkodobý průtok, lze volit vyšší rychlost):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00382}{\pi \cdot 1,5}} = 0,057 \text{ m}$$

Na základě výpočtu je zvoleno potrubí PVC-U d 75×5,4 mm (DN 65). Skutečná rychlost proudění:

$$v_{skut} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,00382}{\pi \cdot 0,0638^2} \approx 1,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tato rychlost je vyhovující.

5.6.3 Návrh čerpadel pro zpětný proplach

Pro zajištění hydraulické energie potřebné k regeneraci ultrafiltračních membrán jsou navržena dvě odstředivá čerpadla zapojená paralelně.

Požadovaný celkový průtok proplachu $Q_{BW} = 13,75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (odpovídá fluxu $250 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ pro proplach jednoho modulu, viz kapitola 5.6.2).

Průtok na jedno čerpadlo:

$$Q_1 = \frac{Q_{BW}}{2} = \frac{13,75}{2} = 6,88 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Dopravní výška musí překonat transmembránový tlak při praní a hydraulické ztráty v potrubí proplachu.

- Požadovaný tlak na membráně: cca 1,5 bar (15 m)
- Ztráty v potrubí a armaturách: 5,0 m (odhad pro d75)
- Rezerva: 5,0 m

Celková dopravní výška:

$$H = 15 + 5 + 5 = 25 \text{ m}$$

Návrh čerpadla

Pro pracovní bod $Q = 7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a $H = 25,0 \text{ m}$ (pro každé čerpadlo) je navržen typ: 2 ks nerezové vícestupňové čerpadlo (např. Calpeda MXH 803 nebo ekvivalent).

- Výkon motoru $P = 1,1 \text{ kW}$
- Materiálové provedení: Nerezová ocel AISI 304

5.6.4 Ověření návrhu softwarem výrobce

Správnost návrhu byla ověřena simulací v softwaru Inge System Design (iSD). Simulace byla provedena pro konfiguraci se dvěma moduly typu *IntegraTec™ MB 40 TR*. Výstupní protokol potvrzuje, že zvolená konfigurace je schopna pracovat s fluxem až $62,5 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. V manuálním návrhu byla z důvodu provozní jistoty a rezervy pro zhoršenou kvalitu vody zvolena konzervativnější hodnota $50,0 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Simulace dále stanovila výtěžnost systému na 89,8 % a interval chemicky posíleného proplachu (CEB) na 12 hodin.

5.7 NÁVRH VYROVNÁVACÍ NÁDRŽE

Vyrovnávací nádrž plní v technologické lince dvě klíčové funkce:

1. Hydraulické oddělení výroby (ultrafiltrace) a distribuce (ATS), což umožňuje plynulý provoz úpravy i při kolísavém odběru ve spotřebišti.
2. Zásobník procesní vody pro zpětné proplachy (Backwash) a chemické čištění (CEB/CIP) membrán.

Návrhový objem vychází z požadavku na akumulaci minimálně jedné hodiny maximálního výkonu úpravy, což je standardní hodnota pro zajištění provozní stability mobilních úprav. Objem vychází z rovnice (5.11):

$$V = 5,0 \cdot 1,0 = 5,0 \text{ m}^3$$

S ohledem na omezené prostorové možnosti 20' kontejneru nelze použít standardní válcovou nádrž. Je navržena hranatá nádrž svařená z konstrukčních

desek z polypropylenu (PP) s atestem pro styk s pitnou vodou (dle Vyhlášky č. 409/2005 Sb.).

Navrhované parametry:

- Vnitřní rozměry: 2130 × 1160 × 2200 mm ($D \times Š \times V$).
- Skutečný objem: 5,44 m³
- Užitečný objem: 5,2 m³ (po odečtení objemu nad bezpečnostním přepadem)

5.8 NÁVRH AUTOMATICKÉ TLAKOVÉ STANICE

Automatická tlaková stanice (ATS) zajišťuje čerpání upravené vody z vyrovnávací nádrže, její průchod přes finální stupně doúpravy (filtry s aktivním uhlím a UV lampy) a distribuci do spotřebiště pod požadovaným tlakem. Návrhový průtok odpovídá maximálnímu výkonu úpravní $Q = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

5.8.1 Stanovení dopravní výšky

Celková dopravní výška čerpadla se skládá z požadovaného přetlaku v místě odběru a součtu všech tlakových ztrát na výtlačném potrubí (včetně technologických prvků). [56]

$$H = p_{out} + \Sigma H_z \quad (5.14)$$

Kde:

H ... celková dopravní výška [m]

p_{out} ... požadovaný výstupní tlak [m v.s.]

ΣH_z ... celkové tlakové ztráty [m]

Místní tlakové ztráty (H_m):

Významnou část odporu tvoří tlakové filtry s aktivním uhlím (GAU) a armatury. Ztráta na filtrech je uvažována v provozním stavu. Soupis místních ztrát je uveden v následující tabulce (Tab. 5.2).

Tab. 5.2 Výpočet místních tlakových ztrát pro ATS

Tvarovka	n	ξ	h_m	$h_{m, celkem}$
	[ks]	[-]	[m]	[m]
Zpětná kapka	6	1,5	0,073	0,436
Manuální kulový ventil	2	0,15	0,007	0,015
Řídící jednotka filtru	2	1,0	0,048	0,097
Filtry s GAU	2	*	6,000	12,00
Membránový ventil	2	1,5	0,073	0,145
Rotametr	2	*	1,500	3,00
UV lampa	2	*	0,050	0,10
Průtokoměr	1	0,2	0,010	0,010
Koleno 90°	23	1,0	0,048	1,113
			Σ	16,91

* údaje o tlakových ztrátách uvedené výrobcem

Ztráty třením v potrubí H_t :

Výpočet byl proveden pro potrubí PVC-U d50 (DN 40) o celkové délce 20 m (zahrnující rezervu pro připojení) při rychlosti proudění $0,97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a součiniteli tření (viz 5.2). Ačkoliv je výstupní část potrubí redukována na d32, pro výpočet ztrát je tato krátká sekce zanedbatelná v porovnání s místními ztrátami technologie.

Dosazením do Darcy-Weisbachovy rovnice (5.5):

$$H_t = 0,022 \cdot \frac{20}{0,0426} \cdot \frac{0,97^2}{2 \cdot 9,81} = 0,50 \text{ m}$$

Celková dopravní výška H_z :

Dosazením do rovnice (5.14):

$$H_z = 40,0 + (16,91 + 0,50) = 57,41 \text{ m}$$

Pro návrh čerpadla je uvažována hodnota 57,5 m.

5.8.2 Návrh čerpadla

Užitečný výkon se vypočte dle rovnice (5.9):

$$P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,00139 \cdot 57,5 \approx 784 \text{ W}$$

Příkon motoru při uvažované účinnosti $\eta = 0,65$ se vypočítá dosazením do rovnice (5.10):

$$P_0 = \frac{784}{0,65} \approx 1206 \text{ W}$$

Je navržena automatická tlaková stanice s jedním vícestupňovým nerezovým čerpadlem (např. řada Calpeda MXH nebo Grundfos CME) o výkonu motoru 1,5 kW. Stanice bude vybavena frekvenčním měničem, který zajistí udržování konstantního výstupního tlaku 4 bary bez ohledu na aktuální odběr vody a míru zanesení filtrů s aktivním uhlím.

5.9 NÁVRH VELIKOSTI FILTRŮ S GRANULOVANÝM AKTIVNÍM UHLÍM

Tento technologický stupeň zajišťuje zachycení zbytkových mikropolutantů, úpravu organoleptických vlastností (chuť, pach) a především dechloraci vody před distribucí, pokud by došlo k nadměrnému dávkování dezinfekce. Návrh vychází z rozdělení celkového průtoku na dvě paralelně zapojené filtrační jednotky, což umožňuje kontinuitu provozu i během praní jednoho z filtrů.

Průtok na jednu jednotku:

$$Q_1 = \frac{Q_{h,max}}{n} = \frac{5,0}{2} = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Pro tlakovou filtraci na GAU se obvykle navrhuje filtrační rychlost v rozmezí 10–20 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$. Pro návrh je zvolena rychlost $v_f = 15 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Potřebná filtrační plocha jedné nádoby se vypočte dle rovnice (5.15): [57]

$$S_f = \frac{Q}{v_f} \quad (5.15)$$

Kde:

S_f ... filtrační plocha [m^2]

Q ... jmenovitý průtok na jednu filtrační nádobu [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

v_f ... filtrační rychlost [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$]

Dosažením do rovnice (5.15) získáme potřebnou filtrační plochu:

$$S_f = \frac{2,5}{15} = 0,167 \text{ m}^2$$

Na základě vypočtené plochy je zvolena standardizovaná kompozitní tlaková nádoba o rozměru 18 × 65" (průměr × výška, tedy 460 × 1650 mm).

Skutečná filtrační plocha:

$$S_{skut} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,46^2}{4} = 0,166 \text{ m}^2$$

Tato plocha vyhovuje požadavkům.

5.9.1 Výpočet objemu náplně a kontaktní doby

Klíčovým parametrem pro účinnost adsorpce je doba zdržení vody ve filtračním loži. Dle teoretických předpokladů (viz Tab. 3.1) je pro dechloraci a zlepšení chuti vyžadována doba 4–8 minut. Filtrační nádoba o výšce 65" (cca 165 cm) umožňuje výšku náplně cca $H = 1,2$ m (zbytek tvoří prostor pro expanzi lože při praní).

Objem náplně aktivního uhlí (V_{GAU}) v jedné nádobě:

$$V_{GAU} = S_{skut} \cdot H = 0,166 \cdot 1,2 \approx 0,20 \text{ m}^3 = 200 \text{ l}$$

Skutečná kontaktní doba:

$$EBCT = \frac{V_{GAU}}{Q_1} = \frac{0,20}{2,5} = 0,08 \text{ h} = 4,8 \text{ min}$$

Vypočtená doba zdržení 4,8 minuty splňuje požadavky pro dechloraci a základní zachycení organických látek.

5.9.2 Regenerace filtračního lože

Regenerace tlakových filtrů se provádí zpětným proplachem vodou pro odstranění zachycených nečistot a expanzi lože. Proces je rozdělen do dvou fází.

Fáze praní

Intenzita praní musí zajistit vznos filtračního lože (expanzi o 30–40 %). Pro granulované uhlí se volí rychlost praní $v_{bw} = 25 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$.

Průtok prací vody (Q_{bw}) se vypočte dosazením do vzorce (5.1), kde je navržena filtrační rychlost:

$$Q_{bw} = 0,166 \cdot 25 = 4,15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Při době praní 15 min (0,25 h) je spotřeba vody:

$$V_{prani} = 4,1 \cdot 0,25 = 1,03 \text{ m}^3$$

Fáze zafiltrování

Tato fáze slouží k usazení lože a vypláchnutí zbytků nečistot do odpadu. Rychlost je shodná nebo mírně vyšší než provozní, zvoleno $v_{zaf} = 20 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Průtok při zafiltrování (Q_{zaf}):

$$Q_{zaf} = 0,166 \cdot 20 = 3,32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Při době zafiltrování 5 min (0,083 h) je spotřeba vody:

$$V_{zaf} = 3,32 \cdot 0,083 = 0,28 \text{ m}^3$$

Bilance odpadních vod

Celková produkce odpadní vody z jedné regenerace jedné nádoby:

$$V_{celk,1} = V_{prani} + V_{zaf} = 1,04 + 0,28 = 1,32 \text{ m}^3$$

Při uvažované frekvenci praní 1× za 48 hodin pro každou nádobu je průměrná denní produkce odpadních vod z tohoto stupně $1,32 \text{ m}^3\cdot\text{den}^{-1}$.

5.10 NÁVRH UV LAMPY

Technologie UV záření je zvolena jako hlavní způsob hygienického zabezpečení upravené vody. Na rozdíl od chlorace nevytváří vedlejší produkty dezinfekce (DBP) a nemění chuťové vlastnosti vody. V technologické lince jsou UV lampy nasazeny ve dvou bodech:

- Cirkulační smyčka (1 ks): Zajišťuje sanitaci vyrovnávací nádrže a brání nárůstu biofilmu během akumulace permeátu.
- Výstupní sekce (2 ks): Umístěny za filtry s aktivním uhlím. Jelikož aktivní uhlí odstraňuje případný volný chlor a slouží jako substrát pro bakterie, je UV lampa na výstupu nezbytnou bezpečnostní bariérou před distribucí spotřebiteli.

Návrh vychází z požadavku normy ČSN 75 5050-3, která stanovuje minimální radiační dávku pro pitnou vodu:

- Požadovaná dávka: $400 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$
- Transmitance vody (T_{10}): Uvažována hodnota 95 % (voda po ultrafiltraci je zbavena zákalu, což zajišťuje vysokou prostupnost záření a účinnost dezinfekce).

Celkový výstupní průtok úpravy $Q = 5,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ je za automatickou tlakovou stanicí rozdělen do dvou paralelních větví (shodně s filtry GAU). Průtok na jednu větev $Q_1 = 2,5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

Pro zajištění unifikace náhradních dílů je zvolen jeden typ UV lampy pro všechny pozice (výstupní větve i cirkulační smyčku), který kapacitně vyhovuje průtoku $2,5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

Na základě hydraulických parametrů a požadované dávky je navržena nerezová nízkotlaká UV lampa (např. typ ULTRAVIOLET C-800 nebo ekvivalent).

- Max. průtok lampou: $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (při dávce $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
- Počet instalovaných kusů: 3 ks (1× cirkulace, 2× výstup)
- Příkon zářiče: 65 W
- Připojení: 1" (DN 25)

Tímto řešením je zajištěna dostatečná dezinfekční kapacita s rezervou ($2,7 > 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) pro každou větev technologie.

5.11 NÁVRH CIRKULAČNÍHO ČERPADLA

Pro zajištění mikrobiologické stability upravené vody ve vyrovnávací nádrži je navržen recirkulační okruh vybavený UV lampou. Cirkulace zabraňuje stagnaci vody v době, kdy není odběr do spotřebičů.

Průtok cirkulace je navržen s ohledem na hydraulickou kapacitu instalované UV lampy (viz 5.10) a požadavek na pročištění celého objemu nádrže.

- Návrhový průtok: $Q_{cirk} = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Obrat nádrže: $T = 2$ hodiny.

Jedná se o uzavřený okruh s minimálním převýšením. Čerpadlo překonává pouze místní ztráty na UV lampě a tření v potrubí (DN 25). Odhad ztrát:

- Ztráta na UV lampě: cca 0,1 bar (1,0 m)
- Ztráta v potrubí, tvarovkách a armaturách: cca 1,5 m
- Celkem: $H_z = 2,5 \text{ m}$

Je navrženo cirkulační mokroběžné čerpadlo pro pitnou vodu (např. typ Calpeda NC nebo ekvivalent Grundfos UP) s parametry:

- Průtok: $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Dopravní výška: $H = 3,0 \text{ m}$
- Příkon: $P_0 = 110 \text{ W}$

5.12 DÁVKOVÁNÍ CHEMIE

Jelikož není k dispozici rozbor surové vody, je dimenzování dávkovacích čerpadel provedeno na základě maximálních provozních dávek běžných pro úpravu povrchových vod. Návrh zajišťuje dostatečnou kapacitní rezervu pro případné zhoršení kvality zdroje.

5.12.1 Dávkování koagulantu

Koagulace slouží k destabilizaci koloidních látek před membránovou filtrací. Uvažujeme použití koncentrovaného hlinitého nebo železitého koagulantu (např. PAX-18).

- Maximální uvažovaná dávka: $D_{max} = 60 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$
- Průtok vody: $Q = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Potřebný výkon čerpadla: [57]

$$Q_{dav} = Q \cdot D_{max} = 5,0 \cdot 60 = 300 \text{ ml h}^{-1} = 0,3 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$$

5.12.2 Úprava pH

Slouží k optimalizaci pH pro koagulaci. Spotřeba je závislá na pufrační kapacitě vody, typicky se pohybuje v rozmezí $0,1 - 1,0 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

5.12.3 Dávkování chlornanu sodného

Slouží pro hygienické zabezpečení na výstupu z úpravy vody.

Pro udržení rezidua chloru $0,3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ je spotřeba minimální, řádově jednotky $\text{ml} \cdot \text{h}^{-1}$.

5.12.4 Návrh dávkovacích čerpadel

Z výpočtů vyplývá, že maximální potřebné průtoky nepřekračují $2 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$. Z důvodu unifikace náhradních dílů jsou pro všechny chemické sekce navržena membránová elektromagnetická dávkovací čerpadla s regulovatelným výkonem:

- Rozsah výkonu: $0,0 - 5,0 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$
- Protitlak: min. 6 bar
- Materiálové provedení: Hlava PVDF/PVC, těsnění Viton/EPDM (dle typu chemikálie).

5.13 NÁVRH ODPADNÍHO POTRUBÍ

Odpadní potrubí odvádí vodu z procesů regenerace (zpětný proplach membrán, praní filtrů GAU, odkalení předfiltrace) a z bezpečnostních přepadů nádrží. Pro dimenzování společného sběrného potrubí je rozhodující maximální okamžitý průtok, který v systému může nastat. K souběhu praní ultrafiltrace a filtrů s aktivním uhlím z logiky řídicího systému nedochází.

Vzhledem k přítomnosti gravitačního bezpečnostního přelivu nelze odpadní potrubí dimenzovat jako čistě tlakové. Potrubí musí být navrženo jako gravitační s částečným plněním, aby bylo zamezeno vzniku protitlaku a zahlcení přelivu. Rozhodujícím faktorem je maximální průtok při současném praní a hypotetickém přetečení nádrže. Pro zajištění odtoku samospádem uvnitř kontejneru volíme dimenzi, která pojme průtok $Q_{odp} = 15,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1} = 0,00417 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ při plnění potrubí maximálně na 70 %.

Výpočet minimálního průměru dle rovnice kontinuity (5.2) pro $v = 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00417}{\pi \cdot 0,8}} = 0,081 \text{ m} = 81 \text{ mm}$$

Z výpočtu vyplývá, že potrubí d75 by bylo na hranici kapacity. Proto je pro hlavní sběrné odpadní potrubí zvoleno potrubí d90 (DN 80).

- Materiál: PVC.
- Sklon: min. 2 % směrem k výstupu z kontejneru.
- Kapacita: Potrubí DN 80 při sklonu 2 % bezpečně odvede průtok cca $6-8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ($21-28 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$), což poskytuje rezervu pro návrhový průtok $15,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ($4,17 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$).

6 TECHNICKÁ ZPRÁVA

Mobilní kontejnerová úpravna povrchové vody je koncipována s využitím nejnovějších poznatků v oboru úpravárenství vod s přihlédnutím k používaným technologiím a způsobům úpravy vod. Klíčovou navrženou technologií je ultrafiltrace na membránových modulech. Navržená technologie je koncipována jako vícebariérový systém s důrazem na kvalitu výstupního produktu a jeho mikrobiální nezávadnost. Jedná se o komplexní technologii úpravný vody umístěnou v zatepleném 20' kontejneru uloženém v blízkosti povrchového zdroje.

6.1 IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE A KONCEPCE ŘEŠENÍ

Předmětem technické zprávy je návrh technologického vystrojení mobilní kontejnerové úpravný vody, určené pro výrobu pitné vody z povrchových zdrojů.

Základní údaje:

- typ zařízení: mobilní kontejnerová úpravna vody,
- technologie: membránová ultrafiltrace s koagulační předúpravou,
- kapacita: $Q_{h,max} = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
- umístění: ISO kontejner 20',
- režim provozu: automatický s dálkovým dohledem.

Technologická linka je navržena jako vícebariérový systém. Systém je dimenzován pro úpravu povrchové vody s proměnlivou kvalitou (zákal, organické znečištění, mikrobiologie). Klíčovým prvkem je ultrafiltrace v režimu Dead-End, která fyzikálně odstraňuje bakterie a viry, doplněná o adsorpci na aktivním uhlí pro odstranění mikropolutantů a úpravu organoleptických vlastností.

6.2 FUNKČNÍ POPIS TECHNOLOGIE

Technologický proces je rozdělen do čtyř funkčních bloků, které na sebe hydraulicky navazují. Řízení procesu zajišťuje centrální řídicí systém (PLC), který monitoruje provozní stavy a automaticky spouští regenerační cykly.

6.2.1 Hrubé předčištění a chemická úprava

Surová voda je do úpravný dopravována podávacím čerpadlem (1). Prvním prvkem předčištění je hydrocyklon (2), pracující na principu odstředivé síly, který separuje anorganické částice (písek, štěrk) o velikosti $> 400 \mu\text{m}$. Následuje automatický diskový filtr (3) s porozitou $130 \mu\text{m}$, který slouží jako ochranná bariéra proti vláknitým nečistotám a větším suspendovaným látkám. Do proudu mechanicky předčištěné vody je dávkován koagulant (5) pro destabilizaci koloidních látek a činidlo pro úpravu pH (7). K dokonalé homogenizaci chemikálií a tvorbě vloček dochází v průtočné reakčně-akumulační nádrži (9).

6.2.2 Membránová separace

Jádrem technologie je ultrafiltrační jednotka (10), osazená dvěma moduly s dutými vlákny. Voda je filtrována směrem Inside-out (zevnitř vláken ven). Membrána s velikostí pórů 20 nm spolehlivě zachycuje veškeré nerozpuštěné látky, koloidy, bakterie a viry. Proces filtrace je cyklický – po zanesení membrán dochází k automatickému zpětnému proplachu filtrátem, který zajišťují proplachovací čerpadla (M13, M14). Pro odstranění organického a anorganického znečištění pórů probíhá periodicky chemicky posílený proplach (CEB) s dávkováním kyseliny, zásady a chlornanu (M15, M16 a M17).

6.2.3 Doúprava a akumulace

Permeát je akumulován ve vyrovnávací nádrži (I), která slouží jako zdroj vody pro proplachy a zároveň jako sání pro distribuční systém. Aby nedocházelo ke stagnaci vody v nádrži, je instalován cirkulační okruh s UV lampou (12) a cirkulačním čerpadlem (11). Finální doúpravu zajišťují dva paralelně zapojené filtry s granulovaným aktivním uhlím (14, 15), přes které je voda tlačena automatickou tlakovou stanicí (13). Tento stupeň odstraňuje rozpuštěné organické látky, pesticidy a případné zbytky chloru po chemickém čištění.

6.2.4 Hygienické zabezpečení

Ačkoliv ultrafiltrace odstraňuje mikroorganismy, legislativní bezpečnost je jistěna dvojitě. Na výstupu za aktivním uhlím jsou instalovány výkonné UV lampy (16, 17) pro fyzikální dezinfekci. Jako konzervant pro distribuci v síti je do vody dávkován chlornan sodný (19).

6.3 PARAMETRY ÚPRAVY VODY

Tato kapitola definuje klíčové technické a technologické parametry navrženého systému úpravy vody.

6.3.1 Projektované parametry

Technologická linka úpravy vody je dimenzována na následující maximální produkční kapacity (za předpokladu dostatečné kapacity vstupní vody z povrchového zdroje):

- maximální hodinový průtok: $Q_{h,max} = 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
- maximální denní produkce: $Q_{d,max} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$,
- maximální měsíční produkce: $Q_{m\acute{e}s} = 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{m\acute{e}s}^{-1}$.

Surová voda pro úpravu bude primárně odebírána z povrchového zdroje, typicky z vodního toku (řeka) nebo z jezera. Pro zajištění trvalého a spolehlivého odběru surové vody je definován minimální požadavek na výšku hladiny v místě sání. Dostatečné množství vody v řece je pro provádění úpravy definováno výškou hladiny, která musí dosahovat minimálně 30 cm nad zaústění sací trubky.

Technologie úpravy je navržena a optimalizována na základě požadované produkce, avšak její efektivita a stabilita jsou přímo závislé na kvalitě vstupní surové vody.

V závislosti na aktuální kvalitě surové vody lze konfiguraci technologie úpravy flexibilně upravit. Aby byl zajištěn bezpečný provoz úpravy, kvalita surové vody

nesmí překročit limity stanovené v následující tabulce, která specifikuje typické a maximální hodnoty znečištění.

Tab. 6.1 Typické a maximální hodnoty znečištění surové vody [47]

Parametr	Jednotka	Typická hodnota	Maximum (krátkodobé špičky)
Zákal	NTU	< 200	< 400
Nerozpuštěné látky (TSS)	mg·l ⁻¹	< 300	< 500
Velikost částic	mikron	< 300	< 300
Rozpuštěný organický uhlík (DOC)	mg·l ⁻¹	< 20	< 40
Chemická spotřeba kyslíku (CHSK)	mg·l ⁻¹	< 100	< 200
Oleje / Tuhy	mg·l ⁻¹	< 0	< 2
pH Kontinuální		3–10	
pH Čištění	CEB / CIP	2.3 / 12.0	1.0 / 13.0
Volný chlor – Kontinuální	mg·l ⁻¹	0	< 0.2
Volný chlor – CEB	mg·l ⁻¹	20 při pH 12.0	50 při pH 13.0
Volný chlor – CIP	mg·l ⁻¹	100 při pH 12.0	200 při pH 13.0
Teplota	°C	1–40 °C	

6.3.2 Parametry upravené vody

Za předpokladu dostatečné kapacity vstupní surové vody bude upravená voda splňovat parametry podle Vyhlášky č. 252/2004 Sb. *Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody.*

6.3.3 Odběr vzorků vody

Vzorky surové a upravené vody budou odebírány z odběrných míst:

- odběrové místo surové vody před hydrocyklonem (2),
- odběrové místo předupravené vody za průtokoměrem (FIC 6),
- odběrové místo upravené vody za vstřikovací tryskou dávkovacího čerpadla (18).

6.3.4 Množství upravené vody

Maximální hodinový průtok: $Q_{h,max} = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Maximální denní produkce: $Q_{d,max} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$.

Maximální měsíční produkce: $Q_{m\acute{e}s,max} = 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{m\acute{e}s}^{-1}$.

6.4 TECHNICKO – TECHNOLOGICKÝ POPIS ZAŘÍZENÍ ÚPRAVNY VODY

Následující část technické zprávy se věnuje popisu jednotlivých komponent úpravní vody. Umístění těchto prvků je patrné z výkresové dokumentace v přílohách této diplomové práce.

6.4.1 Všeobecné informace

Strojně technologické vybavení úpravní vody tvoří:

- podávací čerpadlo,
- hydrocyklon,
- diskový automatický filtr,
- manuální diskový filtr,
- dávkovací čerpadla,
- reakčně – akumulární nádrž,
- membránová jednotka ultrafiltrace,
- vyrovnávací nádrž,
- cirkulační čerpadlo,
- automatická tlaková stanice,
- tlakové filtry s náplní aktivního uhlí,
- UV lampy,
- propojovací potrubí a armatury,
- elektrický rozvaděč technologie.

6.4.2 Podávací čerpadlo

Pro dopravu surové vody ze zdroje na úpravnu je navrženo horizontální vícestupňové odstředivé čerpadlo v celonerezovém provedení (AISI 304). Čerpadlo je vybaveno frekvenčním měničem pro udržení konstantního průtoku při proměnlivé tlakové ztrátě na předfiltrech.

- Typ: např. Calpeda MXH 408 (nebo ekvivalent).
- Materiálové provedení: Nerezová ocel 1.4301 (AISI 304).

6.4.3 Hydrocyklon

Jako první stupeň ochrany slouží hydrocyklonový separátor písku, pracující na principu odstředivé síly. Zařízení separuje anorganické částice o hustotě vyšší než voda (písek, štěrk) s účinností od velikosti zrna > 400 μm . Separované nečistoty se hromadí ve sběrné komoře ve spodní části separátoru. Odkalení probíhá automaticky pomocí časově řízeného kulového ventilu s elektropohonem (M2), který cyklicky vypouští sediment do kanalizace, aniž by došlo k přerušení průtoku vody technologií.

6.4.4 Diskový filtr

Pro zachycení jemnějších nerozpuštěných látek a vláknitých nečistot je instalován automatický diskový filtr. Filtrační element je tvořen sloupcem stlačených polymerních disků s drážkami definujícími jemnost filtrace 130 μm .

Filtr je vybaven systémem automatického zpětného proplachu, který se spouští na základě tlakové ztráty (rozdíl tlaků vstup/výstup) nebo časového intervalu. Při proplachu dochází k uvolnění stisku disků a jejich roztočení proudem vody, čímž se efektivně odstraní zachycené nečistoty.

6.4.5 Chemické hospodářství

Pro zvýšení účinnosti membránové filtrace jsou do proudu vody před reakční nádrž dávkovány chemikálie pomocí membránových elektromagnetických čerpadel.

Dávkování koagulantu (5): Slouží k destabilizaci koloidních látek. Dávkovací čerpadlo vstříkuje roztok (např. PAX-18) úměrně aktuálnímu průtoku.

Úprava pH (7): Dávkování kyseliny nebo zásady pro optimalizaci pH koagulace.

Zásobní kanystry s chemikáliemi jsou umístěny v samostatných plastových záchytných vanách z chemicky odolného materiálu (PE/PP). Objem každé vany

je dimenzován tak, aby zachytil 100 % objemu skladovaného obalu, čímž je zabráněno úniku chemikálií do prostoru kontejneru a jejich vzájemnému smísení.

6.4.6 Reakčně – akumulční nádrž

Pro zajištění potřebné doby zdržení pro tvorbu vloček je zařazena průtočná tlaková reakční nádoba (9). Nádoba je vyrobena z kompozitních materiálů s vnitřní vložkou z PE. Konstrukce zajišťuje hydraulické zdržení min. 60 sekund při jmenovitém průtoku, což umožňuje dokonalou homogenizaci chemikálií se surovou vodou před vstupem na membrány.

6.4.7 Ultrafiltrační jednotka

Hlavním separačním stupněm je ultrafiltrační jednotka (10) osazená dvěma moduly s membránami typu dutých vláken s velikostí pórů cca 0,02 μm . Filtrace probíhá v režimu dead-end (nulový odtok koncentráту při filtraci) směrem inside – out (zevnitř vláken ven).

Konfigurace: 2 ks modulů, celková plocha 110 m^2 .

Zpětný proplach: Regenerace probíhá plně automaticky pomocí filtrované vody (permeátu). Pro zajištění požadovaného proplachovacího toku ($\text{flux} > 230 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) jsou instalována dvě prací čerpadla (M13, M14), která při proplachu pracují v paralelním režimu.

Chemicky posílený proplach (CEB): Periodicky (cca 1–2x denně) je do prací vody dávkován roztok chemikálií (M15, M16, M17 – kyselina/zásada/chlornan) pro odstranění organického a anorganického zanášení membrán. Vzhledem k použití nekompatibilních chemikálií je každá chemikálie skladována odděleně a umístěna ve vlastní záchytné vaně, aby bylo vyloučeno riziko vzniku nebezpečných plynů při případném úniku.

6.4.8 Vyrovnávací nádrž

Permeát z ultrafiltrace je akumulován v beztlaké plastové nádrži o užitém objemu 5,0 m³. Nádrž plní funkci zásobníku pro zpětné proplachy membrán a zároveň slouží jako sání pro distribuční čerpadla. Je vybavena:

- hydrostatickým čidlem hladiny (4–20 mA) pro plynulé řízení,
- havarijními plovákovými spínači (max/min),
- bezpečnostním přepadem do kanalizace.

Z důvodu ochrany technologie a prostoru kontejneru před vytopením v případě selhání měření hladiny je nádrž vybavena havarijním gravitačním přepadem. Přepadové potrubí dimenze d90 je zaústěno do odpadního potrubí. Horní hrana bezpečnostního přelivu definuje maximální hladinu v nádrži, tj. 50 mm od zákrytové desky nádrže.

6.4.9 Cirkulační okruh s dezinfekcí

Pro zamezení stagnace vody v době minimálního odběru je na vyrovnávací nádrži instalována cirkulační smyčka.

Cirkulační čerpadlo (11): Mokroběžné čerpadlo pro pitnou vodu (např. Wilo Star-Z) zajišťuje kontinuální promíchávání objemu nádrže.

UV lampa (12): Umístěna na cirkulačním potrubí, zabraňuje nárůstu biofilmu a množení bakterií v akumulované vodě.

6.4.10 Automatická tlaková stanice

Distribuci vody do spotřebiště a přes filtry s aktivním uhlím zajišťuje kompaktní automatická tlaková stanice (ATS). Stanice je tvořena nerezovým vícestupňovým čerpadlem s integrovaným frekvenčním měničem (např. Grundfos CME), tlakovou nádobou a snímačem tlaku. Systém udržuje konstantní výstupní tlak bez ohledu na aktuální odběr.

6.4.11 Filtry s granulovaným aktivním uhlím

Pro odstranění rozpuštěných organických látek (pesticidy, mikropolutanty) a zlepšení organoleptických vlastností (chuť, pach) jsou instalovány dva paralelně zapojené tlakové filtry naplněné granulovaným aktivním uhlím (GAU).

Řízení: Každý filtr je vybaven automatickou řídicí hlavou (např. Clack nebo Runxin), která řídí proces filtrace a zpětného praní.

Praní: Probíhá automaticky (časově nebo objemově) čistou vodou z ATS. Odpadní voda je svedena do kanalizace.

6.4.12 UV lampa

Jako hlavní stupeň hygienického zabezpečení jsou na výstupu z úpravný instalovány dvě výkonné UV lampy. Záření o vlnové délce 254 nm inaktivuje bakterie a viry poškozením jejich DNA. Zařízení je dimenzováno na zajištění dávky min. $400 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ při maximálním průtoku, čímž je splněn požadavek legislativy.

6.4.13 Odpadní potrubí a kanalizace

Veškeré odpadní vody z procesu regenerace (proplach diskového filtru, odkalení hydrocyklonu, zpětný proplach membrán, praní GAU) jsou svedeny do centrálního sběrného potrubí dimenze DN 80. Potrubí je vedeno ve spádu k výstupu z kontejneru.

Maximální okamžitý průtok do odpadu: cca $15,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (při praní membrán).

6.5 ZKOUŠKY VODOTĚSNOSTI

Před uvedením úpravný vody do zkušebního provozu musí být provedeny předepsané zkoušky těsnosti všech hydraulických okruhů a akumulačních prostor.

6.5.1 Tlakové zkoušky potrubního vstrojení

Tlaková zkouška rozvodů vody a chemikálií bude provedena v souladu s ČSN EN 806-4 (Vnitřní vodovod pro rozvod vody určené k lidské spotřebě).

Zkušební médium: Pitná nebo surová voda bez mechanických nečistot.

Zkušební přetlak: Potrubní rozvody budou zkoušeny na přetlak rovnající se 1,5násobku provozního tlaku (tj. cca 9,0 bar pro výtlak podávacího čerpadla, resp. 6,0 bar pro nízkotlaké části).

Ochrana citlivých zařízení: Před zahájením tlakové zkoušky musí být uzavřeny nebo demontovány citlivé prvky, které by mohly být vysokým zkušebním tlakem poškozeny. Jedná se zejména o:

- ultrafiltrační moduly (max. tlak 5 bar),
- sondy měření kvality (pH, vodivost, zákal),
- tlakové snímače s nízkým rozsahem.

Průběh: Zkušební tlak musí být udržován po dobu min. 60 minut. Během této doby nesmí dojít k poklesu tlaku o více než 0,2 bar a nesmí se objevit viditelné úkapy na spojích.

Zkouška vodotěsnosti nádrže

Zkouška vodotěsnosti plastové vyrovnávací nádrže bude provedena dle ČSN 75 0905 (Zkoušky vodotěsnosti vodárenských a kanalizačních nádrží).

Vzhledem k tomu, že se jedná o plastovou nádrž, provádí se zkouška napuštěním nádrže po provozní hladinu.

Po napuštění a ustálení hladiny (min. 2 hodiny) proběhne vizuální kontrola pláště a svárů. Zkouška je úspěšná, pokud po 24 hodinách nedojde k měřitelnému úniku vody (nad rámec odparu) a na vnějším povrchu nejsou patrná mokrá místa.

Zkouška těsnosti havarijní jímky

Vzhledem k přítomnosti nebezpečných chemických látek je nutné ověřit těsnost všech prvků sloužících k zachycení případných úniků. Zkouška se provádí v souladu s normou ČSN 75 0905.

6.6 KOMPLEXNÍ VYZKOUŠENÍ

Pro komplexní vyzkoušení zabezpečí provozovatel dostatečné množství pitné vody. Množství a druh použitého média pro komplexní vyzkoušení bude dohodnuto s ohledem na technické možnosti provozovatele. Doba trvání komplexního vyzkoušení na jednotlivých zařízeních bude upřesněna dohodou investora a dodavatele. Navrhuje se doba 24 hodin. Individuální vyzkoušení a vlastní komplexní vyzkoušení úpravy vody provedou dodavatelé technologických zařízení a montáží.

6.7 PROVOZNÍ NÁKLADY

Provozní náklady jsou tvořeny přímými náklady na spotřebu elektrické energie pro stroje a zařízení, personálními náklady pro pracovníky obsluhy a údržby úpravy vody, náklady na odvoz a likvidaci materiálů z úpravy vody a náklady na chemikálie. Dále je nutno počítat s odpisovými náklady pro stroje a zařízení.

6.7.1 Spotřeba elektrické energie

Úpravna vody je navržena pro automatický provoz s důrazem na energetickou efektivitu (využití frekvenčních měničů na čerpadlech).

Celkový instalovaný příkon: $P_i = 15 \text{ kW}$.

Soudobý provozní příkon: $P_p = 6,0 - 8,0 \text{ kW}$.

Specifická spotřeba: Odhadovaná spotřeba el. energie na výrobu pitné vody se pohybuje v rozmezí $0,5 - 0,8 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$.

6.7.2 Spotřeba provozních chemikálií

Dávkování chemikálií je řízeno automaticky v závislosti na průtoku a kvalitě vody.

Koagulant (např. PAX-18):

Dávkování: cca $1,5 - 5,0 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$ (dle zákalu surové vody).

Spotřeba se odvíjí od aktuální kvality zdroje.

Dezinfekce (Chlornan sodný NaClO, 12%):

Dávkování pro hygienické zabezpečení: nastavováno tak, aby koncentrace volného chloru na výstupu byla v rozmezí 0,1 – 0,3 mg·l⁻¹.

6.7.3 Spotřeba vody a produkce odpadních vod

Provozní náklady zahrnují i vodu spotřebovanou na vlastní technologickou potřebu (praní filtrů, regenerace).

Výtěžnost úpravy je cca 85–90 %. Znamená to, že pro výrobu 1,0 m³ pitné vody je nutné odebrat cca 1,15 m³ vody surové.

Odpadní vody:

- zpětný proplach UF: 200 l·cyklus⁻¹,
- praní filtrů s aktivním uhlím: 600 l·cyklus⁻¹.

V případě, že jsou tyto vody odváděny do kanalizace, představují náklad v podobě stočného.

6.7.4 Náklady na obsluhu a údržbu

Díky plné automatizaci nevyžaduje úprava trvalou přítomnost obsluhy.

Běžná obsluha: Předpokládá se pochůzková kontrola v rozsahu 15 minut denně (vizuální kontrola těsnosti, kontrola tlaku, doplnění chemie).

Odborný servis: 1× ročně (kalibrace sond, revize elektro, výměna UV zářičů).

Výměna náplní:

- diskový filtr (čištění): manuálně cca 1× měsíčně,
- aktivní uhlí: výměna náplně cca 1× za 1–2 roky (dle obsahu organických látek a chloru).

6.8 ELEKTRICKÁ INSTALACE

Návrh elektroinstalace a systému měření a regulace tvoří samostatnou část projektové dokumentace, kterou zpracovává osoba s příslušnou elektrotechnickou kvalifikací (dle Vyhlášky č. 50/1978 Sb. resp. NV 194/2022 Sb.).

Tato technická zpráva definuje pouze technologické požadavky na elektrické vstrojení, tj. soupis spotřebičů, které je nutné napájet, a soupis snímačů potřebných pro automatické řízení procesu.

Napěťová soustava:

Předpokládá se připojení na soustavu 3L+N+PE AC 50 Hz 400/230 V / TN-C-S.

Řízení:

Celá technologie bude řízena centrálním rozvaděčem s PLC automatem (např. Siemens Simatic S7-1200) na základě signálů z níže uvedených čidel.

Realizace:

Schéma zapojení rozvaděče a dimenzování kabelových tras zajistí dodavatel elektročásti v rámci dílenské dokumentace.

Tab. 6.2 Soupis elektrických zařízení

Ozn.	Název zařízení	Umístění	Napětí [V]	Výkon [kW]
M1	Podávací čerpadlo	Kontejner	400	1,50
M2	Kulový ventil	Hydrocyklon	230	0,02
M3	Třícestný ventil	Diskový filtr	230	0,20
M4	Třícestný ventil	Diskový filtr	230	0,20
M5	Dávkovací čerpadlo	Koagulant	230	0,02
M6	Dávkovací čerpadlo	Úprava pH	230	0,02
M7	Kulový ventil	UF vstup	230	0,02
M8	Kulový ventil	UF filtrát	230	0,02
M9	Kulový ventil	UF odpad	230	0,02
M10	Kulový ventil	UF odpad	230	0,02
M11	Kulový ventil	UF odpad	230	0,02
M12	Kulový ventil	UF backwash	230	0,02
M13	Prací čerpadlo UF	UF backwash	400	1,85
M14	Prací čerpadlo UF	UF backwash	400	1,85
M15	Dávkovací čerpadlo	CEB (Zásada)	230	0,02
M16	Dávkovací čerpadlo	CEB (Kyselina)	230	0,02
M17	Dávkovací čerpadlo	CEB (Dezinfekce)	230	0,02
M18	Cirkulační čerpadlo	Vyrovnávací nádrž	230	0,04
M19	ATS	Vyrovnávací nádrž	230	1,50
M20	Řídicí hlava filtru GAU	GAU 1	230	0,02
M21	Řídicí hlava filtru GAU	GAU 2	230	0,07
M22	Dávkovací čerpadlo	Dezinfekce výstup	230	0,07
UV1	UV lampa	Cirkulace	230	0,07
UV2	UV lampa	Výstup 1	230	0,01
UV3	UV lampa	Výstup 2	230	0,01

Tab. 6.3 Soupis zařízení pro měření neelektrických veličin

Ozn.	Měřená veličina	Typ přístroje	Umístění / Funkce
QIC1	Zákal	Optický senzor	Vstup surové vody
PI2	Tlak	Tlakový senzor	Před diskovým filtrem
PI3	Tlak	Tlakový senzor	Za diskovým filtrem
QIC4	pH	Elektrochemická sonda	Předúprava (za disk. filtrem)
QIC5	Vodivost	Vodivostní sonda	Předúprava (za disk. filtrem)
FIC6	Průtok	Indukční průtokoměr	Nátok na Ultrafiltraci
QIC7	pH	Elektrochemická sonda	Za reakční nádrží
PI8	Tlak	Tlakový senzor	Vstup na membrány (TMP)
PI9	Tlak	Tlakový senzor	Výstup z membrán (TMP)
PI10	Tlak	Tlakový senzor	Vstup backwash (TMP)
LS11	Hladina (Min.)	Plovákový spínač	Ochrana čerpadel v nádrži
LS12	Hladina (Max.)	Plovákový spínač	Ochrana proti přeplnění nádrže
LI13	Hladina	Tenzometrická sonda	Řízení výkonu úpravní (4-20 mA)
FIC14	Průtok	Indukční průtokoměr	Výstup pitné vody
QIC15	pH	Elektrochemická sonda	Kontrola kvality pitné vody
QIC16	Vodivost	Vodivostní sonda	Kontrola kvality pitné vody
QIC17	Zákal	Optický senzor	Kontrola kvality pitné vody

6.9 VZDUCHOTECHNIKA A TEPELNĚ-TECHNICKÉ VLASTNOSTI KONTEJNERU

Technologie úpravní vody je instalována do standardizovaného ISO kontejneru 20', který plní funkci technologického objektu. Vzhledem k nárokům na celoroční provoz a ochranu citlivých komponent je kontejner stavebně upraven.

6.9.1 Tepelná izolace

Kontejner je navržen jako zateplený. Stěny a strop jsou opatřeny tepelnou izolací (např. sendvičové panely s jádrem z PUR pěny nebo minerální vaty), která minimalizuje tepelné ztráty v zimním období a zabraňuje nadměrnému přehřívání interiéru v letních měsících.

6.9.2 Větrání

Větrání vnitřního prostoru je řešeno jako nucené podtlakové a slouží k odvodu tepelné zátěže od technologie a k zajištění výměny vzduchu v případě úniku

chemických výparů. Přívod vzduchu je zajištěn přes větrací mřížku s filtrem, umístěnou ve spodní části vstupních dveří nebo v obvodové stěně. Odtah vzduchu je zajištěn nástěnným ventilátorem umístěným v horní části stěny kontejneru.

6.9.3 Klimatizace a vytápění

Pro aktivní řízení vnitřního mikroklimatu je kontejner vybaven nástěnnou klimatizační jednotkou. Tato jednotka plní funkci chlazení v letních špičkách, kdy samotné větrání nestačí k udržení teploty pod 35–40 °C. V zimním období může jednotka fungovat v režimu tepelného čerpadla (případně je doplněna o elektrický přímotop) pro temperování prostoru na minimální teplotu 5 °C.

6.10 POŽADAVKY NA STAVEBNÍ PŘIPRAVENOST

Jelikož je úpravna vody řešena jako mobilní kontejnerová jednotka, stavební nároky jsou minimalizovány. Před osazením kontejneru však musí investor zajistit následující stavební připravenost.

Zpevněná plocha:

V místě osazení musí být vybudován vodorovný zpevněný povrch (betonová deska nebo betonové pasy po obvodu).

Přípojka surové vody:

Potrubí surové vody musí být přivedeno do těsné blízkosti místa osazení a ukončeno přírubou nebo závitěm odpovídající dimenze (DN 50), ideálně v nezámrzné hloubce nebo opatřeno topným kabelem.

Elektrická přípojka:

Přívodní silový kabel (např. CYKY-J 5×6 mm²) musí být přiveden do místa hlavního rozvaděče s dostatečnou rezervou pro zapojení.

Kanalizační přípojka:

Pro odvod odpadních vod z praní filtrů a regenerace membrán je nutné připravit kanalizační přípojku s dostatečnou kapacitou pro nárazový odtok.

Uzemnění:

V místě osazení musí být připraven vývod zemnicí soustavy (zemnicí pásek FeZn nebo tyč) pro připojení ochranného pospojování kontejneru.

6.11 BEZPEČNOST A OCHRANA ZDRAVÍ PŘI PRÁCI

Provoz úpravy vody je navržen v souladu s platnými bezpečnostními předpisy. Obsluha musí být prokazatelně proškolená a seznámena s Provozním řádem.

Chemická bezpečnost:

V technologii jsou používány chemické látky klasifikované jako žíravé. Pro manipulaci s nimi platí přísná bezpečnostní opatření dle bezpečnostních listů. Pro zajištění bezpečnosti při manipulaci s chemickými koncentráty je v interiéru kontejneru instalována oční sprcha. Toto zařízení slouží k okamžitému výplachu očí v případě náhodného zasažení žíravinou a je napojeno na vnitřní rozvod upravené vody.

Elektrická bezpečnost a ostatní rizika

Úraz el. proudem: Živé části jsou kryty, ochrana je zajištěna samočinným odpojením od zdroje a proudovými chrániči. Obsluha smí vykonávat pouze běžnou manipulaci (ovládání panelu), zasahovat do el. instalace smí pouze osoba s příslušnou kvalifikací.

Tlaková zařízení: Části technologie pracují pod tlakem (až 6 bar). Před jakoukoli demontáží potrubí nebo armatur je nutné systém odtlakovat.

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh technologického řešení kontejnerové úpravy vody s využitím membránových procesů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část, které společně poskytují komplexní pohled na problematiku mobilních úpraven vody.

V teoretické části byla provedena rešerše dostupných technologií úpravy vody se zaměřením na separační stupně a zdroje surové vody. Zvláštní pozornost byla věnována kontejnerovým úpravnám, jejich konstrukčním specifikům a používaným technologiím, jako jsou tlakové filtry, sorpce na aktivním uhlí a dezinfekce. Dále byly detailně popsány membránové procesy, zejména ultrafiltrace, která představuje klíčový prvek navrženého řešení, včetně různých konstrukčních uspořádání membránových modulů.

Praktická část práce je věnovaná samotnému návrhu kontejnerové úpravy. Na základě zadaných vstupních parametrů byla navržena technologická linka, která zahrnuje předčištění pomocí hydrocyklonu a diskových filtrů, chemickou úpravu a následnou ultrafiltraci. Návrh ultrafiltrační jednotky byl ověřen pomocí softwaru výrobce. Součástí praktického návrhu byly rovněž hydraulické výpočty potrubních tras a dimenzování čerpadel (podávacích, cirkulačních i dávkovacích). Byla navržena vyrovnávací nádrž a automatická tlaková stanice pro distribuci upravené vody.

Součástí praktického výstupu je zpracovaná projektová dokumentace. Ta zahrnuje technologické schéma procesu a kompletní dispoziční řešení umístění technologie uvnitř kontejneru. Pomocí půdorysů a řezů bylo prokázáno, že navržené komponenty lze do vymezeného prostoru kontejneru instalovat při zachování přístupnosti pro obsluhu a údržbu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, Jana. *Příručka provozovatele úpravný pitné vody*. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, c2005. ISBN 80-239-4565-3.
- [2] BRNĚNSKÉ VODÁRNY A KANALIZACE, A.S. *Úpravna vody Švařec*. Online. Dostupné z: <https://www.bvk.cz/media/fotogalerie/upravna-vody-svarec>. [cit. 2025-12-02].
- [3] TUHOVČÁK, Ladislav; ADLER, Pavel; KUČERA, Tomáš a RACLAVSKÝ, Jaroslav. *Vodárenství: Úprava vody*. Brno, 2006.
- [4] BIELA, Renata a BERÁNEK, Josef. *Úprava vody a balneotechnika*. Učební texty vysokých škol. Brno: Cerm, 2004. ISBN 80-214-2563-6.
- [5] KEKES, Tryfon; TZIA, Constantina a KOLLIPOULOS, Georgios. Drinking and Natural Mineral Water: Treatment and Quality–Safety Assurance. Online. *Water*. 2023, roč. 15, č. 13, s. 2325. ISSN 2073-4441. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w15132325>. [cit. 2025-11-29].
- [6] KATSANOOU, Konstantina a KARAPANAGIOTI, Hrisi K. Surface Water and Groundwater Sources for Drinking Water. Online. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2017, s. 1-19. ISBN 9783319768816. ISSN 1867-979X. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/698_2017_140. [cit. 2025-11-29].
- [7] *More people, more food, worse water?: a global review of water pollution from agriculture*. Colombo: International Water Management Institute, 2018. ISBN 978-92-5-130729-8.
- [8] ASCOTT, M. J.; GOODDY, D. C.; WANG, L.; STUART, M. E.; LEWIS, M. A. et al. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone. Online. *Nature Communications*. 2017, roč. 8, č. 1. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01321-w>. [cit. 2025-11-29].

- [9] KOŘÍNEK, Robert; NOVÁKOVÁ, Hana a NIETSCHEOVÁ, Jaroslava. Aktuální stav problematiky ochranných pásem vodních zdrojů. Online. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2017, roč. 59, č. 3, s. 4. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/vtei.2017.03.001>. [cit. 2025-12-29].
- [10] SCHWARZENBACH, René P.; ESCHER, Beate I.; FENNER, Kathrin; HOFSTETTER, Thomas B.; JOHNSON, C. Annette et al. The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems. Online. *Science*. 2006, roč. 313, č. 5790, s. 1072-1077. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.1127291>. [cit. 2025-11-29].
- [11] PAERL, Hans W. a OTTEN, Timothy G. Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. Online. *Microbial Ecology*. 2013, roč. 65, č. 4, s. 995-1010. ISSN 0095-3628. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>. [cit. 2025-11-29].
- [12] KUBEŠ, Jiří. *Provozování a bezpečnost zdrojů, úpraven a rozvodů pitné vody*. České Budějovice: Vysoká škola evropských a regionálních studií, 2013. ISBN 978-80-87472-49-1.
- [13] MATYSÍKOVÁ, Jana. Česle a síta. Online. In: . 2014. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/news/cesle-a-sita.264>. [cit. 2025-12-27].
- [14] MALÝ, Josef a MALÁ, Jitka. *Chemie a technologie vody*. 2., dopl. vyd. Brno: ARDEC, c2006. ISBN 80-860-2050-9. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:87c68950-604a-11e5-bf4b-005056827e51>.
- [15] SHENG, Danny Pui Wei; BILAD, Muhammad Roil a SHAMSUDDIN, Norazanita. Assessment and Optimization of Coagulation Process in Water Treatment Plant: A Review. Online. *ASEAN Journal of Science and Engineering*. 2022, roč. 3,

- č. 1, s. 79-100. ISSN 2776-5938. Dostupné z: <https://doi.org/10.17509/ajse.v3i1.45035>. [cit. 2025-11-29].
- [16] BANAŚ, Marian a HILGER, Bartłomiej. Proposal for New Method for Calculating Sedimentation Process Efficiency in Water Treatment Plants. Online. *Materials*. 2024, č. 3285. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17133285>. [cit. 2025-11-29].
- [17] JURAEV, Sh; AKRAMOV, A; ABDURAZZOKOV, A a PATHIDINOVA, U. Increasing the efficiency of sedimentation tanks for drinking water treatment. Online. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, roč. 1076, č. 1, s. 012049. ISSN 1755-1307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012049>. [cit. 2025-11-29].
- [18] BONNÉLYE, V.; GUEY, L. a DEL CASTILLO, J. UF/MF as RO pre-treatment: the real benefit. Online. *Desalination*. 2008, roč. 222, č. 1-3, s. 59-65. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.129>. [cit. 2025-11-29].
- [19] XU, Qi; LUO, Xi; XU, Chengjian; WAN, Yanlei; XIONG, Guangcheng et al. The Whole Process CFD Numerical Simulation of Flow Field and Suspended Solids Distribution in a Full-Scale High-Rate Clarifier. Online. *Sustainability*. 2022, roč. 14, č. 17, s. 10624. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su141710624>. [cit. 2025-12-09].
- [20] DRBOHLAV, Josef. Poznatky z navrhování a projektování flotace na úpravách vody. In: *Pitná voda 2010*. České Budějovice: W&ET Team, 2010, s. 89–94. ISBN 978-80-254-6854-8.

- [21] LÁTAL, Milan; HLAVÁČ, Jaroslav a FILLA, Josef. Minimalizace provozních nákladů při rekonstrukci ÚV Znojmo. In: *Pitná voda 2012*. České Budějovice: W&ET Team, 2012, s. 107–112. ISBN 978-80-905238-0-7.
- [22] BIELA, Renata. Vodárenská flotace a její použití při úpravě pitné vody v ČR. Online. *TZB info*. 2012. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/8900-vodarenska-flotace-a-jeji-pouziti-pri-uprave-pitne-vody-v-cr>. [cit. 2025-12-27].
- [23] GONZÁLEZ-GALVIS, Juan Pablo; JARAMILLO LONDOÑO, Angela María a SEPÚLVEDA AMAYA, Ruben Dario. Comparison of dissolved air flotation and sedimentation for the treatment of two waters with low turbidity in Colombia. Online. *Water Practice*. 2024, roč. 19, č. 6, s. 2460-2472. ISSN 1751-231X. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.150>. [cit. 2025-12-29].
- [24] CHEREMISINOFF, Nicholas P. *Handbook of water and wastewater treatment technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann, c2002. ISBN 07-506-7498-9. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750674980>.
- [25] HASSARD, Francis. Workshop Report: Slow Sand Filter Futures. Online. 2025. Dostupné z: <https://generic.wordpress.soton.ac.uk/ebnet/wp-content/uploads/sites/343/2025/03/EBNet-WB-WG-SSF-Workshop-Report.pdf>. [cit. 2025-12-27].
- [26] GARCÍA-ÁVILA, Fernando; GALARZA-GUAMÁN, Andrés; BARROS-BERMEO, Mónica; ALFARO-PAREDES, Emigdio Antonio; AVILÉS-AÑAZCO, Alex et al. Integration of high-rate filtration using waste-derived biochar as a potential sustainable technology for drinking water supply. Online. *Biochar*. 2023, roč. 5, č. 1. ISSN 2524-7867. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00256-4>. [cit. 2025-12-29].

- [27] TUHOVČÁK, Ladislav; ADLER, Pavel a KUČERA, Tomáš. *Vybrané statě z vodárenství*. 2008.
- [28] *Kontejnerová řešení pro technologie úpravy a čištění vod*. Online. TZB-info, 2024. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/27246-kontejnerova-reseni-pro-technologie-upravy-a-cistení-vod>. [cit. 2025-11-17].
- [29] BÁBORSKÁ, Lucie. *Fotografie realizovaných projektů*.
- [30] FUSO NERINI, Francesco; VALENTINI, Francesco; MODI, Anish; UPADHYAY, Govinda; ABEYSEKERA, Muditha et al. The Energy and Water Emergency Module; A containerized solution for meeting the energy and water needs in protracted displacement situations. Online. *Energy Conversion and Management*. 2015, roč. 93, s. 205-214. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.019>. [cit. 2025-12-02].
- [31] ROZSYPAL, Jakub. *Fotogalerie realizovaných projektů*.
- [32] *Katalog opatření pro úsporu vody v energetice a průmyslu*. Online. Dostupné z: <http://recyklace-voda.vscht.cz/>. [cit. 2025-11-20].
- [33] ČERPADLA ZÁVLAHY.CZ. *Separátory písku*. Online. 2025. Dostupné z: <https://cerpadlazavlahy.cz/cerpaci-technika/283-hydrocyklon-alfa-turbo-1-8054407026639.html>. [cit. 2025-12-30].
- [34] WATER LIFE S.R.O. *Úprava vody, filtrace a čištění vody*. Online. Dostupné z: <https://waterlife.cz/diskove-filtry-azud/>. [cit. 2025-11-22].
- [35] STUHLÍK, Hynek. *Filtrace vody: Příručka pro obsluhu a údržbu filtračních stanic : Určeno prac. v provozu, projektantům v oboru vodního hosp. růz. sektorů a posl. odb. a vys. škol. Řada stavební lit.* Praha: SNTL, 1962. Dostupné také z:

<http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:a9e7d890-1738-11e6-853f-005056827e52>.

- [36] GRAY, N. F. *Water technology: an introduction for environmental scientists and engineers*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. ISBN 978-1-85617-705-4.
- [37] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [38] KUČERA, Jakub. *Účinnost aktivního uhlí při odstraňování léčiv z vody*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Renata Biela, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, 2024.
- [39] CHOWDHURY, Zaid K.; SUMMERS, R. Scott; WESTERHOFF, Garret P.; NOWACK, Brian O. a CORWIN, Christopher J. *Activated Carbon: Solutions for Improving Water Quality*. USA: American Water Works Association, 2013. ISBN 978-1-58321-907-2.
- [40] KOPECKÝ, Jaroslav. Návrh vhodného aktivního uhlí ve vodárenství. Online. In: . S. 191 - 195. Dostupné z: <https://www.smv.cz/res/data/014/001680.pdf>. [cit. 2024-05-05].
- [41] LARASATI, Amanda; FOWLER, Geoffrey D. a GRAHAM, Nigel J.D. Insights into chemical regeneration of activated carbon for water treatment. Online. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021, roč. 9, č. 4. ISSN 2213-3437. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105555>. [cit. 2024-05-05].
- [42] ČSN 75 5050-3, *Hospodářství pro dezinfekci vody ve vodohospodářských provozech - část 3: Dezinfekce prováděná UV zářením*. Praha: ÚNMZ, 2016.

- [43] PALATÝ, Zdeněk a BERNAUER, Bohumil. *Membránové procesy*. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012. ISBN 978-807-0808-085.
- [44] 27 Membránové procesy. Online. In: . VŠCHT, s. 22. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k27.membranove.procesy.pdf>. [cit. 2026-01-06].
- [45] PEINEMANN, Klaus-Viktor a NUNES, Suzana Pereira. *Membranes for water treatment*. Membrane technology. Weinheim: Wiley-VCH, c2010. ISBN 978-352-7314-836.
- [46] ASIO, S.R.O. *Ultrafiltrace*. Online. 2026. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/p/106.ultrafiltrace>. [cit. 2026-01-06].
- [47] Inge® product Series: dizzer® XL Series Modules for Open Platform, T-Rack® 3.0 Series: Process and Design Guidelines. Online. 2021. [cit. 2025-11-23].
- [48] YANG, Zi; ZHOU, Yi; FENG, Zhiyuan; RUI, Xiaobo; ZHANG, Tong et al. A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification. Online. *Polymers*. 2019, roč. 11, č. 8, s. 1252. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym11081252>. [cit. 2026-01-03].
- [49] PEYDAYESH, Mohammad. Nanofiltration Membranes: Recent Advances and Environmental Applications. Online. *Membranes*. 2022, roč. 12, č. 5, s. 518. ISSN 2077-0375. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/membranes12050518>. [cit. 2026-01-03].
- [50] KOTAS, Jindřich. Základní funkce a princip reverzní osmózy (RO). Online. *TZB - info*. 2016. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14589-zakladni-funkce-a-princip-reverzni-osmozy-ro>. [cit. 2026-01-03].

- [51] ALAYANDE, Abayomi Babatunde; GOH, Kunli; SON, Moon; KIM, Chang-Min; CHAE, Kyu-Jung et al. Recent Progress in One- and Two-Dimensional Nanomaterial-Based Electro-Responsive Membranes: Versatile and Smart Applications from Fouling Mitigation to Tuning Mass Transport. Online. *Membranes*. 2020, roč. 11, č. 1, s. 5. ISSN 2077-0375. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/membranes11010005>. [cit. 2026-01-03].
- [52] PETERSEN, Robert J. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes. Online. *Journal of Membrane Science*. 1993, roč. 83, č. 1, s. 81-150. ISSN 0376-7388. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)80014-o](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)80014-o). [cit. 2026-01-03].
- [53] BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. 3rd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-74372-0.
- [54] KABAY, Nalan; A. SHIRAZI, Mohammad M.; GÜLER, Enver a BRYJAK, Marek. Editorial: Reviews in membrane modules and processes. Online. *Frontiers in Membrane Science and Technology*. 2025, roč. 3. ISSN 2813-1010. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/frmst.2024.1542869>. [cit. 2026-01-06].
- [55] JANDORA, Jan a ŠULC, Jan. *Hydraulika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.
- [56] RACLAVSKÝ, Jaroslav. *Projekt vodní hospodářství obcí*. Modul 2 Doprava vody. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.
- [57] KUČERA, Tomáš. *Projekt VHO*. Modul 1, Jímání a úprava vody. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Úpravna vody Švařec – ilustrační foto [2].....	2
Obr. 2.2 Schéma úpravy vody bez separačního stupně [3]	3
Obr. 2.3 Schéma úpravy vody s jednostupňovou separací [4]	4
Obr. 2.4 Schéma úpravy vody s dvoustupňovou separací [4]	5
Obr. 2.5 Schéma úpravy vody s vícestupňovou separací [3]	6
Obr. 2.6 Příklad podzemního zdroje – jímací studny [autor]	7
Obr. 2.7 Příklad povrchového zdroje – vodárenská nádrž Šance [9]	8
Obr. 2.8 Geometrie česlí a sít [13]	10
Obr. 2.9 Prostory sedimentační nádrže [3].....	11
Obr. 2.10 Sedimentační nádrž [autor].....	11
Obr. 2.11 Čiřič na UV Znojmo [autor]	13
Obr. 2.12 Schéma čiřiče s vločkovým mrakem [14]	13
Obr. 2.13 Schéma klasického uspořádání zařízení flotace [22]	15
Obr. 2.14 Schéma otevřeného pomalého filtru [1].....	17
Obr. 2.15 Otevřené rychlofiltry na úpravě vody Znojmo [autor].....	19
Obr. 2.16 Uspořádání otevřeného rychlofiltru [1]	19
Obr. 3.1 Kontejner 20' pro úpravu vody [29].....	21
Obr. 3.2 Ukázka možného uložení kontejneru [31]	22
Obr. 3.3 Vystrojení kontejnerové úpravy vody [29]	22
Obr. 3.4 Průběh proudění vody v hydrocyklonu [33]	24
Obr. 3.5 Ukázka průmyslového hydrocyklonu [33].....	24
Obr. 3.6 Poloautomatický diskový filtr [34].....	25

Obr. 3.7 Manuální diskový filtr [34]	25
Obr. 3.8 Granulované aktivní uhlí Silcarbon S1240 [autor].....	27
Obr. 3.9 Druhy pórů v aktivním uhlí [38]	28
Obr. 3.10 UV lampy na úpravě vody Znojmo [autor]	31
Obr. 4.1 Schématické znázornění separace v uspořádání DEF a CFF [43].....	34
Obr. 4.2 Příklad ultrafiltrační jednotky [46]	35
Obr. 4.3 Schéma zpětného proplachu do spodní části nátoky [47].....	37
Obr. 4.4 Proces chemicky posíleného proplachu [47]	38
Obr. 4.5 Schéma zapojení CIP [47].....	40
Obr. 4.6 Schéma dopředného proplachu horní částí [47].....	40
Obr. 4.7 Schématický řez kompozitní nanofiltrační membránou [43].....	42
Obr. 4.8 Princip reverzní osmózy [50]	43
Obr. 4.9 Schématické znázornění deskového modulu [43]	45
Obr. 4.10 Schématické znázornění spirálně vinutého modulu [43].....	46
Obr. 4.11 Průřez multikanálovým keramickým modulem [43].....	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Kontaktní doba a životnost aktivního uhlí v různých aplikacích [40].....	28
Tab. 3.2 Výhody a nevýhody některých způsobů dezinfekce pitné vody [1].....	30
Tab. 4.1 Rozdělení membránových procesů [43].....	32
Tab. 4.2 Látky odstraňované z vody membránovými procesy [4].....	33
Tab. 4.3 Charakteristika vody upravené nanofiltrací [1]	41
Tab. 4.4 Volba typu modulu [44].....	45
Tab. 5.1 Výpočet místních tlakových ztrát pro podávací čerpadlo	51
Tab. 5.2 Výpočet místních tlakových ztrát pro ATS	62
Tab. 6.1 Typické a maximální hodnoty znečištění surové vody [29]	74
Tab. 6.2 Soupis elektrických zařízení	84
Tab. 6.3 Soupis zařízení pro měření neelektrických veličin.....	85

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AISI	... American Iron and Steel Institute (označení nerezové oceli)
Apod.	... a podobně
Atd.	... a tak dále
ATS	... Automatická tlaková stanice
BW	... Backwash (zpětný proplach)
CEB	... Chemically Enhanced Backwash (chemicky posílený zpětný proplach)
CFF	... Cross-flow filtration (tangenciální filtrace)
CFD	... Computational Fluid Dynamics (výpočetní dynamika tekutin)
CIP	... Clean in Place (chemické čištění na místě)
CHSK	... Chemická spotřeba kyslíku
ČSN	... Česká technická norma
DAF	... Dissolved Air Flotation (flotace rozpuštěným vzduchem)
DBP	... Disinfection By-Products (vedlejší produkty dezinfekce)
DEF	... Dead-end filtration (koncová filtrace)
DN	... Diameter Nominal (jmenovitá světlost potrubí)
DOC	... Dissolved Organic Carbon (rozpuštěný organický uhlík)
EBCT	... Empty Bed Contact Time (doba zdržení v prázdném loži)
EPDM	... Ethylen-propylen-dien kaučuk (materiál těsnění)
FIC	... Flow Indicating Controller (měření a regulace průtoku)
GAU	... Granulované aktivní uhlí
HCl	... Kyselina chlorovodíková
ISO	... International Organization for Standardization
M	... Motor (označení v elektroschématu)
MF	... Mikrofiltrace
NaOH	... Hydroxid sodný
Např.	... například
NF	... Nanofiltrace
NTU	... Nephelometric Turbidity Units (jednotka zákalu)
PA	... Polyamid
PE	... Polyethylen
PES	... Polyethersulfon
PI	... Pressure Indicator (měření tlaku)
PLC	... Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
PN	... Pressure Nominal (jmenovitý tlak)
PP	... Polypropylen
PS	... Polysulfon
PVC-U	... Polyvinylchlorid neměkčený
PVDF	... Polyvinylidenfluorid
QIC	... Quality Indicating Controller (měření a regulace kvality)
RO	... Reverzní osmóza

THM	...	Trihalomethany
Tj.	...	To je
TMP	...	Transmembránový tlak
TSS	...	Total Suspended Solids (nerozpuštěné látky)
Tzv.	...	tak zvaný
UF	...	Ultrafiltrace
UV	...	Ultrafialové záření

SEZNAM PŘÍLOH

- 01 Technologické schéma
- 02 Půdorys úpravy vody
- 03 Řez úpravnou vody A – A'
- 04 Řez úpravnou vody B – B'
- 05 Řez úpravnou vody C – C', D – D'
- 06 3D pohled
- 07 Jednotka ultrafiltrace
- 08 Vizualizace úpravy vody