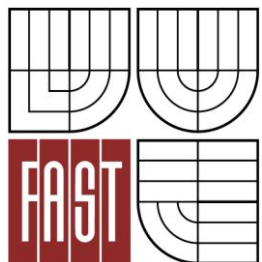




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

VYUŽITÍ MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ PŘI ÚPRAVĚ VODY

USE OF MEMBRANE PROCESSES IN WATER TREATMENT

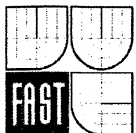
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANETA SPRATKOVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RENATA BIELA, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Aneta Spratková

Název Využití membránových procesů při úpravě vody

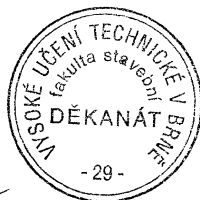
Vedoucí bakalářské práce Ing. Renata Biela, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu



.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [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] GRAY, N. F. Water Technology. An Introduction for Environmental Scientists and Engineers. Third Edition. Elsevier, 2010. 747 p. ISBN 978-1-85617-705-4.
- [4] PALATÝ, Zdeněk. Membránové procesy. 1. vydání. Praha: VŠCHT v Praze, 2012. 282 s.
- [5] BIELA, R., BERÁNEK, J. Úprava vody a balneotechnika. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 164 s. ISBN 80-214-2563-6.
- [6] GRÜNWALD, Alexander. Zdravotně inženýrské stavby 40: Úprava vody. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 103 s. ISBN 80-01-01658-7.
- [7] Odborné časopisy (Sovak, Vodní hospodářství, TZB-info)

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Bakalářská práce se bude zabývat všemi druhy membránových procesů, které je možné využít při úpravě vody na pitnou. Součástí práce budou i příklady úprav, ve kterých jsou membránové procesy již použity, a to nejen u nás, ale i v zahraničí.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


.....

Ing. Renata Biela, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA

Abstrakt

Bakalářská práce obsahuje popis základních vlastností membránových technologií. Věnuje se membránovým procesům, které jsou používány při úpravě vody na pitnou, především procesům tlakovým a elektromembránovým. Součástí práce jsou také konkrétní příklady úprav, ve kterých jsou tyto technologie používány. Jedná se o úpravny vody ve světě i v České republice.

Klíčová slova

Pitná voda, úprava vody, membrána, membránové procesy, tlakové membránové procesy, elektromembránové procesy, úpravna vody

Abstract

This bachelor thesis contains a description of the basic properties of membrane technologies. It deals with the membrane process used in the water treatment for drinking water, especially pressure driven and electrically driven membrane processes. Also included are specific examples of water treatment plants where these technologies are used. The examples are from the Czech Republic as well as worldwide.

Keywords

Drinking water, water treatment, membrane, membrane processes, pressure driven membrane processes, electrically driven membrane processes, water treatment plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

SPRATKOVÁ, Aneta. *Využití membránových procesů při úpravě vody*. Brno, 2016. 46 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Renata Biela, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5.2016

.....
podpis autora
Aneta Spratková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Renatě Biele, Ph.D. za podnětné rady, cenné připomínky, vstřícný přístup a čas, který mi v průběhu psaní práce věnovala.

OBSAH

1	ÚVOD.....	3
2	MEBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY	5
2.1	Princip a rozdělení membránových procesů	5
2.2	Membrány.....	6
2.2.1	Původ a skupenství membrán.....	7
2.2.2	Membránové materiály	7
2.2.3	Struktura membrán.....	7
2.2.4	Morfologie membrán	8
2.2.5	Hlavní parametry membrán.....	8
2.3	Membránové moduly	9
2.3.1	Deskové moduly.....	10
2.3.2	Spirálně vinuté moduly	10
2.3.3	Trubkové moduly	11
2.3.4	Kapilární moduly	12
2.3.5	Moduly s dutými vlákny	12
2.3.6	Srovnání membránových modulů	13
2.4	Způsoby provozování procesů.....	13
3	MEMBRÁNOVÉ PROCESY VE VODÁRENSTVÍ.....	15
3.1	Tlakové membránové procesy.....	15
3.1.1	Provozování tlakových membránových procesů	16
3.1.2	Mikrofiltrace	18
3.1.3	Ultrafiltrace	18
3.1.4	Nanofiltrace.....	19
3.1.5	Reverzní osmóza	19
3.2	Elektromembránové procesy.....	21
3.2.1	Iontově selektivní membrány	21
3.2.2	Elektrodialýza	21
4	VYUŽITÍ MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ V PRAXI	24
4.1	Úpravny vody v zahraničí.....	24
4.1.1	Úpravna vody Méry sur Oise	24
4.1.2	Úpravna vody Roetgen.....	28
4.2	Úpravny vody v České republice.....	32
4.2.1	Úpravna vody Třebotov	32
4.2.2	Úpravna vody Březová.....	34
5	VÝHODY A NEVÝHODY MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ	38
5.1	Výhody membránových procesů.....	38
5.2	Nevýhody membránových procesů	38

6	ZÁVĚR.....	39
7	POUŽITÁ LITERATURA	40
	SEZNAM TABULEK	42
	SEZNAM OBRÁZKŮ	43
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	44
	SUMMARY.....	46

1 ÚVOD

Voda je jednou ze základních podmínek existence života na Zemi. V přírodě se účastní všech podstatných biologických, fyzikálních a chemických pochodů. Dostatek zdrojů pitné vody byl vždy zásadní pro rozvoj lidských společností. Člověk vodu potřebuje nejen jako součást potravy a k hygienickým účelům, ale také k různým výrobním činnostem.

Voda je získávána z přírodních zdrojů a velmi často neodpovídá svými technickými vlastnostmi potřebám a požadavkům jednotlivých spotřebitelů. Proto je nutno surovou vodu, která neodpovídá spotřebě, upravovat.

Pojem úprava vody představuje soubor technologických procesů, kterými se mění vlastnosti vody na úroveň požadovanou spotřebitelem. Pro dosažení požadované jakosti vody se používá značné množství technologických procesů, které lze dělit podle různých hledisek a kritérií. Nejpoužívanější dělení je na procesy mechanické, chemické a biologické. Mechanickými procesy se z vody odstraňují převážně tuhé látky a rozpuštěné plyny. Chemickými procesy se voda upravuje k dalšímu odstraňování nežádoucích látek a ke zdravotnímu zabezpečení vody. Biologické procesy využívají pro úpravu vody činnost živých mikroorganismů – bakterií.

Technické řešení technologie úpravy vody závisí na kvalitě a množství upravované vody. U málo znečištěných zdrojů vody je možné použít úpravu vody v jednom separačním stupni, který představuje koagulační filtr nebo pomalý (biologický) filtr. Při vyšších koncentracích suspendovaných látek v surové vodě je vhodné použít separaci dvoustupňovou, kde lze jako první separační stupeň použít vločkovací nádrž s usazovací, čičič nebo flotační zařízení. Jako druhý separační stupeň se používá rychlofiltr. V případě velmi znečištěných vod, kdy se nepodaří na dvou předcházejících stupních upravit vodu tak, aby vyhovovala požadovaným kritériím, se použije terciální úprava vody. Jako třetí stupeň lze zařadit filtry s aktivním uhlím, biologické filtry, ozonizaci a další způsoby zušlechťování vody. [1]

Dnes jsou přírodní zdroje vody mnohem více ohroženy antropogenním znečištěním, než tomu bylo v minulosti. Do vody se dostává řada nežádoucích látek, které mohou poškodit lidské zdraví. Největší riziko představují látky, které se v životním prostředí téměř neodbourávají a špatně se odstraňují při čištění i úpravě vod. Mezi tyto nežádoucí látky patří např. pesticidy, farmaka, polychlorované bifenyly (PCB), polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), látky ze skupiny thihalogenmethanů (THM), atd. Jejich požadovaný stupeň odstranění výše uvedenými technologiemi je buď nemožný, nebo investičně a provozně náročný. Proto se na trhu objevují nové, tzv. alternativní technologie. Jednou z nich jsou membránové technologie.

Membránové technologie mají v sobě velký potenciál. Představují řešení pro neustále se zpřísňující limity na kvalitu pitné vody. Dalším důvodem jejich rostoucího používání je i to, že tyto postupy mají ve srovnání s klasickou úpravou vody koagulací a filtrací několik zásadních výhod:

- špičkovou kvalitu upravené vody,

- snížení spotřeby chemikálií,
- snížení produkce kalu,
- nižší spotřebu energie,
- vynikající odstranění mikrobiálních kontaminantů,
- kompaktní modulární systém s nižšími nároky na zastavěnou plochu.

K nejatraktivnějším výhodám těchto procesů patří téměř stoprocentní odstranění patogenních organismů odolných dezinfekci chlórem, jejichž odstranění běžnými postupy je velmi obtížné. Velmi účinné jsou tyto procesy při odstraňování přirozených organických látek, které jsou původci nežádoucího zbarvení vody, pachu, chuti a jsou prekursory vedlejších produktů vznikajících při dezinfekci vody. [2]

2 MEBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY

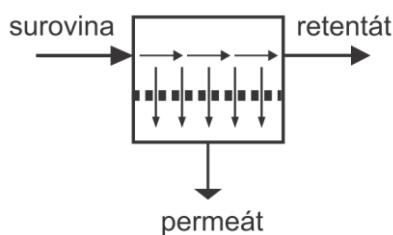
2.1 PRINCIP A ROZDĚLENÍ MEBRÁNOVÝCH PROCESŮ

Membránové separační procesy jsou založeny na principu filtrace kapalného média (surové vody, odpadní vody, atd.) přes membránový modul. Podstatou této technologie jsou selektivně propustné membrány, propouštějící molekuly vody a podle typu membrány pak jen další částice určité velikosti. Aby docházelo k transportu látek přes membránu, je nutná přítomnost hnací síly. Hnací silou může být rozdíl elektrického pole, tlaku, koncentrací nebo teploty. [3]

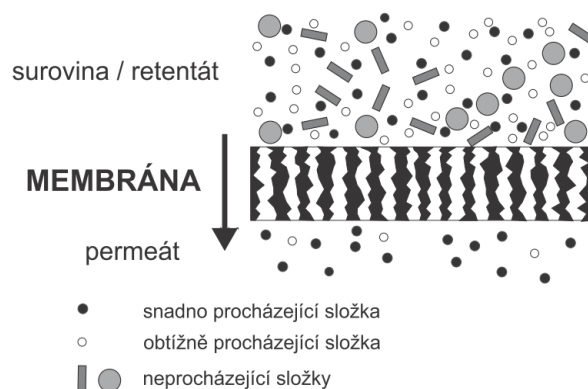
Tab. 2.1 Rozdělení membránových procesů podle hnací síly [3]

Hnací síla	Membránový proces
Gradient elektrického potenciálu	Elektrodialýza (ED)
	Membránová elektrolýza (ME)
	Elektrodeionizace (EDI)
Gradient tlaku	Reverzní osmóza (RO)
	Nanofiltrace (NF)
	Ultrafiltrace (UF)
	Mikrofiltrace (MF)
	Mikrofiltrace (MF)
Gradient koncentrace	Dialýza (D)
Gradient teploty	Membránová destilace (MD)

Působením hybné síly procházejí (permeují) některé nebo všechny složky dělené směsi membránou a vytvářejí tzv. permeát, jeden z produktů membránového dělení. Část dělené směsi zadržaná nad vstupním povrchem membrány tzv. retentát, se z dělicího zařízení odvádí jako druhý produkt. Kapalné médium (surovina) přicházející na membránu se označuje jako tzv. feed, což je označení pro vstupní proud. [4]



Obr. 2.1 Princip membránového procesu [4]



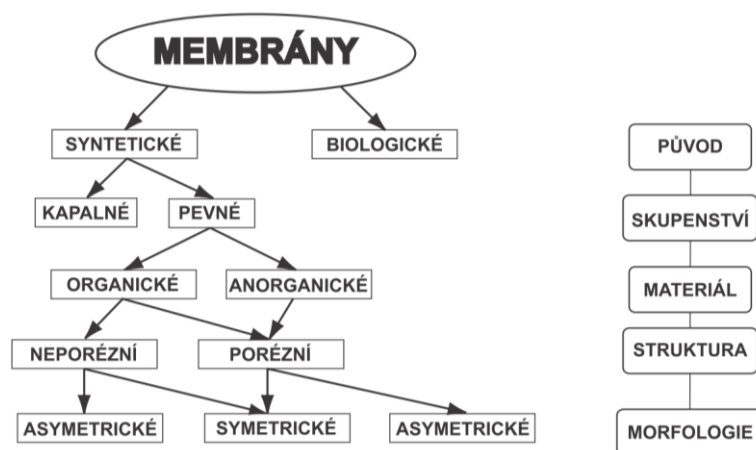
Obr. 2.2 Dělení složek směsi při průchodu porézní membránou [4]

Pouhá přítomnost hnací síly nemusí nutně vést k zahájení separace z důvodu malé intenzity této síly. Během separace se projevuje celá řada dějů, které působí proti vložené hnací síle. Například zkoncentrování separované látky na membráně vede ke vzniku koncentračního gradientu a vzniku osmotického toku proti směru separace. Aby mohl požadovaný separační proces probíhat, musí intenzita vložené hnací síly překonat součet všech sil působících v opačném směru. Což v praxi znamená, že k dosažení vyššího stupně vyčištění je potřeba použít větší množství energie.

Při úpravě vody jsou nejčastěji uplatňovány procesy tlakové a elektromembránové. Je to především pro jejich snadnou kontrolu a vysokou účinnost. [3]

2.2 MEMBRÁNY

Membránu je možné definovat jako záměrně nedokonalou bariéru, kdy jedna složka čištěné směsi (voda) prochází membránou do produktu rychleji než další složky (soli nebo organické nečistoty). Ideální stav nastává v případě, kdy jedna složka membránou prochází a další složka membránou neprochází. Samotná membrána je tak klíčovým prvkem všech membránových procesů. Používané membrány lze třídit do skupin z různých hledisek: původu, skupenství, materiálu použitého pro jejich výrobu, vnitřní struktury a morfologie. Dále je podstatné, zda je membrána iontově aktivní nebo neutrální. [3], [4]



Obr. 2.3 Klasifikace membrán [4]

2.2.1 Původ a skupenství membrán

Základní rozdělení membrán je podle jejich původu na syntetické a biologické. Biologické membrány představují jedny z nejdůležitějších struktur buněk mikrobiálních, rostlinných i živočišných. V buňkách působí jako selektivně propustné bariéry a řídí transport molekul mezi buňkou a jejím okolím, příp. mezi buněčnými organelami a cytosolem. Díky svým chemickým, fyzikálně-chemickým a mechanickým vlastnostem ovšem nenachází uplatnění v průmyslových separacích. Oproti tomu syntetické membrány lze vyrobit tak, aby plně vyhovovaly, jak chemickými tak i fyzikálně-chemickými a mechanickými vlastnostmi, technologickým podmínkám procesu, ve kterém budou použity. Pro separační proces se membrány nejběžněji vyrábějí a využívají v pevném skupenství v podobě tenkých listů nebo tenkostěnných trubek či kapilár. V některých případech jsou využívány tzv. membrány kapalné. Kapalné membrány jsou tvořeny vrstvou kapaliny, která je vhodným způsobem umístěná mezi fázemi, mezi kterými dochází k transportu dělených složek.

V průmyslových membránových separacích mají největší uplatnění pevné membrány, jelikož současně vykazují dobré mechanické i dělicí schopnosti. Tyto vlastnosti lze navíc měnit modifikacemi vnitřní struktury membrány. [4]

2.2.2 Membránové materiály

Membrány mohou být vyrobeny z jakéhokoliv materiálu, z kterého je možné připravit tenkou fólii s bariérovými vlastnostmi pro určité látky a naopak propustnou pro látky jiné. [5]

Z pohledu chemického složení rozlišujeme membrány na organické a anorganické. Anorganické membrány se vyrábějí z materiálů kovových a především keramických materiálů na bázi Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 a SiC . Vykazují dobrou schopnost odolávat vysokým tlakovým rozdílům a obvykle jsou dobře odolné vůči vysokým teplotám. Jejich nevýhodou je malá odolnost proti nárazům a jinému mechanickému namáhání – snadno praskají nebo se lámou. Vyráběny jsou extruzí v podobě trubek a trubkových systémů. Organické membrány se vyrábějí z přírodních (celulózy a jejích derivátů) nebo syntetických polymerů - polysulfony (PSO), polyamidy (PA), polyetherimidy (PEI), polyvinylidenfluoridy (PVDF), polytetrafluorethyleny (PTFE), atd. Jejich chemické složení lze modifikovat v širokém rozmezí a lze tak měnit jejich separační a mechanické vlastnosti. Na rozdíl od anorganických membrán se vyznačují nižší odolností proti vysokým tlakovým rozdílům a teplotám. Obvykle jsou vyráběny v podobě plochých listů, kapilár, nebo tzv. dutých vláken, která se uspořádávají do svazků. [4], [6]

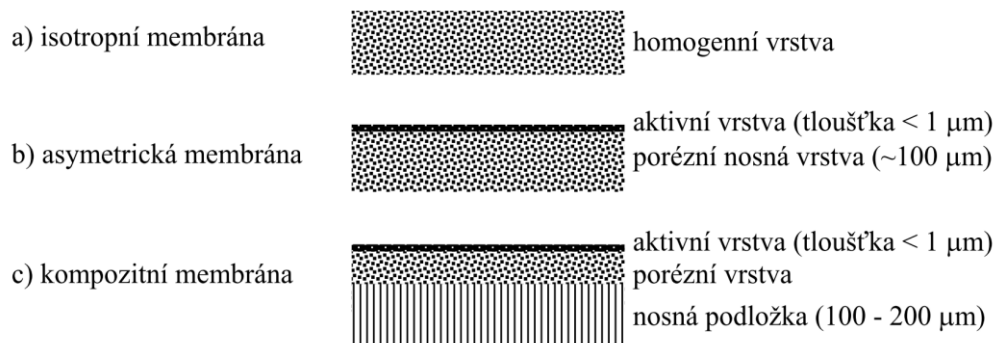
2.2.3 Struktura membrán

Způsobem výroby lze ovlivnit vnitřní mikrostrukturu membrány a rozlišit tak membrány porézní a neporézní. Porézní membrány obsahují ve své struktuře kanálky neboli póry, propojující oba povrchy membrány. Velký rozměr průměru pórů umožňuje konvektivní

tok tekutin membránou a velikosti pórů pak určují dělicí schopnost porézní membrány. Vliv vlastností materiálu membrány na dělicí schopnost je obvykle zanedbatelný. Pro výrobu porézní membrány lze využít organické i anorganické materiály. Neporézními membránami jsou dělené složky transportovány pomocí difuze a konvektivní tok tekutin neporézní strukturou není možný. V neporézních membránách je dělení složek dáno rozdílnými difuzivitami složek a jejich rozdílnou rozpustností v membráně. Jsou vyráběny téměř výhradně z polymerních organických materiálů, protože difuzivity a rozpustnosti složek v anorganických neporézních materiálech jsou pro praktické aplikace příliš nízké. [4]

2.2.4 Morfologie membrán

Dle uspořádání vrstev lze membrány rozdělit na symetrické (isotropní), asymetrické (anizotropní) a kompozitní. Symetrické membrány jsou vyrobeny z jednoho materiálu a po celé své tloušťce mají stejnou strukturu. Aby byla zajištěna odpovídající mechanická odolnost, musí být tloušťka membrány několik desetin až jednotky milimetru. Z toho vyplývá jejich základní nevýhoda a tou je vyšší hydraulický odpor. Asymetrické membrány jsou tvořeny velmi tenkou aktivní vrstvou (desetiny až desítky mikrometrů), která je spojena s tlustší (desetiny až jednotky milimetru) porézní podpůrnou vrstvou z téhož materiálu. Nejnovějšími typy membrán jsou vícevrstevné kompozitní materiály, tzn., že jejich výroba probíhá v několika fázích a materiál aktivní a podpůrné vrstvy je rozdílný. Přitom jsou mezi aktivní a podpůrnou vrstvou umístěny různé mezivrstvy. [5]



Obr. 2.4 Rozdělení membrán dle struktury [6]

2.2.5 Hlavní parametry membrán

Výkon (efektivita) dané membrány je určována především dvěma parametry: selektivitou membrány a intenzitou objemového toku permeátu membránou. [5]

a. Selektivita

Selektivita je schopnost oddělovat vzájemné složky dělených směsí. Ovlivňuje účinnost dělení, regeneraci, čistotu produktu a je nepřímě úměrná velikosti plochy membrány. Při hodnocení membrány se klade na první místo, protože nedostatečná selektivita vyžaduje vícestupňové zařízení, což je obvykle méně ekonomické než klasické separační procesy.

Separční schopnost membrán je obecně charakterizována mezní hodnotou molekulové hmotnosti vyjádřenou v Daltonech ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), tj. velikostí nejmenší částice ve vztahu k molekulové hmotnosti, kterou je membrána schopna zachytit (MWCO). [7], [8]

Selektivitu membrány vůči směsi látek lze vyjádřit pomocí součinitele retence:

$$R = \frac{c_F - c_P}{c_F} = 1 - \frac{c_P}{c_F}, \quad (2.1)$$

kde R ... součinitel retence [-],

c_F ... koncentrace separované složky ve vstupním proudu [%],

c_P ... koncentrace rozpuštěné látky v permeátu [%].

Hodnota retence se pohybuje v rozmezí od 0 % (separovaná látka i rozpouštědlo procházejí volně membránou) do 100 % (úplná retence složky); v tomto případě se jedná o ideální semipermeabilní membránu. [5]

b. Intenzita objemového toku permeátu

Intenzita objemového toku permeátu je definována jako objem tekutiny, který projde membránou za jednotku času, vztažený na jednotku plochy membrány:

$$J_V = \frac{1}{A} \frac{dV_P}{d\tau} \quad (2.2)$$

kde J_V ... intenzita objemového toku permeátu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

A ... separační plocha membrány [m^2],

V_P ... objem permeátu [m^3],

τ ... čas [s]. [5]

2.3 MEMBRÁNOVÉ MODULY

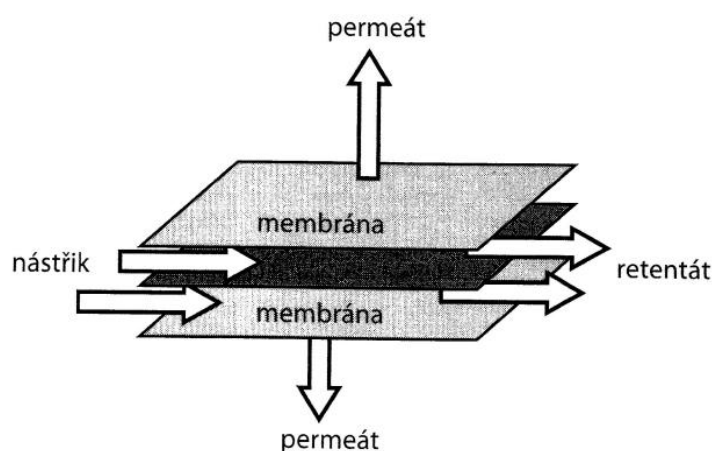
Aby membrány byly použitelné, je nezbytné je umístit do pouzder, které se označují jako membránové moduly. Moduly jsou opatřeny potřebnými přívody a odvody proudů, které dovolují připojit modul do technologického zařízení nebo vzájemně propojit větší množství modulů. Z technického a ekonomického hlediska jsou na moduly kladeny tyto požadavky:

- co největší specifická plocha membrán,
- takové hydrodynamické podmínky, aby byl co nejmenší vliv zvyšování koncentrace zadržované složky v blízkosti povrchu membrány,
- malá náchylnost na znečištění a snadný přístup při čištění,
- jednoduchá výměna membrány,
- nízká cena.

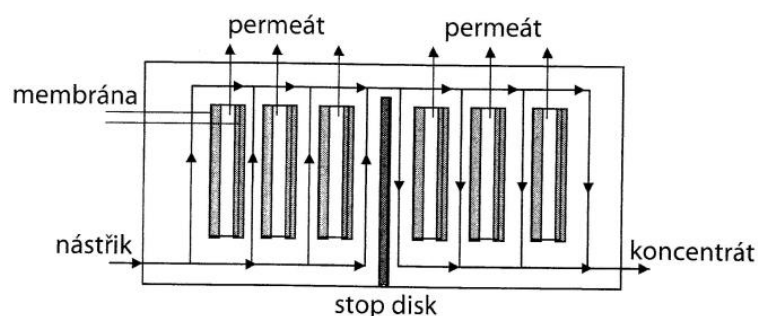
Podle základních konfigurací membrán rozlišujeme dva typy modulů, tj. tubulární a plošné moduly. Plošné membrány obsahují moduly deskové a spirálně vinuté. Membrány tubulární pak zahrnují moduly trubkové, kapilární a moduly s dutými vlákny. Tubulární moduly se převážně rozlišují podle rozdílných rozměrů trubiček. [4], [9]

2.3.1 Deskové moduly

Z hlediska konstrukce se jedná o nejjednodušší moduly. Dvě membrány jsou sendvičově umístěny (zpravidla opakovaně v mnoha sekcích) v nosné konstrukci a mezi nimi se nachází rozdělovač (spacer). V modulu se dále nachází těsnění a koncové desky. Hustota uložení (packing density) se u tohoto typu modulu pohybuje od 100 do 400 m²·m⁻³. Dráha toku kapaliny modulem je znázorněna na Obr. 2.6, kde tzv. stop disky mají zabránit kanálkování tekutiny. [5]



Obr. 2.5 Schéma deskového modulu [5]

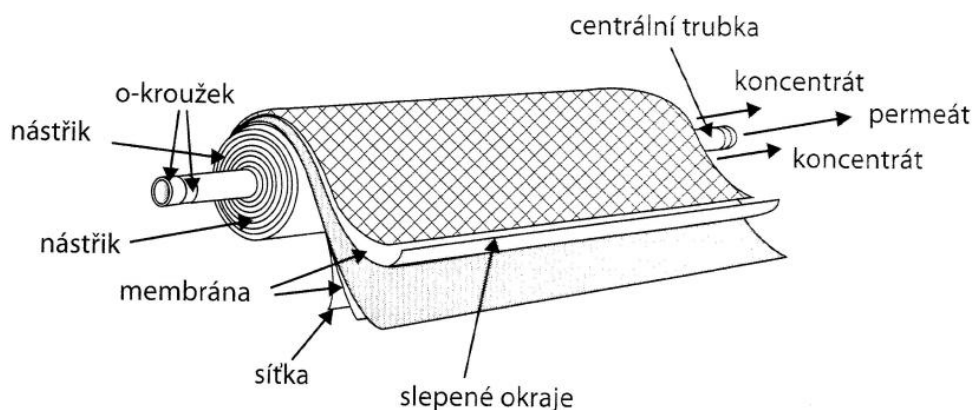


Obr. 2.6 Schéma znázornění dráhy tekutiny v deskovém modulu [5]

2.3.2 Spirálně vinuté moduly

Dalším způsobem uspořádání plošných membrán je jejich umístění do spirálně vinutého modulu. Jedná se o membrány a rozdělovací sítky navinuté na centrální sběrnou trubici. Dvojice membrán je přiložena permeátovou stranou k sobě a po okraji slepena. Nástřik je přiváděn do modulu axiálně, kdežto permeát prochází membránou radiálně a je odváděn centrální trubkou. Jejich výhodou je dosažení lepšího poměru membránové plochy

k objemu zatížení, který se pohybuje od 300 do 1000 m²·m⁻³. Naopak nevýhodou je jejich obtížné čištění. [9]



Obr. 2.7 Schéma spirálně vinutého modulu [5]

2.3.3 Trubkové moduly

Jedná se o soustavu paralelně uspořádaných trubkových membrán umístěných v pouzdře o průměru větším než 10 mm. Obvyklý počet trubek v modulu je 4 až 18, v některých případech i více. Do středu trubiček je přiváděn nástřik, který prochází vnitřní stranou membrán. Permeát prochází porézním nosičem a je odváděn vývodem z modulu. Retentát je odváděn na opačné straně modulu. Materiál trubiček je nejčastěji keramický, na bázi Al₂O₃ a ZrO₂. Jejich nevýhodou je nízká hodnota plochy připadající na jednotku objemu modulu, která je obvykle menší než 300 m²·m⁻³.

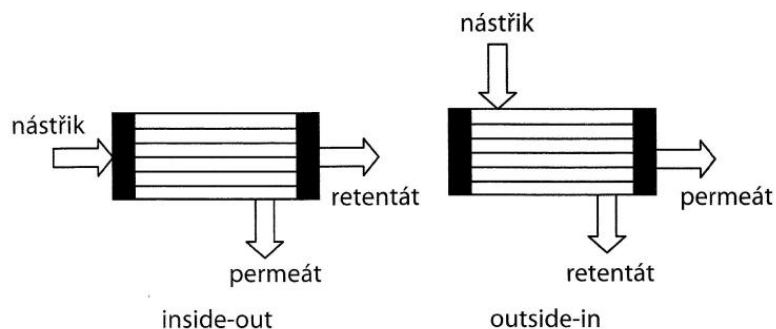
Speciálním typem keramického modulu je monolitický (multikanálový) modul. Tento typ modulu má vnitřní povrch trubiček (kanálek) tvořen aktivní vrstvou a kanálky umístěné v keramickém bloku. [5]



Obr. 2.8 Trubkový modul [10]

2.3.4 Kapilární moduly

Tyto moduly se skládají z velkého množství trubiček (kapilár), které jsou umístěny do jednoho svazku. Vnitřní rozpěr kapilár se pohybuje od 1,5 do 4 mm. Existují dva základní způsoby kapilárních modulů rozdělující se podle směru přiváděného nástríku, resp. odváděného permeátu, a to na inside-out nebo outside-in způsob. Dle způsobu aplikace se pak volí jedna z těchto konfigurací. Hustota uložení je u těchto typů modulů od 600 do 1 200 m²·m⁻³. [5]



Obr. 2.9 Schéma znázornění uspořádání kapilárních modulů [5]

2.3.5 Moduly s dutými vlákny

Moduly s dutými vlákny pracují na stejném principu jako moduly kapilární, jediné odlišení je v rozdílné velikosti rozměrů trubiček. Dutá vlákna mívají průměr menší než 1,5 mm. Opět se uplatňují dva způsoby uspořádání podle přívodu nástríku, tj. inside-out nebo outside-in. Tyto moduly vykazují nejvyšší hustotu uložení, která může dosahovat hodnot od 20 000 až 30 000 m²·m⁻³. [5]



Obr. 2.10 Modul s dutými vlákny [10]

2.3.6 Srovnání membránových modulů

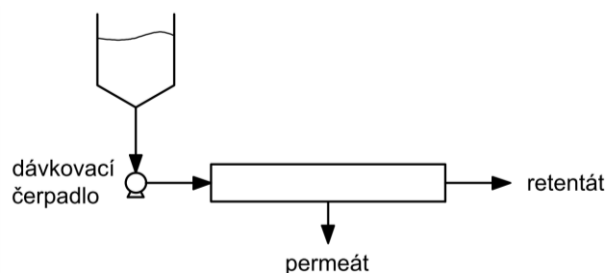
Tab. 2.2 Základní charakteristiky membránových modulů [5]

Charakteristika	Typ modulu			
	Spirálově vlnutý	Dutá vlákna	Trubkový	Deskový
Plocha připadající na jednotku objemu modulu ($m^2 \cdot m^{-3}$)	600 – 1000	3000 – 6000	70 – 150	300 – 600
Typické rychlosti nástřiku ($m \cdot s^{-1}$)	0,3 – 0,8	0,005 – 0,05	1 – 8	0,8 – 1,6
Tlaková ztráta na nástřikové straně (kPa)	300 – 600	10 – 30	50 – 300	100 – 500
Sklon k zanášení membrány	Vyšší	Vyšší	Nízká	Střední
Snadnost čištění	Špatná až dobrá	Špatná	Výborná	Dobrá
Doporučovaná filtrační předúprava nástřiku (filtr o velikosti pórů)	10 – 25	5 – 10	Není třeba	10 – 25
Relativní náklady na získání jednotky objemu permeátu	Nízké	Nízké	Vysoké	Vysoké

2.4 ZPŮSOBY PROVOZOVÁNÍ PROCESŮ

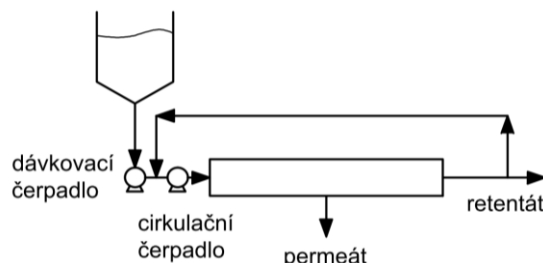
Membránové procesy mohou probíhat v režimu kontinuálním, semikontinuálním s recirkulací a vsádkovém režimu. Volba typu režimu závisí především na vlastnostech vstupní suroviny a výstupních produktech.

Kontinuální neboli jednopřechodový režim je charakterizován nevracejícím se retentátem do nádrže s nástřikem. Při tomto režimu proudí nástřik velkou rychlostí podél povrchu membrány a permeát odtéká v kolmém směru na vstupní proud. Výhodou režimu je nevznikající filtrační koláč, popřípadě výrazné omezení jeho tvorby. Kumulace částic na povrchu membrány je zabráněna relativním pohybem mezi membránou a zpracovávanou disperzí.



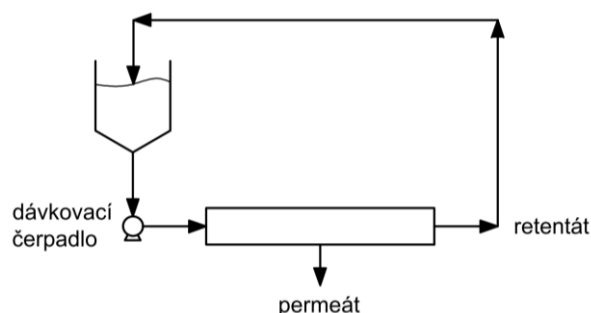
Obr. 2.11 Schéma kontinuálního režimu [9]

U semikontinuálního uspořádání s částečnou recirkulací je výhodou, že hydrodynamické podmínky nad membránou je možné zabezpečit bez ohledu na průtok nástríku a výtěžek permeátu. Důležitým faktorem je zabezpečení dostatečné rychlosti proudění nad membránou, tj. ideální hodnoty Reynoldsova kritéria, aby bylo dosaženo přiměřené hodnoty koeficientu přestupu hmoty látky.



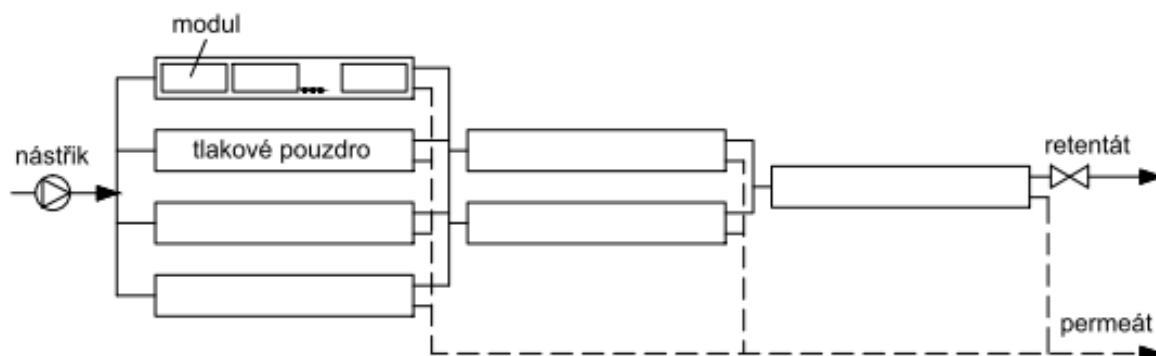
Obr. 2.12 Schéma semikontinuálního režimu s částečným vrácením retentátu [9]

Vsádkový režim je nejjednodušší způsob provozu. Při tomto režimu se nejrychleji dosáhne zahuštění daného množství výchozího roztoku a je potřeba nejmenší plochy membrány. [9]



Obr. 2.13 Schéma vsádkového režimu [9]

Zlepšení dělení suroviny je možno zvýšit sériovým zapojením modulů. Retentát postupně prochází všemi moduly v řadě a dochází ke spojení permeátů z jednotlivých modulů. Výkon membránové jednotky lze zvýšit paralelním zapojením modulů. Zvýšení dělicí schopnosti a zároveň výkonnosti membránového zařízení lze dosáhnout kombinací obou zmíněných zapojení, vzniká tak kombinované uspořádání modulů. [4]



Obr. 2.14 Schéma paralelně-sériového uspořádání modulů [9]

3 MEMBRÁNOVÉ PROCESY VE VODÁRENSTVÍ

Při úpravě pitné vody se membránové procesy nejprve používaly k odsolování mořské a brakické vody nebo odstranění některých klasických toxických polutantů (např. kovů u důlních vod). V posledních letech se tyto procesy začaly stále více využívat k odstranění přírodních organických látek (NOM) u povrchových vod, k náhradě klasické koagulace a pískové filtrace nebo k dezinfekci vody. Při dezinfekci vody jsou tyto procesy požadovány především pro odstraňování cyst *Cryptosporidií* a *Giardií*, jejichž odstranění běžnými postupy je velmi obtížné.

Ve vodárenství jsou nejčastěji využívány procesy, jejichž hybnou silou je tlakový spád nebo elektrický potenciál. [11]

3.1 TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Tlakovými membránovými procesy se zpravidla označují čtyři typy separačních technik: mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a reverzní osmóza (RO). Jejich společným znakem je použití tlakového rozdílu jako hnací síly transportu membránou. Vzájemná odlišnost jednotlivých technik spočívá ve velikostech používaných tlakových rozdílů, převažujícím transportním mechanismu a velikostech membránou zadržovaných částic. [3]

Velikost nejmenší částice, kterou je možné daným tlakovým procesem odstranit, závisí na jmenovité velikosti pórů membrány. Přehled použitelnosti jednotlivých procesů a jimi dosažitelný stupeň odstranění jednotlivých druhů látek a organismů je uveden v tab. 3.1 [8]

Tab. 3.1 Látky odstraňované z vody tlakovými membránovými procesy [8]

Odstraňované látky / Membránový proces	MF	UF	NF	RO
Suspendované látky	C	C	C	C
Prvoci	C	C	C	C
Bakterie	C	C	C	C
Víry	P	C	C	C
Železo, mangan	D	D	C	C
Huminové látky (NOM)	-	P	C	C
CHSK	-	-	P	C
Syntetické organické látky – pesticidy	-	-	P	C
Ca + Mg	-	-	P	C
Dusičnany	-	-	-	C
Amoniak	-	-	-	C

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

Pokud se postupuje od MF přes UF a NF k RO, velikost odstraňovaných látek (molekul) klesá, a tedy i velikost pórů odpovídajících membrán musí být menší. Uplatňuje se zde pravidlo, čím menší molekuly mají být odstraněny, tím vyšší tlak je nutno použít. Mezi jednotlivými tlakovými procesy ovšem neexistuje přesná hranice. [5]

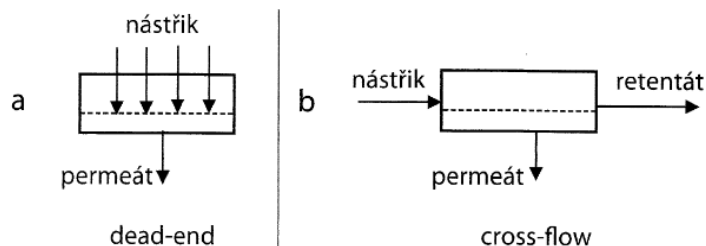
Tab. 3.2 Přehled tlakových membránových metod [3]

Proces	Velikost pórů v membráně [nm]	Pracovní tlak [MPa]
Mikrofiltrace	50 – 1000	< 0,2
Ultrafiltrace	3 – 50	0,1 – 0,5
Nanofiltrace	1 – 3	0,5 – 3,5
Reverzní osmóza	Neporézní nebo pórovitá s póry < 1	1,5 – 15

3.1.1 Provozování tlakových membránových procesů

Způsob uspořádání filtračního procesu

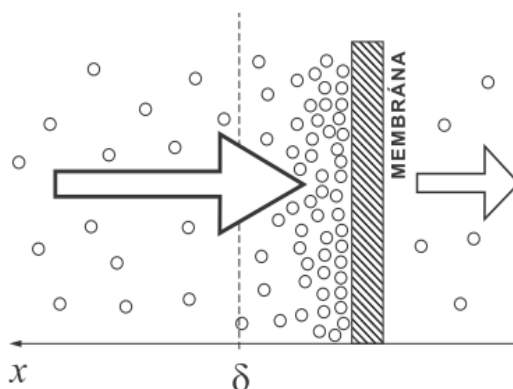
Pro většinu procesů je typické uspořádání s tzv. příčným tokem (cross-flow), při kterém nástřík proudí velmi rychle podél povrchu membrány a permeát odtéká v kolmém směru na vstupní proud. Při tomto způsobu provedení membránové separace zpravidla nedochází k vytváření filtračního koláče, protože relativní pohyb mezi membránou a zpracovávanou disperzí zabráňuje kumulaci částic na povrchu membrány. Rychlost proudění nástříku se pohybuje v rozmezí několika setin až jednotek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ v závislosti na typu separačního procesu a na geometrii nástříkového kanálu v použitém membránovém modulu. Druhý způsob nátku je označován jako filtrace do mrtvého bodu (dead-end). Jedná se o obdobu klasické filtrace, kdy nástřík proudí kolmo k ploše membrány a filtrát prochází membránou. Dead-end uspořádání není vhodné vzhledem k narůstání filtračního koláče, který způsobuje zvýšení tlakových ztrát. [5], [6]



Obr. 3.1 Schéma separace v uspořádání dead-end (a) a cross-flow (b) [9]

Provozní problémy

Přes snahu o nejvyšší hydrodynamický tok na povrchu membrány, dochází u všech čtyř typů tlakových membránových procesů k nárůstu koncentrace v nehybné hraniční vrstvě. V této vrstvě je koncentrace výrazně vyšší než vstupní koncentrace nástriku. Vznik hraniční vrstvy je z provozního hlediska nežádoucí, avšak zcela odstranit jej nelze. Při separaci vysokomolekulárních látek dochází vlivem zvýšené koncentrace až ke vzniku gelovité konzistence, která zvyšuje hydraulický odpor membrány. V případě separace nízkomolekulárních látek může dojít k lokálnímu přesycení roztoku a vzniku krystalů, které separační membránu zanesou. Aby byl zajištěn správný chod procesů, je potřeba zajistit dostatečné míchání na povrchu membrány a snížení hraniční vrstvy na minimum. Intenzita procesu s rostoucím tlakem roste, ale pouze dočasně. Zvýšení koncentrace v hraniční vrstvě způsobí zvýšení hydraulického odporu hraniční vrstvy a zpomalení procesu. Zvýšená koncentrace v hraniční vrstvě a děje s tím spojené bývá označována jako tzv. koncentrační polarizace. Intenzita procesů je omezena především zpětnou difúzí koncentrované látky od povrchu membrány zpět do roztoku. V opačném případě dochází k neustálenému ději a to k hromadění separované látky v povrchové vrstvě. [3]



Obr. 3.2 Vznik polarizační vrstvy [4]

Během celého separačního procesu se na membráně vytváří vrstva zadržovaných částic a mikroorganismů, probíhá také adsorpce organických látek na povrchu membrány nebo v pórech membrány, ve kterých se také vysrážejí částice uhličitanu vápenatého nebo oxidů železa a manganu. Tento jev je označován termínem zanášení (fouling). S rostoucím zanášením postupně klesá propustnost membrány a s propustností klesá její hydraulický výkon. A to vratně nebo nevratně. Usazení vrstvy na povrchu membrány je obvykle vratné a průtok lze obnovit zpětným proplachem membrány vodou nebo vodou se vzduchem. Zanesení pórů membrány je buď nevratné, nebo odstranitelné chemickým čištěním. Preventivně se zanášení membrán předchází vložením dalšího (hrubšího) mechanického filtru před membránu, dávkováním chemikálií (např. tzv. antiscalantů nebo oxidantů) nebo dávkováním koagulantu pro vytvoření většího shluku částic. [11]

Pro minimalizaci zanášení membrány jsou zásadní čistící metody. U těchto metod se uplatňuje všeobecné pravidlo, kdy je výhodnější celý systém preventivně pravidelně čistit z důvodu omezení nevratného znečištění, ke kterému by mohlo dojít na povrchu membrány. Optimální četnost a potřebná délka čistícího procesu závisí na kvalitě přivádějí vody a bývá nejčastěji určována podle pilotních studií. Nejčastěji používané metody jsou: proplach vodou (BW), proplach vzduchem (AEB), chemický proplach (CEB) nebo čištění na místě (CIP). [12]

Kritickou oblastí provozování membrán bývá také jejich integrita. Membrány jsou vystavovány velkému mechanickému namáhání, především při praní a čištění. Proto je nezbytné sledovat kvalitu filtrátu a hlídat, zda nedochází k propouštění kontaminantů rozměrů nominálně větších, než jsou póry používané membrány, což by vypovídalo o porušení membrány. Z hlediska integrity je nejvýhodnější použít keramické membrány, jež potíže s integritou nemívají. [11]

3.1.2 Mikrofiltrace

Mikrofiltrace je fyzikální proces schopný zachytit částice o velikosti od 0,05 μm do 5 μm při působení tlaku nižším než 0,2 MPa. Odstraněny mohou být mikrobiální buňky, bakterie, řasy, koloidy a také protozoa. MF je tedy převážně používána u relativně kvalitních povrchových vod, kde se nevyskytují nadlimitní koncentrace nebezpečných anorganických iontů nebo sledovaných organických látek. Mikrofiltrační membrány jsou nejčastěji zhotoveny z polymerů, které vykazují vysokou hustotu pórů (75 - 80 %). Pro uchycení membrán mohou být využity moduly tubulární, kapilární, spirálně vinuté anebo moduly s dutými vlákny. Ovšem neustálým vývojem byly spirálně vinuté elementy postupně vytlačeny. Bylo to především pro jejich malou membránovou plochu, vysokou energetickou náročnost pro dodržení cross-flow a malou výtěžnost. V současné době jsou v drtivé většině používány membrány ve formě dutých vláken v uspořádání tlakovém nebo podtlakovém, případně deskové systémy. [13], [14]

3.1.3 Ultrafiltrace

Proces ultrafiltrace je obdobný mikrofiltraci. Hlavní rozdíl mezi těmito procesy je ve velikosti pórů membrány a velikosti potřebného tlaku pro zahájení procesu. Velikost pórů membrán je od 0,003 do 0,05 μm a pracovní tlaky se u UF pohybují v rozsahu 0,1 až 0,5 MPa. Z převážné většiny jsou UF membrány zhotoveny z organických polymerních materiálů, jako jsou polysulfony, polyakrylonitrily, polyamidy a acetáty celulózy. Kromě těchto látek se využívají také anorganické keramické materiály, např. Al_2O_3 a ZrO_2 . Ultrafiltrační membrány mají velmi tenkou aktivní vrstvu (0,1 – 1,0 μm), a proto musí být podporovány na silnější, ale vysoce porézní vrstvě (tloušťky 50 – 250 μm), která má trubkovou, kapilární nebo spirálně vinutou podobu. [5], [13]

3.1.4 Nanofiltrace

Při tomto tlakovém membránovém procesu jsou zadržovány částice menší než 0,002 μm , tj. látky s relativní molekulovou hmotností od 200 do 1 000 Daltonů. Provozní tlak se pohybuje v rozmezí 0,5 – 3,5 MPa (je nutné překonat osmotický tlak). Tloušťka aktivní vrstvy je menší než 0,1 μm a vrstva nosiče má obvykle tloušťku 50 – 150 μm . Výhradně jsou používány spirálně vinuté membrány z polymerního materiálu. [5]

Proces nanofiltrace se využívá převážně v případě, kdy zdroj vody obsahuje nadlimitní koncentrace některých organických iontů např. amoniakálního dusíku, dusičnanů, chloridů atd. Aplikace MF nebo UF by byla v tomto případě neúčinná, jelikož do permeátu přejdou tyto ionty kvantitativně. Pokud se ve vodě vyskytují organické látky s malou nebo střední molekulovou hmotností pak je proces MF i UF jako samostatné separační metody prakticky neúčinný a musí být kombinován s dalšími technologickými kroky (stripování, destrukce ozonem, sorpce na aktivním uhlí). [14]

Na separační vlastnosti nanofiltračních membrán má výrazný vliv funkční skupina se záporným nábojem na jejich povrchu (např. sulfoskupiny). Záporný náboj způsobuje selektivní zadržení iontů s vyšším nábojem. U NF dochází převážně k zachycení dvoumocných iontů (98 %) oproti jednomocným iontům (60 %). Nad membránou jsou tak zadržovány např. vápenaté (Ca^{2+}) a hořečnaté (Mg^{2+}) ionty, což vede k „změkčování“ vyrobeného permeátu. Vlastnosti takto změkčené vody nejsou vhodné pro pitné účely. Vzniklý deficit je možné řešit smícháním vyrobeného permeátu s předupravenou zdrojovou vodou v takovém poměru, aby splňoval požadavky norem. Další možností eliminace deficitu je průchod permeátu přes filtry s dolomitickým vápencem, pokud to ovšem chemické složení vyrobeného permeátu umožňuje. Poslední možností je umělá rekonstituce přísadkami příslušných solí v rozpustné formě. [3], [14]

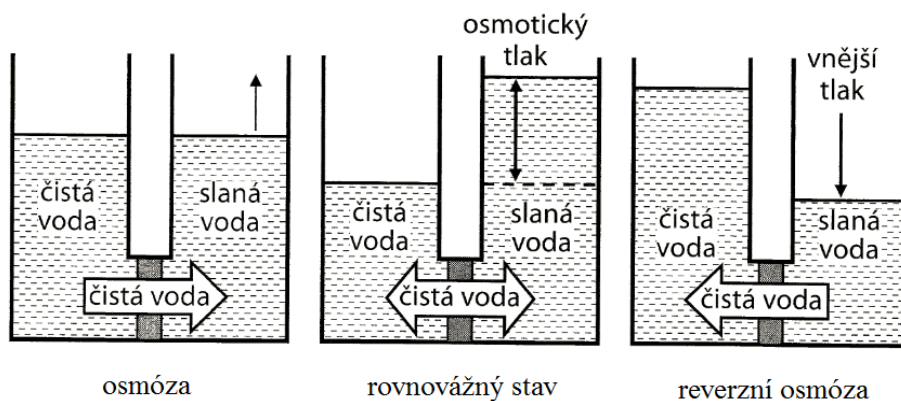
3.1.5 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza se ve vodárenství nejvíce využívá k odsolení mořské vody. Velmi často je také navrhována pro úpravu brakických vod s obsahem solí od 3 do 10 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ nebo při úpravě problematických zdrojů vody, které vykazují nižší hodnoty celkové solnosti, ale vysoké koncentrace závadných anorganických iontů nebo organickou kontaminací. [14]

Jedná se o tlakový proces, který umožňuje transport rozpouštědla (vody) membránou, zatímco rozpuštěné soli a nízkomolekulární látky zachycuje. Princip tohoto způsobu filtrace vychází z fyzikálního jevu, zvaném osmóza. V případě reverzní osmózy se využívá obrácený proces.

Osmóza je děj, při kterém rozpouštědlo prochází semipermeabilní membránou, která tvoří překážku mezi dvěma prostory. V jednom prostoru se nachází rozpouštědlo, v druhém pak roztok nízkomolekulární látky. Vzhledem k rozdílu chemických potenciálů má rozpuštěná látka snahu proniknout do rozpouštědla a rozpouštědlo do roztoku. Semipermeabilní membrána a její vlastnosti ovšem neumožní transport rozpuštěné látky, ale pouze

rozpouštědla. V prostoru roztoku nízkomolekulární látky dochází k přibývání rozpouštědla a hladina roztoku se zvedá tak dlouho, než dojde k rovnováze mezi osmotickým tlakem a hydrostatickým tlakem sloupce roztoku. Reverzní osmóza je děj, při kterém je osmotický tlak překonáván působením vnějšího tlaku a membránou prochází rozpouštědlo z roztoku a nízkomolekulární látky se budou zakoncentrovávat před membránou. [9]



Obr. 3.3 Princip osmózy a reverzní osmózy [9]

Mezi osmotickým tlakem a koncentrací rozpuštěných látek platí vztah:

$$\pi = c \cdot R \cdot T \quad (3.1)$$

kde π ... osmotický tlak [Pa],

c ... rozdíl v koncentraci [$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$],

R ... plynová konstanta ideálního plynu [$8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$],

T ... teplota [K]. [1]

Čím je molekulová hmotnost určité látky nižší, tím je větší osmotický tlak při stejném rozdílu koncentrací. Pokud je záměrem z roztoku solí připravit čistou vodu, je potřeba překonat osmotický tlak. A aby byl proces ekonomicky, je nutné zvýšit tlak minimálně na dvojnásobek osmotického tlaku. [2]

Hodnota pracovního tlaku je velice variabilní a odvíjí se od druhu upravované vody. Velikost pracovních tlaků pro úpravu mořské vody se pohybují okolo 5 – 7 MPa. Při desalinaci vody brakické bývá pracovní tlak okolo 3 – 5 MPa. Pokud se RO používá pro vody povrchové, velikosti pracovních tlaků se pohybují v rozmezí 1,5 – 1,8 MPa. Při použití RO u vstupní vody, která odpovídá kvalitě pitné vodě, je možné pracovat při tlaku okolo 0,7 MPa. [3]

Reverzně osmotické membrány jsou vyráběny z esterů celulózy, především diacetátu a triacetátu. Tyto materiály vykazují vysokou propustnost pro vodu a nízkou permeabilitu pro sůl, ale jejich chemická, tepelná a bakteriální odolnost je nízká. Dalším vhodným materiálem jsou aromatické polyamidy, ty jsou charakteristické vysokou selektivitou pro sůl, ale jejich permeabilita je o něco nižší. [9]

Pro čistou vodu je průtok přímo úměrný tlaku na membráně. Pro RO a NF membrány je průtok roztoků, obsahujících malé molekuly zachycované membránou, funkcí rozdílu mezi tlakem na membráně a osmotickým tlakem vytvářeným v průběhu filtrace:

$$J = K \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (3.2)$$

kte J ... průtok roztoků [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

K ... koeficient propustnosti pro vodu [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$],

ΔP ... rozdíl hydraulického tlaku po obou stranách membrány [Pa],

$\Delta \pi$... rozdíl osmotického tlaku po obou stranách membrány [Pa]. [8]

3.2 ELEKTROMEMBRÁNOVÉ PROCESY

Elektromembránové procesy se vyznačují tím, že hnací silou transportu je gradient elektrického potenciálu, který je aplikován na iontově selektivní membrány. Tyto procesy využívají pohyb částic v elektrickém poli, kdy kladně nabitě částice se pohybují směrem k záporně nabitě elektrodě (katodě) a záporně nabitě částice se pohybují směrem ke kladně nabitě elektrodě (anodě). Pohyb částic je ovlivněn vloženými neporézními polymerními membránami s funkčními skupinami s elektrickým nábojem. Podle polarity funkčních skupin je umožněn transport pouze vybraným částicím. Z hlediska úpravy vod se z elektromembránových procesů uplatňuje především elektrodialýza (ED). [3]

3.2.1 Iontově selektivní membrány

Pro elektromembránové procesy se využívají neporézní polymerní membrány s funkčními skupinami s elektrickým nábojem. Ve vodném prostředí jsou tyto funkční skupiny disociované a jsou tak schopny vyměňovat ionty stejným způsobem jako je tomu u ionexů. Hlavním cílem elektromembránových procesů ovšem není klasická výměna iontů jako u ionexů, ale kontrolovaný selektivní transport iontů přes membránu. Podle polarity procházejících iontů se rozlišují membrány katexové a anexové. Katexové membrány obsahují záporně nabitě skupiny ($-\text{SO}_3^-$ nebo $-\text{COO}^-$), zatímco anexové membrány obsahují bazické skupiny (např. kvartérní dusík $-\text{N}^+\text{R}_3$).

Mezi sledované parametry u iontově selektivních membrán patří mechanická a chemická odolnost, elektrický odpor membrány, iontově výměnná kapacita, převodové číslo iontů v membráně, permselektivita aj. [3]

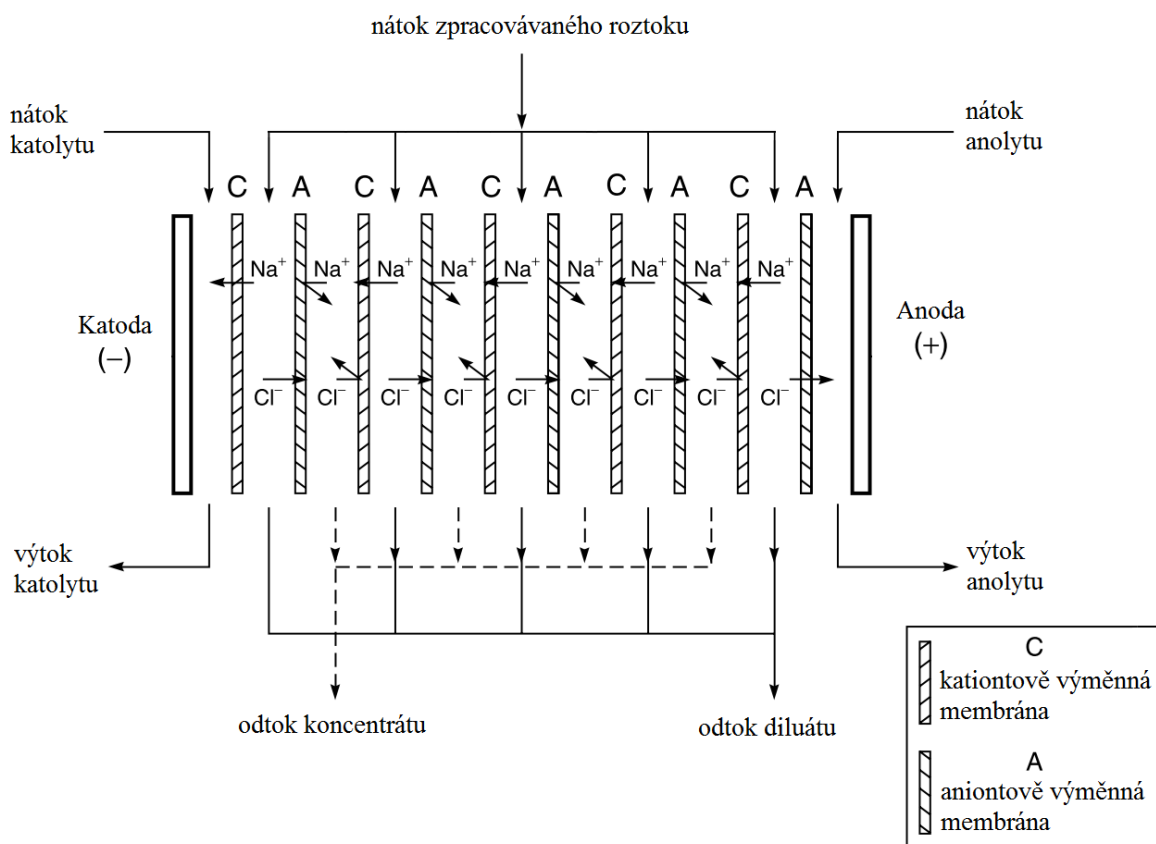
3.2.2 Elektrodialýza

Elektrodialýza nachází ve vodárenství významné uplatnění při odsolování brakických vod, kde v poslední době konkuruje reverzní osmóze. Obecně platí, že elektrodialýzu je výhodné použít pro zpracování vod s nižší solností a naopak s rostoucí vstupní koncentrací NaCl (nad $2000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) je výhodnější použít reverzní osmózu. [3]

U tohoto procesu se využívají bipolární membrány, tj. membrány propouštějící selektivně pouze kationy nebo pouze anionty. Pohyb iontů je vyvolán vloženým stejnosměrným elektrickým proudem. Vstupní vodný roztok prochází mezi membránami, které jsou anexového a katexového typu. Ionty se pohybují podle svého náboje ke katodě, příp. k anodě a tím dochází k rozdělení iontů, tedy k odsolení vstupního roztoku. Membrány přitom propouštějí pouze ionty, které mají příslušnou polaritu a brání průniku iontů nabitých stejným elektrickým nábojem.

Vstupní solný roztok se průchodem zařízením rozděluje na základě vhodné kombinace anexových a katexových výměnných membrán na diluát (odsolená část) a koncentrát (zahuštěná část). Samotné vstupní roztoky musí být určité kvality, jelikož svými vlastnostmi přímo ovlivňují životnost membrán. Je nutné předem odstranit nerozpustné a koloidní látky a látky s nízkým součinem rozpustnosti, které by se v koncentrovaném roztoku vysrážely. [15]

Proces elektrodialýzy probíhá v tzv. elektrodialyzéru neboli elektrodialyzačním modulu. Konstrukce elektrodialyzéru se skládá z řady komor, které jsou ohraničeny z jedné strany katexovou a z druhé strany anexovou membránou. Komory se rozlišují dvojího typu, tj. diluátové a koncentrátové. Komora, ve které dochází k ochuzení pohybem iontů membránou do sousedních komor je označována jako diluátová komora. Sousední komora, kde dochází naopak ke koncentraci iontů je nazývána koncentrátová komora. [3]



Obr. 3.4 Schéma principu elektrodialýzy [16]

Aby elektrodialyzér pracoval optimálně, je nutné zajistit rovnoměrný tok roztoku v komoře a zamezit styku katexových a anexových membrán. Tyto podmínky pomáhají plnit rozdělovače (spacery). Rozdělovače, o tloušťce od 0,4 do 1 mm, rovnoměrně rozvádí roztoky po celé ploše membrán, jsou mechanickou podporou membrán a svou konstrukcí umožňují promíchávání roztoků uvnitř komor. Promíchávání vrstev kapaliny v průtočné komoře je zajištěno síťovinou nebo systémem přepážek v rozdělovači. Nejčastěji používané jsou rozdělovače typu labyrintového a síťového. [3], [5]

Pravidelné opakování katexové membrány, koncentrátového rozdělovače, anexové membrány a diluátového rozdělovače v membránovém svazku je označováno jako tzv. membránový pár. Zvyšováním počtu těchto membránových párů se zvyšuje kapacita elektrodialyzéru. Maximální počet membránových párů elektrodialyzéru je omezen výrobními a technickými možnostmi, popřípadě parametry zdroje stejnosměrného napětí. V extrémních případech mohou elektrodialyzéry obsahovat až 1000 membránových párů.

Z provozního hlediska je nutné v komorách elektrodialyzéru zajistit minimální lineární rychlost kapaliny. Rychlost by se měla pohybovat od jednotek až do desítek $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále je nutné omezit napětí na jednom membránovém páru na 0,8 až 2 V pro minimalizování rizik, jelikož vkládané napětí se při určitém počtu membránových párů může pohybovat až v tisících voltů. [5]

4 VYUŽITÍ MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ V PRAXI

4.1 ÚPRAVNÝ VODY V ZAHRANIČÍ

Ve světě se membránové filtrace používají především v přímořských oblastech, kde se využívají k odsolování mořské vody. Pro úpravu povrchových a podzemních vod se začaly využívat z důvodu postupného zpřísňování požadavků na kvalitu pitné vody. První zkušenosti s využitím membrán pochází z Kalifornie, Malty a Středního Východu. Největší membránové provozy dnes pracují v Japonsku, Francii a Středním Východě. [17]

4.1.1 Úpravna vody Méry sur Oise

Úpravna vody Méry sur Oise zásobuje vodou asi 800 000 obyvatel severní části předměstí Paříže. Je jednou ze tří kapacitně největších ÚV vlastněných sdružením SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France), které je vlastníkem vodárenské infrastruktury na území členských obcí a měst, a jejímž smluvním provozovatelem je společnost Veolia Water. Společně tyto tři ÚV zásobují asi 4 miliony obyvatel Francie. [18]



Obr. 4.1 Provozní budova s nanofiltračními moduly [19]

ÚV Méry sur Oise byla postavena v roce 1911 s celkovou denní produkcí 20 000 m³ pitné vody, upravovanou pomalou pískovou filtrací. V šedesátých letech se ÚV začala modernizovat a do technologické linky byly zařazovány prvky jako rychlofiltrace a ozonizace. V roce 1980 byla vystavěna nádrž surové vody (400 000 m³) a do technologické linky zavedena biologická filtrace na zrnitém aktivním uhlí. Surová voda pro úpravu je čerpána z řeky Oise a obsahuje velké množství organické hmoty, které lze jen velmi obtížně odstranit. Navržená biologická linka: koagulace, flokulace, usazování, písková filtrace, ozonizace a filtrace na zrnitém aktivním uhlí nebyla dostačující, jelikož i přes tyto procesy se na konci úpravy ve vodě vyskytl určitý organický materiál, který vyživoval bakterie v distribučním systému.

Za účelem odstranění nežádoucích organických látek byly v roce 1993 provedeny studie francouzskou společností Compagnie Générale des Eaux, jenž ukázaly, že nanofiltrace byla nejúčinnější metodou úpravy vody. Na základě výsledků studií byl v roce 1994 na úpravně zahájen modelový výzkum nové technologie NF. [18]

Původní technologická linka se zkušební jednotkou nanofiltrace

Na začátku úpravy surové vody z řeky Oise se nacházela před-ozonizace, která byla vybudována pro případ velmi špatné kvality v řece, při běžném provozu se však nevyužívala. Poté byla voda přečerpávána do otevřené nádrže o objemu 270 000 m³. Následovalo dávkování flokulantu a usazování ve čtyřetážových usazovacích nádržích. Dále proces pokračoval na pískové rychlofiltry, za kterými se proces úpravy rozděloval na hlavní provozní jednotku a na zkušební nanofiltrační jednotku. Hlavní provozní jednotka dále pokračovala ozonizací (1,5 až 3,0 mg·l⁻¹), filtrací zrnitým aktivním uhlím, ozonizací (1,5 mg·l⁻¹), chlorací a dechlorací. Ozón byl odbouráván v termických destruktoech. Po této úpravě byla voda čerpána do vodovodní sítě. Voda přiváděná na nanofiltrační jednotku byla odebírána za pískovou rychlofiltrací, důvodem bylo prodloužení životnosti používaných membrán. Zkušební proces NF tedy nahrazoval úpravu pomocí ozonizace a následnou filtrací zrnitým aktivním uhlím. Kapacita instalované nanofiltrační jednotky byla dvakrát 1 800 m³·d⁻¹. Jelikož upravená voda, která prošla nanofiltračními membránami byla extrémně čistá a neobsahovala již organické látky, nebylo nutné přidávat do vody pro její dezinfekci chlor.

Do nanofiltrační jednotky byla voda injektována mezi dvě membrány tlakem 1 MPa a spirálově cirkulovala do jejich středu. Membrány ležely na podpůrné podložce, mezi kterými byla vzdálenost vymezena oddělovací vložkou, a celý tento pás byl stočen do spirály. Použitá membrána měla velikosti pórů od 0,2 do 0,3 μm a byla obalena polymerem, který vytvářel na membráně tenkou vrstvu, což zmenšilo velikost pórů na 10 nm.

Testovaná nanofiltrační jednotka se skládala z předúpravy vody, kde se dávkovala chemikálie, zabraňující vysrážení síranů na membráně a měla tak zabránit nenávratnému ucpání membrán a mikrofilmů z předfiltrace. Pro doúpravu vody se používalo odplynování plynů z vody, korekce pH a rovnováha byla upravována dávkováním sody. Celý model byl doplněn zařízením pro periodické čištění nanofiltračních membrán za pomoci kyseliny citrónové anebo sody.

Zkušební nanofiltrační jednotka byla v Auvers-sur-Oise vybudována za 25 mil. franků francouzskou společností Compagnie Générale des Eaux spolu s OTV. Jednalo se tak o první nanofiltraci, kterou byla upravována pitná voda. Zkušební provoz byl úspěšně ukončen v roce 1997, kdy se vlastník pro dobré výsledky testování rozhodl použít NF pro intenzifikaci ÚV Méry sur Oise. Kompletní rekonstrukce úpravny byla dokončena v roce 1999. [20]

Instalovaná nanofiltrační linka

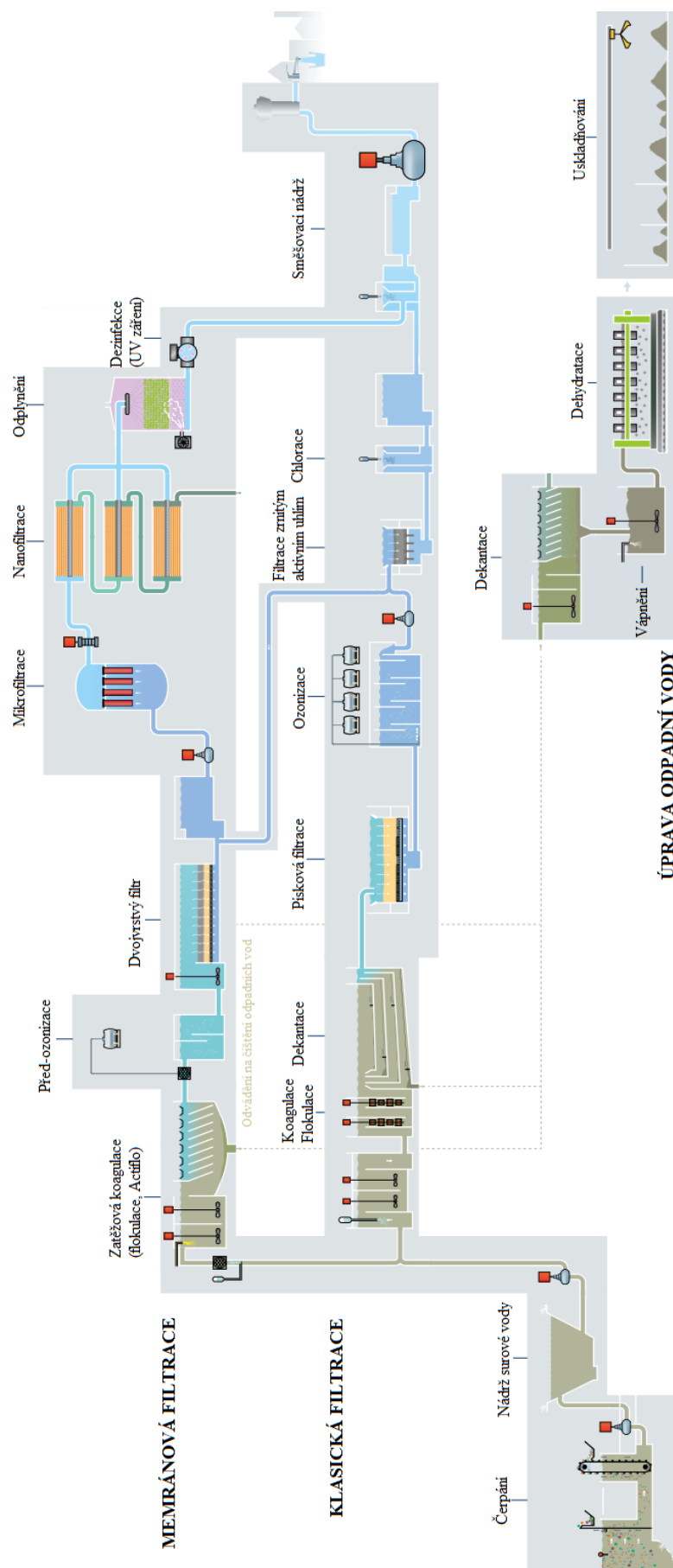
Původní biologická linka je dnes paralelně doplněna o nanofiltrační linku, jenž zabírá plochu cca 34 ha a je umístěna v budově o ploše 3 600 m². Tato linka se skládá z následujících prvků:

- **Zátěžové koagulace** skládající se z flokulace a usazovací technologie ACTIFLO (2 x 700 m³, 10 000 m² lamelové usazovací plochy, povrchové zatížení 40 m·hod⁻¹), tato technologie je schopna zadržet 95 % částic od 1 mm do 100 μm.
- **Před-ozonizace** (3 ozonizátory, produkce 22 kg·hod⁻¹), při které dochází k odstraňování mikrořas, které by činily problémy v celé technologické lince.
- **Dvojrstvého filtru** (písek a antracit, 10 x 117 m², výška filtrační vrstvy 1,5 m, rychlost filtrace 6 – 7 m·hod⁻¹) se schopností odstranění 100 % amonných iontů a také zadržení 100 % částic od 1 do 0,001 μm.
- **Mikrofiltrace** (8 uzavřených mikrofilmů, 410 filtračních náplní, celková filtrační kapacita 7 000 m³·hod⁻¹, filtrační rychlost 0,88 m·hod⁻¹) 100 % zachycující částice od 10 do 100 μm a 95 % účinnost při zachycení částic velikosti od 1 do 10 μm. [21]



Obr. 4.2 Místnost s mikrofiltrovací [19]

- **Nanofiltrace** obsahující 1 520 membránových modulů s celkovým množstvím 9 120 membrán, což představuje 340 000 m² filtrační plochy.
- **Odplynění.**
- **Dezinfekce** pomocí UV záření.
- **Smísení** nanofiltrovacně upravené a chlorované pitné vody z původní linky. Standardně se mísení provádí v poměru 7 : 3 ve prospěch vody upravené NF. [21]



Obr. 4.3 Schéma technické linky ÚV Méry sur Oise [19]

Nanofiltrační jednotka byla po celou dobu výzkumu vyvíjena ve spolupráci s firmou DOW, která byla i dodavatelem finální a v té době zcela speciální nanofiltrační jednotky s označením FILMTEC NF200. Instalovaná jednotka vykazuje výborné zadržení organických látek (např. 97 % zadržení pesticidu atrazin) a zároveň vysokou propustnost pro rozpuštěné vápenaté soli (za standardních podmínek membrána propouští až 65 % CaCl_2). Doplnění původní biologické linky o paralelní nanofiltrační technologii s nominálním hodinovým výkonem $5\,830\text{ m}^3$ zvýšilo celkovou denní kapacitu ÚV na $340\,000\text{ m}^3$ vody, z toho je $140\,000\text{ m}^3$ upravováno nanofiltrací a maximální denní kapacita biologické linky je $200\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. [14]

4.1.2 Úpravna vody Roetgen

Úpravna vody Roetgen je provozovaná společností WAG, která ročně dodává 38 mil. m^3 pitné vody pro zásobování obyvatelstva v oblasti města Cáchy v západním Německu. Jedná se o ÚV s celkovou roční kapacitou 30 mil. m^3 , což představuje více než 90 % dodávky vody společnosti WAG. [14]



Obr. 4.4 Budova úpravny vody v Roetgenu [22]

Původní technologická linka

Původní ÚV Roetgen byla postavena v letech 1953 až 1972 a byla koncipována jako dvoustupňová úpravna s otevřenými rychlofiltry. Technologická linka byla navržena především na zachycení nerozpuštěných látek a odstranění železa a manganu ze surové vody.

Voda pro úpravu je odebírána ze tří štolami propojených vodárenských nádrží ležících v severním Eifelu. Na začátku úpravy byly do přiváděné surové vody nadávkovány potřebné chemikálie pro umožnění procesu koagulace. K vysrážení látek obsažených ve vodě docházelo ve vločkovací nádrži. Takto předupravená voda pokračovala na dvoustupňovou filtraci. První filtrační stupeň tvořilo 13 otevřených rychlofiltrů s celkovou filtrační

plochou 1 170 m². Jako filtrační materiál se používal filtrační koks se zrnitostí do 1,6 mm a výška filtrační vrstvy byla 1,5 m. Druhý filtrační stupeň tvořilo 8 otevřených rychlofiltrů s celkovou filtrační plochou 720 m². Jako filtrační materiál se používal křemičitý písek o zrnitosti 1,0 až 1,6 mm a výška filtrační vrstvy činila 2,0 m. Po procesu filtrace došlo k dezinfekci vody chlórem a oxidem siřičitým. Upravená pitná voda poté odtékala samospádem do spotřebiště. [23]

Rozšíření úpravny vody

Roku 1995 bylo rozhodnuto o rozšíření ÚV z důvodu zabezpečení dodávky pitné vody i při extrémně nepříznivých poměrech surové vody.

Návrh na rozšíření obsahoval tyto zásadní podmínky:

- zajistit maximální odstranění nerozpuštěných látek při všech vyskytujících se kvalitách surové vody,
- eliminovat organické látky obsažené ve vodě v souvislosti se zamezením opětovného výskytu mikroorganismů v pitné vodě,
- zvýšit tvrdost upravené vody pro zlepšení pufrovací schopnosti a korozních vlastností vody,
- optimalizovat bezpečnostní dezinfekci k ochraně pitné vody v trubní síti.

Pro zajištění těchto požadavků se jako jedna z možností jevila výstavba konvenčního filtračního stupně s chemickým srážedlem. Druhou možností pak bylo použití membránové filtrace. S membránovou filtrací nebylo v době rozšiřování úpravny dostatek zkušeností, a proto bylo rozhodnuto o provedení pokusů s jejich použitím.

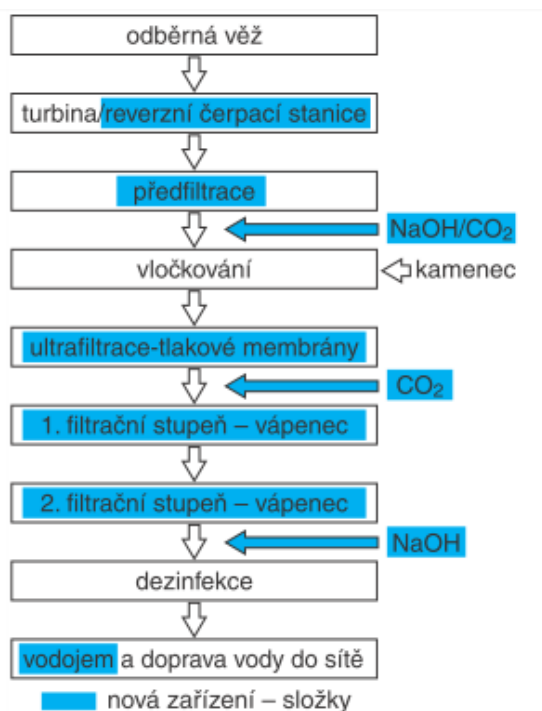
V letech 1997 až 2001 bylo na úpravně realizováno několik výzkumů pro odzkoušení vhodnosti technologie membránové filtrace. Testovány byly jak membránové zařízení tlakové, tak podtlakové. Pro zkoušení zařízení byla používána voda s vyvločkovanou surovou vodou i filtrát z 1. separačního stupně. Výsledky výzkumů pak byly shrnuty takto:

- technologie s tlakovými i podtlakovými membránami jsou pro daný účel stejně vhodné,
- přednosti membránové filtrace lze na ÚV Roetgen plně využít, pokud bude membránové zařízení provozováno s vyvločkovanou surovou vodou,
- pro udržení stabilního provozu postačí periodické proplachování – praní louhem a kyselinou.

S ohledem na výsledky průzkumů bylo rozhodnuto na ÚV Roetgen realizovat následující opatření:

- rozšířit ÚV o ultrafiltrační membránový stupeň, který bude schopný upravit až 6 000 m³·hod⁻¹,

- zařadit ultrafiltrační stupeň před stávající 1. filtrační stupeň,
 - redundanci všech komponent nezbytných pro proces úpravy pitné vody,
 - vystavit nový vodojem o objemu 6 000 m³ pro akumulaci pitné vody,
 - rozšířit zařízení pro čištění prací vody z praní filtrů o membránové zařízení,
 - prostorově i funkčně oddělit zařízení pro pitnou vodu a pro prací vodu z filtrace.
- [14]



Obr. 4.5 Schéma rozšíření technologické linky ÚV Roetgen [14]

Po dokončení projektu a výběru dodavatele se v roce 2004 začalo se stavebními a technologickými pracemi. Ultrafiltrační membránové zařízení bylo vybudováno v samostatné budově v bezprostřední blízkosti původního 1. filtračního stupně. Jedná se o budovu o rozměrech 55 m x 25 m x 17 m, která je rozdělena na tři funkčně rozdílné úrovně. Ve sklepním podlaží se nachází nádrž na upravenou vodu o celkovém objemu 6 000 m³, jenž je rozdělena na dvě stejně velké komory. V přízemí se nachází veškeré trubní zařízení pro ultrafiltraci, skladovací nádrže a dávkovací zařízení na chemikálie pro úpravu vody. V prvním poschodí jsou umístěny bloky s membránami. Vedle haly s membránami je přístavba, ve které jsou umístěna veškerá potřebná elektrotechnická zařízení a ostatní místnosti jako je laboratoř, dílna a provozní kancelář. [23]

Samotné ultrafiltrační zařízení je rozděleno do dvanácti bloků tlakových trub. Jeden blok je schopen dosáhnout maximálního výkonu 560 m³·hod⁻¹. V každém bloku se nachází 36 šestimetrových tlakových trub, rozdělených do tří skupin po dvanácti troubách a v každé tlakové troubě jsou umístěny čtyři membránové prvky SXL firmy X-Flow, Enschede. Celkem je na této úpravně nainstalováno 70 000 m² plochy membrán. Při

provozu je možné využít pouze polovinu bloků, jelikož všechny části zařízení jsou naddimenzovány. Zařízení je provozováno automaticky a všechny údaje, potřebné pro provoz, se automaticky přenášejí do řídicího centra. [14]



Obr. 4.6 Bloky tlakových trub nanofiltrace [24]

V rámci rozšiřování úpravný došlo i k rozšíření již existujícího zařízení pro čištění prací vody s kapacitou $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ o ultrafiltrační zařízení. Zařízení bylo umístěné v samostatné budově o rozměrech $25 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ vedle existujícího zařízení na čištění prací vody. Ve sklepě této budovy se nachází zásobní nádrže na prací vodu, čerpadla a hlavní instalace. V přízemí nalezneme membránové bloky, místnosti pro elektrotechnická zařízení a provozní prostředky. V ultrafiltračním zařízení byly použity tlakové kapilární membrány $1,5 \text{ mm}$ firmy INGE, Greifenberg. Instalované zařízení je rozděleno do tří sekcí, každá čítá 78 modulů zabudovaných ve svislé poloze. Celková zabudovaná plocha membrán činí $7\,000 \text{ m}^2$. K rozšíření zařízení pro čištění pracích vod o ultrafiltrační zařízení bylo přistoupeno z důvodu zajištění možnosti vrácení vyčištěných pracích vod do přívodu surové vody pro úpravu pitné vody. [14]



Obr. 4.7 Ultrafiltrační zařízení pro čištění prací vody [24]

4.2 ÚPRAVNÝ VODY V ČESKÉ REPUBLICE

V České republice se membránové technologie uplatňují především na malých úpravných vod, které zpravidla zásobují malé obce, kde kvůli nevyhovujícím vstupním kvalitativním parametrům se membránová technologie jeví jako vhodné řešení. Například úpravny vody pro obce Hvězdonice, Štěnovických Borek, Chrášťany a Třebotov využívají pro odstranění dusičnanů reverzní osmózy. Z větších úpraven je to například ÚV Březová v Karlovarském kraji, která využívá ultrafiltraci pro lepší pokrytí sezonních výkyvů kvality vody v nádrži, z které je voda pro úpravu odebírána. [17], [25]

Na následujících stránkách jsou podrobněji popsány ÚV Třebotov a ÚV Březová, přičemž druhou zmiňovanou jsem měla možnost osobně navštívit.

4.2.1 Úpravna vody Třebotov

Úpravna vody Třebotov se nachází u obce Třebotov na jihozápadním okraji Prahy a zásobuje vodou asi 800 obyvatel.

Hlavním problémem zásobování obyvatel pitnou vodou byly nadlimitní hodnoty dusičnanů ve zdrojích vody. Surová voda byla čerpána z objektu čerpací stanice, ve které docházelo pouze k hygienickému zabezpečení pomocí NaClO, přímo do distribuční sítě. Hodnoty dusičnanů v distribuované vodě se tak shodovaly s hodnotami v surové vodě a dle provedených rozborů se pohybovaly okolo $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Z tohoto důvodu bylo hledáno řešení pro zajištění plnění hygienických požadavků na pitnou vodu dle vyhlášky č. 252/2004 Sb. Po zhodnocení různých kritérií byla za nejvhodnější řešení zvolena technologie reverzní osmózy.

Stanice RO byla do této úpravy nainstalována v roce 2006. Technologie úpravy byla projektována na $15 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ pitné vody v ustáleném kontinuálním režimu. [26]

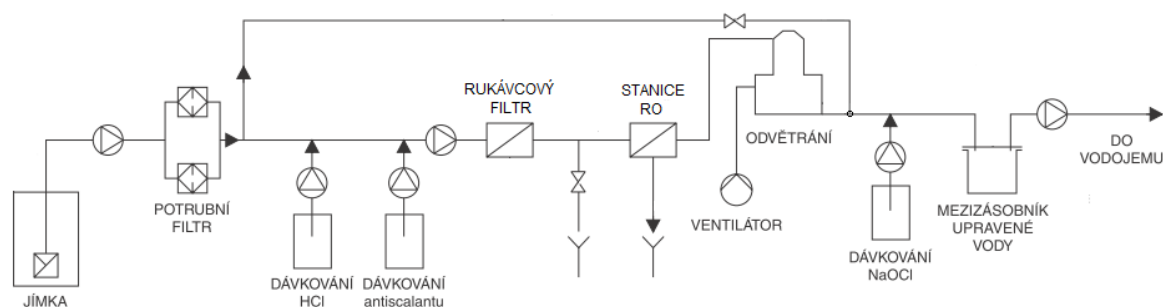
Technologie úpravy

Surová voda je přiváděná čerpáním ze tří studen a gravitačním přítokem z jednoho zářezu. Ke shromažďování vody dochází v zásobní jímce, z které je voda dále čerpána přímo do stanice RO. Do přívodního potrubí ke stanici RO je dávkována kyselina chlorovodíková pro úpravu pH a antiscalant pro zamezení tvorby nerozpustných usazenin. Poté voda vstupuje do pojistných rukávcových filtrů o porozitě $5 \mu\text{m}$, za kterými je následně oddělován proud vody, jenž slouží ke smísení s vyrobeným permeátem. Za těmito filtry je voda čerpána do sekce pracovních nádob, které jsou ve standardním provozu řazeny v uspořádání 2+1. V pracovních nádobách se nachází spirálně vinuté RO elementy FILMTEC BW30-LE440 (12 ks), na kterých vzniká odsolený proud (permeát) a zahuštěný proud (retentát). [14]



Obr. 4.8 Jednotka RO na ÚV Třebotov [27]

Permeát je poté odváděn do odvětrávací kolony, kde protéká přes vrstvu náplně o velké povrchové ploše a kde dále dochází k odvětrání CO_2 pomocí vhněného vzduchu, přiváděného do komory pomocí ventilátoru ze spodu nádrže. Retentát je odváděn do kanalizace. Na výstupu z odvětrávací kolony je zařazen směšovací uzel, ve kterém dochází k směšování permeátu s předupravenou zdrojovou vodou. Pro provádění periodického čištění RO stanice je na nosném rámu integrován CIP tank, ve kterém jsou připravovány a v průběhu operace cirkulovány příslušné čistící chemické roztoky. Na nosném rámu je také umístěn místní rozvaděč, který ovládá, monitoruje, řídí a napájí technologii RO včetně stanic pro dávkování korekčních chemikálií. [14]



Obr. 4.9 Technologické schéma ÚV Třebotov [14]

4.2.2 Úpravna vody Březová

Úpravna vody Březová je největší úpravnou vody v Karlovarském kraji. Více než třetina obyvatel tohoto kraje je zásobena pitnou vodou ze systému Oblastního vodovodu Karlovarska, do kterého je voda z 90 % dodávána právě úpravnou vody v obci Březová.



Obr. 4.10 Budova úpravny vody v Březové

Výstavba úpravny začala v roce 1972 a dokončena byla o deset let později. Dva roky po dokončení byla úpravna testována v rámci zkušebního provozu a trvale byla spuštěna v roce 1984. Úpravna byla navržena s klasickou dvoustupňovou technologií úpravy, která spočívala v usazování nečistot vysrážených do vloček za pomoci chemických látek v usazovacích nádržích a rychlofiltraci přes pískové filtry. Celková kapacita úpravny byla projektována tak, aby dokázala vyrobit 650 litrů pitné vody za vteřinu. Dnes je tato kapacita využívána pouze z necelé poloviny, vyrobí se zde přibližně 250 litrů pitné vody za vteřinu. Původně bylo z úpravny zásobováno 65 000 obyvatel Karlových Varů a okolí. V dnešní době, po postupném napojení dalších obcí na tento systém, je z ÚV zásoben téměř dvojnásobný počet obyvatel kraje.

Současná technologická linka

Voda pro úpravu je přiváděna gravitačním ocelovým potrubím o délce 3,56 km a průměru jeden metr z nedaleké přehradní nádrže Stanovice s objemem 22,5 mil. m³. Tímto potrubím přiteče na úpravnu zhruba 22 000 m³ vody denně. Surová voda je nejprve přivedena do rychlomísiče, kde se smíchá s koagulantem a dochází tak k vysrážení nečistot obsažených ve vodě do podoby vloček. K usazování vloček dochází ve třech obdélníkových usazovacích nádržích. Každá nádrž je dvoupatrová s horizontálním usazováním. Z usazovacích nádrží voda odtéká na pískové rychlofiltry o celkové ploše 518 m², kde je přefiltrována přes jemný písek a zbavena tak veškerých zbylých nečistot. Takto upravená voda je přivedena na ultrafiltraci.

Ultrafiltrační jednotka je tvořena čtyřmi bloky a každý blok obsahuje 72 ultrafiltračních modulů. Jeden filtrační modul má průměr 25 cm, délku 2,1 m a uvnitř se nachází 2 250 membránových vláken a o celkové filtrační ploše 70 m². Každé membránové vlákno je o průměru 4 mm a nachází se v něm 7 kapilár. Voda je na UF bloky čerpána s přetlakem v rozsahu 5 – 15 m v. sl. V modulech voda prochází přes membránová vlákna, na kterých se zachytí nečistoty. Jelikož jsou nečistoty zachycovány převážně na konci membránových vláken, je proces filtrace nastaven tak, že po určitém časovém kroku (cca 1 hod) je proces „obrácen“, tj. pokud probíhá filtrace shora, v následujícím kroku bude probíhat zdola. Je to především pro to, aby byla využita celá délka filtru. Pro zabezpečení zdravotní nezávadnosti se po ultrafiltraci do vody dává dávkou plynný chlór s chloridem amonným. Současné velikosti dávek jsou oproti původním dávkám (technologická linka bez NF) snižené, např. dávkování chlóru je sníženo o 25 %. Dezinfikovaná voda poté odtéká do vodojemu upravené vody.

Praní membrán je zajištěno prací čerpací stanicí sestávající ze tří čerpadel. Proces filtrace se zhruba jednou za hodinu zastaví a proběhne zpětný proplach membrán ultrafiltrovanou vodou. V intervalu jednoho až tří dnů se provádí zpětný chemický proplach membrán pomocí zředěného roztoku kyseliny a zásady. Jednou týdně se provádí test stlačeným vzduchem a jednou za měsíc je použit zpětný proplach roztokem chlóru kvůli desinfekci. [25]

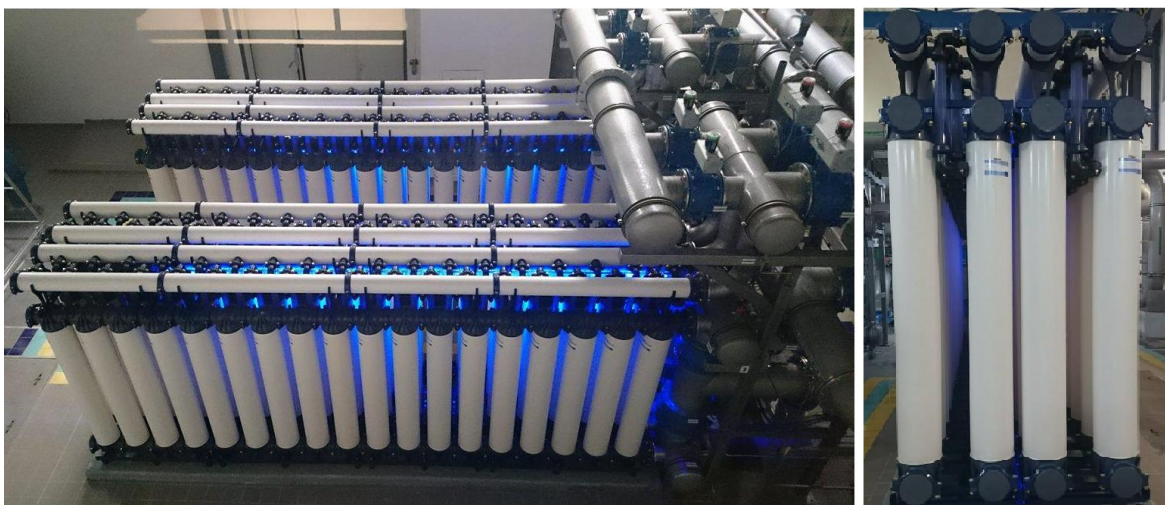
Tab. 4.1 Technické parametry ultrafiltrace [28]

Technická specifikace	
Směr toku filtrace	In-out systém
Režim filtrace	Dead-end
Materiál	Polyethersulfon (PES) – směs s polyvinylpyrrolidonem (PVP)
Výkon	320 l/s při maximálním flux max. 60 l/(m ² ·h) (max. flux neplatí pro praní)
Nominální velikost póru membrány	0,02 μm
Max. výška zařízení včetně odtokového potrubí	5,5 m
Prací voda	Max. 170 l/s, v režimu praní je možné blok rozdělit na 2 části
Umístění modulů	Ve 4 samostatných blocích se stejnou kótou nátohu



Obr. 4.11 Vstupní čerpadla pro předčištěnou vodu

Na ultrafiltrační bloky je předčištěná voda z druhého stupně úpravy čerpána čtyřmi čerpadly. Standardní provozní přetlak je udržován na hodnotě 10 m v. sl. V případě poruchy a odstavení některého z čerpadel je čerpání zajištěno zbývajícími třemi čerpadly. Díky konkrétnímu propojení jednotlivých potrubí není provoz úpravy ultrafiltrace narušen a voda je tak vždy čerpána na všechny 4 bloky.



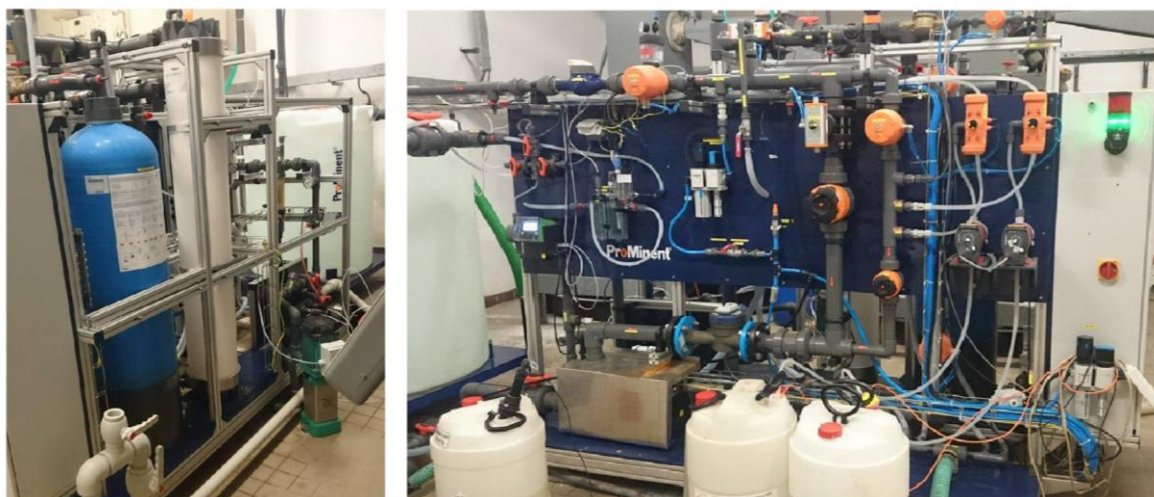
Obr. 4.12 Ultrafiltrační bloky

Barva podsvícení jednotlivého bloku zobrazuje jeho aktuální režim. Modrá barva znamená proces filtrace, zelená proces praní a červená upozorňuje na poruchu. Nejčastější poruchou je ucpávání membránových vláken, což způsobuje nežádoucí pokles provozního tlaku. Pokud dojde k poklesu provozního tlaku pod nejnižší povolené hodnoty je pak nutné poruchový modul vyměnit.



Obr. 4.13 Řez membránovým modulem a jeho detail

Instalace ultrafiltrační jednotky na ÚV Březová byla připravována již od roku 2013, kdy bylo zahájeno testování na zkušební UF jednotce pro výběr nejvhodnějšího typu membrány. Testovací jednotka měla výkonnostní kapacitu jednoho vteřinového litru a její cena byla 1 mil. Kč. V březnu tohoto roku došlo k dokončení celého projektu a jedná se o vůbec první využití ultrafiltrace v rámci České republiky na takto velké úpravně. [25]



Obr. 4.14 Testovací jednotka

V rámci technologické linky představuje UF rozšíření o třetí stupeň úpravy pitné vody. Doplnění stávající technologie o další stupeň pomůže vyřešit sezónní výkyvy kvality vody v přehradní nádrži Stanovice v souvislosti s rozvojem řas a sinic, a zároveň umožní výrobu pitné vody v případě, že by bylo potřeba vyrábět pitnou vodu z náhradního zdroje (z řeky Ohře nebo Teplá).

5 VÝHODY A NEVÝHODY MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

5.1 VÝHODY MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

Membránové separace vykazují vysokou účinnost při odstraňování nerozpuštěných látek, rozpuštěných látek i mikrobiologického znečištění. Jejich aplikací je možné z vody odstranit i kontaminanty, se kterými si klasická úprava vody neparadí. Dokážou z vody odstranit veškeré mikroorganismy v takovém rozsahu, že v upravené vodě se po úpravě nenacházejí jejich mrtvé schránky ani buněčný obsah. Při úpravě vody z kontaminovaného zdroje běžnými vodárenskými postupy se v upravené vodě mohou vyskytnout zmíněné mikroorganismy, zatímco ve vodě upravené pomocí membránových technologií nikoli, protože veškeré mikroorganismy budou zadrženy membránou. Proto může být těmito procesy upravená voda i ze zdrojů, které jsou pro klasickou úpravu vody zcela nevhodující. Použití této technologie by mohlo mít zásadní využití v případech humanitární pomoci nebo při havarijních stavech, např. povodních, kdy by bylo možné pomocí speciální mobilní membránové jednotky získávat pitnou vodu z místních kontaminovaných vodních zdrojů. [29]

K dalším výhodám patří poměrně malá energetická náročnost a velká technologická odolnost. Ve srovnání s klasickou úpravou vody je membránová technologie konstrukčně a technologicky mnohem jednodušší a nenáročnější na obsluhu. Jejich předností jsou také nižší nároky na zastavěnou plochu, snadnost rozšíření systému a kombinovatelnost s jinými separačními technikami. Oproti ostatním metodám úpravy vody mají membránové technologie výhodu i v nižší spotřebě chemikálií (např. koagulantu a desinfekčních látek) a v procesu úpravy nevznikají žádné odpady jako např. kaly. [17], [23]

5.2 NEVÝHODY MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

Navzdory mnoha výhodám membránové filtrace má technologie i své nevýhody, mezi které se řadí především snížená efektivita procesu vlivem povrchových jevů na membránách, omezená životnost membrán a donedávna zde patřily i vysoké pořizovací náklady.

Při provozování je důležité hlídat integritu membrán, jelikož i malé defekty mohou způsobit průnik značného množství patogenních organismů. S tím souvisí potřeba kvalitního předčištění surové vody, aby nedocházelo k zanesení membrán. Pro zajištění dostatečné účinnosti je také potřeba zajistit pravidelné čištění a regeneraci membrán chemickými činidly. [17], [23]

Při úpravě vody RO a částečně NF membránami se projevuje skutečnost, že tyto membrány z vody odstraňují nejen látky nežádoucí, ale i ty potřebné. U RO má permeát charakter téměř demineralizované vody, která není vhodná k pití ani k další distribuci, jelikož vykazuje velmi agresivní a korozivní účinky vůči všem materiálům, se kterými přijde do styku. Proto je nutné RO používat s by-passem (část vody je vedena obtokem okolo membrány a poté je smíchána s permeátem) nebo permeát remineralizovat. [11]

6 ZÁVĚR

Vedle klasických separačních metod jako je např. koagulace, filtrace a destilace, představují membránové procesy poměrně nové odvětví. Využívají semipermeabilní membránu k zachycení látek, které je potřeba z vody odstranit. Aby k odstranění látek docházelo, je nutná přítomnost hnací síly, kterou může být rozdíl tlaku, koncentrací, teploty nebo elektrické pole. Při úpravě pitné vody jsou využívány hlavně procesy, jejichž hnací silou je tlak a elektrické pole. Konkrétně se jedná o procesy: mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace, reverzní osmóza a elektrodialýza. V rámci úpravy pitné vody je nejpoužívanějším procesem reverzní osmóza, která má největší využití při odsolování mořské a brakické vody.

Ve vodárenství nachází membránové procesy uplatnění převážně v oblastech s nedostatkem kvalitních zdrojů pitné vody. Zatímco ve vyspělejších přímořských zemích je již naprosto běžné používání reverzní osmózy k odsolování vody mořské, jejich využívání v zemích, kde je prozatím dostatek zdrojů pitné vody, má spíše charakter pozvolného růstu. Na zvyšujícím se počtu aplikací membránových technologií má velký vliv klesání investičních i provozních nákladů. V určitých případech jsou investiční náklady membránové technologie srovnatelné s náklady na klasické metody úpravy vody. V jejich prospěch svědčí také špičková separační schopnost. Membrány jsou schopny odstranit mikrobiální kontaminanty jako viry, bakterie a prvoky. I přes tyto výhody jsou ovšem membránové procesy využívány spíše na specifické případy úpravy vody. Mezi hlavní nevýhody, pro aplikaci membránových procesů, patří zejména potřeba pravidelné kontroly integrity membrán, omezená životnost membrán a zanášení membrán. Při zanesení membrány dochází k nežádoucímu snížení výkonnosti membrány a tím pádem i celého systému. Proto je nutné dbát na preventivní pravidelné proplachování a čištění membrán.

Ve světě jsou membránové procesy pro úpravu pitné vody zařazeny mezi standardní metody pro úpravu pitné vody, kdežto v české legislativě (vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 409/2005 Sb.) nejsou dokonce uvedeny ani jako povolená metoda k úpravě pitné vody. Při jejich realizaci je proto nutné žádat o souhlas příslušného státního orgánu. Navzdory této legislativní překážce je možné v České republice zaznamenat zvýšený zájem o využití těchto procesů. První realizace membránových procesů v rámci České republiky byly provedeny na menších úpravárnách vod, kde byly instalovány jednotky reverzní osmózy pro úpravu příliš vysokých hodnot dusičnanů ve zdrojové vodě. Trend zvýšené pozornosti k těmto procesům dokládá i nedávná realizace ultrafiltrační jednotky na ÚV Březová, která je největší úpravnou vody v Karlovarském kraji.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BIELA, Renata a Josef BERÁNEK. *Úprava vody a balneotechnika*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 164 s. ISBN 80-214-2563-6.
- [2] TUHOVČÁK, L.; ADLER, P.; KUČERA, T.; RACLAVSKÝ, J. *Vodárenství*, VUT v Brně, FAST, Brno, 2006.
- [3] JELÍNEK, Luděk. *Desalinační a separační metody v úpravě vody*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008, 171 s. ISBN 978-80-7080-705-7.
- [4] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: VŠCHT Praha, 2007, 350 s. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [5] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT Praha, 2012, 282 s. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [6] VŠCHT Praha, Ústav biotechnologie: *Separace v biotechnologiích*. [online]. 2011. 20 s. [cit. 2016-02-14]. Dostupné z WWW: <http://ub.vscht.cz/files/uzel/0015847/separ.pdf>
- [7] ILAVSKÝ, Ján, Danka BARLOKOVÁ a Jana BUCHLOVIČOVÁ. *Membránové procesy v úpravě pitné vody*. In: *Voda Zlín 2015* [online] Zlín: Moravská vodárenská, a.s., březen 2015, s. 111-116 [cit. 2016-02-24]. ISBN 978-80-905716-1-7. Dostupné z WWW: <http://www.smv.cz/res/archive/138/015092.pdf?seek=1429083276>
- [8] DOLEJŠ, Petr, Nataša KALOUSKOVÁ a Zuzana NOGOVÁ. *Využití membránových procesů při úpravě pitné vody*. In: *Voda Zlín 2002* [online] Zlín: Moravská vodárenská, a.s., březen 2002. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z WWW: <http://www.smv.cz/res/archive/014/001646.pdf>
- [9] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT Praha, 2013, 254 s. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [10] www.newbiolink.com – Beijing New Technology Development Co., Ltd
- [11] KOŽIŠEK, František. *Využití membránové filtrace při úpravě vody*. Vytápění, větrání, instalace: Časopis Společnosti pro techniku prostředí. Praha. roč. 2010. s. 52-54. ISSN 1210-1389.
- [12] PEINEMANN, K. V., NUNES, S. P. *Membranes for Water Treatment*. Volume 4. Wiley – VCH, 2010. 237 p. ISBN 978-3-527-31483-6.
- [13] GRAY, N. F. *Water Technology. An Introduction for Environmental Scientists and Engineers*. Third Edition. Elsevier, 2010. 747 p. ISBN 978-1-85617-705-4.
- [14] KUTAL, Tomáš a Ladislav CABEJŠEK. *Praktické zkušenosti s využitím membránových separačních metod pro úpravu pitné vody*. SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací. roč. 2007, č. 3, s. 12-15. ISSN 1210-3039.

- [15] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. *Chemie a technologie vody*. 2. dopl. vyd. Brno: ARDEC, 2006, 329 s. ISBN 80-86020-50-9.
- [16] BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2004. ISBN 0-470-85445-6.
- [17] BIELA Renata. *Membránové procesy ve vodárenství*. SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací. roč. 2004., č. 7-8, s. 23-24. ISSN 1210-3039.
- [18] CYNA, B., G. CHAGNEAU, B. BABLON, N. TANGHE. *Two years of nanofiltration at the Méry-sur-Oise plant, France*. Desalination. France. 2002. Volume 147, Issues 1-3, Pages 69-75. ISSN 0011-9164.
- [19] www.sedif.com – Syndicat des Eaux d'Île-de-France
- [20] MACEK Lubomír. *Nanofiltrace pro šest tisíc*. SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací. roč. 1994., č. 3, s. 15-16. ISSN 1210-3039.
- [21] CHUDOBA Pavel a Michal ČIŽÍK. *Membránové technologie pro úpravu pitných vod – příklad ÚV Méry sur Oise (Francie)*. In: *Voda Zlín 2005* [online] Zlín: Moravská vodárenská, a.s., březen 2005. [cit. 2016-04-8]. Dostupné z WWW: <http://www.smv.cz/res/archive/014/001694.pdf>
- [22] www.kersten-gmbh.de – Kersten Kunststoffcoating GmbH
- [23] ČECH, Dalibor. *Membránové procesy při úpravě pitné vody*. Brno, 2010. 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Renata Biela, Ph.D.
- [24] www.ressourcewater.fona.de – Bundesministerium für Bildung und Forschung – Ressource Wasser
- [25] www.vodakva.cz – Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s.
- [26] LÁNSKÝ Milan a Jiří PAUL. *Technologie reverzní osmózy – provozní zkušenosti z ÚV Třebotov*. In: *Sborník konference Pitná voda 2008* [online] W&ET Team, Č. Budějovice 2008, s. 235-240 [cit. 2016-04-23]. ISBN 978-80-254-2034-8. Dostupné z: <http://www.wet-team.cz/files/konference/2008/PV%20Tabor/37-Lansky%20a%20kol.pdf>
- [27] Prezentace VWS MEMSEP, člen skupiny Veolia Water Solution. Dostupné z: http://www.vodaforum.cz/prezentace/zakaznici/vodaforum/dokumenty/pps/f37_prezentace-vwsm.pps
- [28] Interní materiály úpravny vody Březová.
- [29] HONZAJKOVÁ, Zuzana, Eva PODHOLOVÁ, Tomáš PATOČKA a Martin PODHOLA. *Využití nanofiltrace a ultrafiltrace k úpravě vody na vodu pitnou*. In: *Sborník konference Pitná voda 2010* [online] W&ET Team, Č. Budějovice 2010, s. 107-112 [cit. 2016-05-13]. ISBN 978-80-254-6854-8. Dostupné z WWW: <http://www.wet-team.cz/files/konference/2010/PV2010%20sbornik/19-Honzajkova.pdf>

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Rozdělení membránových procesů podle hnací síly [3]	5
Tab. 2.2 Základní charakteristiky membránových modulů [5]	13
Tab. 3.1 Látky odstraňované z vody tlakovými membránovými procesy [8].....	15
Tab. 3.2 Přehled tlakových membránových metod [3]	16
Tab. 4.1 Technické parametry ultrafiltrace [28].....	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Princip membránového procesu [4]	5
Obr. 2.2 Dělení složek směsi při průchodu porézní membránou [4].....	6
Obr. 2.3 Klasifikace membrán [4]	6
Obr. 2.4 Rozdělení membrán dle struktury [6].....	8
Obr. 2.5 Schéma deskového modulu [5]	10
Obr. 2.6 Schéma znázornění dráhy tekutiny v deskovém modulu [5]	10
Obr. 2.7 Schéma spirálně vinutého modulu [5].....	11
Obr. 2.8 Trubkový modul [10]	11
Obr. 2.9 Schéma znázornění uspořádání kapilárních modulů [5]	12
Obr. 2.10 Modul s dutými vlákny [10].....	12
Obr. 2.11 Schéma kontinuálního režimu [9]	13
Obr. 2.12 Schéma semikontinuálního režimu s částečným vrácením retentátu [9]	14
Obr. 2.13 Schéma vsádkového režimu [9]	14
Obr. 2.14 Schéma paralelně-sériového uspořádání modulů [9]	14
Obr. 3.1 Schéma separace v uspořádání dead-end (a) a cross-flow (b) [9].....	16
Obr. 3.2 Vznik polarizační vrstvy [4].....	17
Obr. 3.3 Princip osmózy a reverzní osmózy [9]	20
Obr. 3.4 Schéma principu elektrodialýzy [16]	22
Obr. 4.1 Provozní budova s nanofiltračními moduly [19].....	24
Obr. 4.2 Místnost s mikrofiltrací [19].....	26
Obr. 4.3 Schéma technologické linky ÚV Méry sur Oise [19]	27
Obr. 4.4 Budova úpravny vody v Roetgen [22]	28
Obr. 4.5 Schéma rozšíření technologické linky ÚV Roetgen [14].....	30
Obr. 4.6 Bloky tlakových trub nanofiltrace [24]	31
Obr. 4.7 Ultrafiltrační zařízení pro čištění prací vody [24].....	31
Obr. 4.8 Jednotka RO na ÚV Třebotov [27]	33
Obr. 4.9 Technologické schéma ÚV Třebotov [14]	33
Obr. 4.10 Budova úpravny vody v Březové	34
Obr. 4.11 Vstupní čerpadla pro předčištěnou vodu	36
Obr. 4.12 Ultrafiltrační bloky	36
Obr. 4.13 Řez membránovým modulem a jeho detail	37
Obr. 4.14 Testovací jednotka.....	37

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A ...	separační plocha membrány [m^2]
AEB ...	proplach vzduchem
BW ...	proplach
c ...	rozdíl v koncentraci [$\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$]
CEB ...	chemický proplach
CIP ...	čištění na místě
c_F ...	koncentrace separované složky ve vstupním proudu [% , -]
c_P ...	koncentrace rozpuštěné látky v permeátu [% , -]
D ...	dialýza
ED ...	elektrodialýza
EDI ...	elektrodeionizace
J ...	průtok roztoků [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
J_V ...	intenzita objemového toku permeátu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
K ...	koeficient propustnosti pro vodu [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$]
MD ...	membránová destilace
ME ...	membránová elektrolyza
MF ...	mikrofiltrace
MWCO ...	molekulová hmotnost molekul, které neprojdou membránou [Da]
NF ...	nanofiltrace
NOM ...	přírodní organické látky
PA ...	polyamidy
PAU ...	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB ...	polychlorované bifenyly
PEI ...	polyetherimidy
pH ...	záporný dekadický logaritmus látkové koncentrace vodíkových iontů
PSO ...	polysulfony
PTFE ...	polytetrafluorethyleny
PVDF ...	polyvinylidenfluoridy
R ...	plynová konstanta ideálního plynu [$8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$]
R ...	součinitel retence [-]
RO ...	reverzní osmóza
T ...	teplota [K]
THM ...	trihalogenmethany

UF ...	ultrafiltrace
ÚV ...	úpravna vody
V_P ...	objem permeátu [m^3]
ΔP ...	rozdíl hydraulického tlaku po obou stranách membrány [Pa]
$\Delta \pi$...	rozdíl osmotického tlaku po obou stranách membrány [Pa]
π ...	osmotický tlak [Pa]
τ ...	čas [s]

SUMMARY

This bachelor thesis deals with all types of membrane processes that can be used in treatment for drinking water production. Membrane processes are a relatively new branch of industry in the field of water treatment. These processes use a semipermeable membrane to capture substances that need to be removed from water so that the treated water meets quality limits for drinking water. In order to cause the removal of the substances, the presence of a driving force is required. This force might be the electric field or the difference in pressure, concentrations, or temperature. Basic principles and properties of this technology are described in the second chapter of this thesis. The third chapter focuses on the description of membrane processes that are used in water supply, which are mainly pressure driven and electrically driven membrane processes. Specifically, it is microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, and electrodialysis processes. Within the treatment for drinking water production, the most common treatment is reverse osmosis, which has the greatest use in desalination of sea and brackish water.

The thesis also contains specific examples of water treatment plants, not only in our country but also abroad, where the membrane processes are used. Specifically, two water treatment plants from abroad and two water treatment plants in the Czech Republic. In foreign countries, membrane technologies are mainly used in coastal areas where it is used for seawater desalination. The use of membrane processes for the treatment of surface water and groundwater began to be used mainly due to the gradual tightening of the quality parameters of drinking water.

The final chapter deals with the advantages and disadvantages of membrane technologies for water treatment. They are compared to conventional water treatment. For example the greatest advantages of membrane processes include the almost total elimination of pathogens resistant to chlorine disinfection, whose removal by conventional methods is very difficult.