

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 419*

*ISSN 1213-418X*

**Petr Hlavínek**

**AKTIVAČNÍ ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD  
SE SEPARACÍ KALU  
PONOŘENÝM MEMBRÁNOVÝM MODULEM**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodního hospodářství obcí

**doc. Ing. Petr Hlavínek, CSc.**

**AKTIVAČNÍ ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD SE SEPARACÍ  
KALU PONOŘENÝM MEMBRÁNOVÝM MODULEM**

**ACTIVATED SLUDGE WASTEWATER TREATMENT PLANTS  
WITH SLUDGE SEPARATION BY MEANS OF SUBMERGED  
MEMBRANE MODULE**

Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení  
v oboru  
Vodní hospodářství a vodní stavby



BRNO 2012

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

čištění odpadních vod, aktivovaný kal, vratný kal, dosazovací nádrž, membrána, membránový modul, statická filtrace, dynamická filtrace

## **KEY WORDS**

wastewater treatment, activated sludge, return sludge, final clarifier, membrane, membrane module, dead-end filtration, cross-flow filtration

© Petr Hlavínek, 2012

ISBN 978-80—214-4436-2

ISSN 1213-418X

# OBSAH

KLÍČOVÁ SLOVA .....	2
KEY WORDS .....	2
OBSAH .....	3
1 ÚVOD .....	7
2 MEMBRÁNOVÁ TECHNOLOGIE .....	8
2.1 Membrány a mebránové separační procesy .....	8
2.2 Materiál membrán a konfigurace .....	9
2.3 Provoz membránového procesu .....	10
2.4 Zanášení a čištění membrán .....	11
3 MEMBRÁNOVÉ BIOREAKTORY .....	13
3.1 Historie a vývoj MBR .....	13
3.2 Biologické čištění odpadních vod .....	14
3.3 MBR proces .....	15
3.4 Zásady dimenzování MBR .....	16
3.5 Konstrukční předpoklady při výstavbě MBR .....	17
3.6 Zkušenosti s provozem MBR .....	17
4 POLOPROVOZNÍ TESTOVÁNÍ NIZKOZATÍŽENÉ AKTIVACE S MEMBRÁNOVOU FILTRACÍ .....	18
5 PŘÍPADOVÉ STUDIE .....	21
5.1 Komunální ČOV s MBR Benecko .....	21
5.2 Komunální ČOV s MBR Podomí .....	22
5.3 Komunální ČOV s MBR Pasohlávky .....	23
6 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI .....	24
7 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	26
7.1 Zkratky .....	26
7.2 Symboly .....	26
POUŽITÁ LITERATURA .....	27
ABSTRACT .....	30

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

doc. Ing. Petr Hlavínek, CSc.

Narozen: 15. 3. 1959 v Brně



### Vzdělání:

- Učební obor zedník, Ingstav Brno (1975).
- Střední průmyslová škola stavební (1979).
- Ing. – Fakulta stavební VUT v Brně (1984).
- Dipl. S.E. – Institute of Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Nizozemí (1991).
- Central European University Budapest, Environmental Science and Politics (1993).
- CSc. – Fakulta stavební VUT v Brně (1993).
- Doc. – Fakulta stavební VUT v Brně (1998).

### Zaměstnání:

- |            |  |
|------------|--|
| 1984–1985  | Základní vojenská služba VPÚ Bratislava.           |
| 1985–1992  | Hydroprojekt Praha, OZ Brno, později AQUATIS a.s.  |
| 1991–dosud | VUT v Brně, FAST, Ústav vodního hospodářství obcí. |
| 2007–dosud | AQUA PROCON s.r.o.                                 |
| 2012–dosud | VUT v Brně, FAST, AdMaS.                           |

### Funkce:

- |            |   |
|------------|---|
| 1997–2010  | Zástupce vedoucího ústavu vodního hospodářství obcí.  |
| 2000–dosud | Člen oborové rady doktorského studia v oboru „Vodní stavby a vodní hospodářství“ VUT v Brně, FAST.          |
| 2005–dosud | Člen oborové rady doktorského studia v oboru „Technologie odpadů“ Mendlova universita, Agronomická fakulta. |

### Odborná praxe:

- |            |  |
|------------|--|
| 1984–1985  | Projektant, stavbyvedoucí v rámci vojenské základní služby.  |
| 1985–1992  | Asistent, projektant, samostatný projektant, vedoucí projektant a hlavní inženýr projektu v HYDROPROJEKT Praha, OZ Brno, později AQUATIS a.s. Brno.                                  |
| 1992–dosud | OSVČ – činnost organizačního a ekonomického poradce ve stavebnictví.   |
| 1994–dosud | Autorizovaný inženýr pro vodohospodářské stavby.   |
| 2001–dosud | Soudní znalec pro obor stavebnictví odvětví vodní stavby. Soudní znalec pro obor vodní hospodářství odvětví čistota vod.   |
| 2004–2007  | Expert správce stavby projektu "Ochrana vod povodí řeky Dyje I" ref. číslo ISPA 2001/CZ/16/P/PE/009 pro technologie odvádění a čištění odpadních vod.                                |
| 2007–2009  | Expert správce stavby projektu "Břeclavsko – výstavba vodohospodářské infrastruktury" číslo CCI 2004/CZ/16//C/PE/016 pro technologie úpravy vody a odvádění a čištění odpadních vod. |
| 2009–2012  | Expert správce stavby projektu "Ochrana vod povodí řeky Dyje II" pro technologie odvádění a čištění odpadních vod.   |
| 2007–2012  | Ředitel „Divize rozvojové projekty a ČOV“ v AQUA PROCON s.r.o.   |
| 2012–dosud | Autorizovaný inženýr pro technologické zařízení staveb.  |

### **Členství v odborných organizacích:**

- 1990–dosud Člen svazu stavebních inženýrů.
- 1993–dosud Člen komory autorizovaných inženýrů.
- 2007–dosud Zkušební komisař oboru „Stavby vodního hospodářství a krajinného inženýrství“.
- 1992-2010 Člen IWA (International Water Association).
- 1993–dosud Člen CZWA (České asociace pro vodu).
- 1995-2003 Člen předsednictva AČE ČR (Asociace čistírenských expertů ČR).
- 2001-dosud Člen redakční rady čistírenských listů – příloha Vodního hospodářství.
- 2006-dosud Člen redakční rady „Výstavba měst a obcí“, ISSN 1803-4241.

### **Odborné stáže:**

- 1991 Údržba a provoz pilotních čistíren odpadních vod, Department of Water Pollution Control, Wageningen, Agricultural University, Nizozemí.
- 1994 National Water Research Institute, Canada Centre for Inland Waters, Wastewater Technology Centre, Kanada.
- 1994 University of California Los Angeles, Department of Civil Engineering, USA.
- 2004 University Exeter, Center for Water Systems, School of Engineering and Computer Science Exeter, Velká Británie.
- 2005 University of Wollongong, Environmental Engineering, Austrálie.
- 2006,2008 Ben Gurion University of the Negev, Izrael.

### **Vybrané národní projekty (odpovědný řešitel):**

- 2005–2008 Integrovaný přístup při řešení využití dešťových vod v intravilánu. (MZe ČR).
- 2006–2008 Minimalizace množství nutrientů a odpadních vod vypouštěných do vod povrchových a podzemních (MPO ČR).
- 2006–2008 Vývoj malé čistírny odpadních vod se separací kalu ponořeným membránovým modulem (MPO ČR).

### **Vybrané mezinárodní projekty (odpovědný řešitel):**

- 2003–2005 CARE-S (Computer Aided REhabilitation of Sewer networks), projekt V. rámcového programu EU.
- 2004–2006 AQUAREC (Integrated Concepts For Reuse Of Upgraded Wastewater), projekt V. rámcového programu EU.
- 2006–2009 MBR-train (Process optimisation and fouling control in membrane bioreactors for wastewater and drinking water treatment), projekt VI. rámcového programu EU.
- 2008–2010 AMEDEUS (Accelerate MEmbrane Development For Urban Sewage Purification) projekt VI. rámcového programu EU.
- 2010–2012 AOP4WATER (Reducing Fresh Water Consumption In High Water Volume Consuming Industries by Recycling AOP-Treated Effluents), projekt CORNET.

## **Pedagogická činnost:**

- *Bakalářský a magisterský program*
  - Přednášky: Inženýrské sítě (1992-1993), Stokování a čištění odpadních vod (1992-dosud), Vybrané statě z čištění odpadních vod (1993-1995), Čištění odpadních vod z potravinářského průmyslu (1992-dosud), Automatizace čistíren odpadních vod (1994-1995), Čistota vod (1992-dosud), Vodní stavitelství (1993 - 2010), Vodohospodářský management (2002-dosud).
  - Vedení diplomantů a bakalářů.
  - Členství v komisích pro SZZ a obhajoby DP, VUT FAST Brno.
  
- *Doktorský program*
  - Přednášky: Čištění odpadních vod, Čistota vod.
  - Členství v komisích pro obhajoby doktorských disertačních prací v oborových radách DSP: VUT v Brně, FAST - Vodní hospodářství a vodní stavby, Mendlova universita, Agronomická fakulta - Technologie odpadů.
  - Školitel studentů doktorského studia. Absolvovalo 9 absolventů s titulem PhD. (Ing. Jiří Palčík, Ph.D., Ing. Jitka Kosmáková, Ph.D., Ing. Bronislav Remeš, Ph.D., Ing. Vladimíra Šulcová, Ph.D., Ing. Stanislav Malaník, Ph.D., Ing. Tatiana Sklenářová, Ph.D., Ing. Beata Jánošová, Ph.D., Ing. Radim Mífek, Ph.D., Ing. Jiří Kubík, Ph.D.).

## **Ocenění:**

- TOP 10 Excellence VUT 2008 – 5. Místo v kategorii technologické.
- TOP 10 Excellence VUT 2009 – 2. Místo v kategorii technologické.
- TOP 10 Excellence VUT 2010 – 5. Místo v kategorii technologické.

## **Publikace:**

- |  |     |
|--|-----|
| • Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s impakt faktorem > 0,5:    | 4   |
| • Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s impakt faktorem 0,1- 0,5: | 1   |
| • Citace jiným autorem dle Web of Science:                               | 16  |
| • Články ve vědeckých a odborných časopisech:                            | 35  |
| • Sborníky mezinárodních vědeckých konferencí:                           | 51  |
| • Odborné publikace:   | 6   |
| • Sborníky konferencí:   | 56  |
| • Výzkumné a expertní zprávy:  | 32  |
| • Recenzní a odborné posudky:  | 350 |
| • Skripta:   | 5   |

# 1 ÚVOD

Od roku 2025 se očekává, že 60 % světové populace bude žít v nedostatku vody, pokud současná spotřeba vody zůstane na současné úrovni. S dalším rozvojem lidské společnosti bude spotřeba vody narůstat, zejména v rozvojových zemích. V příštích 15-ti letech bude spotřebováno více než 90 % dosažitelných zdrojů pitné vody. Z těchto důvodů je znovu-využití a recyklace vody nevyhnutelná. Současné technologie čištění odpadních vod musí být nahrazeny pokrokovějšími technologiemi, které budou schopny garantovat vysokou kvalitu vyčištěné vody, budou provozně méně nákladné a splní stále se zpřísnující legislativní požadavky.

Technologie membránové separace aktivovaného kalu, běžně nazývaná jako „Membránové bioreaktory“ (dále MBR) byla poprvé komercializována v roce 1969 pro malé aplikace jako čištění odpadních vod na lodích, pro výluhové vody ze skládek a vysoce koncentrované průmyslové odpadní vody. Technologie MBR byla založena na konfiguraci mimo hlavní linku (side-stream configuration), tj. separační proces byl aplikován v externí recirkulační smyčce, většinou v uspořádání zevnitř ven, přes polymerní nebo keramické tubulární membrány. Teprve v roce 1990 se objevila nová generace technologie MBR, založená na tzv. ponořeném filtračním systému, pracujícím s nízkým podtlakem (sání zvenku dovnitř). Membrány byly nově provzdušňovány k omezení jejich ucpávání. To vedlo k úsporám jak investičních tak provozních nákladů a MBR technologie se stala komerčně životaschopnou pro čištění průmyslových a městských odpadních vod [22].

V Evropě byl první MBR uveden do provozu v roce 1998 v Porloku (Anglie) pro 3.800 ekvivalentních obyvatel (dále EO) a brzy následovaly v roce 1999 Buchel a Rodingen (Německo) pro 1.000 a 3.000 EO a Perthes-en-Gastinais (Francie) pro 4.500 EO. Jen o pár let později v roce 2002 byla spuštěna do provozu MBR v Breccii (Itálie) s průtokem  $38.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , který byl později zvýšen na  $42.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . V roce 2004 byl uveden do provozu Nordkanal (Kaarst, Německo) s denním průtokem  $45.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  pro 80.000 EO. Instalace tedy rostly z malých MBR k velkým během několika málo let [[13], [23], [40]].

V posledních letech se vzhledem ke zvyšujícímu se zájmu o tuto technologii výrazně zvýšil nejen počet výzkumných prací zabývajících se separací kalu pomocí membránové filtrace v procesu čištění odpadních vod, ale především počet aplikací, a to jak v oblasti čištění průmyslových odpadních vod, tak i v oblasti čištění městských odpadních vod. Rizika spojená s provozem membránové technologie jsou převážně spjata s technickými problémy samotné filtrace, jako je ztráta filtrační výkonnosti membrány (pokles permeability) z důvodu jejího znečištění, případně s její ekonomickou náročností. Nespornými výhodami MBR technologie proti konvenčním technologiím je menší zastavěná plocha, MBR nejsou závislé na sedimentačních vlastnostech kalu, mají schopnost zvládat vyšší a kolísavé látkové zatížení a produkují vysokou kvalitu odtoku (včetně desinfekce) nezávislou na kvalitě a množství přítékajících odpadních vod.

Trendy vývoje naznačují, že MBR technologie budou stále více využívány v oblasti čištění odpadních vod, zejména jako součást programů pro opětovné využívání vody a zachování přírodních vodních zdrojů. Zájem o MBR se stále zvyšuje, a tento nárůst lze očekávat i nadále, především v oblasti komunálních vod. Stále se zvyšuje i kapacita jednotlivých instalací. Velkou příležitostí k aplikaci MBR technologií jsou již existující ČOV, které v následujících letech vyžadují modernizaci/rozšíření vzhledem k požadavkům zvýšení kapacity a/nebo zlepšení parametrů vypouštěné vody, a to bez nároku na zvětšení půdorysné plochy. Nové výzkumy v této oblasti, průmyslový vývoj a zkušenosti naznačují, že MBR nebudou v příštích desetiletích jen alternativním řešením, ale budou stále více využívány. [[1], [2], [3], [9], [24], [33]]

Na Ústavu vodního hospodářství obcí byla problematika MBR řešena intenzivně od roku 2002 v rámci mezinárodních grantů AQUAREC (Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater), MBR-train, (Process optimisation and fouling control in membrane bioreactors for wastewater and drinking water treatment), AMEDEUS (Accelerate membrane development for urban sewage

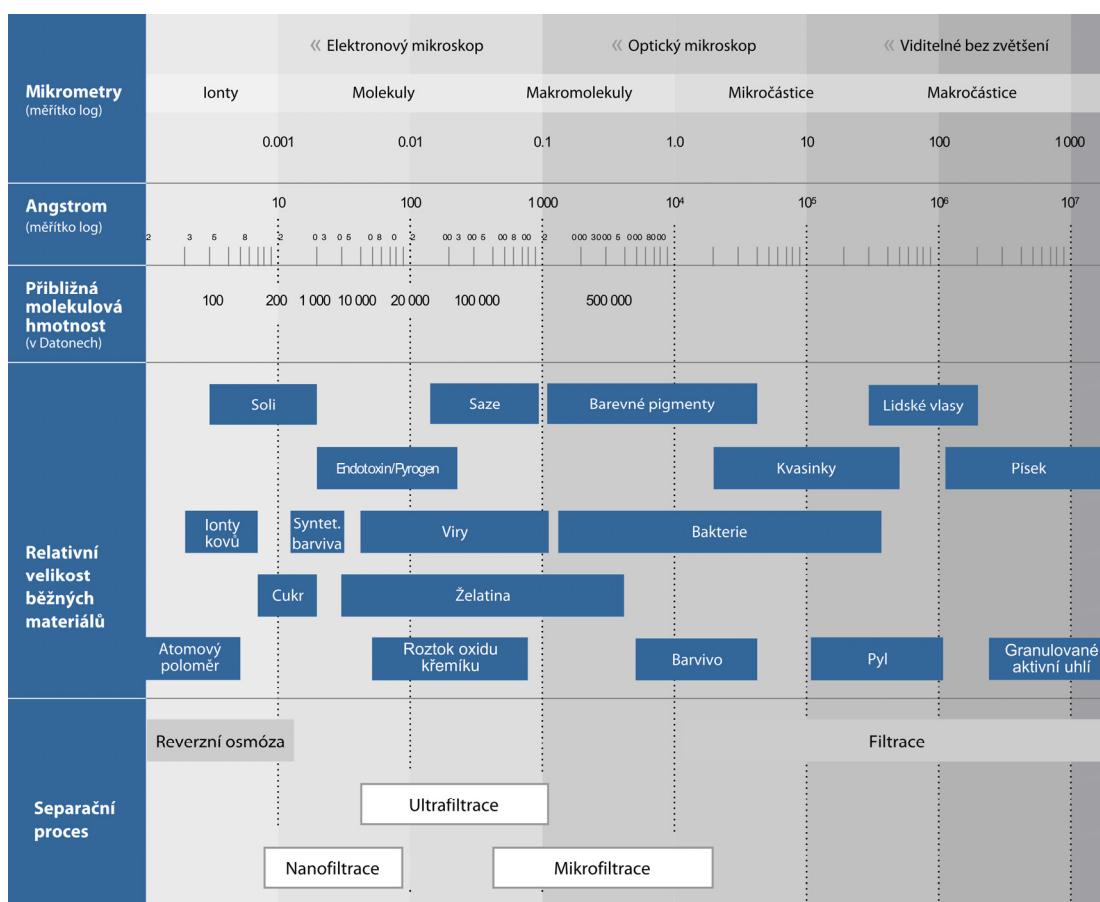


purification) a národních grantů MPO Tandem - Vývoj malé čistírny odpadních vod se separací kalu ponořeným membránovým modulem (příjemce ENVI-PUR s.r.o.) a Minimalizace množství nutrientů a odpadních vod vypouštěných do vod povrchových a podzemních (příjemce ASIO s.r.o.). Ověřené technologie a prototypy byly začleňovány do výroby ve firmách ENVI-PUR s.r.o. ([www.envi-pur.cz](http://www.envi-pur.cz)) a ASIO s.r.o. ([www.asio.cz](http://www.asio.cz)) [[8], [10], [37], [38], [40]].

## 2 MEMBRÁNOVÁ TECHNOLOGIE

### 2.1 MEMBRÁNY A MEMBRÁNOVÉ SEPARAČNÍ PROCESY

Membránová filtrace je princip selektivní separace. Membrána tvoří polopropustnou bariéru mezi dvěma fázemi - pevnou a kapalnou. Zachycená část se nazývá retentát (koncentrát) a fáze procházející membránou permeát (filtrát). Základní třídění membránových procesů se odvíjí od velikosti pórů a potřebného transmembránového tlaku (TMP [ $N \cdot m^{-2}$ ]) umožňujícího separaci, který vzrůstá se zmenšujícími se póry. Membrány propouštějí molekuly vody a podle typu membrány pak jen další fyzikální a chemické komponenty určité velikosti. Čtyři klíčové procesy jsou: mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a reverzní osmóza (RO) – obr. 1. U reverzní osmózy a nanofiltrace hraje významnou roli překonání osmotického tlaku separovaných roztoků. U filtračních separačních procesů je průtok membránou závislý na tlakovém gradientu; u nefiltračních technologií jako je dialýza a elektrodialýza na diferenci koncentrace na opačných stranách membrány, respektive rozdílu elektrických potenciálů, u membránové destilace pak na teplotním gradientu. [22]



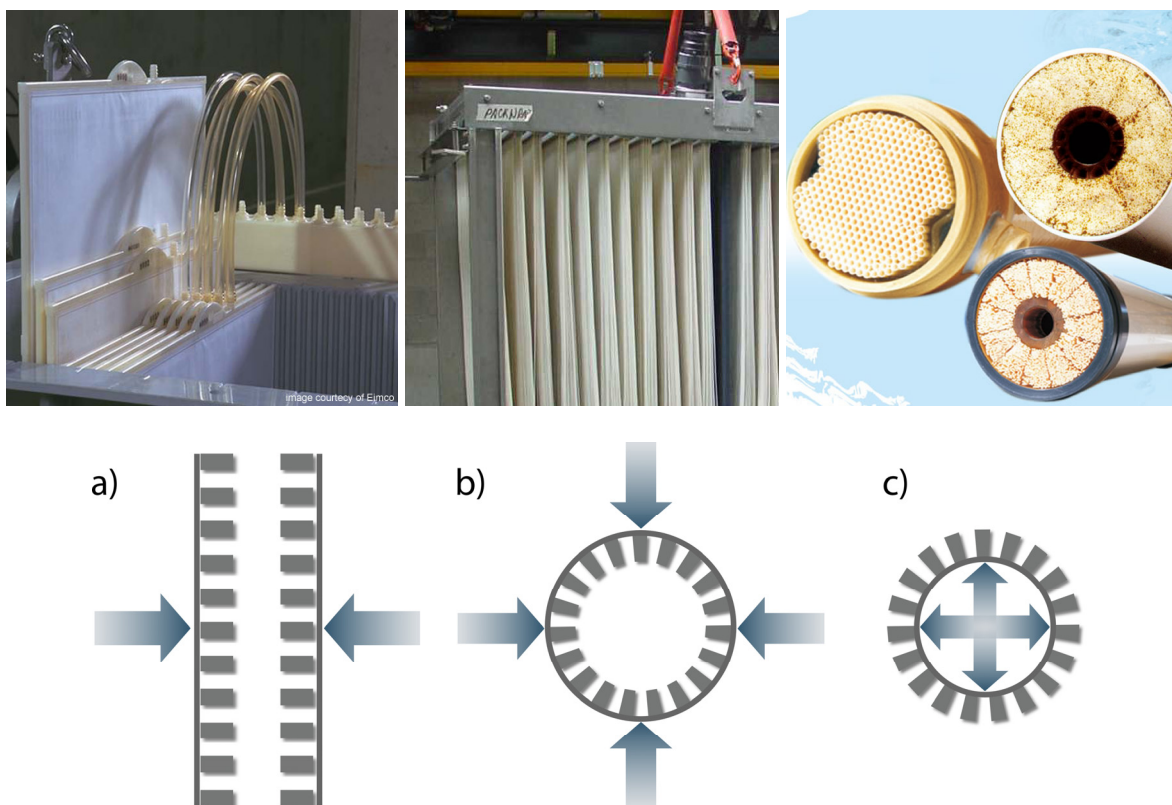
Obr. 1 Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených/propuštěných částic (zdroj: Microdyn-Nadir)

## 2.2 MATERIÁL MEMBRÁN A KONFIGURACE

Existují dva nejpoužívanější typy materiálů membrán - polymer a keramika. Membránový materiál je použitelný tehdy, je-li tvarován tak, aby propouštěl vodu. Membrána se skládá ze silnějšího porézního nosiče a z tenké povrchové vrstvy poskytující požadovanou permeselektivitu. Polymerické membrány jsou zhotoveny tak, aby měly vysokou povrchovou poréznost. Membrána musí dostatečně mechanicky pevná a musí být odolná proti tepelným a chemickým účinkům. Pro membránovou separaci lze použít polyvinyliden difluorid (PVDF), polyetylsulfon (PES), polyetylen (PE) a polypropylén (PP). [24]

Konfigurace membrány, čili její geometrie, způsob upevnění a orientace vzhledem ke směru nátoku vody, je zásadní pro určení jejího celkového výkonu. Ideální konfigurace membrány by měla splňovat vysoký poměr mezi plochou membrány a objemem modulu, velký průtok na straně nátoku, nízkou energetickou náročnost v přepočtu na jednotkový objem vody, nízké náklady v přepočtu na jednotkovou plochu membrány, konstrukci umožňující snadné čištění a konstrukci poskytující modularizaci.

Takovouto ideální konstrukci membrány lze však v praxi stěží vytvořit, protože některé z uvedených vlastností se vzájemně vylučují (např. je zřejmé, že zvýšení požadovaného průtoku sebou přináší zvýšené energetické nároky). Existuje šest základních konfigurací, které jsou v současnosti využívány v membránových procesech. Jsou to deskové typy (FS), dutá vlákna (HF), multitubulární (MT), kapilární (CT), skládané náplně (FC) a spirálovité moduly (SW). Pouze první tři z nich jsou však vhodné pro MBR, a to především z důvodů, které už byly zmíněny – nutnost udržení průtoku a požadavky na čištění. Mezi typy používané jako ponořené v aktivaci patří membránové moduly tvořené FS (obr. 2a) nebo HF (obr. 2b). MT (obr. 2c) se používají jako zařazené za aktivaci. [22]



Obr. 2 Typy membránových modulů:  
a) deskový (Kubota), b) duté vlákno a c) multitubulární (zdroj: Norit X flow)

## 2.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MEMBRÁN A PROVOZ MEMBRÁNOVÉHO MODULU

Mezi základní parametry charakterizující membránu patří flux, transmembránový tlak a permeabilní koeficient.

Flux ( $J_p$ ) je parametr charakterizující membránu z hlediska hydraulického výkonu. Je definován jako průtok permeátu ( $Q_p$ ) vztažený na jednotku plochy membrány ( $A_M$ ) za ustálených podmínek, standardní teploty a tlaku. V případě nerovnovážných podmínek lze vypočítat pouze jeho střední hodnotu, a to jako podíl mezi změnou objemu permeátu ( $\Delta V_p$ ), který projde určitou plochou membrány ( $A_M$ ) za odpovídající dostatečně dlouhý časový úsek ( $\Delta\tau$ ). Flux je definován dle rovnice 1: [7]

$$J_p = \frac{Q_p}{A_M} = \frac{1}{A_M} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta\tau} \quad (1)$$

Flux je považován za rozhodující parametr při hodnocení hydraulického výkonu membránové jednotky.

Nejběžnější transmembránovou hnací silou je tlak, běžně označovaný jako transmembránový tlak ( $\Delta p_{TM}$ ). Je určený středním přetlakem na straně suspenze a tlakem na permeátové straně membrány ( $p_p$ ). Středním tlakem na straně suspenze se rozumí aritmetický průměr tlaků působících z této strany na membránu, respektive tlak na přítoku ( $p_F$ ) a tlak koncentrátu – retentátu ( $p_C$ ). Transmembránový tlak lze definovat dle rovnice 3: [7]

$$\Delta p_{TM} = \frac{p_F + p_C}{2} - p_p \quad (3)$$

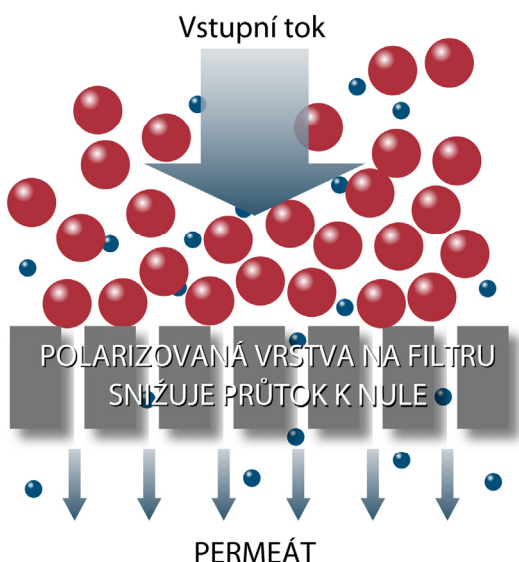
Hodnota transmembránové hnací síly určuje hybnou sílu celého procesu filtrace. Se snižujícím se průměrem pórů membrány roste transmembránová síla a naopak.

Permeabilní koeficient/permeabilita ( $L_p$ ) neboli také propustnost je definován jako poměr mezi fluxem ( $J_p$ ) a transmembránovým tlakem ( $\Delta p_{TM}$ ). Permeabilní koeficient lze definovat dle rovnice 4: [7]

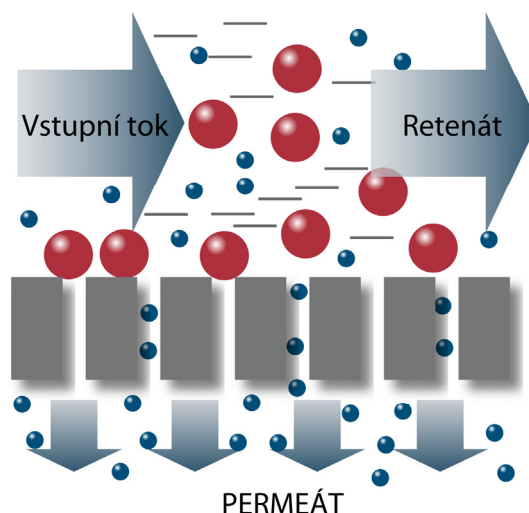
$$L_p = \frac{J_p}{\Delta p_{TM}} \quad (4)$$

V praxi se používají dva režimy membránové filtrace ve spojitosti se směrem přiváděného toku, a to statická (klasická, dead-end) a dynamická (příčná, cros-flow) filtrace. U klasické filtrace je směr toku filtrované suspenze veden kolmo k povrchu membrány, tloušťka filtračního koláče pak narůstá úměrně s tokem suspenze, průtok permeátu se snižuje až k nule a je nutno zajistit odstranění vznikajícího filtračního koláče periodickým praním membrány – pomocí tlakového vzduchu apod. Princip klasického nátoku je uveden na obr. 3a.

U filtrace s příčným tokem je suspenze přiváděna tangenciálně k povrchu membrány, čímž se snižuje tloušťka filtračního koláče, po čase vznikne rovnováha mezi zanášením membrány a čistícím efektem, což udržuje konstantní tloušťku filtračního koláče a vede k prodloužení životnosti membrány. Filtrace příčným tokem však vyžaduje relativně složitě přídavné zařízení a představuje také vyšší spotřebu energie. Princip příčného nátoku je uveden na obr. 3b.

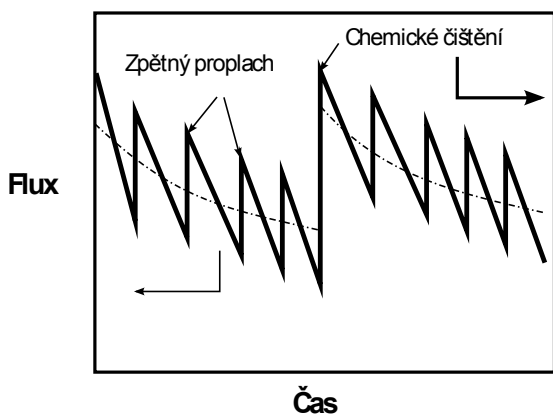


Obr. 3a Filtrace dead-end (statická)

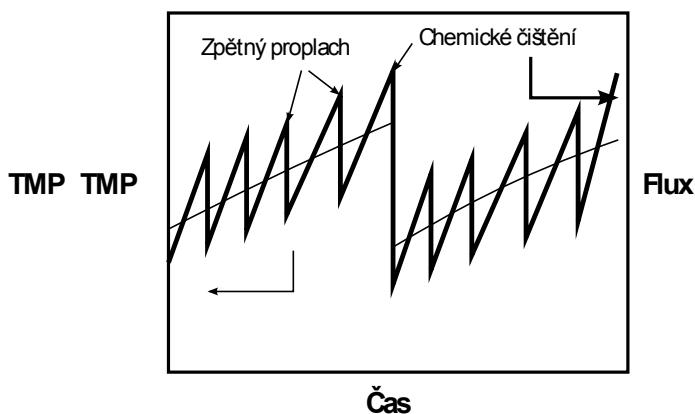


Obr. 3b cross-flow (dynamická)

V membránovém systému může být udržován buď konstantní průtok, nebo konstantní tlak. Pokud membrány pracují na základě konstantního tlaku, klesá v důsledku jejich zanášení průtok. Naopak v případě že požadujeme konstantní průtok, je zapotřebí s postupným zvyšováním odporu membrány měnit transmembránový tlak. Princip systému s konstantním tlakem je uveden na obr. 4a. Princip systému s konstantním průtokem je uveden na obr. 4b.



Obr. 4a Režim s konstantním tlakem [25]



Obr. 4b Režim konstantním průtokem [25]

## 2.4 ZANÁŠENÍ A ČIŠTĚNÍ MEMBRÁN

Jednou z nevýhod membránové separace je potřeba pravidelného čištění a regenerace membrán, jejich účinnost se snižuje vlivem zanášení. Membrány je potřeba chránit před nadměrným zanášením nerozpuštěnými látkami, tak se prodlouží intervaly chemické regenerace membrán a tím i jejich životnost. Po určité době dochází při provozu k poklesu hydrostatického tlaku za membránou, což se projeví snížením rychlosti odtoku vyčištěné odpadní vody ze systému. Pokles tlaku je způsoben postupným zanesením membrány, a to jak vytvořením filtračního koláče na jejím povrchu při biologickém čištění odpadních vod, tak zanesením pórů membrány drobnými částicemi. [21]

Zanášení membrán je způsobováno převážně adsorpcí makromolekul a/nebo koloidních látek na vnějším i vnitřním povrchu (v pórech) membrány; adhezí a tvorbou biofilmového nárůstu na povrchu membrány – v tomto případě se někdy hovoří o biologickém zanášení (tzv. „biofouling“);

srážením rozpuštěných látek na vnějším i vnitřním membránovém povrchu, např. vznik inkrustů uhličitanu vápenatého při změně hodnoty pH, což může být způsobeno např. vystripováním rozpuštěného oxidu uhličitého – v extrémních případech může dojít až k poškození membrány; prostorovými a časovými změnami již zachycených částic, např. změna mikrobiologického složení s následnou zvýšenou produkcí extracelulárních polymerů a stárnutím materiálu membrány, čímž dochází k částečné změně vlastností membrány. [22]

Pravidelné čištění filtrační membránové jednotky je nutné pro zajištění kontinuálního a stabilního odtoku. Zanášení rozdělujeme do dvou kategorií. Vnější je způsobeno materiálem, který se hromadí na jejím povrchu a vytváří filtrační koláč. Filtrační koláč může být částečně odstraněn mechanicky (stěrka, zpětný proud). Vnitřní způsobuje materiál, který se může hromadit uvnitř membrány a tím zabránit průtoku permeátu (odtok vyčištěné odpadní vody). Pro odstranění vnitřního zanesení je nutno přistoupit k čištění chemickému, regeneraci membrány. Míru zanesení membrány významně ovlivňuje kvalita odpadní vody přiváděná do systému. Předúprava odpadní vody přivedené na membránový modul má významný vliv na výkon membrány a kvalitu upravené vody. [22]

Čištění je možno provádět chemicky nebo mechanicky. Odstranění suspendovaných látek z membrány lze zajistit fyzikálními metodami. Chemické čištění je založené na fyzikálně – chemických reakcích mezi činidlem a látkami, které tvoří nános. Má vyšší účinnost než mechanické čištění, odstraňuje tzv. nevratné (permanентní) zanesení. Ani chemické čištění ale nedokáže obnovit původní propustnost membrány, zanechává určitý zbytkový odpor, který se stupňuje v průběhu let (nenapravitelné zanesení).

Podle četnosti a účinnosti rozlišujeme 3 druhy chemického čištění.

U chemického zefektivnění zpětného proplachování (CEB) je do proplachové vody přidáno malé množství chemického činidla, provádí se denně.

Údržbové čištění používá vyšší koncentrace chemikálií, čištění se provádí každých 5 až 7 dní, pravidelné údržbové čištění snižuje četnost intenzivních čistících procesů. Proces trvá přibližně 30 až 60 minut, nejčastěji používanou chemikálií je chlornan sodný. Údržbové čištění probíhá in situ (uvnitř membránové nádrže), a může být provedeno v napuštěné nádrži (ozn. CIP – čištění na místě), nebo ve vypuštěné nádrži (ozn. CIA – čištění na vzduchu). Pro dávkování chemikálií se používají injektory, které dopravují činidlo do membrány. Po dokončení čištění se použitá chemikálie vypustí do nádrže s membránou, její koncentrace je dostatečně nízká, takže nemá vliv na biomasu v nádrži. U membrán s dutými vlákny probíhá chemické čištění jako zpětné proplachování, při kterém je do proplachové vody přidána čistící chemikálie.

Intenzivní chemické čištění využívá chemikálie s vysokou koncentrací, četnost čištění jednou až dvakrát ročně, v závislosti na provozním průtoku. Provádí se ve chvíli, kdy TMP vzroste na hraniční hodnotu, a filtrace je velmi nízká. Jako chemické činidlo se používá chlornan sodný o koncentraci 0,2-0,5 % pro odstranění organických ulpěných látek, a následuje použití organické kyseliny (citronové, šťavelové) o koncentraci 0,2-1 %, která odstraní anorganické částice. Intenzivní čištění může probíhat in situ nebo ex situ. U čištění in situ je čištěná kapalina s biomasou vypuštěna z membránové nádrže a odvedena dočasně do vedlejší nádrže. Nádrž s membránou se naplní koncentrovanou chemikálií, a membrána se nechá nasáknout (doba sycení se pohybuje okolo 2 h, může být i více). Použitá chemikálie je odvedena z nádrže, někdy je potřeba ji neutralizovat, následně je čištěná kapalina přivedena zpět do membránové nádrže. Intenzivní čištění tedy vyžaduje prostory a zařízení pro čerpání, uskladnění chemikálií a jejich zneškodnění. U malých zařízení, kde není více membránových nádrží, a vlivem intenzivního čištění může docházet k hydraulickým nárazovým zatížením, se buduje nárazová nádrž.

Nevýhodami chemického čištění je nutnost použití chemikálií, a jejich následného zneškodnění, což zvyšuje náklady na údržbu membrány a vyžaduje přerušení procesu filtrace během čištění. Průběh chemického čištění je stanoven výrobcem membrány, který dále určí četnost čištění a používané chemikálie.

V poslední době je využíváno čištění ultrazvukem. Je založeno na vysílání ultrazvukových vln ze zdroje, který přeměňuje elektrickou energii na mechanické vibrace. Vytváří se akustické tlakové pole, to vede ke vzniku kavitačních bublin. Když se kavitační bubliny rozpadnou, vzniká mikroproudění a nárazové vlny působí na membránu, odstraňují ulpělé částice a nanosenou vrstvu. Tyto jevy vedou ke snížení koncentrační polarizace, a omezují další ukládání částic. Čištění ultrazvukem je vhodné pro deskové, trubkové membrány, i pro membrány z dutých vláken. Ultrazvuk může pracovat kontinuálně, a udržovat tak stále vysokou hodnotu průtoku membránou, nebo může pracovat periodicky, kdy se střídají vysoké průtoky membránou v době čištění s nižšími průtoky mezi jednotlivými periodami. Výhodami ultrazvukového čištění jsou údržba membrány bez nutnosti jejího přemístění, čištění se provádí bez přerušení filtrace, nepoužívají se chemická činidla, zařízení nevyžaduje náročnou údržbu. Propustnost membrány a tedy i průtok jsou udržovány na vysokých hodnotách při nižších TMP. [22]

### 3 MEMBRÁNOVÉ BIOREAKTORY

#### 3.1 HISTORIE A VÝVOJ MBR

Výzkum a vývoj membrán v oblasti čištění odpadních vod započal v šedesátých letech dvacátého století. První membránový bioreaktor (MBR) byl vytvořen firmou Dorr-Oliver roku 1969 pro čištění odpadních vod na lodích. V roce 1970 se společnosti Dorr-Oliver Corp. (USA) a Sanki Engineering Corp. (Japonsko) dohodly na spolupráci a MBR technologie se tak dostala na japonský trh. V osmdesátých letech 20. století byly investiční a provozní náklady ale stále příliš vysoké pro širší komerční využití. MBR byly používány zejména pro čištění vysoce koncentrovaných průmyslových vod a drenážních vod ze skládek a čištění odpadních vod na palubách lodí. První systémy byly založeny na konfiguraci mimo hlavní linku (side-stream), tzn. membránová separace byla použita v externí recirkulační smyčce s průtokem média zevnitř ven (inside-out) přes organické nebo keramické membrány. V roce 1989 vyvinul Yamamoto a spol. (Japonsko) ponořeny membránový bioreaktor (submerged MBR), který měl v porovnání s externím prokazatelně nižší náchylnost k ucpávání. V roce 1990 iniciovala japonská vláda výzkum a vývoj nových technologií pro opakované využívání vody (Aqua Renaissance Programme '90), který vedl k hlavnímu technologickému a průmyslovému průlomům v membránových procesech - konceptu ponořených membránových modulů, redukujících zanášení membrán pomocí nízkého podtlaku (sání outside-in, neboli zvenku dovnitř) a provzdušňování membrán z důvodu zamezení jejich zanášení. Výrazně se snížily investiční (zjednodušilo se vybavení) a provozní náklady (odstranění energeticky náročné recirkulace kalu). Výzkumný program urychlil průnik těchto technologií na trh a vedl v Japonsku ke vzniku nových firem, jako např. Mitsubishi Rayon nebo Kubota. Kanadská firma Zenon vyvinula ponorný modul v roce 1992. [[11], [22], [24]]

Za posledních deset let zaznamenaly aplikace membránové technologie v oblasti čištění odpadních vod velký nárůst. To dokazuje nejen počet publikací či odborných pracovišť zabývajících se touto problematikou, ale především zvyšující se počet aplikací, a to jak v oblasti čištění průmyslových odpadních vod, tak i v oblasti čištění městských odpadních vod. [[23], [40]].

Rozvoj membránové technologie je také zřejmý z neustále se zvyšujícího počtu výrobců a dodavatelů této technologie. Mezi nejznámější a nejvýznamnější firmy působící v této oblasti patří např. společnosti: Zenon (Kanada), Kubota (Japonsko), A3 (Německo), Asahi Kasei (Japonsko), Busse (Německo), Huber (USA), Martin System (Německo), Puron (USA) a mnohé další. [38]

V kombinaci výše uvedených faktů s neustále se zpříšňujícími legislativními požadavky, s rostoucí cenou a spotřebou vody (aplikace MBR pro opětovné využití vyčištěné vody), je možné

oprávněně předpokládat rozvoj a stoupající trend v počtu aplikací membránové technologie, a to především v oblasti čištění městských odpadních vod.

Globálně je zřejmý trend ve zvyšování velikosti MBR, stejně jako nárůst dodavatelů technologie, i když největší MBR jsou převážně vybaveny technologií GE ZENON (tab. 1).

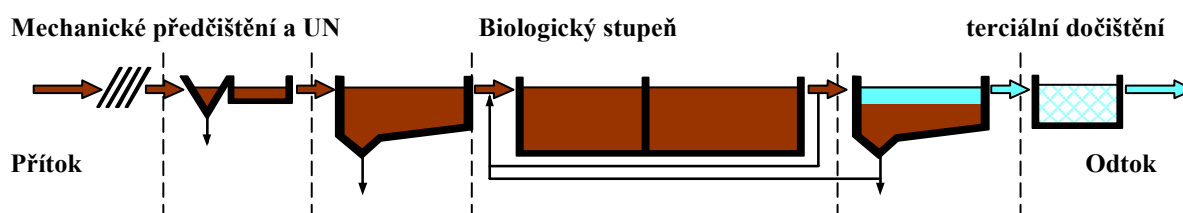
**Tab. 1 Přehled největších MBR (květen 2010) [22]**

Projekt	Technologie	Datum uvedení do provozu	Průtok (m <sup>3</sup> /d)
Shending River, Čína	BOW	2010	120.000
Wenyu River, Čína	ASAHI K/BOW	2007	100.000
Johns Creek, GA, USA	GE Zenon	2009	94.000
Beixaothe, Čína	Siemens	2008	78.000
Al Ansab, Muscat, Oman	Kubota	2010	78.000
Peoria, AZ, USA	GE Zenon	2008	76.000
Cleveland bay, Austrálie	GE Zenon	2007	75.000
Sabadell, Španělsko	Kubota	2009	55.000
San Pedro del Pinatar, Španělsko	GE Zenon	2007	48.000
Syndial, Itálie	GE Zenon	2005	47.000
Broad Run WRF, VA, USA	GE Zenon	2008	47.000
Peking Miyun, Čína	MRE	2006	45.000
NordKanal, Německo	GE Zenon	2004	45.000
Tempe Kyrene, AZ, USA	GE Zenon	2006	44.000
Brescia, Itálie	GE Zenon	2002	42.000
Traverse City, MI, USA	GE Zenon	2004	39.000
Linwoog, GA, USA	GE Zenon	2007	38.000
North Kent Sewer Authority, MI, USA	GE Zenon	2008	35.000
Jinqiao Power, Čína	GE Zenon	2006	31.000
Dubai Sports City, SAE	GE Zenon	2009	30.000

Zvyšující se počet velkých membránových čistíren odpadních vod je doprovázen zvyšujícím se počtem výrobců komponentů a dodavatelů technologie. Zatím co doposud byly používány zejména konvenční technologie čištění, v současnosti jsou MBR preferovány všude tam, kde je nedostatek prostoru a požadavek na vysokou kvalitu vyčištěné vody. V Japonsku, Singapuru, USA, Číně a v řadě Evropských zemí roste počet membránových čistíren odpadních vod geometrickou řadou.

### 3.2 BIOLOGICKÉ ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Klasický aktivační proces je v současnosti nejrozšířenějším způsobem biologického čištění odpadních vod. Tento proces sestává ze tří za sebou následujících stupňů, kterými odpadní voda prochází, výsledkem je vyčištěná voda a přebytečný kal, který se dále zpracovává v kalovém hospodářství. Schématické znázornění je na obr. 5.

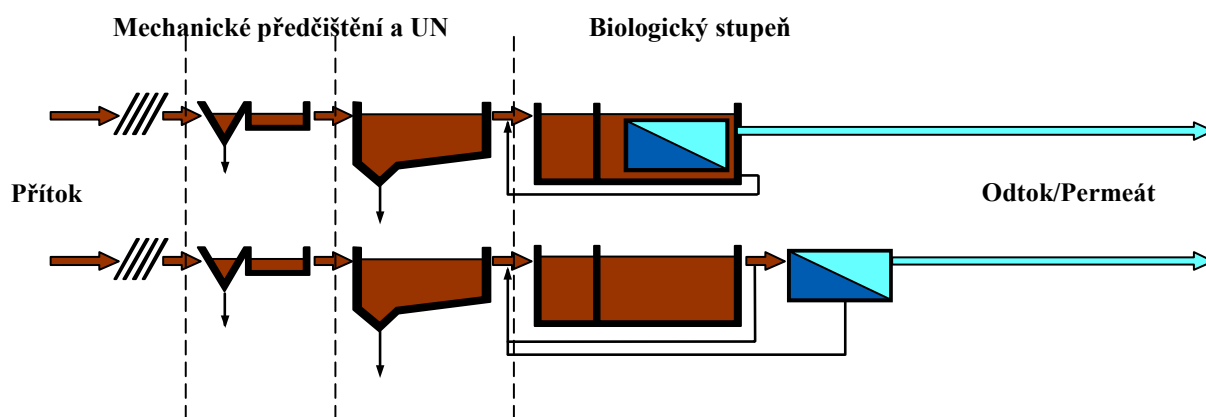


**Obr. 5 Technologické schéma mechanicko-biologické ČOV**

Odpadní voda je v mechanickém stupni zbavena části nerozpuštěných látek. Odsazená odpadní voda přitéká do aktivační nádrže, ve které se mísí s recirkulovaným (vratným) kalem. Směs je intenzivně provzdušňována tlakovým vzduchem nebo mechanickými aerátory. Vyšší koncentrace biomasy v biologickém reaktoru se dosahuje recirkulací. Po průtoku směsi aktivační nádrží je aktivovaný kal separován od vyčištěné vody v dosazovací nádrži. Zahuštěný aktivovaný kal se recirkuluje zpět na začátek aktivační nádrže. Odstraňování nerozpuštěných a rozpuštěných organických látek má za následek kontinuální tvorbu nové biomasy, která se ze systému musí periodicky odstraňovat ve formě přebytečného aktivovaného kalu. I když v tomto stupni probíhá celá řada fyzikálně chemických procesů jako je stripování, sorbce, chemická oxidace, sedimentace, k účinnosti procesu přispívají hlavně biologické procesy. [[12], [32]]

### 3.3 MBR PROCES

Ponořené MBR existují ve dvou konfiguracích. Membrány jsou ponořeny buď přímo v aktivaci, nebo jsou umístěny v tzv. membránové nádrži. Schématické znázornění je na obr. 6. Recirkulační čerpadlo čerpá aktivační směs do membránového reaktoru v poměru 100 až 500 % přítoku. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma konfiguracemi je v tom, že pro umístění v membránové nádrži je třeba čerpadlo navíc pro recirkulaci a že je oddělena aktivační nádrž a membránová nádrž.



Obr. 6 Možnosti použití membránové filtrace v čištění odpadních vod

Výše uvedené konfigurace mají řadu výhod a nevýhod. Se separátní membránovou nádrží mohou být membránové moduly snadno odděleny od biomasy a jsou lehce dostupné pro inspekci, údržbu nebo čištění. Zejména tehdy, pokud je nutné častější čištění membrán je dosaženo úspor energie a času. Toto uspořádání také dovoluje lepší chemickou regeneraci membrán.

Ucpávání membrán je se separátní membránovou nádrží nižší. Na jedné straně to vyplývá z možnosti nezávisle optimalizovat hydrauliku membránové nádrže a možnosti lépe kontrolovat rozložení kalu. Na druhé straně je možno optimalizovat funkci aktivační nádrže.

Konfigurace MBR se separátní membránovou nádrží vede k lepší kvalitě odtoku. Je to dáno tím, že tyto systémy mají obvykle nižší koncentraci kalu v aktivační nádrži, jejich specifický objem je větší a to vede ke zvýšení jejich hydraulické kapacity. Oddělená filtrace také vede ke kaskádovému uspořádání celkového objemu reaktoru, což činí tuto konfiguraci méně citlivou na změny průtoku nebo zatížení. Pokud jsou vyžadovány přísné parametry na odtoku je toto uspořádání vhodnější díky možnosti lépe optimalizovat denitrifikaci a biologické odstraňování fosforu. Při vícelinkovém uspořádání je možno využívat při odstavení jedné linky kapacitu všech membránových nádrží, zatímco při membránách ponořených přímo v aktivační nádrži nelze tuto možnost použít.

MBR s oddělenou membránovou nádrží byly vyvinuty později a jsou preferovány pro intenzifikace čistíren odpadních vod se střední a větší kapacitou a tam, kde lze očekávat větší



kolísání průtoku nebo zatížení nebo tam, kde jsou vysoké požadavky na odbourávání nutrietů. Pokud chceme použít systém s nitrifikací a denitrifikací v časovém sledu, je využití konfigurace s oddělenou membránovou filtrací jedinou možností. Tato konfigurace má však vyšší provozní a investiční náklady. Přes to, že konfigurace s membránami ponořenými přímo v aktivační nádrži má vyšší požadavky na obsluhu, její provozní náklady jsou zhruba o 30 % nižší. Také investiční náklady jsou okolo 70 % nákladů na MBR s oddělenou separací.

### 3.4 ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ MBR

Většina technologických řešení MBR se provozuje bez usazovací nádrže a se stářím kalu větším než 25 dnů. Nicméně lze navrhnout i řešení s nízkým stářím kalu (5–20 dní) zabezpečující snížení parametru CHSK popřípadě nitrifikaci. Hlavními ukazateli pro návrh membránové části je průtok membránami a teplota. Často je ovšem třeba zohlednit hydraulické a látkové zatížení. Vzhledem k tomu, že existují různé legislativní požadavky a zároveň i řada technických řešení různých výrobců, existuje i velké množství variant. Na základě zkušeností se však dá vycházet z několika zásad.

Množství přebytečného kalu v MBR se nijak zásadně neliší od klasických biologických čistíren, rychlosti kinetických reakcí odpovídají rychlostem při běžných aktivačních procesech, stáří kalu se obvykle pohybuje ve stejném rozsahu jako u klasických biologických aktivačních čistíren. Kaly z MBR jsou zpracovávány standardně a jejich kvalita negativně neovlivňuje technologické procesy v kalovém hospodářství. Všechny použitelné membránové moduly s velikostí pórů do 0,5  $\mu\text{m}$  se propírají vzduchem a jejich účinnost odstraňování choroboplodných zárodků se podstatně neliší. Pro MBR je vody nutno vždy řádně mechanicky předčistit, aby se předešlo ucpávání membrán a akumulaci kalu, a tudíž ke zhoršení hydraulické účinnosti membrán. Aplikace MBR neomezuje účinnost základních čistírenských procesů (snížení CHSK, nitrifikace, denitrifikace, biologické nebo chemické odstranění fosforu nebo aerobní stabilizaci). Membránové čištění je možno provozovat v oddělené nebo společné nádrži. U obou systémů lze vyjmenovat několik výhod i nevýhod, které je třeba při návrhu vzít v úvahu. Cena stavebních prací bude vyšší u oddělených nádrží. V membránové nádrži je možná údržba, čištění a regenerace membrán in situ, zatímco v případě umístění ve společné nádrži je nutné membrány z aktivace vyjmout. U odděleného reaktoru je možné lépe kontrolovat koncentraci sušiny a lépe se dají zvládat nárazová hydraulická zatížení; vyšší koncentrace sušiny má pozitivní vliv na snížení objemu reaktoru a negativní efekt na provzdušňování. U odděleného reaktoru lze udělat vestavbu mezi aktivací membránovým reaktorem na regeneraci membrán, lépe se zamezí nechtěnému zkratovému proudění nečištěné odpadní vody než u společné nádrže a je zde vysoká flexibilita ohledně objemů nádrží; množství a velikost nádrží pro aktivaci jsou nezávislé na membránových nádržích (např. při sezónních výkyvech lze snížit objem při udržení plné hydraulické kapacity). Při aplikaci oddělených nádrží je nezbytné mít přečerpávací čerpadla, zatímco u společné nádrže to není třeba. U společné nádrže se simultánní nebo přerušovanou nitrifikací/denitrifikací může propírací vzduch narušovat zdárný průběh denitrifikace, proto doba na propírání vzduchem by měla být zohledněna při návrhu biologického stupně. Bez ohledu na to, zda membrány jsou situovány v oddělené nebo společné nádrži, bude propírací vzduch potřebný na čištění membrán vnášet do aktivační nádrže kyslík v proudu vratného kalu. Proto u čistíren, kde jsou přísné odtokové hodnoty v parametru  $N_{\text{celk}}$ , by měl být vratný kal vyústěn do míst, kde by nenarušoval zdárný průběh denitrifikace. [[14], [15], [16], [18], [25], [27]]

V zásadě je objem membránové části dán minimálním objemem pro potřebnou úroveň biologického čištění a dodatečným objemem pro umístění membránové vestavby. Určujícím parametrem pro stanovení objemu aktivace je stáří kalu, přičemž výpočet je možné provést obvyklými metodami.

### 3.5 KONSTRUKČNÍ PŘEDPOKLADY PŘI VÝSTAVBĚ MBR

Návrh MBR podléhá stejným pravidlům, jako u klasických biologických ČOV. MBR však mají některá specifika, která je třeba vzít v úvahu. Filtrační nádrž nebo aktivace s membránovou vestavbou mohou být plněny samospádem nebo čerpáním, podle něhož se pak navrhuje i recirkulace kalu. Aktivace s membránami nebo samostatná filtrační nádrž jsou zároveň vyrovnávací nádrží, neboť nedisponují volným přepadem, to znamená, že je nutno brát v úvahu změnu výšky hladiny. Nad filtrační jednotkou je třeba počítat minimálně s 30–50 cm vody a také výška membrán nade dnem by měla být alespoň 30 cm. Při hloubkách větších než 2.5 m je třeba uvažovat s míchacím zařízením k zamezení vzniku zkratového proudění. Přívodní a odtokové žlaby po stranách se osvědčily pro minimalizování vlivu nárazového hydraulického přetížení a zkratového proudění. Je třeba zajistit rovnoměrný přívod odpadních vod na jednotlivé jednotky tak, aby se zabránilo nerovnoměrnému zanášení membrán. Velikost sestav modulů je tím limitována. Vzhledem ke kolísání v přítoku na ČOV je třeba monitorovat výšku hladiny především v membránové komoře, přičemž je třeba počítat i s případnou tvorbou pěny. Je třeba zajistit, aby permeát používaný v systémech se zpětným proplachem neobsahoval nerozpuštěné látky. Chemické čištění (regenerace) membrán se provádí přímo v membránové nádrži (oddělené nádrže) nebo ve speciální regenerační komoře (společná nádrž). Komory na regeneraci musí rozměrově odpovídat použitým filtračním jednotkám a je nutné, aby byly vybaveny odpovídající technikou. Velikost a počet komor vyplývá z předpokládaného provozování. Nádrže, ve kterých probíhá regenerace membrán, musí být vybaveny povrchem odolným vůči působení roztoků s nízkým i vysokým pH, kterých je používáno pro regeneraci modulů. Musí být zabráněno přístupu listí, větví a dalších nečistot z okolí, jež by mohly způsobit ucpání nebo poškození membrán i za cenu zakrytí nádrží. Výpadek jedné nebo více filtračních jednotek by mohl způsobit kolaps celé čistírny. Proto musí být v návrhu zohledněn a zpracován plán opatření pro případ výpadku části technologie. Je třeba zohlednit hmotnost suché filtrační jednotky při montáži a použité při demontáži. Výhodou je, pokud je možné jednotku zbavit aktivační směsí. Je třeba zajistit odvětrání všech sacích potrubí a potrubí, jimiž jsou přiváděny chemikálie. Životnost přepínacích ventilů se předpokládá na 100.000 změn polohy je možné ji prodloužit neúplným uzavíráním klapky. Dmychadla musí být regulovatelná s možnou rezervou na připojení dalších filtračních jednotek. Konstrukčně je třeba zabezpečit, aby vzduch byl k jednotlivým filtračním jednotkám přiveden rovnoměrně. Pro zakrytá zařízení s membránovými reaktory je třeba zajistit klimatizaci nebo alespoň dostatečnou výměnu vzduchu. Mimoto je třeba pro sklady chemikálií a jejich dávkování při regeneraci zajistit dostatečnou bezpečnost práce. [[17], [19], [35], [36], [37], [38]]

### 3.6 ZKUŠENOSTI S PROVOZEM MBR

V praxi není problém s dodržením limitu pro nerozpuštěné látky (jakákoliv hodnota vyšší než  $1 \text{ mg.l}^{-1}$  je znakem nějakého problému – protržená membrána, netěsnost), neboť velikost pórů automaticky zabezpečuje hodnoty pod  $1 \text{ mg.l}^{-1}$ . Zpravidla také není problém s ukazatelem BSK<sub>5</sub>. Pokud je biologie funkční, tak  $5 \text{ mg.l}^{-1}$  je zcela reálná hodnota. Problém může být občas s dosažením hodnoty CHSK  $30 \text{ mg.l}^{-1}$ . Její dosažení souvisí i s obsahem nerozložitelných organických látek, tj. pokud rozpuštěná organická látka není biologicky rozložitelná a velikost částic je menší než velikost pórů v membránách, pak ji ani membrány nezachytí. Sorpce CHSK na nebo do vloček kalu je také podstatně ovlivněna dobou zdržení odpadní vody v aktivaci. V praxi lze očekávat hodnoty CHSK kolem  $50 \text{ mg.l}^{-1}$ . Co se týká dalších ukazatelů – zejména dusíku a fosforu, záleží na celkovém technologickém uspořádání, které je v podstatě stejné jako u klasických čistíren. Navíc lze počítat s tím, že voda je hygienicky zabezpečena minimálně na úrovni požadavků pro vodu určenou ke koupání. Obvyklé dosažitelné koncentrace na odtoku jsou uvedeny v tab. 2.

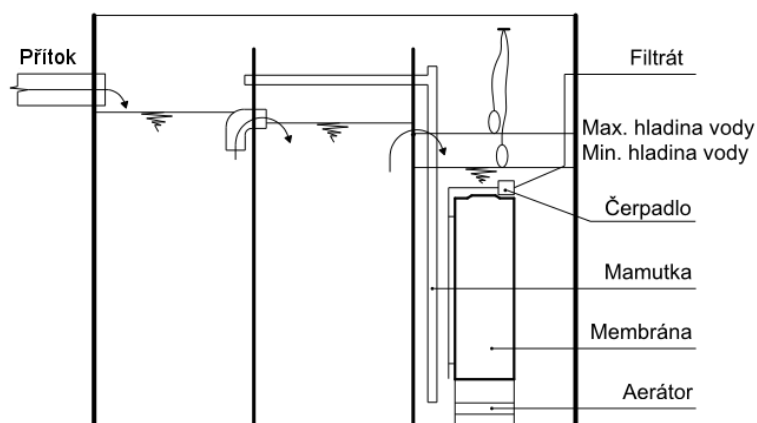
Tab. 2 Tabulka obvyklých dosažitelných koncentrací na odtoku. (zdroj: ENVI-PUR)

Parametr	Hodnota	Jednotka
CHSK <sub>Cr</sub>	< 50	mg.l <sup>-1</sup>
BSK <sub>5</sub>	< 10	mg.l <sup>-1</sup>
NL	< 1	mg.l <sup>-1</sup>
Zákal	< 1	NTU
E-Coli (bakterie)	< 100	KTJ/100 ml
Viry (stupeň odstranění)	99,99	%

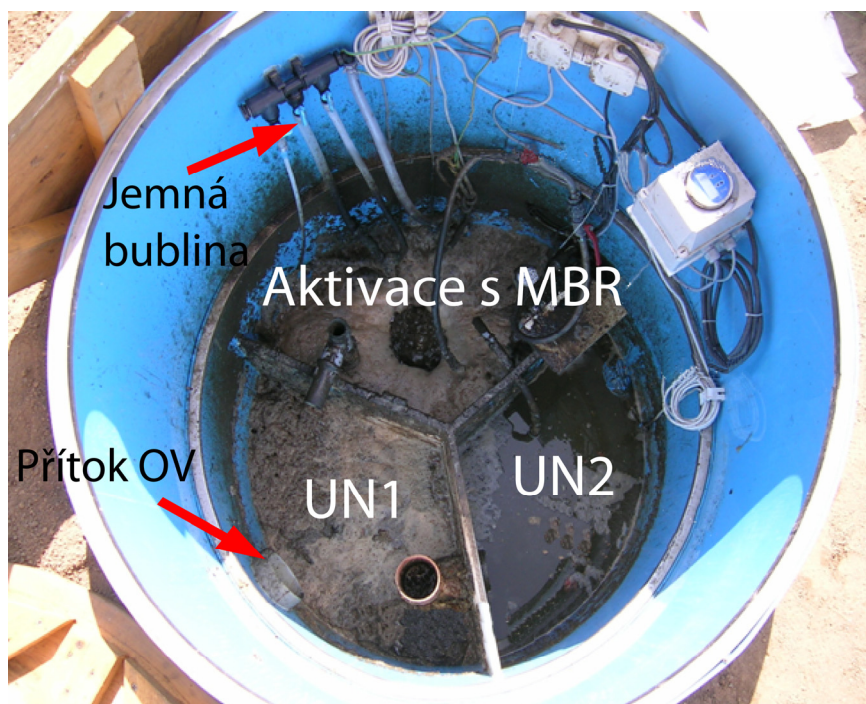
Díky velikosti pórů v membránách a díky efektu náplavné filtrace se dá konstatovat, že voda po průchodu membránami (oblast ultrafiltrace) bude dostatečně hygienicky zabezpečena, a to pravděpodobně až na úroveň požadavků kladených na pitnou vodu. Proto není problém její použití na koupání, co se však týká použití na vodu pitnou, tam přichází do úvahy ještě faktor xenobiotik (hormony, zbytky léků atd.), které membránami prochází. Takže z praktického hlediska je výhodné použití tam, kde potřebujeme zajistit filtrace a hygienické zabezpečení.

#### 4 POLOPROVOZNÍ TESTOVÁNÍ NIZKOZATÍŽENÉ AKTIVACE S MEMBRÁNOVOU FILTRACÍ

Poloprovoznímu testování, které bylo prováděno v roce 2007 a 2008 předcházela řada laboratorních testování, kde byly zkoumány různé provozní stavy, ověřen proces aktivovaného kalu s biomasou ve vzhledu, biomasou ve vzhledu kombinovanou s biomasou přisedlou, technologie regenerace deskových modulů a modulů z dutých vláken.[[14],[15],[16],[17],[19],[20],[28],[34]]. Testovaný MBR byl osazen na zahradě rodinného domu čtyřčlenné rodiny a byly do něho přivedeny všechny odpadní vody vyprodukované v domě. Schéma MBR je na obr. 7., fotografie a popis na obr. 8. Vyčištěná voda (permeát) byla zachycována v nádrži a využívána na závlahy. Vlastní MBR sestává ze tří sériově propojených nádrží. První dvě jsou využívány jako usazovací nádrže a slouží pro akumulaci kalu. Třetí nádrž slouží jako biologický reaktor s aktivovaným kalem a separací kalu ponořeným membránovým modulem. V MBR byly postupně testovány tři membránové moduly firem A3 Water Solutions, Martin Systems a PURON.



Obr. 7 Schéma poloprovozní ČOV



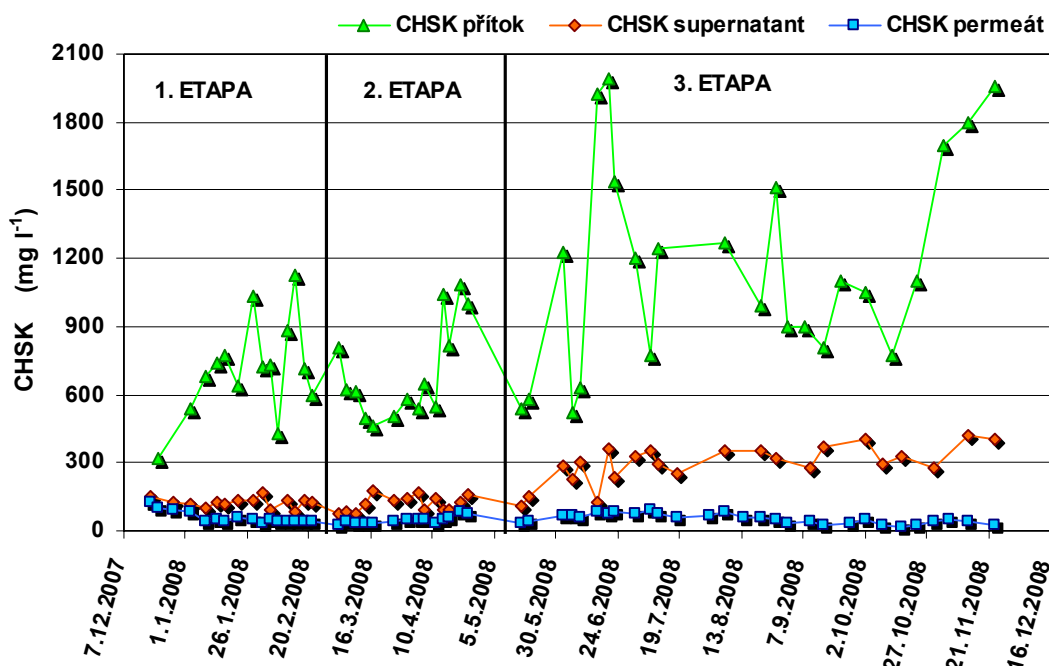
Obr. 8 Fotografie a popis poloprovozní ČOV (zdroj: autor)

Doposud publikované poloprovozní zkoušky MBR byly realizovány zejména na polygonech velkých městských ČOV, které sice garantovaly ustálený provoz, ale mají odlišné charakteristiky odpadní vody a aktivovaného kalu [4]. Námi prováděný poloprovoz byl unikátní zejména s ohledem na specifika domovní ČOV, kde byl MBR testován a délku poloprovozu. Malý domovní MBR je velmi specifický. Pracuje jako nízkozatěžovaná aktivace s koncentrací kalu 10–12 g l<sup>-1</sup>, stářím kalu kolem 100 dní a minimálním odběrem přebytečného kalu. Celý systém musí být jednoduchý a nenáročný na obsluhu a údržbu.[5]

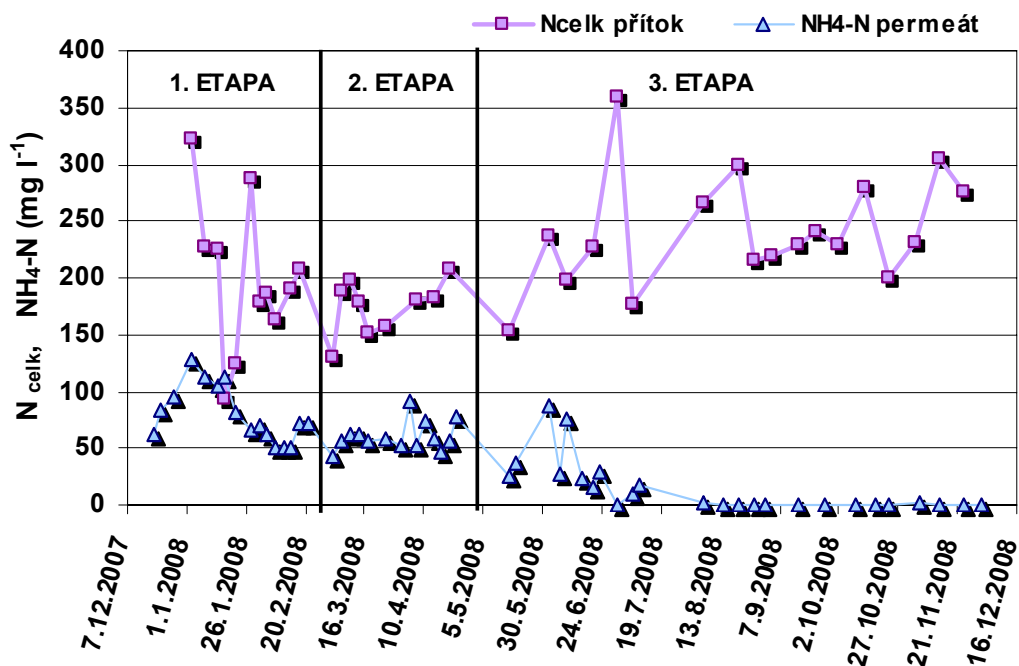
Přítok do domovní ČOV je značně odlišný od splaškových vod přiváděných stokovou sítí. Množství přitékajících vod a její kvalita je značně rozkolísaná. Přítok navíc obsahuje vlasy, toaletní papír, vlákna a jiné částice, které byly na polygonech odstraněné účinným mechanickým předčištěním.

Jedním z hlavních cílů výzkumu bylo otestovat reakci aktivovaného kalu na specifické podmínky během reálného provozu MBR. Mezi tyto podmínky patří dlouhá doba nulového přítoku/zatížení a naopak velké nárazové množství koncentrovaných odpadních vod, extrémní zimní teploty (méně než 5 °C), vysoké hodnoty pH a přítomnost detergentů.

Testování probíhalo ve 3 etapách, v prvních dvou etapách byla aerace zajištěna válcovými aerátory pod membránovým modulem, ve 3. etapě byly osazeny dva středobublinné a jeden jemnobublinný aerátor mimo membránu. Jak je zřejmé z obr. 9. koncentrace CHSK na přítoku kolísaly ve všech 3. etapách. CHSK permeátu byla relativně ustálená, s průměrnou hodnotou za sledované období 53,4 mg.l<sup>-1</sup>. BSK<sub>5</sub> na odtoku se pohybovalo v rozmezí 0,5 až 8 mg.l<sup>-1</sup>, což představuje účinnost 99,5 %. Jak je zřejmé z obr. 10 na přítoku značně kolísala koncentrace N<sub>celk.</sub>. Koncentrace N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na odtoku byla po naběhnutí nitrifikace v rozmezí 0,3–2 mg.l<sup>-1</sup>.



Obr. 9 Hodnoty CHSK během celého sledovaného období [29]



Obr. 10 Průběh koncentrací  $N_{\text{celk}}$  na přítoku a  $N\text{-NH}_4^+$  na odtoku [29]

Pilotní membránová čistírna odpadních vod je dodnes využívána pro výzkum. Od roku 2008 v ní byly testovány membránové moduly několika dalších výrobců, ověřovány technologie regenerace membrán a zkušeny různé provozní stavy. V současnosti je řešen inovační voucher pro firmu ENVI-PUR s.r.o. řešící inovace v konstrukčním řešení membránových ČOV a optimalizaci provozu domovní membránové ČOV.

## 5 PŘÍPADOVÉ STUDIE

Poznatky z laboratorního a provozního testování membránových ČOV jsou průběžně přenášeny do praxe. V současnosti je v České republice v provozu přes 100 MBR, převážně do kapacity 500 EO. Největší realizovanou MBR je ČOV Benecko (1900 EO), největší MBR v projekční přípravě je v současnosti ČOV Pasohlávky (13.300 EO). Jako příklad je uvedena i projektovaná ČOV Podomí (600 EO) vzhledem ke zvýšenému požadavku na jakost vyčištěných odpadních vod.

### 5.1 KOMUNÁLNÍ ČOV S MBR BENECKO

ČOV je umístěna v rekreační oblasti, kde je rozdílný počet přechodných obyvatel a rekreatantů v zimním a letním období. Původní kapacita čistírny byla 900 EO, po jejím rozšíření je kapacita 1.900 EO a to bez jakéhokoli zvětšování objemů nádrží.

ČOV je koncipována jako mechanicko-biologická s nitrifikací a membránovou filtrací pro separaci aktivovaného kalu. Bylo instalováno nové mechanické předčištění s velikostí průliny 2 mm a provedena kompletní rekonstrukce lapáku písku. Stávající dvojlinka aktivačních nádrží byla vybavena jemnobublinným aeračním systémem a vestavbou membránové filtrace pro separaci aktivovaného kalu. Aktivační nádrž byla rozdělena příčkami tak, aby vznikly dvě oddělené membránové komory. Rozčleněním se jednak zabránilo kontaktu surové vody s membránami a jednak je možno provádět chemickou regeneraci membrán přímo ve filtračních komorách bez nutnosti složité manipulace. Na konci aktivačních nádrží je biologicky vyčištěná voda čerpána do membránové komory k membránovým modulům, kde dochází k separaci aktivovaného kalu. Vyčištěná odpadní voda se následně odvádí do recipientu. Celý provoz čistírny je řízen automaticky a vyžaduje pouze minimální přítomnost obsluhy.

Dodávka vzduchu do aktivačních nádrží je řízena prostřednictvím kyslíkových sond. ČOV byla doplněna o chemickou eliminaci fosforu síranem železitým. Membránovou filtrací vyčištěná voda zbavená tuhých látek a zárodků splňuje kvalitativní požadavky směrnice EU na vody ke koupání 75/160/EHS. ČOV je uspořádána jako dvojlinka, takže v případě odstávky jedné linky může být čistírna dále provozována. V tab. 3 jsou uvedeny vybrané technologické parametry. Garantované odtokové parametry jsou uvedeny v tab. 4. Předpokládané náklady na spotřebu elektrické energie jsou 0,8–1,1 kWh.m<sup>-3</sup>.

Tab. 3 Technologické parametry ČOV Benecko po intenzifikaci (zdroj ENVI-PUR)

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Návrhový net flux Q24	$J_{p,Q24}$	10,4	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Návrhový net flux Qd	$J_{p,Qd}$	13,4	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Návrhový maximální net flux	$J_{p,max}$	23,4	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Celková filtrační plocha	$A_M$	1 600	m <sup>2</sup>
Průměrný průtok	$Q_d$	332,5	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>
Návrhová koncentrace kalu	$X$	10	kg.m <sup>-3</sup>
Zatížení kalu	$B_X$	0,075	kg BSK <sub>5</sub> .kg suš.d <sup>-1</sup>
Objem aktivace	$V_{AN}$	152	m <sup>3</sup>
Objem membránové komory	$V_{MK}$	54,7	m <sup>3</sup>

Tab. 4 Garantované odtokové parametry ČOV Benecko (zdroj ENVI-PUR)

Parametr	Jednotka	„p“	„m“
BSK <sub>5</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	5	10
CHSK <sub>Cr</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	25	40
NL	mg.l <sup>-1</sup>	1	1
N-NH <sub>4</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	3	5

## 5.2 KOMUNÁLNÍ ČOV S MBR PODOMÍ

ČOV je umístěna v CHKO Moravský Kras. Jedná se o novostavbu. V současné době je v obci stávající jednotná kanalizace, která je vyústěna do recipientu. Návrhová kapacita ČOV je 600 EO. V současné době je vydáno platné územní, stavební a vodoprávní povolení.

Technologická linka ČOV sestává z čerpací jímky, mechanického předčištění, směšovací aktivace, membránové komory, dmychárny, provozní budovy, kalového a chemického hospodářství. Čerpací jímka je vystrojena čerpadly seřazenými paralelně. V této čerpací jímce je vytvořena akumulací rezerva pro zdržení odpadní vody při regeneračním cyklu. Mechanické předčištění je představováno válcovým sítem se čtvercovými průlinami rozměru 1x1mm. Po předčištění natéká odpadní voda do aktivační nádrže. Aktivační nádrž je řešena jako směšovací aktivace. Z aktivační nádrže voda natéká do membránové komory. V této komoře jsou umístěny membránové moduly o celkové filtrační ploše 500 m<sup>2</sup>. Odtok permeátu je zajištěn čerpadly do akumulací jímky. Z akumulací jímky voda gravitačně odtéká přes měrný objekt do recipientu. Chemické hospodářství sestává z regenerační komory a ze skladovacích nádrží a příslušných dávkovacích čerpadel. Chemické hospodářství je navrženo tak, aby bylo možné regeneraci provádět za provozu zpětným proplachem (CEB), a také ve zvláštní komoře (CIP). S ohledem na velikost ČOV a charakter OV je při zpětném proplachu počítáno pouze s regenerací kyselou (odstranění organických nárůstů). Regenerace zásaditými chemikáliemi (anorganické znečištění) bude probíhat pouze v regenerační nádrži při pravidelných regeneračních cyklech.

Mechanická regenerace membrán, dodávka vzduchu do aktivace a provzdušňování kalové nádrže je zajištěno Rootsovými dmychadly. Vzduch pro mechanickou regeneraci bude dodáván nepřetržitě. Dodávka vzduchu do aktivační nádrže bude řízena dle průběhu koncentrace kyslíku v aktivační směsi. Kalová nádrž bude provzdušňována v časových cyklech. Základní parametry MBR ČOV Podomí jsou uvedeny v tab. 5 a garantované odtokové parametry jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 5 Návrhové technologické parametry ČOV Podomí (zdroj AQUA PROCON)

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Návrhový net flux Q24	$J_{p,Q24}$	8	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Návrhový net flux Qd	$J_{p,Qd}$	10,4	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Návrhový Net flux maximální	$J_{p,max}$	15	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Celková filtrační plocha	$A_M$	500	m <sup>2</sup>
Průměrný průtok	$Q_d$	78	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>
Návrhová koncentrace kalu	$X$	10	kg.m <sup>-3</sup>
Zatížení kalu	$B_X$	0,05	kg BSK <sub>5</sub> .kg suš.d <sup>-1</sup>
Objem aktivace	$V_{AN}$	70	m <sup>3</sup>
Objem membránové komory	$V_{MK}$	18	m <sup>3</sup>

Tab. 6 Garantované odtokové parametry ČOV Podomí (zdroj AQUA PROCON)

Parametr	Jednotka	„p“	„m“
BSK <sub>5</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	5	10
CHSK <sub>Cr</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	25	40
NL	mg.l <sup>-1</sup>	1	5
N-NH <sub>4</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	12	20

### 5.3 KOMUNÁLNÍ ČOV S MBR PASOHLÁVKY

Obec Pasohlávky se nachází v okrese Břeclav, v Jihomoravském kraji. Lokalita se nachází na severním břehu horní Novomlýnské nádrže. Na ČOV jsou přiváděny splaškové odpadní vody komunálního charakteru. V obci Pasohlávky jsou odpadní vody čerpány soustavou pěti čerpacích stanic. Odpadní vody z autokempu Merkur, které jsou na ČOV přivedeny mají komunální charakter ovlivněný sezónností provozu. V odpadních vodách se mohou nárazově objevovat zvýšené koncentrace nepolárních extrahovatelných látek, amoniakálního dusíku a fosforu.

Do splaškové kanalizace, jejíž výstavba je pro území připravována investorem Thermal Pasohlávky a.s. v rámci samostatné akce a která bude napojena na rozšířenou centrální ČOV Pasohlávky, budou vypouštěny splaškové odpadní vody ze sociálních zařízení budov, odpadní vody z kuchyní po předčištění na lapačích tuků, technologické vody z praní filtrů a ředící vody.

V rámci Aquaparku vodní svět budou vody z praní filtrů, ředící vody, vody ze sprch akumulovány v jímce odpadních vod, odkud budou po využití zbytkového tepla řízeně vypouštěny do splaškové kanalizace. Projekt Moravia Thermal předpokládá kapacitní rozšíření stávající ČOV v majetku obce Pasohlávky na kapacitu 13.300 EO. Intenzifikace ČOV se předpokládá ve třech etapách.

V současné době je zpracována technická studie a návrh intenzifikace ČOV. Instalace membránové technologie se předpokládá ve druhé etapě. Bude nezbytné osadit nové strojně stírané válcové síto sloužící k odstranění shrabků nad 3 mm z nátoků a k odstranění vláknitých nečistot, které mají špatný vliv na funkci membrán. Shrabky budou vyhrnovány ze síta pomocí mechanického kartáče do výsypky a následně do kontejneru na shrabky. Shrabky budou odváženy na skládku komunálního odpadu.

Pro umístění membrán budou vybudovány dvě nové membránové nádrže o rozměrech 10×5×4 m. Do nádrží budou umístěny membránové mikrofiltrační moduly s celkovou filtrační plochou 7.000 m<sup>2</sup>. Permeát z membránových modulů bude odsáván čerpadly, která budou umístěna na membránových modulech. Provoz těchto čerpadel bude řízen hladinovými spínači (plováky nebo ultrazvukovými čidly). Odsávaný permeát bude odveden do sběrné šachty a přes výústní a měrný objekt do recipientu. Každý membránový modul bude vybaven provzdušňovacím systémem pro fyzikální čištění membrán.

Systém je navržen jako hybridní, tj. membrány jsou nadimenzovány na průměrný průtok, průtoky nad kapacitu membrán budou vedeny přes stávající dosazovací nádrže.

Základní parametry MBR ČOV Pasohlávky jsou uvedeny tab. 7 a garantované odtokové parametry jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 7 Návrhové technologické parametry ČOV Pasohlávky (zdroj AQUA PROCON)

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Net flux Q <sub>24</sub>	$J_{p,Q24}$	12	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Net flux Q <sub>d</sub>	$J_{p,Qd}$	17	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Net flux maximální kontinuální	$J_{p,max}$	25	l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Celková filtrační plocha	$A_M$	7000	m <sup>2</sup>
Průměrný průtok	$Q_d$	2277,0	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>
Návrhová koncentrace kalu	$X$	12	kg.m <sup>-3</sup>
Zatížení kalu	$B_X$	0.05	kg BSK <sub>5</sub> .kg suš.d <sup>-1</sup>
Objem aktivace	$V_{AN}$	1070	m <sup>3</sup>
Objem membránové komory	$V_{MK}$	200	m <sup>3</sup>



**Tab. 8 Garantované odtokové parametry ČOV Pasohlávky (zdroj AQUA PROCON)**

Parametr	Jednotka	„p“	„m“
BSK <sub>5</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	7	10
CHSK <sub>Cr</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	20	30
NL	mg.l <sup>-1</sup>	0	0
N-NH <sub>4</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	1	2
N <sub>celk</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	10	15
P <sub>celk</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	0,9	1

## 6 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI

Konvenční aktivační proces, který využívá mikroorganismy pro biologickou degradaci organického znečištění je použitelný pro čištění jak komunálních, tak průmyslových odpadních vod. Separace aktivovaného kalu představuje finální stupeň čištění odpadních vod. Pro tento účel se v současnosti nejvíce využívají gravitační dosazovací nádrže. Požaduje se od nich čistý a stabilní odtok, který bude mít nízký obsah BSK<sub>5</sub> a NL [32]. Právě sedimentační vlastnosti kalu a účinnost dosazovacích nádrží jsou stále otevřeným problémem, jehož řešení se přes dlouholeté zkušenosti s aktivačním procesem nedá garantovat.[6] Při zhoršené účinnosti dosazovací nádrže dochází k vyplavování biomasy, která může zvyšovat hodnotu BSK na odtoku až o 50 %, přičemž tato biomasa obsahuje významné množství dusíku a fosforu. Uvádí se, že každých 10 mg.l<sup>-1</sup> unikajícího aktivovaného kalu zhorší základní ukazatele kvality vypouštěných vod (BSK<sub>5</sub> o 5 mg.l<sup>-1</sup>, N<sub>celk</sub> o 0,6–0,8 mg.l<sup>-1</sup>, P<sub>celk</sub> až o 1 mg.l<sup>-1</sup>). V dosazovací nádrži může docházet k sekundárnímu znečišťování vyčištěné odpadní vody fosforem uvolňovaným z poly-P bakterií.

Membránová technologie představuje jedno z možných řešení, jak vyhovět zpřísnujícím se limitům na kvalitu čištěných odpadních vod vypouštěných do recipientu. Membránová technologie je kombinací biologického čištění odpadních vod a velmi účinné separace pevné a tekuté fáze. Jednou z hlavních výhod této technologie je, že kvalita finálního odtoku není ovlivňována špatnými sedimentačními vlastnostmi kalu či tvorbou biologické pěny. Membránové aktivační reaktory mohou být provozovány při vysoké koncentraci biomasy (až 15 kg.m<sup>-3</sup>), což umožňuje výrazně snižovat objemy nádrží. I přesto, že s provozem membránové separace aktivovaného kalu na ČOV jsou spojeny vyšší náklady a také poměrně vysoké vstupní investice, je velmi pravděpodobné, že této technologii bude v oblasti čištění odpadních vod patřit budoucnost. Důvodem je nejen vysoká kvalita získávaného odtoku a další často zmiňované výhody, ale i rostoucí konkurence výrobců membrán v této oblasti, která se podílí na postupném snižování cen membrán a na jejich rostoucí kvalitě.

Na ústavu Vodního hospodářství obcí začaly první experimenty s membránami již v roce 1996. [11] Výzkumná a vývojová činnost v této problematice se zintenzivnila od roku 2002, kde byla problematika MBR řešena pod vedením autora v rámci mezinárodních grantů AQUAREC (Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater), MBR-train, (Process optimisation and fouling control in membrane bioreactors for wastewater and drinking water treatment), AMEDEUS (Accelerate membrane development for urban sewage purification). V rámci grantu MPO (TANDEM) - Vývoj malé čistírny odpadních vod se separací kalu ponořeným membránovým modulem řešeným ve spolupráci s firmou ENVI-PUR s.r.o. a grantu MPO (TANDEM) -Minimalizace množství nutrientů a odpadních vod vypouštěných do vod povrchových a podzemních řešeným ve spolupráci s firmou ASIO s.r.o. byla vytvořena řada prototypů a ověřených technologií, které byly zaváděny do praxe. Firma ENVI-PUR s.r.o. a ASIO s.r.o patří mezi nejvýznamnější firmy zabývající se v České republice vývojem, výrobou

a prodejem MBR. Obě firmy mají zastoupení ve více než 20 zemích a vyváží své produkty do celého světa.

V rámci výzkumných a vývojových prací byly vyvinuty prototypy, ověřeny technologie a zavedená výroba domovní ČOV s aktivačním procesem a separací kalu ponořeným membránovým modulem, kontejnerové ČOV pro 50-500 EO s aktivačním procesem a separací kalu ponořeným membránovým modulem, aktivační ČOV s kombinovanou biomasou a separací kalu ponořeným membránovým modulem a průmyslové membránové ČOV s dutým vláknem pro čištění koncentrovaných průmyslových odpadních vod. Byla vyvinuta technologie regenerace deskových membránových modulů a membránových modulů s dutými vlákny. Výsledky řešených výzkumných prací byly aplikovány do výuky předmětu čištění odpadních vod a do vývojových prací jsou zapojováni diplomanti a doktorandi ústavu a výsledky jsou aplikovány v praxi.

Ústav vodního hospodářství obcí se problematice MBR dlouhodobě věnuje a je považován za špičkové pracoviště i mimo ČR. Pozitivní ohlas ze zahraničí vedl k pozvání autora do vědeckého výboru prestižní konference 6th IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water & Wastewater Treatment, která se konala v říjnu 2011 v Aachenu, Německo (<http://www.iwa-mtc2011.org/>). V rámci výzkumného centra AdMas jsou pracovníci ústavu zapojeni v přípravě nově vznikajícího centra kompetence MemBiT - Centrum membránových integrovaných technologií, kde koordinují přípravu výzkumu membránových technologií v oblasti vodního hospodářství.

## 7 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

### 7.1 ZKRATKY

BSK <sub>5</sub>	[mg.l <sup>-1</sup> ]	biochemická spotřeba kyslíku
CEB	[-]	chemically enhanced backwash (chemicky podpořený zpětný proplach)
CHSK <sub>Cr</sub>	[mg.l <sup>-1</sup> ]	chemická spotřeba kyslíku
CIA	[-]	cleaning in air (čištění na vzduchu)
CIP	[-]	cleaning in place (čištění na místě)
CT	[-]	capilar tube (kapilární)
EO	[-]	ekvivalentní obyvatel
FC	[-]	pleated filter cartridge (skládané náplně)
FS	[-]	flat sheet (deskové typy)
HF	[-]	hollow fibre (dutá vlákna)
KTJ	[KTJ]	kolonie tvořící jednotka
MBR	[-]	membránový bioreaktor
MF	[-]	mikrofiltrace
MT	[-]	multitube (multitubulární)
N-NH <sub>4</sub>	[mg.l <sup>-1</sup> ]	amoniakální dusík
N <sub>celk</sub>	[mg.l <sup>-1</sup> ]	celkový dusík
NF	[-]	nanofiltrace
NL	[mg.l <sup>-1</sup> ]	nerozpuštěné látky
NTU	[NTU]	nefelometrické turbidimetrické jednotky
P <sub>celk</sub>	[mg.l <sup>-1</sup> ]	celkový fosfor
PE	[-]	polyetylén
PES	[-]	polyetylsulfon
PP	[-]	polypropylén
PVDF	[-]	polyvinyliden difluorid
RO	[-]	reverzní osmóza
SW	[-]	spiral-wound (spirálovité)
TMP	[N.m <sup>-2</sup> ]	transmembránový tlak
UF	[-]	ultrafiltrace

### 7.2 SYMBOLY

$A_M$	[m <sup>2</sup> ]	plocha membrány
$B_X$	[kg BSK <sub>5</sub> .kg suš.d <sup>-1</sup> ]	zatížení kalu
$J_p$	[l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ]	flux
$L_p$	[l.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup> ]	hydraulická permeabilita
$p_C$	[Pa]	tlak koncentrátu (retenátu)
$p_F$	[Pa]	tlak přitékající odpadní vody
$p_P$	[Pa]	tlak na permeátové straně membrány
$p_{TM}$	[Pa]	transmembránový tlak
$Q_d$	[m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ]	průměrný průtok
$Q_p$	[l.h <sup>-1</sup> ]	průtok permeátu membránou
$\tau$	[s]	čas
$V_{AN}$	[m <sup>3</sup> ]	objem aktivační nádrže
$V_{MK}$	[m <sup>3</sup> ]	objem membránové komory
$V_p$	[l]	objem permeátu
$X$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	návrhová koncentrace kalu

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AMADEUS Project Proposal part B, (2005). Specific Targeted Research Project supported by the European Commission under the Sixth Framework Programme (Priority “Global Change and Ecosystems”, Contract No.: 018328 – AMEDEUS.
- [2] VAN BENTEM, A.G.N., PETRI, C.P., SCHYNS, P.F.T. AND VAN DER ROEST, H.F. (2007). Membrane Bioreactors: Operation and Results of an MBR Wastewater Treatment Plant. Water and Wastewater Precititioner Series: STOWA Report, IWA Publishing 2007, ISBN: 1843391732, 108 p.
- [3] DAIGGER, G.T.; CRAWFORD, G. V. AND LOZIER, J. C. (2004). Membrane Bioreactor Practices and Applications in North America. *Proceedings WEFTEC.04, Workshop 108*, New Orleans, 2-5 October 2004.
- [4] DANČOVÁ L., BODÍK I., BLŠŤÁKOVÁ, A., JAKUBČOVÁ, Z., DRTIL, M. (2008). Long-term operation of a domestic wastewater treatment plant with membrane filtration. *Chemical Papers*, **62** (5), ISSN 0366-6352, 451–457.
- [5] DEWILDE, W., GEENENS, D. A THOEYE, C., (2003). Do we really want to build MBRs for domestic wastewater treatment? *Proceedings MBR 4*, April 9, 2003, Cranfield.
- [6] DRTIL, M. A HUTŇAN, M. (2007). Technologický projekt- časť Procesy a technológie čistenia odpadových vôd, Bratislava.
- [7] DVOŘÁK, L. (2011). Studium biologických procesů čištění odpadních vod v membránových reaktorech. Dizertační práce. VŠCHT Praha
- [8] HLAVINEK P.VILIM D., KUBIK J., HLUSTIK P., (2009), Development of containerised turn-key MBR plants, Book of proceedings of Final MBR-Network Workshop, Berlin, Germany, 96-7
- [9] HLAVINEK P.(2009). Perspektivy využití membránových technologií v České republice, sborník z mezinárodního odborného semináře „Současná problematika vodního hospodářství měst a obcí“, Hlohovec, ISBN 978-80-214-3862-0, 11-14.
- [10] HLAVÍNEK, P., VILÍM, D. (2007). Využití membránových technologií pro ČOV 50 – 2000 EO, Optimalizace návrhu a provozu stokových sítí a ČOV 2007, ISBN: 80-86020-54-1, 181-186.
- [11] HLAVÍNEK, P. (1996) Využití membránových technologií pro čištění průmyslových odpadních vod. In Konference Asociace čistírenských expertů ČR s mezinárodní účastí "Čištění průmyslových odpadních vod", Asociace čistírenských expertů ČR. ISBN 80-86020-24-X, 115 - 119.
- [12] CHUDOBA J., DOHÁNYOS M., WANNER J. (1991). *Biologické čištění odpadních vod*. SNTL Praha.
- [13] CHURCHOUSE, S., WARREN, S. AND FLOYD., M. (2007) Feedback from the Porlock MBR Plant in its 10th year of operation: An analysis of the flux, effluent duality and membráně lifetime data to date, Proceedings of 7<sup>th</sup> Aachener Tagung-Wasser and Membranen, 30-31. October , Aachen, Nemecko, A4, 1-10.
- [14] JAKUBČOVÁ Z., HLAVÍNEK, P., DRTIL M AND BODÍK I. (2009). Lab-scale testing of a low-loaded activated sludge process with membrane filtration, *Chemical Papers*, **63** (2), ISSN 0366-6352, 140-145

- [15] JAKUBČOVÁ Z., PIKOROVÁ, T., HLAVÍNEK P., BODÍK I., DRTIL M. (2008). Sledovanie vlastnosti aktivácie s vysokou koncentráciou a vekom kalu s ponoreným membránovým modulom, Zborník konferencie Kaly a odpady 2008, Bratislava, Slovakia, (p. 191-196)
- [16] JAKUBČOVÁ Z., HLAVÍNEK P., DRTIL M., BODÍK I. (2008). Vybrané výsledky laboratórneho testovania aktivácie s membránovou separáciou kalu, Vodní hospodářství, ročník. 58 (č. 5), ISSN: 1211-0760 178-180.
- [17] JAKUBČOVÁ Z., PIKOROVÁ, T. (2008). Membránová separácia aktivovaného kalu- čo môžeme očakávať a čo nesmieme opomenúť. Zborník z prednášok 5. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou Odpadové vody 2008, Štrbské Pleso, Slovensko, ISBN: 978-80-89088-68-3, 170-178.
- [18] JAKUBČOVÁ Z., PAGÁČOVÁ, P., DRTIL M, BODÍK I., HLAVÍNEK P.(2008). Aktivácia s kombinovanou biomasou- vybrané výsledky z laboratórneho modelovania. Zborník posterov 5. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou Odpadové vody 2008, Štrbské Pleso, Slovensko, ISBN: 978-80-89088-68-3, 48-54.
- [19] JAKUBČOVÁ, Z., HLAVÍNEK, P., DRTIL, M., BODÍK, I, DANČOVÁ, L., BLŠŤÁKOVÁ, A., PAGÁČOVÁ, P. (2007). Vybrané parametre aktivácie s membránovou filtráciou, 7. mezinárodní konference a výstava "Odpadní vody 2007", ISBN:978-80-239-9618-0, 65-68.
- [20] JAKUBCOVA Z., HLAVINEK P., BODIK I, DRTIL M. (2007). Selected parameters of activation with membrane filtration, Proceedings of the 7th Aachener Tagung Wasser und Membranen, 30-31 Aachen, Germany. 1-8
- [21] JIANG T. KENNEDY M., GUINZBOURG B, VANROLLENGHEM P., SCHIPPERS J., (2005), Optimising the operation of a MBR pilot plant by quantitative analysis of the membrane fouling mechanism, Water Sci. Tech. 51 (6), ISSN 0273-1223, 19-25.
- [22] JUDD, S., (2011). The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment, Elsevier, Oxford, ISBN: 978-0080966823.
- [23] LESJEAN, B. AND HUISJES, E. H. (2007). Survey of European MBR market, trends and perspectives. Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment, Proceedings of IWA 4<sup>th</sup> International Membrane Technologies Conference, 15-17 May 2007, Harrogate, UK.
- [24] LESJEAN, B., ROSENBERGER, S., SCHROTTER, J-CH. AND ANJOU RECHERCHE (2004). Membrane-aided biological wastewater treatment-an overview of applied systems. Membrane Technology, August 2004, pp. 5-10.
- [25] LI, Norman N., et al. Advanced Membrane Technology and Applications. [s.l.] : Wiley, 208. 994 s. ISBN 978-0-471-73167-2.
- [26] MARTIN GARCIA, N., SOAREZ, A., PIDOU, M., LESTER, J.N., JUDD, S. AND JEFFERSON, B., (2007). Comparison of aerobic and anaerobic MBRs for wastewater treatment, *Proceedings of the 2nd IWA National Young Water Professionals Conference*, 4-6 June 2007, Berlin, Germany, 179-187.
- [27] MATULOVA Z., HLAVINEK P., PIKOROVA T., DRTIL M., (2009). Operation of domestic pilot MBR WWTP, Book of proceedings of Final MBR-Network Workshop, 31.03-1.04 2009, Berlin, Germany, p. 145-146

- [28] MATULOVÁ, Z., PAGÁČOVÁ, P., DRTIL, M., BODÍK, I., HLAVÍNEK, P. (2009) Lab-scale research of MBR with combined biomass cultivation. 36th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering SSCHE (CD), Tatranské Matliare, May 25-29.2009, 211-1 - 211-10. ISBN 978-80-227-3072-3.
- [29] MATULOVÁ, Z.; HLAVÍNEK, P.; DRTIL, M.; One-Year Operation of Single Household MBR Plant. *Water Science and Technology*. 2010. p. 217 - 226. ISSN 0273-1223.
- [30] MATULOVA, Z., DRTIL M., HLAVÍNEK P. (2009). Operation of Single Household MBR WWTP, Book of Proceedings of 5th IWA Specialized Membrane Technology Conference for Water and Wastewater Treatment, Beijing, China, CD.
- [31] Melin T., Rautenbach R. (2007): *Membranverfahren: Grundlagen der Modul-und Anlagenauslegung*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin : Springer, 583 s. ISBN 978-3-540-34327-1.
- [32] METCALF & EDDY (2003). *Wastewater engineering:treatment and reuse* (4th International Edition). McGraw-Hill, New York. ISBN 0-07-041690-7.
- [33] MULDER, J.W., EVENBLIJ, H., FAYAERTS, M., GEILVOELT, S. (2007) Hybrid MBR Heenvliet-20 months of operational experience, Proceedings of 7<sup>th</sup> Aachener Tagung-Wasser and Membranen, Aachen, Nemecko, A23.
- [34] PAGÁČOVÁ P., MATULOVÁ Z., DRTIL M., HLAVÍNEK, P. (2009). Aktivácia s kombinovanou biomasou a membránovou filtráciou, Sborník prednášok konferencie s medzinárodnou účasťou Městské vody 2009: Optimalizace návrhu a provozu stokových sítí a ČOV 2009, 1.-2. října 2009, Velké Bílovice, ISBN: 978-80-86020-64-8, 23-30.
- [35] PIKOROVÁ T., MATULOVÁ Z., HLAVÍNEK P., PAGÁČOVÁ P., DRTIL M., RUSNÁK D. (2010). Porovnání dvou membránových modulů zkoumaných v reálných podmínkách domovní čistírny odpadních vod, Zborník posterov 6. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou Odpadové vody 2010, Štrbské Pleso, Slovensko, 98-103.
- [36] PIKOROVÁ, T., JAKUBČOVÁ Z., HLAVÍNEK P., DRTIL M., BODÍK I. (2008). Pilot-scale operation of household MBR plant. Proceedings of the 35th International Conference of SSCHE, Tatranske Matliare, Slovak Republic, (pp 277 and CDrom)
- [37] VACHOVEC R., SOUSEDÍK M., HLAVÍNEK, P., VILÍM D. (2010). Využití MBR v lokalitách s vysokými požadavky na jakost vypouštěných vod, Sborník přednášek konferencie s medzinárodnou účasťou Městské vody 2010, Velké Bílovice, ISBN: 978-80-86020-71-4, 143-152.
- [38] VILÍM D., VACHOVEC R., HLAVÍNEK, P. (2010). Aplikace MBR a konkrétní případové studie, XVI. Odborná konference „ Nové trendy v čistírenství, Tábor, ISBN: 978-80-254-8312-1, 24-33.
- [39] VILÍM, D., HUŠTIK P., HLAVÍNEK, P. (2008). Package MBR System For Small WWTP upgrade, Retrofit with MBR, containerized unit, demonstration cases, MBR-network workshop, Velké Bílovice, ISBN: 80-86020-60-6.
- [40] YANG, W.B., CICEK, N. AND ILG, J. (2006) State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Science* **270**(1-2), ISSN: 0376-7388 201-211.

## ABSTRACT

The term “Membrane bioreactor” (MBR) applies to all water and wastewater treatment processes integrating a permselective membrane with a biological process. All currently available commercial MBR processes employ membrane ostensibly as a filter, rejecting solid materials developed by the biological process to provide clarified and disinfected product.

There are mainly two different types of membrane material, these being polymeric and ceramic and six principal configurations currently employed in membrane processes, which all have various practical benefits and limitations (flat sheet-FS, hollow fibre-HF, multitubular-MT, capillary tube-CT, pleated filter cartridge-FC and spiral wound-SW). Only first three are suited to MBR technologies.

Conventional pressure driven membrane processes with liquid permeation can operate in one of two modes. If there is no retentate stream then operation is termed “dead-end” or “full flow”. If retentate continuously flows from the module outlet, than the operation is termed “cross-flow”. Filtration always leads to an increase in the resistance to flow. Cleaning of membranes can be physical or chemical.

A classical MBR comprises a conventional activated sludge process coupled with membrane separation to retain the biomass. Since the effective pore size is generally below 0,1  $\mu\text{m}$ , the MBR produces a clarified and substantially disinfected effluent. In addition, it concentrates up the biomass and, in doing so, reduces the necessary tank size and also increases the efficiency of biotreatment process. MBR thus tend to generate treated water of high purity with respect to dissolved constituents such as organic matter and ammonia, both of which are significantly removed by biotreatment. Moreover, by removing the requirement for biomass sedimentation, the flow rate through an MBR cannot affect product water quality through impending solids settling, as it is case for conventional activated sludge process.

There are three main operations of MBR contributing most significantly to operating expenditure. These are membrane permeability maintenance, microbiology maintenance and liquid and sludge transfer. Screening is generally recognized as being crucial in suppressing clogging of both the membrane modules and the aerators. It must be conceded, that notwithstanding the advantages offered by the technology, an MBR plant is more complicated both in design and operation, than conventional activated sludge process, and therefore more exposed to greater risk of process failure.

Thesis describe detailed research study, which tested the overall process performance and more specially the sludge and the membrane behaviour in the specific conditions of real single household MBR. Pilot testing followed a number of laboratory experiments dealing with filtration properties of different types of membranes, different operating conditions and membrane module regeneration. One year testing of household MBR showed average quality of effluent expressed as  $\text{BOD}_5$  2,3  $\text{mg.l}^{-1}$  and COD 54,3  $\text{mg.l}^{-1}$ .

The results from laboratory and pilot testing of MBR are continuously transferred to the industry. In the Czech Republic there is more than 100 MBR in operation. The biggest MBR in operation is MBR Benecko (1.900 population equivalent), the biggest MBR in design stage is MBR Pasohlávky (13.300 population equivalent). There is a number of MBR in design stage or in consideration, especially for sensitive areas like natural parks and landscape protected areas.

Author deals with MBR at Institute of Municipal Water Management, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology since 1996. He was involved in FP5 project SQUAREC, FP6 project MBR-train and FP6 project AMEDEUS. Institute of Municipal Water Management is recognized as top-ranking institution in the field of MBR and it is part of prepared MemBiT (Center of membrane integrated technologies) competence center.