

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in  
komunalno inženirstvo

Kandidatka:

**Eva Prošek**

# **Testiranje membranskega modula za ultrafiltracijo**

**Diplomska naloga št.: 169**

**Mentor:**  
prof. dr. Boris Kompare

**Somentor:**  
Alojz Medic

Ljubljana, 22. 6. 2011

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana Eva Prošek izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»TESTIRANJE MEMBRANSKEGA MODULA ZA ULTRAFILTRACIJO«.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

V Ljubljani, 22. 06. 2011

Eva Prošek

## **BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN**

**UDK:** 556.5:532.57(043.2)  
**Avtor:** Eva Prošek  
**Mentor:** prof. dr. Boris Kompare  
**Somentor:** Alojz Medic, univ. dipl. inž.  
**Naslov:** Testiranje membranskega modula za ultrafiltracijo  
**Obseg in oprema:** 60 str., 18 sl., 6 tab., 8 graf., 5 en., 2 pril.  
**Ključne besede:** ultrafiltracija, membranska tehnologija, testni modul, pretok, fluks, membranski tlak

### **Izvleček**

Namen naloge je bilo testiranje membranskega modula za ultrafiltracijo proizvajalca Litree, Kitajska. Pri testu smo opazovali tako obnašanje modula kot tudi membrane. Modul je primeren za laboratorijski preizkus (ang. small scale). Predmet obdelave je bila površinska voda, potok Gradaščica, ki jo filtriramo skozi modul.

V prvem delu naloge opišemo membransko tehnologijo in procese. Posebej izpostavimo ultrafiltracijo kot tehnologijo za pripravo vode. Povzamemo tudi zakone in predpise, ki se nanašajo na pitno vodo.

V drugem delu naloge opišemo izvedeni praktični test uporabe modula.

Opravili smo 21 ciklov meritev, na koncu 7. in 14. cikla smo izvedli kemijsko pranje. Vmes smo izvajali hidravlična pranja. Merili smo pretok, vstopni in izstopni tlak. Iz izmerjenih podatkov smo izračunali membranski tlak (TMP), fluks in prepustnost membrane. Pri surovi vodi in filtratu smo merili temperaturo, pH, motnost, skupne suspendirane snovi in velikost delcev.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDK:** 556.5:532.57(043.2)  
**Author:** Eva Prošek  
**Supervisor:** Prof. Boris Kompare, Ph D.  
**Cosupervisor:** Alojz Medic, B.Sc.  
**Title:** Testing of a membrane module for ultrafiltration  
**Notes:** 60 p., 18 fig., 6 tab., 8 graph., 5 eq., 2 ann.  
**Key words:** ultrafiltration, membrane technology, test modul, hollow fiber, trans membrane pressure, flux

**Abstract**

The thesis describes the test of the ultrafiltration membrane module, manufactured by Litree, China. During the test, the behavior of the module as well as the ultrafiltration membrane was observed. The module is suitable for conducting small scale tests, i. e. for laboratory use. Raw water which was filtered through the module was surface water of the Gradaščica stream.

In the first part of the thesis, membrane technology and processes are described, specifically ultrafiltration as one of the membrane technology possibilities for the water treatment. The laws and regulations relating to drinking water are also mentioned.

In the second part, a practical test is described. 21 cycles of measurements were performed and, at the end of the 7<sup>th</sup> and 14<sup>th</sup> cycle, the chemically enhanced backwash. In between the cycles hydraulic backwashes were performed. Flow, inlet and outlet pressure were measured. From the measured data, we calculated the trans membrane pressure (TMP), flux and permeability of the membrane. In the raw water and the filtrate temperature, pH, turbidity, total suspended solids and particle size were measured.

## **ZAHVALA**

Na prvem mestu se zahvaljujem mentorju prof. dr. Borisu Komparetu in somentorju Alojzu Medicu.

Zahvaljujem se tudi podjetju MAK CMC d.o.o., ki mi je omogočilo uporabo pilotne naprave, modula za ultrafiltracijo in merilnih naprav.

Za potrpežljivost, pomoč in ideje sem hvaležna Mateju Čehovinu.

Hvala tudi vsem ostalim, ki ste prispevali k nastanku diplomskega dela in predvsem k izvedbi praktičnega dela naloge.

Hvala družini za potrpežljivost in podporo.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MEMBRANSKA FILTRACIJA</b>	<b>3</b>
2.1	Tehnologija	3
2.1.1	Razvoj membran	4
2.2	Membranski procesi	6
2.2.1	Materiali membran	6
2.2.2	Struktura membran	10
2.2.2.1	Simetrične membrane	10
2.2.2.2	Asimetrične membrane	10
2.2.3	Načini izvedbe membranskih procesov	11
2.2.3.1	Statična filtracija	12
2.2.3.2	Dinamična filtracija	12
2.2.4	Membranski moduli	13
2.2.4.1	Ploščati modul	14
2.2.4.2	Spiralno naviti modul	15
2.2.4.3	Modul iz votlih vlaken	16
2.2.5	Zadrževanje snovi na membrani	19
2.2.6	Razlike med membranskimi procesi	20
<b>3</b>	<b>ULTRAFILTRACIJA</b>	<b>22</b>
3.1	Membrana pri ultrafiltraciji	22
3.1.1	Uporaba ultrafiltracije	23
<b>4</b>	<b>SNOVI V VODI, KI JIH ODSTRANJUJEMO Z ULTRAFILTRACIJO</b>	<b>25</b>
4.1	Delci	26
4.2	Mikroorganizmi	26

<b>5</b>	<b>ZAKONODAJA IN PREDPISI</b>	<b>27</b>
5.1	Evropski predpisi	27
5.1.1	Direktiva Sveta Evropske unije o kakovosti vode, namenjene za prehrano ljudi (Direktiva Sveta EU 98/83/ES)	27
5.1.2	Slovenski predpisi	29
5.1.2.1	Pravilnik o pitni vodi	30
5.1.2.2	Zakon o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov ter snovi, ki prihajajo v stik z živili	31
<b>6</b>	<b>NALOGA IN METODE DELA</b>	<b>32</b>
6.1	Aparature	32
6.2	Merjenje parametrov	33
<b>7</b>	<b>TESTNI MODUL</b>	<b>34</b>
7.1	Opis testnega modula	34
7.2	Opis preizkusa	37
7.3	Potek	40
7.3.1	Filtracija	40
7.3.2	Hidravlično pranje	40
7.3.3	Kemijsko pranje	41
7.4	Meritve	43
7.4.1	Pretok in tlak	43
7.4.2	Temperatura	47
7.4.3	Vrednost pH	48
7.4.4	Skupne suspendirane snovi (TSS)	49
7.4.5	Motnost	50
7.4.6	Velikost delcev	52
7.5	Rezultati in ugotovitve	52
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>VIRI</b>	<b>57</b>



**KAZALO PREGLEDNIC**

Tabela 1: Primerjava tipov modulov (Vir: Baker, 2000)	14
Tabela 2: Primerjava med membransko filtracijo in reverzno osmozo (Vir: Crittenden 2005: str. 959 )	21
Tabela 3: Specifikacije	34
Tabela 4: Delovanje preizkusa	40
Tabela 5: Odstotek odstranitve skupnih suspendiranih snovi	50
Tabela 6: Odstotek odstranitve motnosti	51

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: TMP po času	44
Grafikon 2: Fluks po času	45
Grafikon 3: Prepustnost membrane po času	46
Grafikon 4: Volumen prefiltrirane vode v ciklu filtracije	47
Grafikon 5: Primerjava temperature filtrata in surove vode	48
Grafikon 6: Primerjava pH vrednosti filtrata in surove vode	49
Grafikon 7: Primerjava TSS vrednosti filtrata in surove vode	50
Grafikon 8: Primerjava motnosti filtrata in surove vode	51

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Tipi membran (Crittenden, 2005: str. 957)	4
Slika 2: Simetrične membrane (Baker, 2000: str. 5)	10
Slika 3: Asimetrične membrane (Baker, 2000: str.5)	11
Slika 4 : Statična filtracija (EPA, 2005: str. 2-32)	12
Slika 5: Dinamična filtracija (EPA, 2005: str. 2-33)	13
Slika 6: Ploščati modul	15
Slika 7: Spiralno naviti modul (Bauman, 2010: str. 6)	16
Slika 8: modul iz votlih vlaken (Bauman, 2010: str. 6)	17
Slika 9: Odzunaj – navznoter	17
Slika 10: Statična (čelna) filtracija odznotraj – navzven	18
Slika 11: Dinamična (vzdolžna) filtracija odznotraj – navzven	18
Slika 12: Ultrafiltracija – velikost por in molekulska masa (EPA, 2005: str 2-3)	23
Slika 13: Filtracijski in ločevalni spekter (Tehnofan, <a href="http://www.filtrir-za-vodo.si/">http://www.filtrir-za-vodo.si/</a> )	25
Slika 14: Filtracija skozi modul	35
Slika 15: Votla vlakna v modulu	36
Slika 16: Membrana testnega modula, povečana 250 x.	36
Slika 17: Sestavni deli sistema	38
Slika 18: Sistem nastavljen za pranje	41

## **KAZALO PRILOG**

**Priloga A:** Opravljene meritve in izračuni TMP, fluksa in prepustnosti

**Priloga B:** Izpis iz programa MaS control

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

### *Okrajšave*

TMP	membranski tlak (ang. trans membrane pressure)
HACCP	Ocena tveganja na kritičnih točkah (ang. Hazard Analysis Critical Control point)
TDS	Skupne raztopljene snovi (ang. Total dissolved solids)
TSS	Skupne suspendirane snovi (ang. Total suspended solids)
MWCO	Izključitvena molekulska masa (ang. molecular weight cut-off)
KPP (CEB)	Kemijsko pospešeno pranje (ang. Chemically enhanced backwash)
MF	Mikrofiltracija
UF	Ultrafiltracija
NF	Nanofiltracija
RO	Reverzna osmoza
nt	Napajalni tok
f	Filtrat

### *Simboli*

<b>Simbol</b>	<b>Opis</b>	<b>Enota</b>
$C_p$	Koncentracija filtrata	[mol/ l, mg/ l]
$C_f$	Koncentracija surove vode	[mol/ l, mg/ l]
R	zavrženo	[/]
TMP	Membranski tlak	[bar]
$T_v$	Vstopni tlak	[bar]
$T_i$	Izstopni tlak	[bar]
J	Fluks	[l/ (h m <sup>2</sup> )]
Q	Pretok	[l/ h]
$A_m$	Površina membrane	[m <sup>2</sup> ]
P	Prepustnost membrane na vodo	[l/( h m <sup>2</sup> bar)]
TSS <sub>nt</sub>	Skupne suspendirane snovi v napajalnem toku	[mg/ l]
TSS <sub>f</sub>	Skupne suspendirane snovi v filtratu	[mg/ l]

## **SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK**

biofilm	Skupek mikroorganizmov, pritrjenih na biogeno ali abiogeno podlago. (Wikipedia, 2011).
hidrofilen	ki se veže z vodo, omočljiv (SSKJ, 1994)
hidrofoben	ki se ne veže z vodo, neomočljiv (SSKJ, 1994)
MWCO	Izključitvena molekulska masa – najnižja molekulska masa organskih snovi, ki ne prehajajo membrane



## 1 UVOD

Temeljna pravica ljudi je pravica do čiste pitne vode, torej vode, ki ne ogroža zdravja. Zato so pomembne tehnologije priprave pitne vode. Kakovost pitne vode globalno upada, medtem ko predpisi povsod po svetu postavljajo vedno strožje zahteve o kakovosti pitne vode (World Health Organization, 2011).

Namen je bil postaviti koncept laboratorijske testne naprave, pri kateri smo uporabili testni modul. Modul je primeren za laboratorijski (ang. small scale) preizkus. S preizkusom smo želeli testirati tako laboratorijsko testno napravo, kot tudi laboratorijski modul za ultrafiltracijo.

Predmet obdelave je površinska voda, potok Gradaščica, ki jo filtriramo skozi modul. Merili smo tudi pretok in vstopni in izstopni tlak, na podlagi izmerjenega vstopnega in izstopnega tlaka izračunamo membranski tlak, oz. t.i. TMP (ang. Trans membrane pressure) tudi diferencialni tlak, fluks in prepustnost membrane.

V prvem delu opišemo membranske metode kot vrsto tehnologije za pripravo pitne vode, nato ultrafiltracijo kot eno izmed membranskih metod, njene lastnosti in vlogo pri pripravi pitne vode. Pri tem upoštevamo tudi standarde in zakonodajo za ustreznost pripravljene vode.

V drugem delu opišemo izvedeni preizkus modula in rezultate merenj ter ugotovitve.

Za pripravo pitne vode, ki je zdravstveno ustrezna in na pogled čista, mora biti ustrezno izbran način priprave vode. Izbran mora biti glede na lastnosti in vsebnosti onesnažil v surovi vodi. Pri izbiri tehnologije se odločamo glede na izvor vode in glede na namen uporabe. Pri izvoru vode ločimo podzemne in površinske vire. Kakovost surove vode je odvisna tudi od hidrogeoloških značilnosti, podlage, stopnje človeških aktivnosti na tem območju, bližine oziroma oddaljenosti vira, in drugih faktorjev.

Površinske vode imajo večjo vsebnost (višje koncentracije) delcev kot podzemne vode, medtem ko imajo običajno podzemne vode večjo koncentracijo raztopljenih mineralnih snovi. Razlikovanje temelji tudi na stopnji raztopljenih soli ali skupnih raztopljenih snovi (ang. total dissolved solids – TDS) v vodnem viru. Vodo, ki vsebuje manj kot 1000 mg/l



imenujemo 'sladka' voda (ang. fresh water). Voda, ki vsebuje med 1000 in 10 000 mg/l TDS, je brakična voda (ang. brackish water). Največji vir vode so morja in oceani, ki pa vsebujejo približno 35 000 mg/l raztopljenih soli in za pripravo pitne vode potrebujejo demineralizacijo. Prav vsaka surova voda, ki se nahaja v naravi, potrebuje obdelavo oziroma postopek, da jo pripravimo ustrezno za pitje (Crittenden, 2005).

Postopki in tehnologija priprave so tako odvisni od lastnosti surove vode in od uporabe vode, ki jo želimo pripraviti. Ta je lahko namenjena pitju, pripravi hrane, osebni higieni, pranju in pomivanju, različnim potrebam industrijskih procesov ali kmetijskim procesom. Prav uporaba pripravljene vode je odločilni kriterij za izbiro tehnologije. Ena izmed tehnologij priprave vode je tudi membranska filtracija.

## 2 MEMBRANSKA FILTRACIJA

Membranska filtracija je moderna fizikalno-kemijska tehnika ločevanja, ki temelji na razlikah v prepustnosti sestavin, ki se nahajajo v vodi. Pri membranskem postopku se voda črpa preko površine membrane, kar daje dva produkta: vodo in zadržano vodno suspenzijo.

Membrana je ponavadi sintetični material, tanjši od 1 milimetra in je polprepustna (ang. semipermeable), kar pomeni da nekatere snovi popolnoma prepušča, druge se pa zadržujejo na njeni površini. Rezultat je tok snovi, ki so prešle skozi membrano in tok snovi, k jih membrana zadrži (Crittenden, 2005).

Filtracijo bi lahko opisali kot proces, ki ločuje suspendirane delce od tekoče osnove s tem, da tekočina prehaja skozi porozen medij. Porozen medij je lahko zrnava (zrnavi filtri) ali pa polprepustna membrana (membranski filter). Pri membranski filtraciji je glavni tok (ang. feed stream) tekočine (ang. suspension) sestavljen iz trdnih delcev, ki jih želimo odstraniti: sedimenti, alge, bakterije, praživali, virusi, ali koloidni delci. Glavni namen membranske filtracije je ustvariti dva toka: tekočino (vodo) iz katere so bili delci popolnoma odstranjeni in odpadni tok.

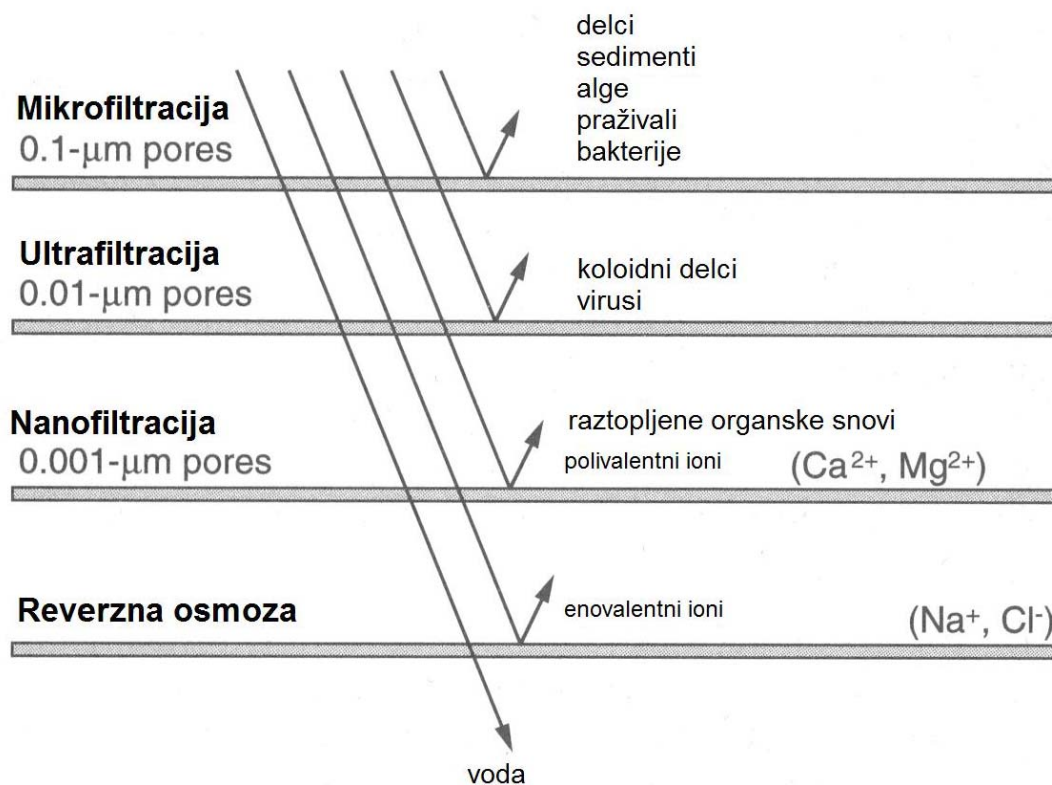
Postopki priprave vode z različnimi membranskimi procesi so se uveljavili tudi pri pripravi pitne vode. Z njimi lahko dosežemo zadostno kakovost vode za uživanje.

### 2.1 Tehnologija

Membransko filtracijo, ki se uporablja pri postopkih priprave pitne vode, delimo na štiri tipe:

- Mikrofiltracija (MF),
- Ultrafiltracija (UF),
- Nanofiltracija (NF),
- Reverzna osmoza (RO).

Razlike med tipi membran so v velikosti por, in s tem tudi snovmi, ki jih zadržujejo, kar je shematsko prikazano na Sliki 1. Ločijo se tudi pod kako visokim tlakom obratujejo (ang. operating pressure).



Slika 1: Tipi membran (Crittenden, 2005: str. 957)

Pri pripravi pitne vode se uporabljata izraza membranska filtracija in reverzna osmoza, ki označujeta membrane glede na njihove fizikalno-kemijske procese. Pod membransko filtracijo štejemo mikrofiltracijo, ultrafiltracijo, nanofiltracijo in reverzno osmozo kot je označeno na Sliki 1.

### 2.1.1 Razvoj membran

V zadnjih treh desetletjih 20. stoletja se je pojavil razvoj predvsem na treh področjih obdelave vode. Dva od teh pomembnih razvojnih prebojev sta bila na področju kakovosti vode in en na področju razvoja nove tehnologije.

Prvi preboj pri raziskavah kakovosti je, da oksidanti za dezinfekcijo vode, še posebej klor, v vodi reagirajo z naravnimi organskimi spojinami in tvorijo stranske produkte (ang. disinfection byproducts (DBP)), kateri so potencialno ali celo dokazano kancerogeni.

Druga ugotovitev je bila, da so določeni patogeni mikroorganizmi, kot sta *Giardia* in *Cryptosporidium*, živalskega (ang. zoonotic) izvora in se pojavljata tudi v vodah, ki niso onesnažene z odpadno vodo oziroma fekalno vodo iz urbanih območij.

Zadnja in največja sprememba pa je bila na področju membranske tehnologije, primerne za obdelavo vode za gospodinjstva in naselja. Membranske tehnologije imajo možnost, da zadržijo nevarne organizme in jih izločijo, kar povečuje varnost pitne vode ob tem, da ne ustvarjajo kemijskih stranskih produktov v filtratu.

Prve membrane so bile razvite sredi dvajsetega stoletja, ampak je bila njihova uporaba zelo omejena. V poznih 1950. letih so membrane začeli uporabljati v laboratorijske namene, največkrat za izboljšavo koliformnih testov. V sredini 1960 se je začela membranska filtracija uporabljati pri proizvodnji pijač kot nadomestek za toplotno pasterizacijo, ki služi kot metoda za prečiščenje in mikrobiološko stabilnost. Membrane so se uporabljale kot odstranljive, torej so jih menjali in zavrgli. Zato ideja o uporabi membran za pripravo velikih količin pitne vode ni prišla v poštev. V sredini 1980. let so raziskovalci v Avstraliji in Franciji preizkušali idejo o spiranju membrane, oziroma filtracijskih vlaken, po vsaki uporabi. Na ta način membrane ni bilo potrebno po določenem času obratovanja zavreči. S tem se je podaljšala življenjska doba membrane.

V 1990. letih pa so ti produkti postali komercialno zanimivi, in v začetku 21. stoletja je bilo že nekaj velikih proizvajalcev membranskih sistemov in v izgradnji so bile mestne naprave za pripravo pitne vode, kapacitete do  $3 \cdot 10^5$  m<sup>3</sup>/l dan.

Membrane so prav verjetno najpomembnejši razvoj pri pripravi pitne vode od leta 1900, saj predstavljajo potencial, da iz vode popolnoma odstranijo nečistoče glede na velikost (Crittenden, 2005).

## 2.2 Membranski procesi

Membranski procesi so postopki, pri katerih je za ločevanje snovi uporabljena selektivno prepustna membrana. Membrana določene snovi zadrži, nekatere pa prepušča.

Napajalni tok membrana loči na dva tokova:

- Retentat (angl. Reject), ki vsebuje komponente, ki jih membrana zadrži. Imenuje se tudi koncentrat.
- Permeat (angl. Permeate), ki vsebuje komponente, ki jih membrana prepušča. Imenuje se tudi filtrat.

Membranski procesi imajo v primerjavi z ostalimi separacijskimi procesi nekatere prednosti in slabosti, ki omejujejo področja uporabe. Prednosti (Baker, 2000):

- Ne zahtevajo spremembe agregatnega stanja,
- Obratujejo kontinuirano ali pol kontinuirano,
- Delovanje je možno nadzirati preko avtomatiziranega sistema,
- Direktno ne vnašamo v filtrat dodatnih reagentov in topil,
- Lahko jih povečamo iz laboratorijskega v industrijsko merilo,

Imajo pa tudi določene pomanjklivosti:

- Nekatere membrane so kemijsko in termično slabo obstojne,
- Nekatere membrane so občutljive na prisotnost klora in drugih oksidirajočih spojin,
- Membrane se pogosto mašijo in težje čistijo.

### 2.2.1 Materiali membran

Delovanje membrane je odvisno od materiala iz katerega je izdelana membrana in njegovih kemijskih in fizikalnih značilnosti. Idealna membrana se ne maši in ima dolgo obratovalno dobo, je kemijsko stabilna in neobčutljiva na kemikalije, nerazgradljiva in cenovno ugodna.

Materiale, ki se uporabljajo za proizvodnjo membran, ločimo na organske in anorganske, in sicer:

- Modificirani naravni produkti, katerih osnova je običajno celuloza (acetatna celuloza, nitroceluloza ...)
- Anorganski materiali (kemični in kovinski materiali, porozno steklo ...)
- Sintetično pridobljeni polimeri (poliamid, polisulfon, vinilni polimeri, polietilen, politetrafluoroetilen ...)

Anorganske membrane so izdelane s stiskanjem in sintranjem prahu kovinskih oksidov. Material je nanesen na že pripravljeno porozno površino. Tak način izdelave ima prednost v tem, da je možna izdelava različnih debelin z različno poroznostjo in razporeditvijo por. Pomanjkljivost je visoka cena takšnih membran.

Homogene polimerne membrane so izdelane z raztezanjem delno kristalizirane folije, ki jo raztezajo pravokotno na usmerjenost kristalov. Z dodajanjem določenih sredstev, npr. stekla, je mogoče dobiti mikroporozne membrane. Slabost takih membran je majhna permeabilnost, majhna poroznost in slaba mehanska trdnost.

Način izdelave polimernih membran je s procesom fazne inverzije ali faze ločitve. Postopek omogoča izdelavo tako simetričnih kot asimetričnih membran. Fazna inverzija je proces priprave membran, pri katerem polimer v kontroliranih pogojih preide iz tekočega v trdno stanje. Omogoča jo sistem, ki je običajno sestavljen iz polimera, topila in netopila. Pri fazni inverziji se enofazna raztopina polimera, ki jo sestavljata polimer in topilo, s pomočjo sedimentacije spremeni v dve ločeni fazi. Sedimentacijo polimera v vodi dosežemo z različnimi postopki:

- S potopitvijo polimerne raztopine v vodo,
- Z absorbcijo vode z vlago nasičene atmosfere,
- Z zamrzovanjem razgrete raztopine polimera,
- Z izhlapevanjem polimera, raztopljenega v mešanici lahko hlapnega topila in slabo hlapnega topila,

Uporabiti je možno tudi kombinacijo navedenih postopkov (Baker, 2000).

Membranski procesi lahko obsegajo različne procese, zato je njihova uporaba široka. Z različnimi tipi in materiali lahko dosežemo lastnosti membran:

- Visoko stopnjo selektivnosti,
- Visoko mehansko trdnost,
- Dobro temperaturno stabilnost odpornost na kemikalije,
- Visoko prepustnost,
- Nizko ceno in dostopnost membran in s tem razmeroma nizke stroške obratovanja.

Najpogosteje uporabljeni materiali za membrane pri obdelavi vode so (Crittenden, 2005):

- Polipropilen (ang. Polypropylene (PP))
- Poliviniliden (ang. Polyvinylidene fluoride (PVFD))
- Polisulfon (ang. Polysulfone (PS))
- Polietersulfon (ang. Polyethersulfone (PES))
- Acetatna celuloza (ang. Cellulose acetate (CA))

Proizvajalci ne izdajajo informacij o različnih dodatkih k materialom, za izboljšanje lastnosti.

#### Acetatna celuloza (ang. Cellulose acetate (CA))

Je najbolj pogost hidrofilen material, iz katerega so narejene membrane. Pri CA membranah je obraščanje minimalno in dober pretok. Material je lahko izdelati, je cenovno ugoden, z veliko različnimi velikostmi por. Kot derivat celuloze je tudi bolj primeren za razgradnjo. Acetatno celulozne membrane so odporne na klor v koncentraciji do 1 mg/l, niso pa odporne na večje koncentracije, razen na občasne doze koncentracij do 50 mg/l. Membrana je kompaktna pri delovanju pod tlakom, vendar se v dobi obratovanja zmanjšuje pretok skozi membrano. Za obratovanje niso sprejemljive vrednosti pH pod 4 in nad 8.5, prav tako temperatura nad 300 °C ali agresivne kemikalije. Zato se jih ne sme čistiti z agresivnimi kemikalijami kot nekatere druge vrste membran.

#### Polisulfon in polietersulfon (ang. Polysulfone (PS) in Polyethersulfone (PES))

To sta hidrofobna materiala, ki pa sta pri obdelavi vode podvržena biološkemu obraščanju. Sta vzdržljiva in odporna na različne kemijske spojine in odporna na bakterije, ki se nahajajo v surovih vodah. V krajših intervalih membrana prenese kemijsko pranje s klorom

koncentracije do 200 mg/l, pH vrednosti od 1 do 13 in temperaturo do 750 °C. Torej je lahko čiščenje in dezinfekcija membrane agresivna, brez da bi jo poškodovali.

#### Poliviniliden (ang. Polyvinylidene fluoride (PVFD))

Je hidrofoben material, ki je trpežen, odporen na kemikalije in bakterije. Prenaša izpostavljenost kloru v katerikoli koncentraciji tudi skozi daljše časovno obdobje. pH napajalne tekočine je lahko med 2 in 10, ter temperature do 750 °C. Torej čiščenje membrane lahko poteka z agresivnimi sredstvi, brez da bi jo pri tem poškodovali.

#### Polipropilen (ang. Polypropylene (PP))

Je najbolj hidrofoben material od zgoraj naštetih. Iz polipropilena so izdelane membrane za mikrofiltracijo, ker je material zelo hidrofoben, ne dovoljuje prehoda vode skozi membrano pri manjših porah, na primer ultrafiltraciji. Je trpežen, kemijsko in bakteriološko odporen, pH vrednosti so lahko med 1 in 13, odporen tudi na visoke temperature, kar pomeni, da čiščenje membrane lahko poteka z agresivnimi sredstvi. Vendar pa material ni odporen na klor, kar pomeni, da se na membrani in opremi s časom lahko pojavi biološko obraščanje (ang. biological growth).

#### Polivinil klorid (ang. Polyvinyl chloride (PVC))

Je široko uporabljen material na različnih področjih industrije. Njegova namembnost je odvisna od dodatkov, ki izboljšujejo lastnosti ali dodajo barvo. Osnovni komponenti za izdelavo PVC sta derivata soli in olja. V gradbeništvu je PVC široko uporabljen material, ker je močan, lahek, vzdržljiv, odporen na bakterije in nekatere kemikalije, izolativen ter cenovno ugoden.

Pri membranah za ultrafiltracijo se PVC uporablja zaradi trdnosti, ugodne cene, fizikalnih, kemijskih in mehanskih lastnosti materiala. V raziskavah materialov membran se uporabljajo različni dodatki za izboljšavo PVC, predvsem v težnji po zmanjšanju biološkega obraščanja. Pri tem je potrebno upoštevati tudi dobro poroznost membrane.

V primeru testnega ultrafiltracijskega modula PVC membrana prenese temperaturo vode med 5 in 38 °C, razpon pH vrednosti med 2 – 13. Kemijsko pranje poteka s klorovodikovo kislino, z natrijevim hidroksidom, ter natrijevim hipokloritom.



## 2.2.2 Struktura membran

Strukture membran v splošnem delimo na trdne in tekoče, trdne membrane pa glede na strukturo v simetrične in nesimetrične.

### 2.2.2.1 Simetrične membrane

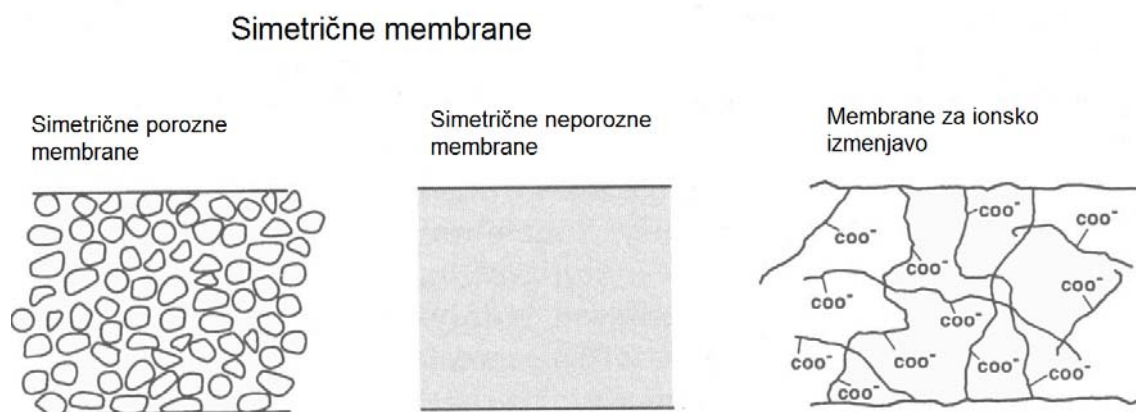
Struktura membrane je konstantna skozi debelino membrane, pravimo da je homogena. Po prečnem prerezu so razmeroma enakomerno razporejene enako velike pore in medprostori.

Torej je zgradba takih membran preprosta in delujejo podobno kot konvencionalni filtri. Skozi take membrane je možen večji pretok v primerjavi z nesimetričnimi membranami.

Uporabljajo se za mikrofiltracijo, ultrafiltracijo in nekaterih proizvodnih postopkih v industriji.

Poznamo tri tipe simetričnih membran, ki so prikazane na Sliki 2 (Baker, 2000):

- Neporozne
- Porozne
- Membrane za ionsko izmenjavo



Slika 2: Simetrične membrane (Baker, 2000: str. 5)

### 2.2.2.2 Asimetrične membrane

Pri asimetričnih membranah se skozi prečni prerez membrane spreminja velikost por. So bolj porozne v primerjavi z asimetričnimi membranami. Sestavljene so iz več plasti, kjer je

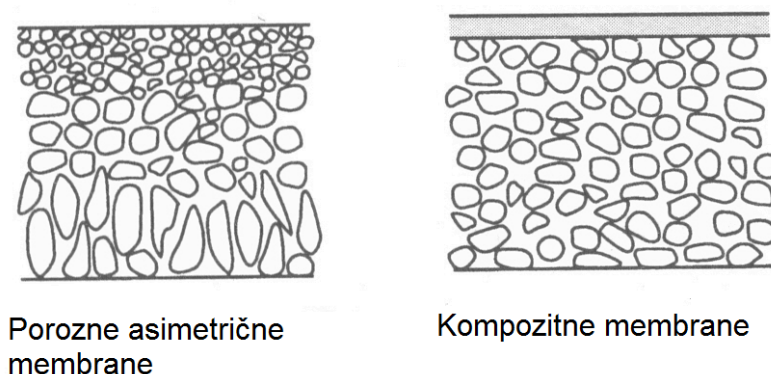
zgornja plast tanka in selektivna, podpira jo debelejša spodnja plast. Tanka ali selektivna plast omogoča visok pretok, medtem ko spodnja plast daje mehansko odpornost. Separacija poteka na zgornji selektivni plasti. Pri tem tipu membran se mašenje ne pojavlja tako pogosto kot pri simetričnih membranah.

Asimetrične membrane, prikazane na Sliki 3, delimo na:

- Porozne z aktivnim slojem (membrana je izdelana iz enakega materiala),
- Kompozitne (zgornja plast je iz drugačnega materiala kot porozni nosilec).

Asimetrične membrane so v veliki meri nadomestile simetrične, saj imajo v primerjavi z njimi kar nekaj prednosti: mehansko so bolj odporne, omogočajo višje pretoke, manjkrat se pore zamašijo in tudi čiščenje asimetričnih membran je enostavnejše (Baker, 2000).

### Asimetrične membrane



**Slika 3: Asimetrične membrane (Baker, 2000: str.5)**

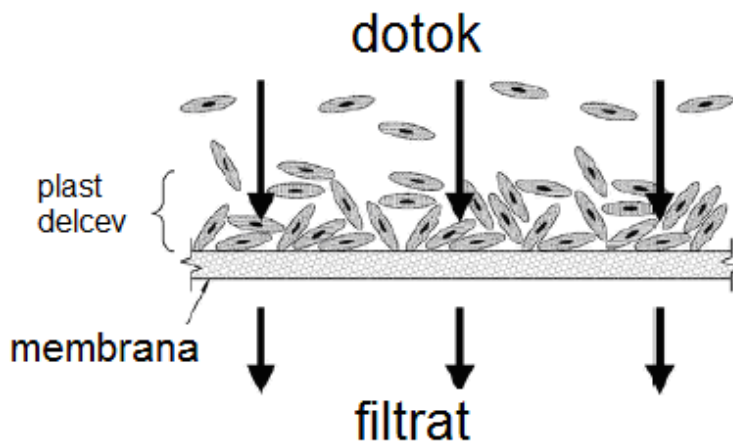
### 2.2.3 Načini izvedbe membranskih procesov

Glede na smer toka ločimo dva načina izvedbe filtracije:

- Statično filtracijo (ang. Dead-end filtration), pri kateri napajalni tok teče čelno,
- Dinamično filtracijo (ang. Crossflow filtration), pri kateri napajalni tok teče vzdolžno, oziroma prečno.

### 2.2.3.1 Statična filtracija

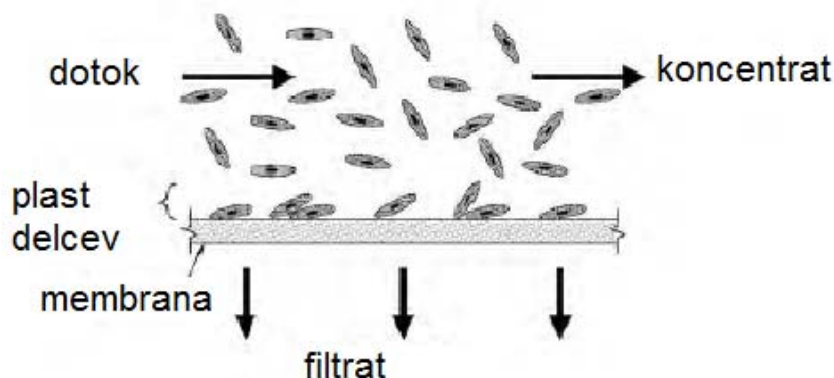
Statična filtracija pomeni, da je napajalni tok pravokoten na površino membrane (Slika 4). Pri tej vrsti filtracije se delci zadržijo na površini membrane, zato ni toka koncentrata. Delci, ki jih membrana zadrži, povzročajo rast sloja, katerega debelina narašča sorazmerno s koncentracijo suspenzije napajalnega toka. Debelina sloja zmanjšuje pretok preko membrane, zato je potrebno periodično spiranje membrane.



Slika 4: Statična filtracija (EPA, 2005: str. 2-32)

### 2.2.3.2 Dinamična filtracija

Pri dinamični filtraciji teče napajalni tok vzporedno s površino membrane, kot je prikazano na Sliki 5. Pri tem načinu filtracije se pojavita tako tok filtrata kot koncentrata. Pri tej vrsti filtracije se snovi v idealnih pogojih ne nabirajo na površini membrane. Ker se ustvari ravnotežje med učinkom odnašanja snovi in odlaganja na membrani, ostaja debelina odloženih snovi konstantna. Ko se tvori sloj odloženih snovi, začetni tok filtrata pada, dokler se ne ustvari ravnotežje med odlaganjem in odnašanjem. Tako stanje imenujemo stacionarna faza. Dinamična filtracija lahko deluje dalj časa brez prekinitev, v primerjavi s statično.



Slika 5: Dinamična filtracija (EPA, 2005: str. 2-33)

#### 2.2.4 Membranski moduli

Membrane so v praksi vgrajene v t.i. module, ker so same občutljive in ker so za njihovo uporabo v praksi potrebne velike površine membran. Oblika modulov je ravninska ali valjasta. Module razdelimo na različne tipe:

- Ploščati,
- Spiralno naviti,
- Moduli z votlimi vlakni.

Membrane vgrajene v module imajo daljšo življenjsko/obratovalno dobo, saj se s tem preprečujejo poškodbe membran. Manj pogosto je tudi mašenje, enostavnejše je čiščenje in servisiranje.

Optimalni moduli, ki so primerni za membranske procese, so tisti, ki omogočajo (Vavtar, 2004):

- Dovolj veliko specifično površino (površina membrane/ enota volumna [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]),
- Dobre turbulentne pogoje, ki pospešujejo prehajanje snovi skozi membrano,
- Majhno porabo energije,
- Enostavno čiščenje in vzdrževanje,
- Preprosto vgrajevanje in menjanje membran,
- Majhne padce tlaka,
- Nizke investicijske in obratovalne stroške.

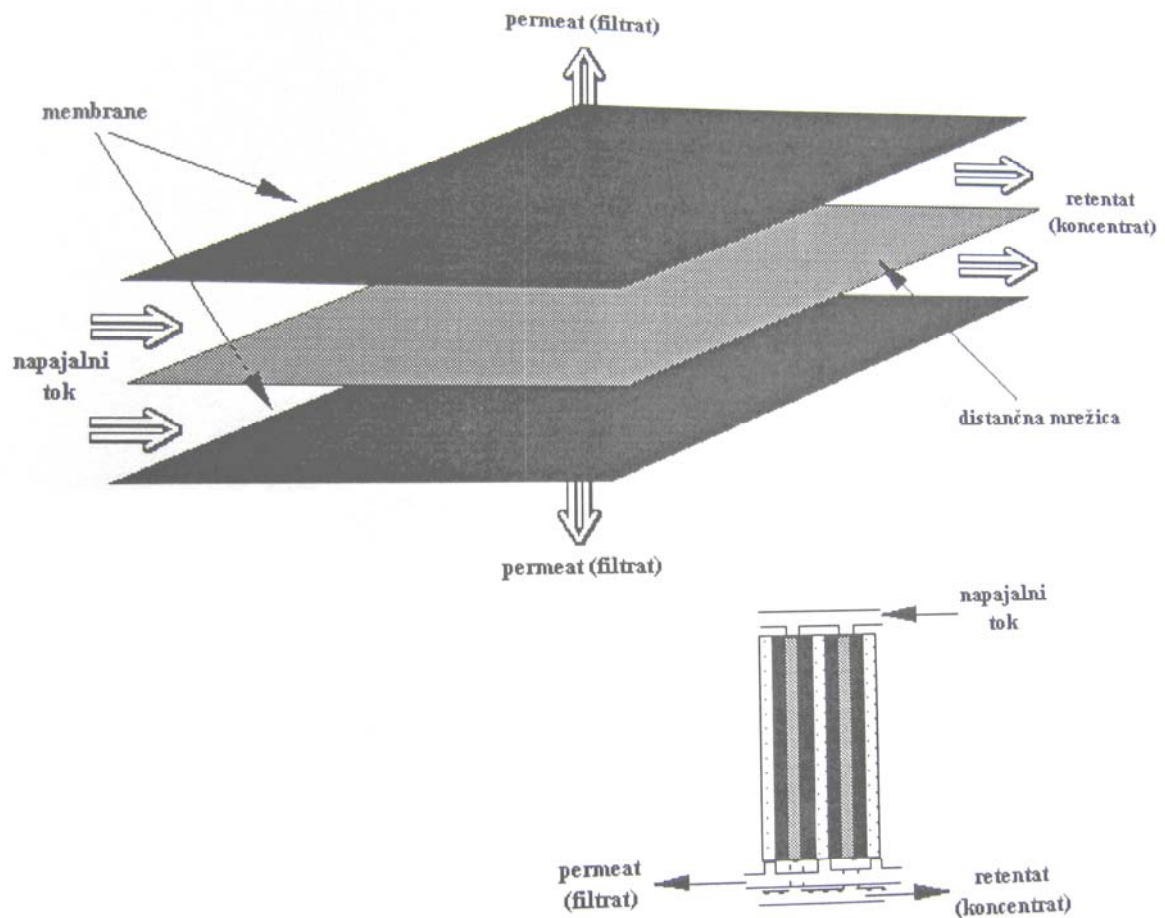
V Tabeli 1 so primerjave tipov modulov po nekaterih parametrih.

**Tabela 1: Primerjava tipov modulov (Vir: Baker, 2000)**

<b>Parameter</b>	<b>Ploščat modul</b>	<b>Spiralno navit modul</b>	<b>Modul iz votlih vlaken</b>
<b>Stroški obratovanja</b>	visoki	nizki	nizki
<b>Cena</b>	visoka	nizka	zelo nizka
<b>Specifična površina [m<sup>2</sup>/ m<sup>3</sup>]</b>	400 - 600	800 - 1000	5000 - 40000
<b>Kontrola koncentracijske polarizacija</b>	dobra	zmerna	slaba
<b>Možnost zamašitve</b>	srednja	srednja	zelo visoka
<b>Čiščenje</b>	enostavno	enostavno	težko
<b>Zamenjava membrane</b>	da	ne	ne
<b>Prednosti</b>	pri čiščenju se lahko odstrani	je kompakten in odporen	možnost spiranja v obratni smeri
<b>Slabosti</b>	ni možno čistiti v obratni smeri	ni možno čistiti v obratni smeri	občutljiv na velike spremembe tlaka

#### 2.2.4.1 Ploščati modul

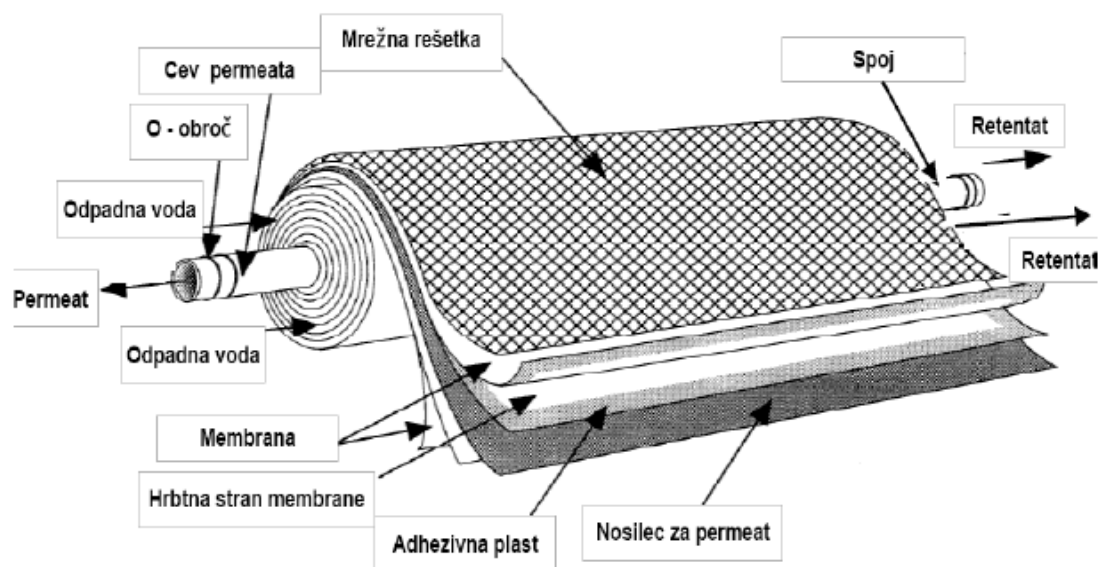
Ploščati moduli so se pojavili med prvimi oblikami uporabe membran. Sestavljeni so iz vzporedno razvrščenih ravnih membran, na katerih so nameščene porozne oporne plošče, in kjer se odvaja filtrat. Plošče so z vmesnimi distančniki povezane v sestave. Filtracija ponavadi poteka od zunaj navznoter, kot je prikazano na Sliki 6. Ploščati moduli se uporabljajo za ultrafiltracijo, mikrofiltracijo, reverzno osmozo in elektrodializo (Baker, 2000).



**Slika 6: Ploščati modul**

#### 2.2.4.2 Spiralno naviti modul

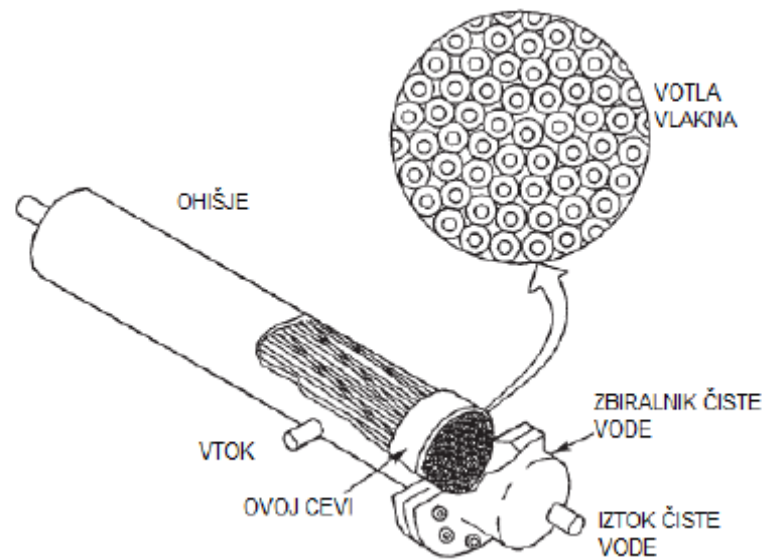
Spiralno naviti moduli so sestavljeni iz dveh membran, poroznega in distančnega dela, prikazano na Sliki 7. Tak element je navit okrog perforirane cevi, v kateri se zbira filtrat. Napajalni tok torej teče iz zunanje strani membrane, ko pronica v notranjost, po spirali odteka proti sredini, kjer se zbira v cevi (Baker, 2000). Spiralni moduli so kompaktni, preprosti in cenovno ugodni. Slabost je možnost zamašitve membrane in težje čiščenje.



Slika 7: Spiralno naviti modul (Bauman, 2010: str. 6)

#### 2.2.4.3 Modul iz votlih vlaken

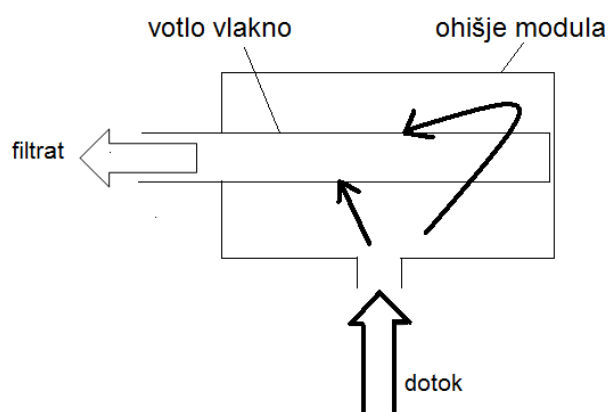
Modul iz votlih vlaken je sestavljen iz več tankih vlaken (Slika 8), ki so vgrajena v valjastem ohišju. Stene vlaken morajo prenesti precejšnje hidrostatične tlake, zato imajo vlakna majhne premere in debelejše stene. Zunanji premeri vlaken so od 0,5 mm do 2 mm. Moduli z votlimi vlakni omogočajo velike specifične površine in so cenovno ugodni. Običajno se lahko spirajo s tokom v nasprotni smeri (ang. backwash).



**Slika 8: Modul iz votlih vlaken (Bauman, 2010: str. 6)**

Pri votlih vlaknih sta možna dva režima toka, in sicer:

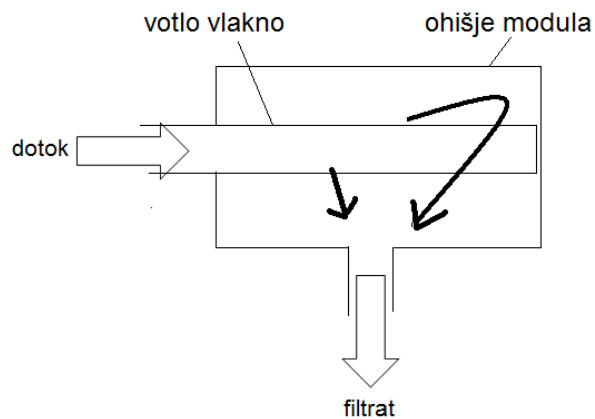
- Odzunaj – navznoter (ang. outside – in): ta način ne deluje pri dinamični filtraciji (ang. cross-flow mode). Prednosti takega režima je možnost filtracije večje količine vode pri enakem fluksu, ker ima votlo vlakno na zunanjem plašču večjo površino, v primerjavi z načinom 'odznotraj - navzven', in manjšo občutljivost na večje delce v vodi, ki jo obdelujemo. Shematsko je to prikazano na Sliki 9.



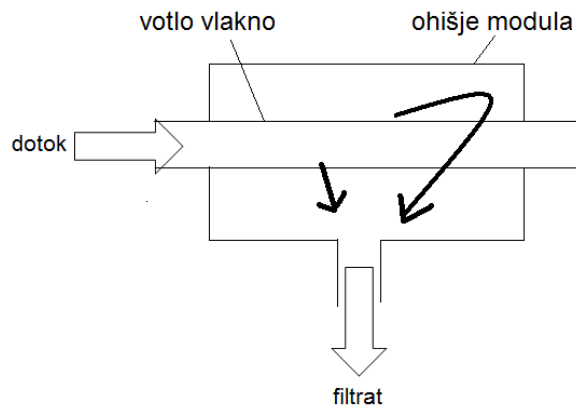
**Slika 9: Odzunaj – navznoter**



- odznotraj – navzven (ang. inside – out): ta način je možen pri statični in dinamični filtraciji. In sicer, pri statičnem načinu, kot je prikazano na Sliki 10, je cenovno ugodnejši v primerjavi z naslednjim.
- Način 'znotraj - navzven' pri dinamični filtraciji je prikazan na Sliki 11, njegova prednost je delovanje pri večjem fluksu in bolj motni vodi, saj dinamični način preprečuje nalaganje in formiranje oblog (ang. cake) na površini membrane.



**Slika 10: Statična (čelna) filtracija odznotraj – navzven**



**Slika 11: Dinamična (vzdolžna) filtracija odznotraj – navzven**

Slaba stran pri obeh je možnost zamašitve vlakna z večjimi delci in pa možnost filtracije manjše količine vode, zaradi manjše površine notranjega dela plašča votlega vlakna.

### 2.2.5 Zadrževanje snovi na membrani

Osnovni mehanizem pri filtraciji je odstranjevanje nezaželenih delcev iz tekočine z zadrževanjem (angl. straining), in tudi z adsorbicijo in nalaganjem plasti (angl. cake formation).

Zadržani delež snovi, ki je odstranjena iz napajalnega toka, se imenuje zadržek (retentat), oz. odpadok (angl. rejection).

Retentat izračunamo po formuli (Crittenden, 2005):

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_F} \quad (1)$$

R ....retentat (ang. rejection) [/]

C<sub>p</sub>...koncentracija snovi v filtratu [mol/l, mg/l]

C<sub>F</sub>....koncentracija snovi v napajalnem toku [mol/l, mg/l]

Zadržani delež snovi se izkazuje v različnih oblikah, če gre za delce (motnost, štetje delcev).

Pri računu delcev, ki se pojavljajo v zelo majhnem obsegu (kot na primer mikroorganizmi), pa so te vrednosti zelo majhne, zato uporabljamo tudi formulo za logaritmično odstranitev:

$$R_{\log} = -\log(1 - R) = \log\left(\frac{C_F}{C_p}\right) \quad (2)$$

R ... retentat (ang. rejection) [/]

C<sub>p</sub>... koncentracija snovi v filtratu [mol/l, mg/l]

C<sub>F</sub>.... koncentracija snovi v napajalnem toku [mol/l, mg/l]

Obračanje in nalaganje snovi, predvsem organskih, ter formiranje plasti (ang. cake formation) na steni membrane je pomembno poglavje pri membranski tehnologiji.

Oblaganje delimo na povratno-reverzibilno (ang. reversible) in nepovratno- nereverzibilno (ang. irreversible).

Znak oblaganja ali mašenja por membrane je, ko pri stalnem pretoku oziroma stalnemu fluksu naraste TMP. To pomeni, da je potrebno izvesti hidravlično pranje membrane. Če po opravljenem hidravličnem pranju znova vzpostavimo filtracijo pri konstantnem fluksu in se

vrednosti TMP vrnejo na začetne ali malo višje vrednosti, potem je bilo hidravlično pranje uspešno in nadaljujemo s filtracijo. V primeru, da so TMP na začetku novega cikla mejne vrednosti, ki jih predpiše proizvajalec, pri enakem fluksu, pomeni, da je potrebno izvesti kemijsko pranje. Manjšanje vrednosti fluksa skozi cikle kaže na oblaganje membrane. Po kemijskem pranju se lahko prepustnost membrane vrne na začetno vrednost, kot pri novi membrani. To pomeni, da smo membrano regenerirali. Če pa ne dosežemo take prepustnosti, pomeni, da so se pore membrane nepovratno zamašile.

Pristopi reševanja problema obraščanja in oblaganja membrane so različni, najpogosteje se navaja:

Pri raziskovalnem pristopu:

- Analiza biofilma in ugotavljanje njegove rasti, ter kontrole rasti, kdaj in v kakšnih pogojih se pojavi.
- Raziskovanje in preizkusi novih materialov membran, ki temeljijo tudi na nanomaterialih ali pa posebne kemijske obdelave membran za prepračevanje rasti biofilma.

Pri operativnem pristopu:

- Dodajanje različnih aditivov pri sami filtraciji: flokulantov ali koagulantov ali predhodna obdelava vode.
- Analiziramo hidrodinamične pogoje: upoštevamo obliko modula, pretok skozi membrano in material membrane, ter optimiziramo pretok napajalnega toka skozi modul.

## 2.2.6 Razlike med membranskimi procesi

Razlike med membransko filtracijo (MF in UF) in reverzno osmozo (RO) sta seveda v tipu membrane in snovmi, ki jih odstranjujeta iz vode. Poleg tega se ločita tudi po materialu, ki je uporabljen za membrano, legi membranskih elementov, opremi, načinu načrtovanja in uporabe takega sistema. Primerjava karakteristik je podana v Tabeli 2.

Membranski procesi se uporabljajo na različnih področjih in industrijskih procesih. Pri tem se uporablja vse tipe membran odvisno od tekočine in učinka, ki ga želimo doseči.

Za primer priprave pitne vode se uporablja ultra-filtracija za obdelavo predvsem površinske in podzemne vode, v primeru, ko ta vsebuje suspendirane in koloidne delce in je motna. Reverzna osmoza se uporablja predvsem pri razsoljevanju morske vode, pripravo demineralizirane tehnološke vode in recikliranju vode. Za reverzno osmozo je značilno, da potrebuje zaradi občutljivosti membran predpripravo surove vode, ki pa se pogosto izvede prav z uporabo katere izmed metod membranske filtracije: ultrafiltracije ali mikrofiltracije.

**Tabela 2: Primerjava med membransko filtracijo in reverzno osmozo (Vir: Crittenden 2005: str. 959 )**

<b>Karakteristika</b>	<b>Membranska filtracija(UF)</b>	<b>Reverzna osmoza (RO)</b>
<b>Odstanjevanje</b>	Odstranjevanje delcev in mikroorganizmov	Razsoljevanje, mehčanje, odstranjevanje organskih spojin, stranskih produktov dezinfekcije, odstranjevanje specifičnih onesnažil
<b>Tip membrane</b>	Mikrofiltracija in ultrafiltracija	Nanofiltracija in reverzna osmoza
<b>Tipični vodni vir</b>	Površinska voda	Morska voda, obarvana podzemna voda
<b>Struktura membrane</b>	Homogena ali asimetrična	Asimetrična ali tankoslojni kompozit
<b>Najbolj pogosta izvedba</b>	Votla vlakna	Navitje
<b>Glavni način filtracije</b>	Zadrževanje	Razlika v topnosti in difuznosti
<b>Delež zadržanih snovi</b>	Pogosto 99 % ali več	Tipično 50 – 99%, odvisno od nečistoč
<b>Najbolj pogost način toka</b>	Statični	Dinamični
<b>Obratovanje vključuje povratno pranje/spiranje</b>	Da	Ne
<b>Obratovanje pod vplivom osmotskega tlaka</b>	Ne	Da
<b>Na obratovanje vpliva koncentracijska polarizacija</b>	Ne	Da
<b>Tipični TMP</b>	0,2 – 1 bar	5 – 85 bar
<b>Tipični pretok skozi membrano</b>	30 – 170 l/(m <sup>2</sup> h)	1 – 50 l/(m <sup>2</sup> h)
<b>Tipični izkoristek</b>	> 95 %	50 % za morsko vodo Do 90 % za podzemno vodo

### 3 ULTRAFILTRACIJA

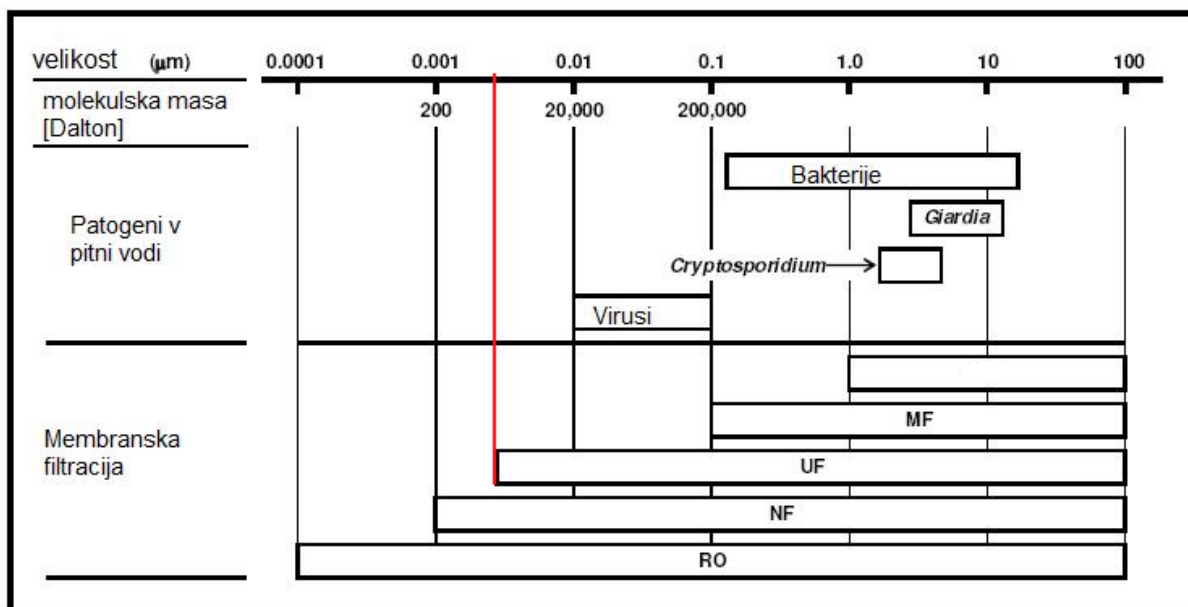
Prvo sintetično ultrafiltracijsko membrano je izumil Bachhold iz nitroceluloze. Bil je prvi, ki je uporabil termin 'ultrafilter'. V letih 1920 so se ultrafiltracijske membrane uporabljale v laboratorijske namene, do 1960. let. Leta 1963 se je z izumom nesimetričnih celulozno acetatnih membran se je začela širša proizvodnja ultrafiltracijskih membran.

Leta 1969 je družba Abicor (sedaj Koch Industries) prvič vgradila industrijski sistem za ultrafiltracijo in sicer pri ločevanju avtomobilske barve od vode v odpadnih vodah avtomobilske industrije. Nekaj let kasneje so prvič uporabili ultrafiltracijo za ločevanje sirotke pri proizvodnji sira. Tako se je nadaljevala vgradnja podobnih sistemov. Leta 1973 so pri družbi Romicon prvič predstavili module z votlimi vlakni, moduli s spiralnim navitjem pa istega leta pri Abicorju. V nadaljnjih 20 letih je industrija na področju ultrafiltracije naraščala in raziskave še vedno potekajo, predvsem pri iskanju novih materialov in načinov, da zmanjšali obraščanje membrane (Baker, 2000).

#### 3.1 Membrana pri ultrafiltraciji

Ultrafiltracija je membranski proces, ki deluje pod tlakom. Struktura ultrafiltracijskih membran je običajno asimetrična, proizvedena po Loeb-Sourirajan procesu (Rushton, 2000). Fino porozna zgornja plast je nad poroznim spodnjim slojem. V zgornji plasti se zadrži največ delcev, medtem ko spodnja plast služi za mehansko odpornost membrane. Materiali so tako organski kot anorganski, najpogosteje pa se zaradi vzdržljivosti in kemijske odpornosti uporabljajo različni polimeri (Baker, 2000).

Membrane imajo velikost por od 0,01 – 0,05 mikro metrov [ $\mu\text{m}$ ] in so karakterizirane ne samo po velikost por, ampak tudi po izključitveni molekularni masi (ang. molecular weight cut-off), ki se izraža v enotah [Dalton]. Tako ultrafiltracijske membrane zadržijo tudi nekatere makromolekule. Ker pa je težko določiti obliko makromolekul in te se običajno nahajajo kot različne spojine, in ne kot suspendirane snovi, se membrane ločijo po zmožnosti izključevanja molekulske mase (MWCO). Razpon za MWCO je med 10 000 in 500 000 Dalton (Slika 12). Večina ultrafiltracijskih membran, ki se uprabljajo za obdelavo vode, ima MWCO okrog 100 000 Dalton (EPA, 2005).



Slika 12: Ultrafiltracija – velikost por in molekulska masa (EPA, 2005: str 2-3)

Modeli modulov se pri ultrafiltraciji razlikujejo med seboj v odvisnosti od namena uporabe in hidravlične kapacitete. Za obdelavo vode so najpogostejši moduli z votlimi vlakni, nato ploščati in spiralno naviti moduli (Bauman, 2010).

### 3.1.1 Uporaba ultrafiltracije

Površinska voda je onesnažena zaradi naravnih procesov in človekovih dejavnosti. V njej se nahajajo tako suspendirani delci kot nevarni mikroorganizmi, tudi fekalnega izvora. Ultrafiltracijske čistilne naprave se največkrat uporabljajo za pripravo pitne vode prav iz površinskih vod, torej rek ali jezer. Mogoča je tudi uporaba pri motni oziroma kalni podzemni vodi. Konvencionalno čiščenje pri pripravi površinske vode za pitje po navadi obsega koagulacijo, flokulacijo, sedimentacijo in dezinfekcijo. Če to nadomestimo z UF, so tukaj prednosti pri:

- Zmanjšanje potrebe po kemikalijah (flokulantih in koagulantih),
- Proces je avtomatiziran,
- Priprava pitne vode je neodvisna od mikrobiološke kakovosti surove vode in vsebnosti delcev.

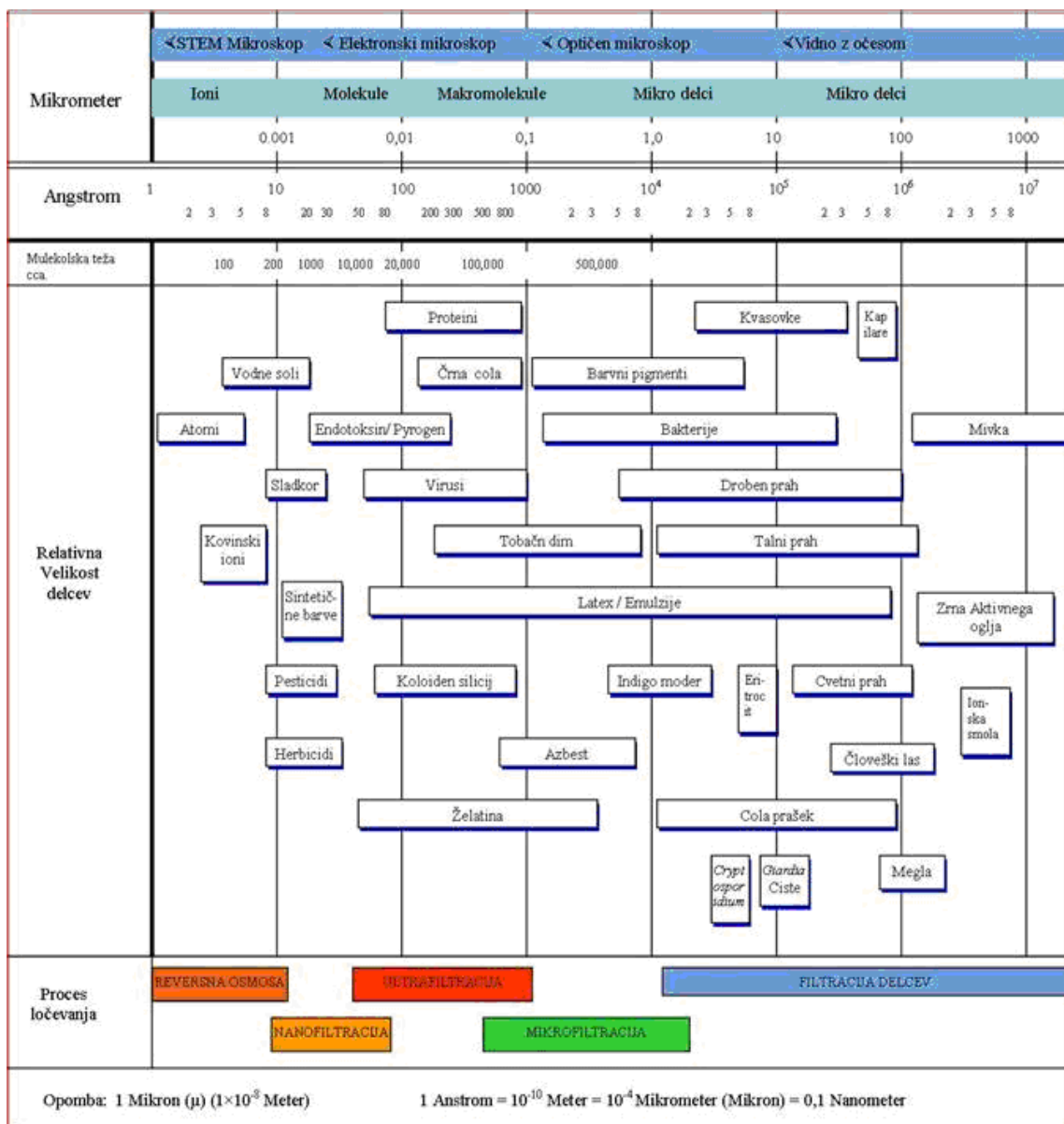
Raziskave so bile opravljene na področju UF naprave za pitno vodo na različnih lokacijah. Na UF napravah, kjer so merili parametre za površinske vode, so uspešno zmanjšali motnost in skupne koliformne (100 %), tako izboljšali barvo oziroma izgled vode. Zagotovljena je bila neprekinjena oskrba. Tehnologija se je izkazala za zanesljivo in primerno, ob rednem vzdrževanju in pregledih. Predvsem v ruralnih območjih, kjer so manjša naselja in v državah v razvoju, se je pokazalo manj okužb z neprimerno pitno vodo (Arnal, 2008).

Vendar so tudi ugotovili, da če pripravljena voda stoji dalj časa, oziroma se distribuira do končnih uporabnikov, se lahko pojavijo bakterije, vsaj v napravah, ki so se nahajale v ruralnih območjih in tropskem podnebju. Za to je potrebno vodo, preden jo distribuiramo, še stabilizirati, v največ primerih s dodajanjem klora (Arnal, 2008).

## 4 SNOVI V VODI, KI JIH ODSTRANJUJEMO Z ULTRAFILTRACIJO

Namen ultrafiltracije je, da loči vodo od: olja, delcev v velikosti med 0,01  $\mu\text{m}$  in 0,1  $\mu\text{m}$ , bakterij, suspendiranih trdnih snovi, makromolekul in proteinov, koloidov. Čez pore prepušča vodo, ne pa površinsko aktivnih snovi (ang. surfactants). Filtrat je bister, saj dobro odstranjuje delce in suspendirane snovi.

Približna primerjava velikosti je prikazana na Sliki 13.



Slika 13: Filtracijski in ločevalni spekter (Tehnofan, <http://www.filtri-za-vodo.si/>)



## 4.1 Delci

Za pripravo pitne vode za mestne sisteme, kjer je surova voda površinski vir so bili opisani različni primeri praks uporabe UF modulov za pripravo pitne vode.

Pri pilotni napravi na zelo obremenjeni reki se je izkazalo, da je bil filtrat, ne glede na spreminjanje motnosti in koncentracije delcev v surovi vodi, konstantne kakovosti. Izmerjena motnost je bila vedno pod 0,2 NTU. Vendar zaradi zelo motne površinske vode, so pred filtracijo dodali še postopek koagulacije. Izkazalo se je, da je koagulant povečal fluks in pričakovano zmanjšal prepustnost delcev skozi membrano (Xia, 2004).

Pri obdelavi jezerske vode po konvecionalnem postopku, ki je obsegal fino filtracijo, ozoniranje, hitre peščene filtre in kloriranje, se je izkazala v obdelani vodi prevelika motnost in vsebnost delcev, ter suspendiranih snovi in možen izbruh parazitov. V primerjavi z UF napravo, se je izkazalo, da je postopek UF odstranil delce, suspendirane snovi in motnost v 99%, kar po konvecionalnem postopku ni bilo možno. V 90 % so bile uspešno odstranjene suspendirane snovi (Lipp, et.al.,1998).

Pri obdelavi surove vode z zelo visoko motnostjo in visoko koncentracijo organskih spojin se pojavi hitro obraščanje membrane in rast biofilma. V takem primeru so hidravlična in s tem tudi kemijska pranja pogostejša, kar tudi skrajša življenjsko dobo membrane (Natasuka, et.al., 1995).

## 4.2 Mikroorganizmi

Izkušnje z UF membranami se pokažejo tudi na področju odstranjevanja mikroorganizmov. V površinski vodi se največkrat nahajajo različni virusi, bakterije in praživali, med njimi najpogosteje *Giardia* in *Cryptosporidium*. Obe sta nevarni za človeško zdravje in sta odporni na dezinfekcijo s klorom. V primeru uporabe UF membran pri obdelavi površinske vode je bil ta organizem odstranjen v okviru predpisov za zagotavljanje mikrobiološke kakovosti pitne vode (EPA, 2005).

## **5 ZAKONODAJA IN PREDPISI**

Temeljni cilji vodovarstvene zakonodaje so zmanjšanje emisij v okolje ter preprečevanje onesnaženja vodnih teles in s tem virov pitne vode. Voda v zakonodaji zavzema več področij, osredotočili smo se na zakone, ki obravnavajo pitno vodo oziroma vodo kot živilo.

### **5.1 Evropski predpisi**

Evropsko zakonodajo na področju pitne vode predstavljata Direktiva Sveta Evropske unije o pitni vodi (Direktiva Sveta EU 98/83/ES) ter delno Direktiva o skupni politiki do voda (Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike), ki navajata smernice za ustrezno preskrbo s pitno vodo.

Od evropskih standardov in predpisov, ki obravnavajo oskrbo s pitno vodo, velja predvsem standard EN 805 (Oskrba z vodo – Zahteve za sisteme izven zgradb in komponent), na podlagi katerega je bil v Sloveniji sprejet Slovenski standard SIST EN 805. Poleg zahtev, ki se tičejo hidravlike vodovodnega sistema pri projektiranju oziroma dimenzioniranju, postavlja standard tudi zahteve, ki obravnavajo kakovost pitne vode.

#### **5.1.1 Direktiva Sveta Evropske unije o kakovosti vode, namenjene za prehrano ljudi (Direktiva Sveta EU 98/83/ES)**

Direktiva 98/83/ES je bila sprejeta leta 1998, in nadomešča Direktivo Sveta 80/778/EGS iz leta 1980, saj je bilo potrebno predpise prilagoditi izkušnjam prejšnje Direktive, ter znanstvenemu in tehnološkemu napredku.

Direktiva 98/83/ES ureja kakovost vode, namenjene za prehrano ljudi. Cilj direktive je varovanje zdravja ljudi pred škodljivimi vplivi onesnaženja vode, ki je namenjena za prehrano, z zagotavljanjem njene zdravstvene ustreznosti in čistosti.

V 2. členu je opredeljen izraz vode, ki je namenjena za prehrano ljudi in sicer kot: »Vso vodo v svojem prvotnem stanju ali po čiščenju, namenjeno pitju, kuhanju, pripravi hrane ali za druge gospodinske namene, ne glede na svoje poreklo in ne glede na to, ali se zagotavlja iz vodovodnega omrežja, cisterne, steklenic ali posod« in kot: »Vso vodo, ki se v podjetjih za proizvodnjo hrane uporablja za proizvodnjo, predelavo, konzerviranje ali trženje proizvodov in snovi, namenjenih za prehrano ljudi, razen če se pristojni nacionalni organi prepričajo, da kakovost vode ne vpliva na zdravstveno ustreznost živil v končni obliki« (Direktiva Sveta EU 98/83/ES člen 2, 1(a) in 1 (b)).

Za kakovost vode hišnega vodovodnega omrežja in naprav, ki niso nacionalnega pomena, ne odgovarja dobavitelj vode. Direktiva ne zajema določb za naravne mineralne in zdravilne vode. Izjema je tudi voda, ki je iz individualnega vira in zagotavlja v povprečju manj kot 10 m<sup>3</sup> vode na dan ali oskrbuje manj kot 50 oseb, razen če se ta voda uporablja kot del gospodarske ali javne dejavnosti. Vendar pa so države članice dolžne prebivalce, ki se oskrbujejo iz individualnih virov ustrezno obvestiti o ukrepih, ki se lahko sprejmejo za varstvo zdravja ljudi v primerih očitnih onesnaženj takih virov.

Voda za namene minimalnih zahtev Direktive, je zdravstveno ustrezna in čista, če je brez mikroorganizmov in snovi, ki predstavljajo morebitno nevarnost za zdravje ljudi. Vrednosti parametrov držav članic, ne smejo biti manj stroge od vrednosti, ki so določeni v Direktivi. Država članica določi tudi dodatne vrednosti, ki niso vključeni v Prilogi 1 (Direktiva Sveta EU 98/83/ES, Priloga 1) kjer to zahteva varstvo ljudi na določenem ozemlju.

Mesta ustrezanja morajo biti iz pip, ki se običajno uporabljajo za prehrano ljudi. Države članice morajo redno spremljati stanje in preverjati učinkovitosti postopkov priprave vode in razkuževanja in distribucijo vode, ter spremljati onesnaženje s stranskimi produkti razkuževanja, da so na nizki ravni, ne da bi se pri tem oviralo razkuževanje.

Direktiva podaja tudi omejitve uporabe in odstopanja, vendar pa nalaga članicam, da morajo v primeru odstopanja sprejeti ustrezne sanacijske ukrepe, pripraviti programe spremljanja in poskrbeti za varovanje zdravja ljudi. Zajema tudi primere za izjemne okoliščine.

Za kakovost obdelave vode, opreme in materialov morajo države članice zagotoviti, da materiali niso škodljivi ali nevarni za ljudi, oziroma da niso presežene mejne vrednosti nečistoč pri njihovi uporabi oziroma vgradnji. Tukaj se sklicujejo na zakone in predpise Evropske unije in držav članic, ki se nanašajo na gradbene proizvode.

Parametri in vrste parametrov so navedeni v Prilogi 1 (Direktiva Sveta EU 98/83/ES, Priloga 1).

- V delu A so tabelirani mikrobiološki parametri. Za *E. Coli* je podana vrednost parametra 0 število/ 100 ml. Če je voda za prodajo v steklenicah ali posodah velja vrednost 0/ 250 ml.
- V delu B so podani kemijski parametri in njihove vrednosti v [ $\mu\text{g/l}$ ].
- V delu C so podani indikatorski parametri. Tukaj bi izpostavili parameter *Clostridium perfringens* (vključno s sporami) predpisana vrednost parametra 0 /100 ml. Vendar pa tega parametra ni potrebno meriti, razen če je voda površinska ali pa na zajetje vpliva površinska voda. Če vrednost parametra odstopa, je potrebno ugotavljanje prisotnosti drugih patogenih mikroorganizmov, kot na primer *Cryptosporidia*.
- Motnost mora biti sprejemljiva za potrošnike, priporočena vrednost pri pripravi površinske vode iz čistilne naprave je 1 NTU.

V Prilogi II so opisane zahteve za spremljanje stanja, ter v Prilogi III tehnične zahteve za analizo parametrov, ki jih opravljajo laboratoriji (Direktiva Sveta EU 98/83/ES).

### 5.1.2 Slovenski predpisi

Krovna zakonodaja, ki pokriva področje vodooskrbe, je naslednja:

- **Zakon o gospodarskih javnih službah** (Ur.list RS, št. 32/1993, Ur.list RS, št. 30/1998-ZZLPPO, 127/2006-ZJZP, 38/2010-ZUKN) opredeljuje načine organiziranja in izvajanja javne službe vodooskrbe.
- **Zakon o varstvu okolja** (Ur. list RS, št. 41/2004 in spremembe Ur. list RS, št. 17/2006, 20/2006, 28/2006 Skl. US: U-I-51/06-5, 39/2006-UPB1, 49/2006-ZMetD, 66/2006 Odl. US: U-I-51/06-10, 112/2006 Odl. US: U-I-40/06-10, 33/2007-ZPNačrt, 57/2008-ZFO-1A, 70/2008, 108/2009) opredeljuje oskrbo s pitno vodo kot obvezno občinsko javno gospodarsko službo ter določa standarde izvajanja javne službe vodooskrbe.

- **Zakon o vodah** (Ur. list RS, št. 67/2002, spremembe: Ur. list RS, št. 110/2002-ZGO-1, 2/2004-ZZdrI-A, 41/2004-ZVO-1, 57/2008) opredeljuje področje varstva vodnih virov ter področje pridobivanja vodnih pravic.
- **Zakon o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov, ki prihajajo v stik z živili** (Ur. list RS, št. 52/2000 in spremembe Ur. list RS, št. 42/2002 in 47/2004) navaja zahteve, ki jih mora izpolnjevati pitna voda, z namenom varovanja zdravja ljudi.
- **Zakon o varstvu pred požarom** (Ur. list RS, št. 71/1993 in spremembe Ur. list RS, št. 87/2001, 110/2002-ZGO-1, 105/2006, 3/2007-UPB1, 9/2011) in **Zakon o gasilstvu** (Ur. list RS, št. 71/1993 in spremembe Ur. list RS, št. 1/1995-CZ, 28/1995, 73/1997 Odl.US: U-I-341/94, 28/2000, 91/2005, 113/2005-UPB1, 120/2008 Odl. US: U-I-61/06-14) določata zahteve glede uporabe vode iz javnega vodovodnega omrežja za potrebe požarne varnosti.
- **Zakon o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami** (Ur. list RS, št. 64/1994 in spremembe Ur. list RS, št. 33/2000 Odl.US: U-I-313/98, 87/2001-ZMatD, 41/2004-ZVO-1, 28/2006, 51/2006-UPB1, 97/2010) predpisuje obveznost izdelave načrta zaščite in reševanja za vodovodne sisteme v skladu z Uredbo o vsebini in izdelavi načrtov zaščite in reševanja.
- **Pravilnik o pitni vodi** in Pravilniki o spremembah in dopolnitvah Pravilnika o pitni vodi (Ur. list RS, št. 19/2004, spremembe in dopolnitve Ur. list RS, št. 35/2004, 26/2006, 92/2006, 25/2009).

V okviru naloge nas zanimajo predvsem Pravilnik o zdravstveni ustreznosti pitne vode in Pravilnik o pitni vodi, ter njune dopolnitve.

#### 5.1.2.1 Pravilnik o pitni vodi

Pravilnik o pitni vodi (Ur. list RS, št. 19/2004, spremembe in dopolnitve Ur. list RS, št. 35/2004, 26/2006, 92/2006, 25/2009) določa zahteve, ki jih mora izpolnjevati voda, namenjena za pitje, pripravi hrane in druge gospodinjske namene, ter za proizvodnjo in promet z živili, z namenom varovanja zdravja ljudi. Pitna voda je zdravstveno ustrežna, kadar ne vsebuje nevarnih snovi za človeka v koncentraciji, ki predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi. Pravilnik nalaga upravljanje, spremljanje na osnovah HACCP sistema, ter kontrolo

kakovosti vode v skladnosti s pravilnikom. Materiali in snovi, ki so v stiku z vodo pri pripravi in transportu, ne smejo vplivati na njeno kakovost. V prilogi 1 so navedeni parametri in mejne vrednosti, ki pa so skladni kot pri Evropski direktivi (Direktiva Sveta EU 98/83/ES, Priloga 1).

Pravilnik ne piše o tehnologijah priprave pitne vode, le da mora biti tehnologija priprave ustrežna, da voda ustreza zahtevam Pravilnika. Prav tako ne omenja različnih postopkov priprave in dezinfekcije.

#### **5.1.2.2 Zakon o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov ter snovi, ki prihajajo v stik z živili**

Zakon o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov ter snovi, ki prihajajo v stik z živili (ZZUZIS) (Ur. list RS, št. 52/2000 in spremembe Ur. list RS, št. 42/2002 in 47/2004) velja tudi za pitno vodo iz javnih sistemov za oskrbo s pitno vodo, vodo za pakiranje ter predpakirani pitni vodi, namenjeni javni porabi. Zakon predpisuje ustrezno ravnanje, shranjevanje in higienske kriterije, ter monitoring proizvodnje. Za zdravstveno ustreznost izdelkov in snovi navaja le da morajo biti uporabljeni ustrezni tehnološki postopki. Prav tako mora biti notranji nadzor izveden po HACCP sistemu.

Zakon ne omenja nikakršnih predpisov o tehnologiji in materialih, ki prihajajo v stik s pitno vodo. Pitna voda kot živilo ne sme škoditi zdravju ljudi.

Ultrafiltracija se nikjer ne omenja.

## 6 NALOGA IN METODE DELA

Namen je bil postaviti koncept laboratorijske testne naprave, pri kateri smo uporabili testni modul. S poizkusom smo želeli testirati tako laboratorijsko testno napravo, kot tudi laboratorijski modul za ultrafiltracijo proizvajalca Litree, na konkretnem primeru surove vode.

Uporabo laboratorijske testne naprave in testnega modula za ultrafiltracijo ter opremo mi je omogočilo podjetje MAK CMC d.o.o..

Modul in celoten sistem je bil pritrjen na stojalo. Zraven sta še dve 100-litrski posodi, ena za dotok surove vode iz Gradaščice, in druga, kamor se je iztekal filtrat.

### 6.1 Aparature

Uporabili smo naslednje aparature:

- Modul za ultrafiltracijo, proizvajalca Litree,
- Rotameter – merilnik pretoka,
- Peristaltična črpalka, proizvajalca Watson Marlow tip 313 FMD/D 24VDC, z usmernikom električnega toka. Maksimalni tlak 4 bar, maksimalni pretok 50 l/h,
- Dva manometra za merjenje tlaka ( $T_v$  – vstopni in  $T_i$  – izstopni tlak), v merilnem območju 0 – 2,5 bar,
- Čistilni kos s stopnjo filtracije 0,1 mm.

Poskus je zasnovan tako, da je surova voda (Gradaščica) speljana v posodo in nato čez čistilni kos, ki zadrži delce večje od 0.1 mm, v filtracijski modul (Slika 17). Pred tem ni nikakršne kemijske obdelave vode.

V času poskusa se je surova voda spreminjala, glede na zunanje in vremenske razmere.

Do polovice trajanja poskusa je bila voda zelo motna, rjava, vsebovala je mulj in delce. V drugi polovici poskusa je voda postala bolj bistra in pa zelenkaste barve.

## 6.2 Merjenje parametrov

Pri analizi vode smo uporabili:

- Aparat za merjenje motnosti - turbidimeter Lovibond TurbiDirect [NTU],
- Spektrofotometer HACH-Lange, Dr 2800 za merjenje skupnih suspendiranih snovi (ang. TSS) [mg/l],
- Merilnik proizvajalca Lovibond, tip MicroDirect za merjenje temperature [°C] in pH vrednosti,
- Za merjenje delcev v surovi vodi Particle Sizer Analysette 22, proizvajalca Fritsch,
- Kivete,
- Steklene posodice za vzorce smo očistili in splakovali z demineralizirano vodo.

Parametre smo merili v posodah, kamor se je črpala Gradaščica in pa v posodi, kamor se je iztekal filtrat.



## 7 TESTNI MODUL

Poskusni modul je primeren za laboratorijski preizkus (ang. small scale). Je pomanjšana verzija realnega modula (približno 200-krat manjši) in ga proizvajalec ponuja za namen testiranja in preizkusa membrane. Material membrane se od modula v pravi velikosti ne razlikuje, razlikuje pa se konfiguracija modula, saj ima veliki modul odvodni distributor, da filtrat kontrolirano odteka iz modula.

Laboratorijski modul je poenostavljena vezija realnega modula.

Modul v pravi velikosti meri  $\Phi 187$  mm x 1398 mm ali  $\Phi 277$  mm x 1713 mm se uporablja za pripravo pitne vode, kot predfiltracija pri reverzni osmozi, pri pripravi vode za proizvodnjo hrane in pijač, pri obdelavi koncentrirane hrane, postopku alkoholne fermentacije in obdelavi mleka, pri prečiščenju in zbistritvi vina, pripravi vode za farmacevtsko uporabo in obdelavi odpadne vode. Od namena je odvisna tudi zasnova celotnega sistema filtracije.

### 7.1 Opis testnega modula

Specifikacije modula, kot jih navaja proizvajalec smo povzeli v Tabeli 3.

**Tabela 3: Specifikacije**

Membranski modul proizvajalca	Litree, Kitajska
Material membrane	PVC
Velikost por membrane	0,05 $\mu$ m
Način izvedbe membranskega procesa	statična filtracija (ang. dead-end)
Smer filtracije	znotraj – ven (ang. inside – out)
modul	Votla vlakna
Dimenzije modula	L= 300 mm, $\Phi$ = 35 mm
Dimenzije membrane	Zunanja dimenzija vlakna: 1,50 mm Notranja dimenzija vlakna: 0,85 mm Debelina membrane: 0,65 mm Površina membrane: 0,20 m <sup>2</sup>
Vrsta membrane	Asimetrična, hidrofilna

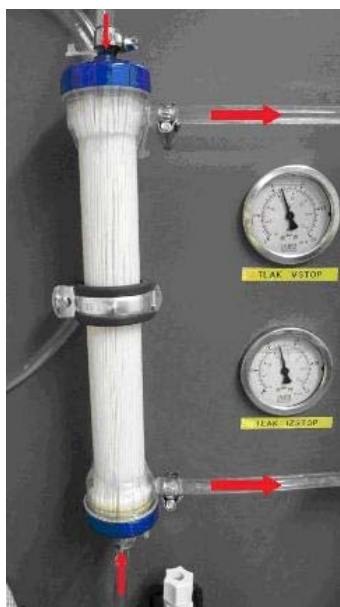
»se nadaljuje...«

»... nadaljevanje«

Maksimalni obratovalni fluks (ang. Maximum design flux)	60 – 160 L/(m <sup>2</sup> h)
Maksimalni vstopni tlak in maksimalni TMP	Maksimalni vstopni tlak 2 bar Maksimalni TMP = 1,5 bar
Obratovanje	Temperatura vode: 5 - 38 °C Razpon pH vrednosti: 2 - 13 Največja motnost surove vode: do 200 NTU
Kemijsko pranje	Z raztopino klorovodikove kisline (HCl) v koncentraciji 1000 ppm in pri pH vrednosti 2 Z raztopino natrijevega hidroksida (NaOH) v koncentraciji 500 ppm in pri pH vrednosti 12 Z raztopino natrijevega hipoklorita (NaOCl) v koncentraciji 500 ppm prostega klora

Modul ima PVC ohišje, ki pa ne prenese velikih tlakov, tako da nikoli nismo presegli vstopnega tlaka več kot 2 bar.

Filtracija poteka v smeri skozi modul, kot je označeno na Sliki 14. Spiranje membrane s filtrirano vodo poteka v obratni smeri, se pravi čez stranska iztoka noter v modul in zgoraj ter spodaj ven iz modula.



**Slika 14: Filtracija skozi modul**

Surova voda vstopa zgoraj in spodaj v modul in v notranjost votlih vlaken (Slika 15), kjer se filtrira na ven in odteka skozi stranska iztoka. Votla vlakna so na začetku in koncu modula zalita z epoksi smolo.



**Slika 15: Votla vlakna v modulu**



**Slika 16: Membrana testnega modula, povečana 250 x.**

Kot je zapisano v Tabeli 3, membrana je asimetrična. To pomeni da so na notranji strani manjše in na zunanji strani večje pore. Prerez membrane modula je na Sliki 16, povečana 250x.

## 7.2 Opis preizkusa

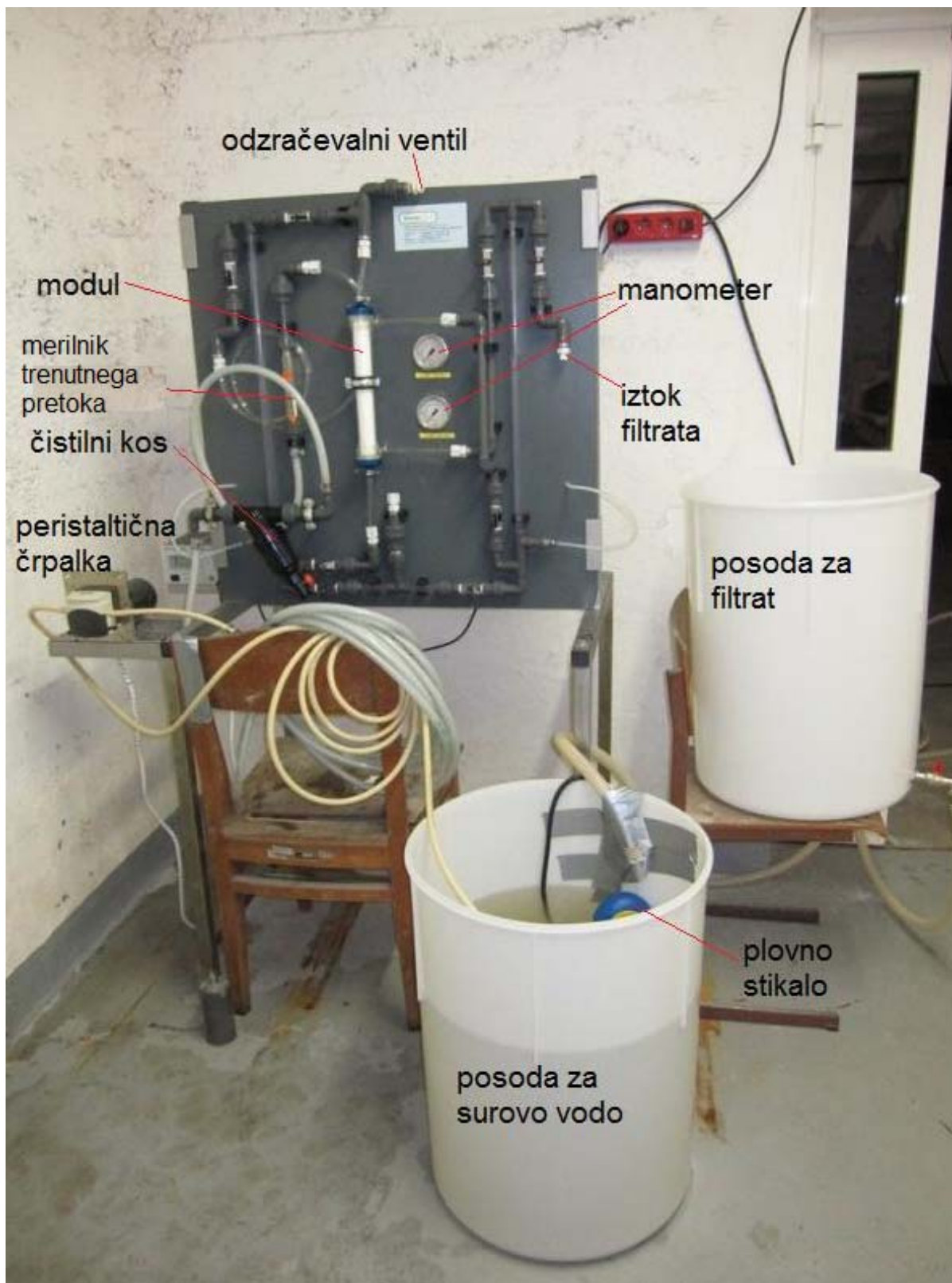
- Hidravlične komponente

Hidravlične komponente so iz PVC in PP materiala, ki je primeren za uporabo v živilski industriji, poleg tega pa ustrezajo delovnim pogojem, kar pomeni obratovanje pod tlakom.

- Predpriprava in predfiltracija:

Vodo smo črpali iz potoka Gradaščica s pomočjo potopne črpalke (M Tech) v 100-litrsko posodo. Dotok vode je bil reguliran s plovnim stikalom. Voda predhodno ni bila niti fizikalno niti kemijsko obdelana. Od tukaj smo vodo črpali s pomočjo peristaltične črpalke (Waston Marlow 313), v sistem. Pred modulom je bil nameščen čistilni kos, filter 0,1 mm, z namenom, da se svetli premer votlih vlaken v modulu ne zamaši. Praviloma mora biti delec manjši od 1/3 svetlega premera vlakna. Filtrat je iztekal v 100-litrsko posodo, namenjeno za filtrat.

- Sestavni deli sistema (prikazano na Sliki 17)



Slika 17: Sestavni deli sistema

- Delovanje

Poskus je trajal 6 tednov, medtem ko je filtracija potekala 25 ur in 44 minut. Filtracija ni potekala kontinuirano, saj odčitavanje in pranje membrane ni avtomatsko.

Meritve so obsegale 7 ciklov, med katerimi smo izvajali hidravlično pranje. Nato je sledilo kemijsko pranje. Nato smo ponovili 7 ciklov meritev, nato smo zopet izvedli kemijsko pranje. Po drugem kemijskem pranju smo zopet izvedli 7 ciklov meritev, med katerimi je potekalo hidravlično pranje. Skupaj je bilo izvedenih 21 ciklov in 2 kemijski pranja.

Poskus je bil načrtovan tako, da smo vsakič, ko smo začeli nov sklop meritev, izvedli kemijsko pranje membrane. V intervalih med meritvami, ko sistem ni deloval smo modul izplaknili in nato zapolnili s filtrirano vodo.

Zaradi sestave sistema (Slika 17), je potrebno pred hidravličnim pranjem prestaviti cevi, in nastaviti, tako da poteka pretok filtrata v obratni smeri kot filtracija.

Cikel nam predstavlja filtracijo med hidravličnimi pranja. Trajanje cikla je odvisno od sestave surove vode, oziroma od mašenja membrane. Glede na proizvajalčeva priporočila vrednosti  $TMP = 0,8$  ne smemo preseči, saj s tem lahko trajno zamašimo pore v membrani. Pri doseženi vrednosti  $TMP = 0,8$  pomeni, da moramo membrano hidravlično sprati.

Trajanje prvega cikla filtracije je bilo najdaljše in sicer 3 ure. Tega časa pri nobenem naslednjem ciklu nismo dosegli, saj je prej narasel  $TMP$  in smo morali izvesti hidravlično ali kemijsko pranje.

Pretok reguliramo s pomočjo peristaltične črpalke. V času preizkusa je sistem deloval z največjim pretokom 20 l/h v času po pranju membrane. Najmanjši pretok je bil 14,5 l/h in sicer, preden smo izvedli kemijsko pranje membrane. Povprečen pretok v času testiranja je bil 17,29 l/h.

Potek delovanja smo povzeli v Tabeli 4.

**Tabela 4: Delovanje preizkusa**

Trajanje testa [min]	1552
Povprečno trajanje filtracijskega ciklusa [min]	72
Število hidravličnih pranj	19
Število kemijskih pranj (KPP)	2
Povprečen pretok skozi modul [l/h]	17,29
Največji pretok [l/h]	20
Količina prefiltrirane vode [l]	447,53

## 7.3 Potek

### 7.3.1 Filtracija

Iz potoka načrpamo surovo vodo (Gradaščico) v posodo.

Delovanje modula se začne, ko vklopimo peristaltično črpalko, ki poganja surovo vodo iz posode v sistem. Ta potisne vodo skozi filter. Pred vstopom surove vode merimo tlak (prvi manometer). Voda se v modulu filtrira skozi votla vlakna, od znotraj-navzven, po metodi statične filtracije. Skozi izstopni cevi, kjer teče filtrat, merimo izstopni tlak (drugi manometer). Filtrat izteka v posodo.

Pri zagonu je potrebno sistem odzračiti.

### 7.3.2 Hidravlično pranje

Hidravlično pranje poteka v obratni smeri kot filtracija. Za spiranje uporabimo filtrat. Pred spiranjem izplaknemo cevi in jih prestavimo na položaj za hidravlično pranje. Pranje poteka protitočno, kar pomeni, da gre tok pri pranju v obratni smeri kot pri filtraciji, se pravi od zunaj – noter.

Spiranje poteka pri fluksu 180 do 200 l / (m<sup>2</sup> h) in traja 1 do 2 minuti.

Na Sliki 18 rdeče puščice označujejo vtok filtrirane vode pri hidravličnem spiranju. Zelene puščice označujejo iztok iz filtra.

Pri pranju se je videlo, da so se iz modula izprale odfiltrirane snovi, saj je bila na začetku spiranja voda obarvana.



**Slika 18: Sistem nastavljen za pranje**

### **7.3.3 Kemijsko pranje**

Pri kemijskem pranju poteka tok v isti smeri kot pri hidravličnem pranju in se s kratico imenuje KPP (ang. CEB, Chemically enhanced backwash). Kemijsko pranje poteka v dveh fazah.

Prvič izvedemo KPP 1 z raztopino klorovodikove kisline (HCl) v koncentraciji 1000 ppm in pri pH vrednosti 2. Nato sledi KPP 2 z raztopino natrijevega hidroksida (NaOH) v koncentraciji 500 ppm in pri pH vrednosti 12 in raztopino natrijevega hipoklorita (NaOCl) v koncentraciji 500 ppm prostega klora.

Namen kemijskega pranja je, da se raztopijo in odluščijo obloge (ang. cake formation), ki nastanejo na površini membrane. Kislina (KPP 1) služi za odstranjevanje mineralnih oblog, medtem ko natrijev hidroksid in natrijev hipoklorit (KPP 2) odstranita organske obloge in biofilm.



Sistem nastavimo enako kot za hidravlično pranje. Na Sliki 19 je z rdečo označena smer toka pri kemijskem pranju, z zeleno pa iztok iz modula. Vendar namesto filtrata tokrat črpamo v modul raztopino klorovodikove kisline oziroma raztopini natrijevega hidroksida in natrijevega hipoklorita. Ker smo rokovali z nevarnimi snovmi, smo pri kemijskem pranju uporabili zaščitno obleko, rokavice in zaščitna očala.

Vedno opravimo KPP 1 pred KPP 2.

KPP 1 poteka tako, da pripravimo raztopino in s pomočjo peristaltične črpalke načrpamo v modul. V modulu pustimo 10 minut, nato spiramo s filtrirano vodo.

Po pranju s kislino opravimo še KPP 2 za odstranjevanje biofilma. Lužnato raztopino prav tako pustimo v modulu 10 minut, nato spiramo s čisto vodo.

Nato speremo sistem s filtrirano vodo.

Vso odpadno vodo kemijskih pranj zbiramo posebej. Vodo kontroliramo z merjenjem pH vrednosti pri spiranju s filtrirano vodo, saj tako spremljamo, da v sistemu ni več ostankov kemikalij.

Po opravljenem kemijskem pranju in izpiranju prestavimo cevi in sistem pripravimo za filtracijo surove vode.

## 7.4 Meritve

### 7.4.1 Pretok in tlak

V času delovanja smo odčitavali pretok v modul s pomočjo merilnika trenutnega pretoka - rotametra  $Q$  [l/h] in pa vstopni in izstopni tlak na manometrih [bar]. Časovni korak je bil 2 minuti. Meritve in izračunani parametri so podani v Prilogi 1 diplomskega dela.

Upoštevali smo tehnična navodila proizvajalca, po katerih so priporočene vrednosti za  $TMP = 0,8$  bar in fluks  $J = 60 - 160$  L/(m<sup>2</sup> h).

Na podlagi izmerjenih podatkov smo izračunali  $TMP$ , fluks in prepustnost po enačbah (3 - 5) (EPA, 2005)

$$TMP = T_v - T_i \quad (3)$$

$TMP$ ...membranski tlak [bar]

$T_v$ ...vstopni tlak [bar]

$T_i$ ...izstopni tlak [bar]

Fluks je pretok na površino [m<sup>2</sup>] membrane in izračunamo po formuli, pri čemer je površina membrane znan podatek, 0,2 m<sup>2</sup>.

$$J = \frac{Q}{Am} \quad (4)$$

$J$ ...fluks [l/(h m<sup>2</sup>)]

$Q$ ...pretok [l/h]

$Am$ ...površina membrane [m<sup>2</sup>]

Prepustnost membrane se izračuna po formuli:

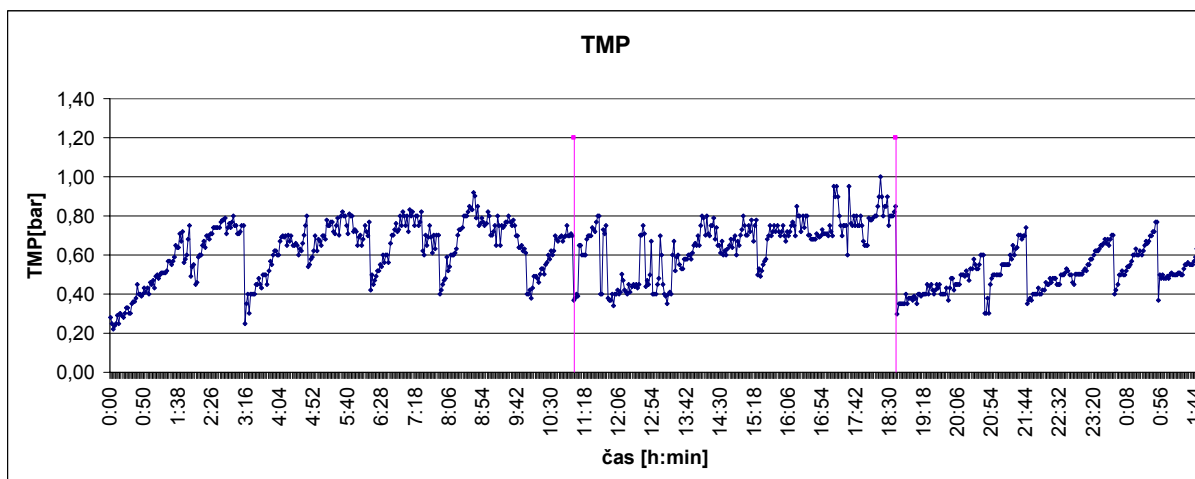
$$P = \frac{J}{TMP} \quad (5)$$

$P$ ...prepustnost membrane [l/(h m<sup>2</sup> bar)]

$J$ ...fluks [l/(h m<sup>2</sup>)]

TMP...membranski tlak [bar]

Na podlagi pretoka in tlakov smo videli, kdaj je bilo potrebno hidravlično ali kemijsko spirati membrano, oziroma kdaj je padla prepustnost. Vse parametre smo izrisali grafično po času.



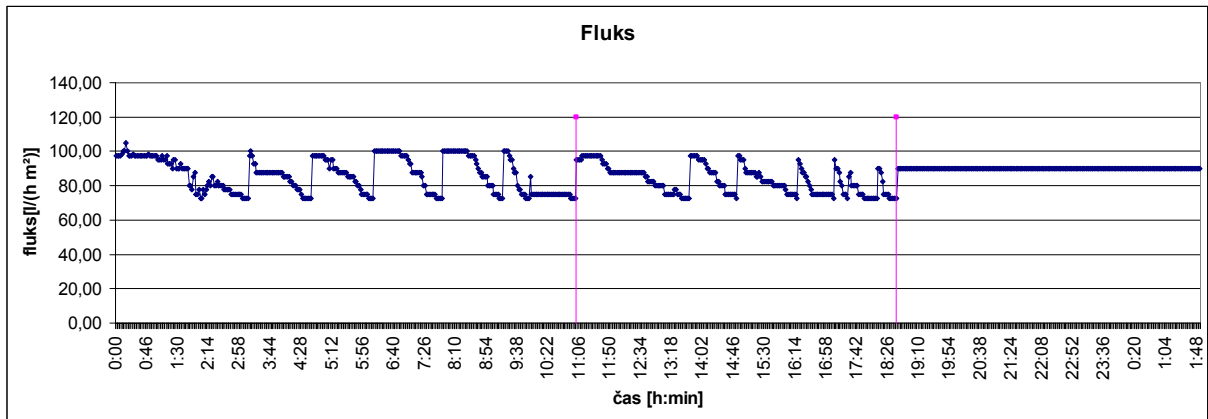
**Grafikon 1: TMP po času**

Na Grafikonu 1 vidimo, kako s časom TMP narašča, dokler ne doseže vrednosti 0,8 bar, ko moramo izvesti pranje. Ob začetku novega cikla TMP pade na okrog 0,4 bar in nato počasi narašča.

V prvi tretjini grafikona vidimo, da so TMP vrednosti hitro narasle in je bil cikel filtracije kratek. To si razlagamo s tem, da je bilo v vodi več delcev in mulja, zato je bilo potrebno pogosteje izvesti hidravlično pranje. Za kemijsko pranje smo se odločili takrat, ko s hidravličnim pranjem nismo uspeli regenerirati membrane. Pri času 11:03 smo prvič izvedli kemijsko pranje in znižali vrednost začetnih TMP, vendar pa ne na vrednosti nove membrane. Pri času 18:40 je bilo drugič izvedeno kemijsko pranje. Iz grafikona vidimo, da je bilo zelo učinkovito. Pri zadnjem kemijskem pranju je bilo vidno, da so se v modulu in ceveh naredile organske obloge. Ob kemijskem spiranju se je to videlo v odpadni vodi v obliki odlučene obloge. Po tem smo izvedli še 7 enakomernih ciklov, kar pomeni, da je vsak trajal 60 minut, ne glede na vrednost TMP po 60 minutah filtriranja. Pretok smo uravnavali s pomočjo peristaltične črpalke in ventilov na testni laboratorijski napravi.

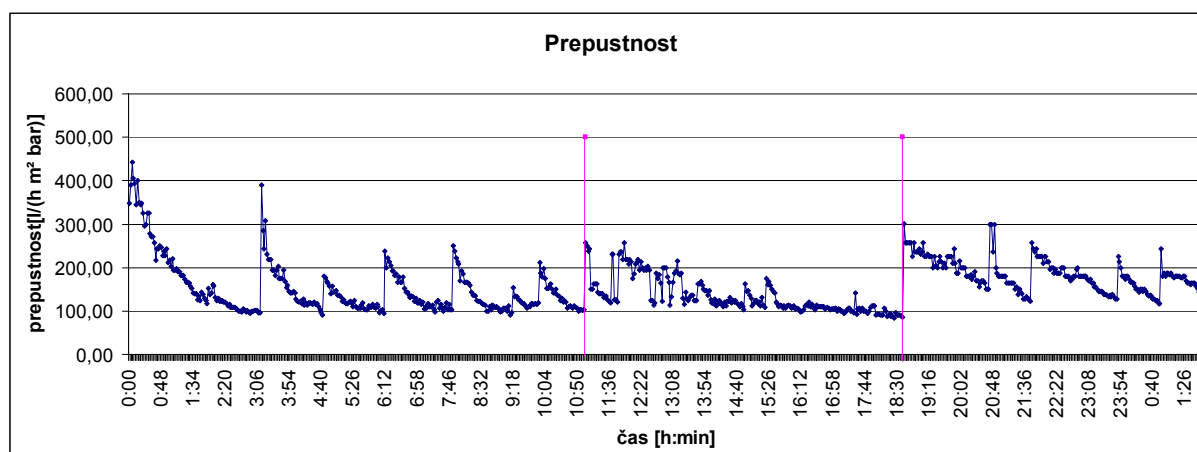
Najmanjša vrednost TMP je bila 0,25 bar, na začetku drugega cikla merjenja. To pomeni, da smo novo membrano prvič učinkovito hidravlično sprali. Maksimalna vrednost je bila 1 bar, s čimer smo presegli mejo 0,8 bar razlike. Vendar glede na specifikacije proizvajalca, s tem

nismo poškodovali membrane. Povprečna vrednost TMP skozi celoten poskus je bila 0,60 bar.



**Grafikon 2: Fluks po času**

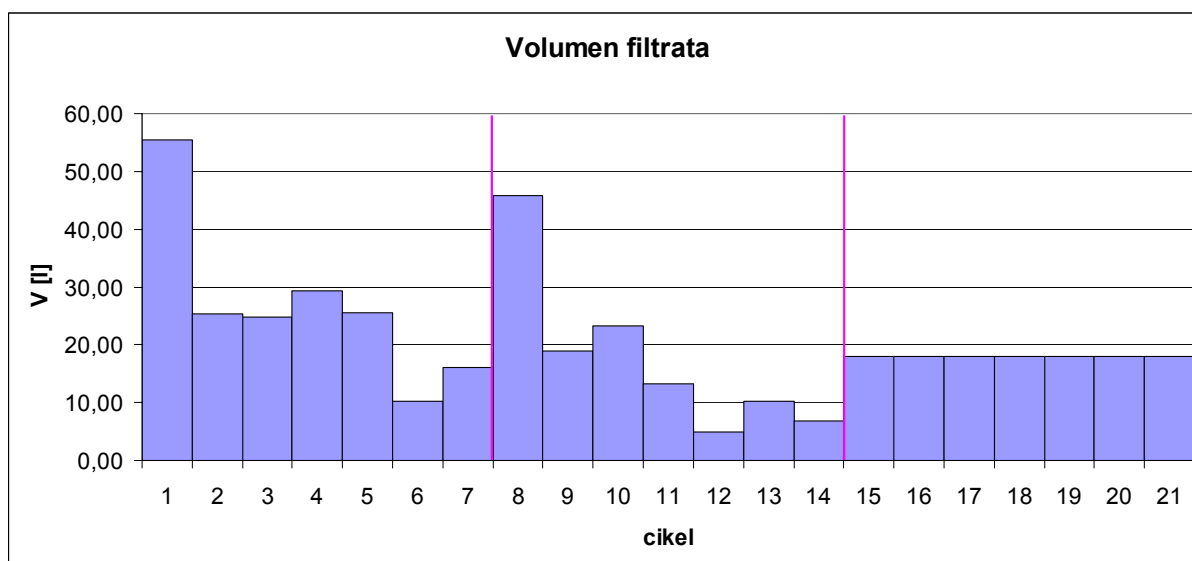
Fluks je odvisen od pretoka skozi modul. Na Grafikonu 2 fluksa po času vidimo, da je vrednost fluksa padala pri vsakem ciklu. Pri prvem ciklu se vidi, da je bila membrana nova (do 3:10h) oziroma je bilo pred 8 ciklom izvedeno kemijsko pranje. Pred drugim kemijskim pranjem je fluks hitro padal. V zadnji tretjini grafikona pa je fluks konstanten, zaradi spremenjenega načina merjenja. Merili smo samo glede na čas, se pravi, da je cikel trajal eno uro. Največji fluks je bil  $100 \text{ l}/(\text{h m}^2)$  in je bil dosežen na začetku vsakega novega cikla. Najmanjši fluks je  $72,50 \text{ l}/(\text{h m}^2)$  in je izračunan na koncu cikla, preden smo membrano hidravlično prali. Povprečen fluks je  $86,47 \text{ l}/(\text{h m}^2)$ . Proizvajalec navaja, da je vrednost fluksa med  $60$  in  $160 \text{ l}/(\text{h m}^2)$ .



**Grafikon 3: Prepustnost membrane po času**

Na Grafikonu 3 vidimo, kako je padala prepustnost membrane proti koncu vsakega cikla. Največja prepustnost je, ko je modul nov. V drugem ciklu po hidravličnem pranju nismo več dosegli začetne prepustnosti, in tudi pri nadaljnjih meritvah pada. Sklepamo, da smo po prvem pranju do neke mere nepovratno zamašili membrano. V drugi tretjini grafikona vrednosti niso tako izrazite kot v prvem in zadnjem delu. To lahko razložimo z oblaganjem membrane. Surova voda je bila v tem času zelene barve in organsko obremenjena. Ko smo hidravlično spirali, se je videlo organske obloge. Na membrani so se odložile snovi, ki jih s hidravličnim pranjem nismo uspeli odstraniti. Ker je bila voda biološko aktivna, sklepamo, da so se na membrani naredile organske obloge. Ko smo drugič kemijsko sprali modul, se je prepustnost zopet zvečala. V zadnji tretjini je voda vsebovala več organskih kot suspendiranih snovi, vendar pa smo uspeli s hidravličnimi prani sprati modul. Največja prepustnost je bila na začetku, ko je bil modul nov, se pravi 443,18 l/(h m<sup>2</sup> bar). Najmanjša prepustnost je bila 85,29 l/(h m<sup>2</sup> bar), ravno pred drugim kemijskim pranjem.

Na podlagi meritev smo tudi izračunali količino prefiltrirane vode [l] v vsakem ciklu, kar je prikazano na Grafikonu 4.



**Grafikon 4: Volumen prefiltrirane vode v ciklu filtracije**

V prvem ciklu, ko je bil modul nov, smo prefiltrirali največjo količino vode, 55,54 l, vendar pa je bil tudi čas cikla najdaljši v primerjavi z ostalimi. Vidimo, da se količina prefiltrirane vode z uporabo manjša, dokler ne opravimo kemijskega pranja. To se izrazito vidi pri 8 ciklu. Ko smo spremenili režim merjenja, to so cikli od 15 do 21 v zadnji tretjini, je bil volumen konstanten, saj sta bila izbrana konstanten pretok  $Q = 18$  l/h ter določen čas filtracije 1h. Tako smo v prvih 7 ciklih prefiltrirali skupaj 186 l vode, v naslednjih 7 ciklih 123 l vode, po drugem kemijskem pranju, ko smo imeli konstanten pretok in čas filtracije, pa 126 l vode.

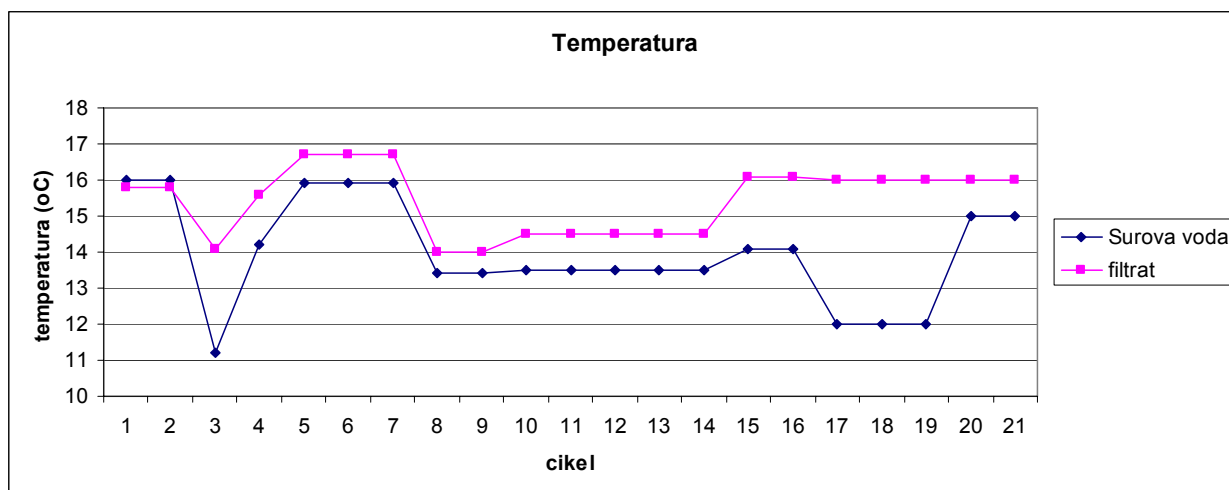
#### 7.4.2 Temperatura

Temperaturo smo merili z merilnikom proizvajalca Lovibond, tip MicroDirect. Temperaturo surove vode smo izmerili, ko smo vodo iz potoka Garadščica načrpali v posodo. Temperaturo filtrata smo izmerili prav tako v posodi, kamor se je iztekal filtrat.

Temperatura surove vode je vedno nižja kakor filtrata. Temperatura surove vode je odvisna od zunanje temperature ozračja in vremenskih razmer. Temperatura filtrata pa je bila vedno izmerjena za nekaj stopinj višja od temperature surove vode.

Razlog je, da je filtracija potekala v zaprtem in ogrevanem prostoru, voda je iztekala v posodo, kjer je bila manjša količina vode v primerjavi s količino surove vode. Tako se je

hitreje segrela. Ker pa smo imeli tudi surovo vodo nekaj časa v zaprtem prostoru, se je tudi ta segrevala, vendar smo morali surovo vodo dočrpavati. Primerjavo vidimo na Grafikonu 5.



**Grafikon 5: Primerjava temperature filtrata in surove vode**

Pri višji temperaturi surove vode je prepustnost membrane načeloma večja, saj je viskoznost vode manjša. Če pa je temperatura vzrok za izhajanje raztopljenega CO<sub>2</sub> iz vode in za pomik hidrogen-karbonatnega ravnotežja v smeri izločanja karbonatov v surovi vodi, lahko pričakujemo obratni pojav – da se z dvigom temperature prepustnost membrane niža.

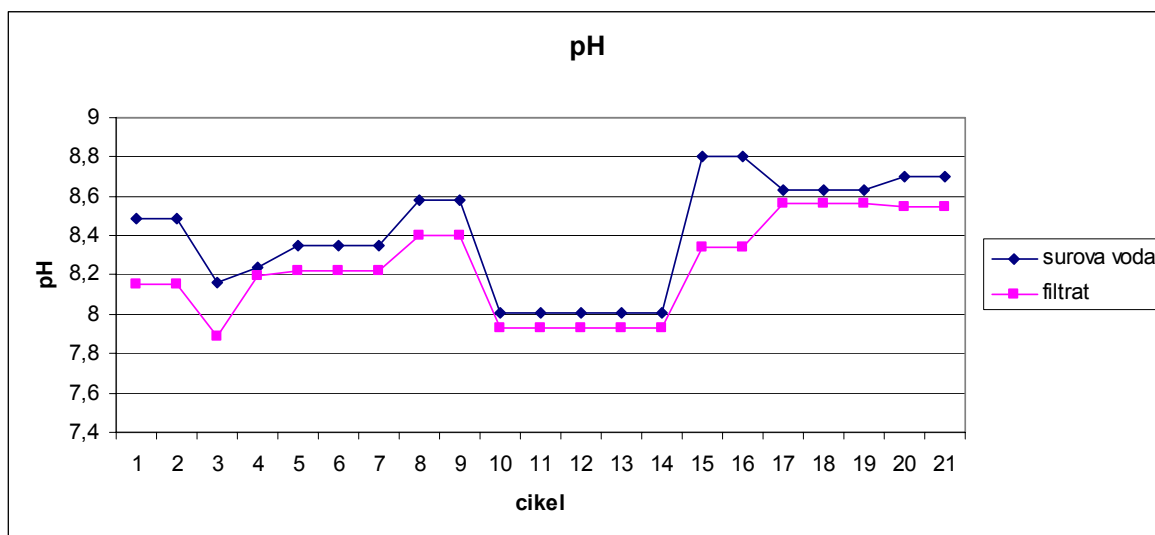
### 7.4.3 Vrednost pH

Vrednosti pH smo prav tako merili z merilnikom proizvajalca Lovibond, tip MicroDirect. Vrednosti pH surove vode so bile izmerjene vedno višje, kakor filtrata. pH se je tekom testiranja spreminjal tudi zaradi zunanjih vplivov in spremenljivosti surove vode. Izmerjen pH surove vode je bil vedno višji kakor pH v filtrirani vodi.

Višjo vrednost pH v surovi vodi, si lahko razlagamo tudi, da je v surovi vodi potekala fotosinteza in je bilo malo CO<sub>2</sub>. V prostoru, kjer smo izvajali test, pa se je v vodi CO<sub>2</sub> znova raztopil, in tako imamo nižjo vrednost pH v filtratu.

Vrednost pH v filtratu je bila nižjo tudi zato, ker se je voda filtrata pri iztoku in v posodi zaradi raztapljanja CO<sub>2</sub> iz zraka ozračila.

Vrednosti pH surove vode se gibljejo od 8 do 8,8. To pomeni, da je voda v naravi alkalna. S filtracijo se je pH vrednost v povprečju spremenila za 0,2. Povprečna vrednost pH filtrata znaša 8,2.



**Grafikon 6: Primerjava pH vrednosti filtrata in surove vode**

Na Grafikonu 6 vidimo veliko spremembo pri merjenju pH v 14 in 15 ciklu. To je lahko tudi posledica stanja merilne opreme, saj je to interval, po katerem je bilo potrebno umeriti elektrodo elektronskega merilnika.

#### 7.4.4 Skupne suspendirane snovi (TSS)

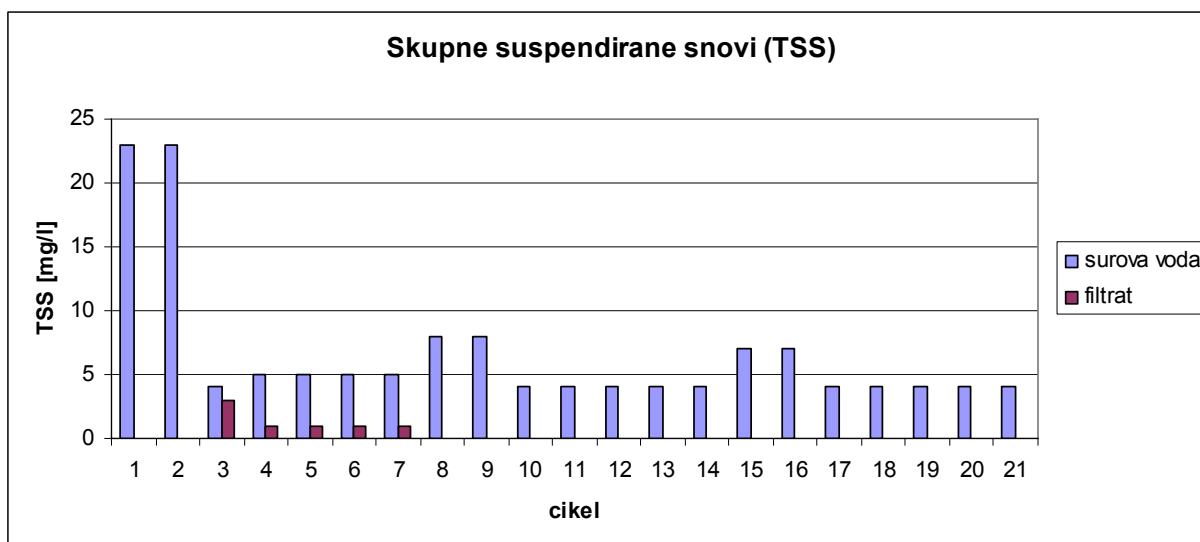
Vzorce za merjenje smo jemali iz posod. Merili smo s spektrofotometrom HACH-Lange, Dr 2800. Meritev poteka tako, da vzorce nalijemo v čiste kivete. Aparat vklopimo in ga umerimo z ničelnim vzorcem, demineralizirano vodo. Valovna dolžina pri merjenju je 810 nm. Nato vstavimo vzorec surove vode ter odčitamo. Enako naredimo z vzorcem filtrata. Aparat poda rezultate v [mg/l] skupnih suspendiranih snovi.

Skupnih suspendiranih snovi je bilo v surovi vodi na začetku več kakor proti koncu zaradi zunanjih vplivov. Od 3 do 7 cikla se tudi v filtratu pojavijo suspendirane snovi (Grafikon 7).



To je posledica starega vzorca, v katerem so se verjetno raztopljeni snovi oborile. Pri drugih meritvah so bile skupne suspendirane snovi v filtratu pod mejo detekcije.

Ultrafiltracijski modul popolnoma zadrži skupne suspendirane snovi, vendar so se zaradi procesov v vodi, ko je vzorec stal 12h, v našem primeru čez noč, raztopljeni snovi oborile.



**Grafikon 7: Primerjava TSS vrednosti filtrata in surove vode**

Odstranjevanje v primeru skupnih suspendiranih snovi po formuli (1) je bilo 100 % (Tabela 5), razen v primerih ciklov 3 do 7, ta odstopanja smo razložili že v prejšnjem odstavku.

**Tabela 5: Odstotek odstranitve skupnih suspendiranih snovi**

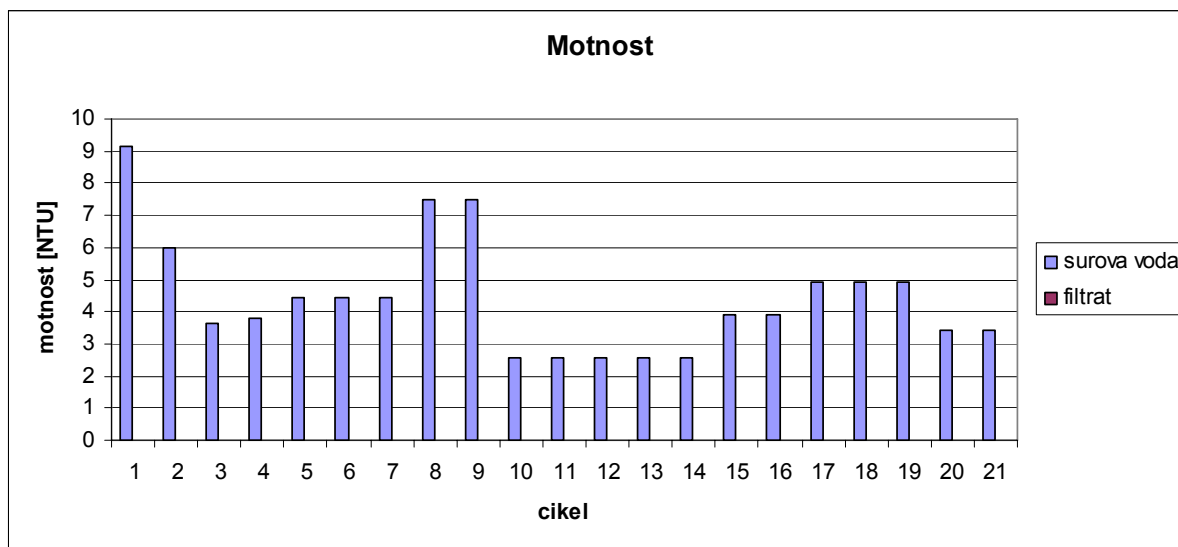
cikl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TSS <sub>nt</sub> [mg/l]	23	23	4	5	5	5	5	8	8	4
TSS <sub>f</sub> [mg/l]	0	0	3	1	1	1	1	0	0	0
R [%]	100	100	25	80	80	80	80	100	100	100

cikl	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
TSS <sub>nt</sub> [mg/l]	4	4	4	4	7	7	4	4	4	4	4
TSS <sub>f</sub> [mg/l]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R [%]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

#### 7.4.5 Motnost

Motnost smo merili vsak cikl oziroma vsakokrat, ko smo v posodo s surovo vodo načrpali svežo vodo iz Gradašnice. Motnost smo merili s turbidimetrom Lovibond TurbiDirect. Vzorec

vode smo zajeli v čisto kiveto in vstavili v aparat in odčitali motnost, za vzorec surove vode in filtrata. Vmes smo kiveto sprali z demineralizirano vodo. Enote za merjenje motnosti so [NTU].



**Grafikon 8: Primerjava motnosti filtrata in surove vode**

Pri meritvah motnosti lahko vidimo, da je bila surova voda v prvi tretjini bolj motna kakor kasneje (Grafikon 8). Kot smo že omenili, se je voda zelo spreminjala v času preizkusa, na začetku je bila voda že na pogleda bolj motna, rjava in je vsebovala veliko mulja.

Motnost v filtratu je bila pri vseh meritvah pod mejo detekcije oziroma manjša od 0,01 NTU.

Proizvajalec zagotavlja izstopne parametre motnosti pod 0,1 NTU.

Odstranjevanje v primeru motnosti [NTU] po formuli (1) je bilo blizu 100 % (Tabela 6), saj smo za motnost v filtratu vzeli vrednost 0,01 NTU.

**Tabela 6: Odstotek odstranitve motnosti**

cikel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
motnost-nt [NTU]	9,16	5,97	3,62	3,82	4,42	4,42	4,42	7,48	7,48	2,55
motnost-f [NTU]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
R [%]	99,89	99,83	99,83	99,74	99,77	99,77	99,77	99,87	99,87	99,61

cikel	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
motnost-nt [NTU]	2,55	2,55	2,55	2,55	3,93	3,93	4,93	4,93	4,93	3,42	3,42
motnost-f [NTU]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
R [%]	99,61	99,61	99,61	99,61	99,75	99,75	99,80	99,80	99,80	99,71	99,71

#### 7.4.6 Velikost delcev

Velikost delcev v surovi vodi smo izmerili z aparatom, t.i. Particle Sizer Analysette 22, proizvajalca Fritsch.

Karakteristike surove vode so se spreminjale v času preizkusa in je bilo največ delcev in mulja v vodi v prvi polovici merjenj, zato se te meritve nanašajo na prvih 10 ciklov. Kasneje surova voda ni več vsebovala količine suspendiranih delcev, ki bi bili primerni za odvzem vzorca.

Ker aparat zahteva vsaj 10 % koncentracijo delcev v vodi, smo prvih 10 ciklov merjenja zbirali vzorce. Na koncu smo vzorec koncentrirali, da smo dobili primeren vzorec za analizo.

Particle Sizer deluje skupaj s programsko opremo MaScontrol.

Aparat je priključen na vodovod, prav tako ima iztok za odpadno vodo. V Wet dispersion Unit nalijemo slepi vzorec s čisto vodo, da se aparat umeri. Ta meritev se imenuje Background. Nato dodamo vzorec, ki ga aparat sprva premeša in z ultrazvokom razbije delce, če se držijo skupaj. Nato izmeri delce.

Odčitek poda program v obliki krivulje porazdelitve velikosti delcev. V našem primeru smo merili delce velike med 0,08  $\mu\text{m}$  in 2000  $\mu\text{m}$ , kakor je programsko nastavljeno.

Program izriše grafikon, ki je podan v Prilogi 2. Na abcisi so podane vrednosti velikosti delcev  $d$  [ $\mu\text{m}$ ], na ordinati pa odstotek [%] delcev. 99,8 % delcev je manjših od 166  $\mu\text{m}$ . 50 % delcev je manjših od 22,8  $\mu\text{m}$ . Velikost povprečnega delca je 36,58  $\mu\text{m}$ .

V surovi vodi je bil prisoten pesek, ki predstavlja delce od 1000 do 2000  $\mu\text{m}$ . Glede na rezultat meritev lahko sklepamo, da je bilo največ finega peseka v velikosti od 30  $\mu\text{m}$  do 500  $\mu\text{m}$  in mulja, katerega velikost je približno od 3  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ . Delci gline so veliki od 0,1  $\mu\text{m}$  do 2,5  $\mu\text{m}$ .

### 7.5 Rezultati in ugotovitve

Merjeni parametri pri testnem UF modulu se skladajo s primerljivimi UF membranami, oziroma se skladajo s priporočili in smernicami proizvajalca (EPA, 2005 in Litree).

Ob izvajanju testa smo se držali navodil proizvajalca, če je bilo to mogoče. Do neke mere pa smo poenostavili postopek, ker nismo vključili v pranje komprimiranega zraka.

Glede na to, da voda ni bila sintetična, ampak smo za testiranje uporabili površinsko vodo, ki se je med izvajanjem testa spreminjala glede na zunanje razmere, lahko trdimo, da je bilo testiranje uspešno. Tudi na pogled je bila voda v posodi, kamor se je iztekal filtrat, videti čista.

Skupno je bilo prefiltriranih 447,5 l vode.

Temperatura filtrata je bila izmerjena višja, ker je test potekal v zaprtem in ogrevanem prostoru. V filtratu je bila izmerjena motnost vsakokrat pod mejo detekcije, oziroma manjša od 0,01 NTU. Skupni suspendirani delci so bili izmerjeni pod mejo detekcije, razen v primerih, ko vzorec ni bil izmerjen takoj. Iz tega lahko sklepamo, da so v vodi bile prisotne raztopljene snovi, ki so se oborile, medtem ko je vzorec stal – sklepamo na spremembo kemizma vode, oziroma vodo, ki ni v karbonatnem ravnotežju, ali pa prisotnost mikrobiološke aktivnosti.

Glede na izmerjene velikosti delcev v surovi vodi, smo ugotovili, da je bilo v vodi največ peska in mulja, ki pa je bil s filtracijo uspešno odstranjen. S predfiltracijo so bili odstranjeni delci do 0,1 mm in sicer s čistilnim kosom. Manjši delci so bili odstranjeni s ultrafiltracijskim modulom.

Zadovoljili smo tudi kriterij zakonodaje, ki priporoča pri pripravi površinske vode iz čistilne naprave vrednost motnosti 1 NTU. V našem primeru je bila izmerjena motnost v filtratu pri vseh meritvah pod mejo detekcije oziroma manjša od 0,01 NTU

Obnašanje membrane ocenimo glede na parametre, ki smo jih izračunali iz izmerjenih podatkov. Vrednost TMP ne smemo preseči, ampak se moramo držati navodil proizvajalca. Če TMP ni v okviru predpisanih vrednosti, lahko nepovratno zamašimo pore v membrani ali poškodujemo membrano, tako da se pretrga. V obeh primerih filtracija potem ni učinkovita. Tekom testiranja smo se držali predpisanih vrednosti.

Fluks se je spreminjal glede na pretok. V zadnji tretjini, ko smo spremenili režim merjenja in ko voda ni bila več tako obremenjena z delci, je fluks zaradi konstantnega pretoka konstanten. Za tak način merjenja smo se odločili na podlagi izkušenj v prvih dveh tretjinah. Glede na tlak in pretok, smo določili optimalni čas cikla filtracije, se pravi 60 minut. Na ta način pretok ni padal in tudi hidravlično pranje je bilo dokaj učinkovito. Res pa je, da je bila voda manj obremenjena z delci, kot na začetku testiranja. Optimalni čas filtracije, v našem primeru 60 minut, se sklada tudi s priporočili drugih proizvajalcev UF modulov (Norit, DOW...).

Prepustnost membrane je največja pri novem modulu. Kasneje je prepustnost odvisna, med drugim tudi od obremenjenosti vode. Zaradi spremenljivosti surove vode smo modul testirali tako na vodo, ki je vsebovala veliko mulja in delcev, kot na vodo, ki je bila obremenjena z organskimi snovmi. Tako, kot smo razložili pri fluksu, smo na podlagi izkušenj iz prvih dveh tretjin, v zadnji tretjini vzpostavili drugačen režim. Tako smo po 15 ciklu uspešno hidravlično sprali membrano, tako da smo skoraj vsakokrat do 21 cikla dosegli tako prepustnost, kot je bila pri 15 ciklu.

Življenjska doba modula naj bi bila 5 do 7 let. Vendar pa je to odvisno od načina obratovanja in obremenjenosti surove vode. Kot smo ugotovili iz testiranja, je potrebno ugotoviti optimalen čas cikla filtracije, se pravi čas med izvajanjem hidravličnega pranja. Na podlagi meritev določimo pogostost kemijskega pranja, tako da optimalno regeneriramo membrano. S pogostostjo kemijskih pranj se tudi krajša življenjska doba membrane.

Za testni UF modul ocenjujemo življenjsko dobo od nekaj tednov do nekaj mesecev, glede na kakovost surove vode, pogostost kemijskih pranj, kot tudi zaradi samih materialov in konfiguracije modula.

## 8 ZAKLJUČEK

V prvem delu naloge smo opisali teoretične osnove membranskih tehnologij, medtem ko smo v drugem delu opisali praktični poskus.

Testiranje modula, ki smo ga izvedli, je pripomoglo predvsem k spoznavanju filtracijske tehnologije in obnašanju testne laboratorijske naprave pri danih pogojih. Tukaj mislimo na uporabo modula in celotne pilotne naprave pri filtraciji s surovo vodo iz potoka Gradaščice.

V sklopu naloge smo merili določene parametre pri danih pogojih, pri čemer smo uporabljali merilne inštrumente.

Laboratorijska testna naprava s testnim ultrafiltracijskim modulom je primerna za uporabo, vendar smo v času testiranja naleteli tudi na nekatere tehnične težave in videli, da je še prostor za določene izboljšave.

Peristaltična črpalka, ki naj bi bila ustrezna, se je zaradi načina delovanja izkazala za neustrezno. Potrebovali bi črpalko s fleksibilno možnostjo nastavljanja pretokov in tlakov.

Za nadaljnjo uporabo bi lahko vzpostavili on-line merjenja pretokov, tlakov in temperature. Če bi merili kontinuirano in dlje časa, bi to pomenilo tudi prilagoditev pilotne naprave in avtomatizacijo hidravličnih pranj.

Na podlagi pridobljenih izkušenj lahko trdimo, da je treba upoštevati tako tehnične omejitve (armatura, peristaltična črpalka) kot tudi druge vplive, kot na primer spremenljivost surove vode glede na letni čas. Pomanjkljivosti sistema se mnogokrat pokažejo šele v praksi.

Laboratorijska testna naprava je primerna za ugotavljanje trendov pri izbrani surovi vodi, ko s takšno tehnologijo nimamo izkušenj. Poleg tega je primerna za prenašanje in montažo. Uporabna je v primeru ocenjevanja težavnosti surove vode, pred zasnovo sistema UF v dejanskem merilu. Na ta način ocenimo, ali bo ultrafiltracija primerna rešitev, kakšna bo dolžina cikla in kako pogosto bo potrebno hidravlično ali kemijsko pranje, ter vidimo, ali je filtrat zadovoljive kakovosti.

Vsekakor lahko na takšen način ugotovimo trende pri izbrani surovi vodi. V primerjavi s postavitvijo (pilotne) naprave v dejanski velikosti je to tudi cenovno ugodnejša rešitev.

V bodoče bi lahko preizkusili pilotno napravo tudi na drugih primerih surove vode, na primer na kraških vodah, in opazovali tako fizikalne kot mikrobiološke parametre.

Membranska tehnologija praviloma omogoča doseganje vedno zahtevnejših standardov kakovosti pripravljene vode, tudi brez neposrednega vnašanja dodatnih kemikalij, in tako predstavlja nepogrešljivo tehnološko rešitev pri pripravi vode. Nadaljnje raziskave potekajo predvsem v dveh smereh. Prva je razvijanje novih (nano)materialov membran, druga smer pa je kombiniranje postopkov filtracije. Tako se napredni postopki uporabe membran kažejo v nadaljnjih raziskavah v kombinaciji z drugimi procesi, na primer z naprednimi oksidacijskimi procesi (ozoniranjem). Ti so zelo učinkoviti pri odstranjevanju mikroonesnaževal (Bauman, 2010). Takšni postopki predstavljajo prispevek k varovanju okolja, saj v primerjavi s konvencionalnimi postopki priprave zmanjšujejo količino dodanih kemikalij.

## 9 VIRI

Arnal, J.M., Garcia-Fayos, B., Verdu, G., Lora, J. 2008. Ultrafiltration as an alternative membrane technology to obtain safe drinking water from surface water: 10 years of experience on scope of the AQUAPOT project. *Desalination* 248 (2009): 34–41.

Bauman, M., Pobrežnik, M., Košak, A., Roš, M., Lobnik, A. 2010. Membranske tehnologije. Vodni dnevi 2010.

[http://www.sdzv-drustvo.si/si/VD%2010%20Referati/vodni\\_dnevi\\_2010-referati.html](http://www.sdzv-drustvo.si/si/VD%2010%20Referati/vodni_dnevi_2010-referati.html)  
(pridobljeno 16. 5. 2011)

Baker, Richard W. 2000. *Membrane Technology and Applications*. Združene države Amerike, McGraw – Hill Companies: 514 str.

Bajec, A. (ur.), Hajnšek-Holz, M. (ur.), 1994. *Slovar slovenskega knjižnega jezika*. Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša, SAZU, DZS: 1714 str.

Bentama, J., Schmitz, P., Destrac, P., Espenan, J. M. 2004. Technological innovation for the production of drinking water by membrane processes. *Desalination* 168 (2004): 283–286.

Crittenden, J. (ur.), Rhodes Trussell, R. (ur.), Hand, D.W. (ur.), Howe, K.J. (ur.), Tchobanoglous, G. (ur.) 2005. *Water Treatment: Principles and Design – Second Edition*. Hoboken, New Jersey, Združene države Amerike, John Wiley and Sons, Montgomery Watson Harza: 1948 str.

Evroterm.2000.

<http://evroterm.gov.si> (20. 5. 2011).

Hammer J.M. 2004. *Water and Wastewater Technology*, fifth edition. New Jersey. Pearson Prentice Hall: 540 str.



Judd, S. (ur.), Judd, C. (ur.). 2011. The MBR Book, Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, Second Edition. Velika Britanija Butterworth-Heinemann for Elsevier, : 519 str.

Lipp, P., Baldauf, G., Schick, R., Elsenhans, K., Stabel. H.-H. 1998. Integration of ultrafiltration to conventional drinking water treatment for better particle removal – efficiency and costs? Desalination 119: 133–142.

Litree, Kitajska, tehnična dokumentacija, 2010.

Litree.

<http://www.litree.com/en/> ,(pridobljeno 20. 5. 2011).

Lenntech.

<http://www.lenntech.com/index.htm> (pridobljeno 20. 5. 2011).

Nakatsuka, S., Nakate I., Miyano T., 1995. Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membranes. Desalination 106: 55–61.

Norit.

<http://www.noritmt.com/> (pridobljeno 10. 5. 2011)

Nicolaisen, B., 2002. Developments in membrane technology for water treatment. Desalination 153: 355–360.

Panglisch, S., Holy, A., Urban, F., Dautzenberg, W., Sous, P., Ohligschlaeger, J., Gimbel, R., 2004. Transferring pilot experiments into planning of Germany's largest two-stage ultrafiltration plant. Desalination 179 (2005): 225–235.

Pravilnik o pitni vodi . Ur. list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09.

Pitna voda v Sloveniji.

<http://www.pitna-voda.si/> (pridobljeno 10. 5. 2011).

Rushton, A., Ward, A. S., Holdrich, R. G., 2000. Solid – Liquid Filtration and Separation Technology, Second Edition. Germany, Wiley-vch Verlag: 587 str.

Tahnofan.

<http://www.filtri-za-vodo.si/default.asp?mID=sl&pID=pomoc-pri-izbiri-filtra> (pridobljeno 10. 10. 2010).

United States Enviromental Protection Agency (EPA), Office of Water, 2005. Membrane Filtration Guidance Manual. Office of Water. 332 str.

[http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/lt2/pdfs/guide\\_lt2\\_membranefiltration\\_final.pdf](http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/lt2/pdfs/guide_lt2_membranefiltration_final.pdf) (pridobljeno 9. 6. 2011).

Vavtar, K. 2004. Čiščenje pesticidov iz pitne vode z reverzno osmozo. Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, vodarstvo in komunalno inženirstvo: 102 str.

Zakon o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov ter snovi, ki prihajajo v stik z živili (ZZUZIS). Ur. list RS, št. 52/2000, 42/2002, 47/2004.

World Health Organization.

<http://www.who.int/en/> (pridobljeno 20. 5. 2011).

Wikipediija.

<http://sl.wikipedia.org/wiki> (pridobljeno 20. 5. 2011).

Xu, Jian, Xu, Zhen-Liang. 2002. Poly (vinilchloride) (PVC) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared from PVC/additives/solvent. Journal of Membrane Science 208: 203–212.

Xia, S., Xing, L., Ruiping, L., Guibai, L. 2004. Pilot study of drinking water production with ultrafiltration of water from the Songhuajiang River (China). *Desalination* 179 (2005): 369–374.

## **PRILOGA A**

Opravljene meritve in izračuni TMP, fluksa in prepustnosti

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
0:00	1	19,50	1,38	1,10	0,28	97,50	348,21
0:02	2	19,50	1,35	1,10	0,25	97,50	390,00
0:04	3	19,50	1,31	1,09	0,22	97,50	443,18
0:06	4	19,50	1,30	1,06	0,24	97,50	406,25
0:08	5	19,70	1,42	1,17	0,25	98,50	394,00
0:10	6	20,00	1,50	1,21	0,29	100,00	344,83
0:12	7	20,00	1,55	1,30	0,25	100,00	400,00
0:14	8	21,00	1,70	1,40	0,30	105,00	350,00
0:16	9	20,00	1,50	1,21	0,29	100,00	344,83
0:18	10	19,50	1,30	1,02	0,28	97,50	348,21
0:22	12	19,50	1,35	1,05	0,30	97,50	325,00
0:24	13	19,50	1,45	1,12	0,33	97,50	295,45
0:26	14	19,70	1,55	1,22	0,33	98,50	298,48
0:28	15	19,50	1,49	1,19	0,30	97,50	325,00
0:30	16	19,50	1,35	1,05	0,30	97,50	325,00
0:32	17	19,50	1,40	1,05	0,35	97,50	278,57
0:34	18	19,50	1,38	1,02	0,36	97,50	270,83
0:36	19	19,50	1,39	1,03	0,36	97,50	270,83
0:38	20	19,50	1,50	1,12	0,38	97,50	256,58
0:40	21	19,50	1,45	1,00	0,45	97,50	216,67
0:42	22	19,50	1,35	0,95	0,40	97,50	243,75
0:44	23	19,50	1,49	1,09	0,40	97,50	243,75
0:46	24	19,50	1,39	1,00	0,39	97,50	250,00
0:48	25	19,70	1,45	1,05	0,40	98,50	246,25
0:50	26	19,50	1,48	1,05	0,43	97,50	226,74
0:52	27	19,50	1,50	1,09	0,41	97,50	237,80
0:54	28	19,50	1,48	1,05	0,43	97,50	226,74
0:56	29	19,50	1,40	1,00	0,40	97,50	243,75
0:58	30	19,50	1,48	1,02	0,46	97,50	211,96
1:00	31	19,50	1,45	1,00	0,45	97,50	216,67
1:02	32	19,00	1,47	1,00	0,47	95,00	202,13
1:04	33	19,00	1,41	0,98	0,43	95,00	220,93
1:06	34	19,00	1,50	1,01	0,49	95,00	193,88
1:08	35	19,50	1,60	1,10	0,50	97,50	195,00
1:10	36	19,00	1,48	1,00	0,48	95,00	197,92
1:12	37	19,00	1,50	1,00	0,50	95,00	190,00
1:14	38	19,50	1,51	1,00	0,51	97,50	191,18
1:16	39	18,50	1,51	1,00	0,51	92,50	181,37
1:18	40	18,50	1,51	1,00	0,51	92,50	181,37
1:20	41	18,50	1,51	1,00	0,51	92,50	181,37
1:22	42	18,00	1,50	0,98	0,52	90,00	173,08
1:24	43	19,00	1,55	0,98	0,57	95,00	166,67
1:26	44	19,00	1,55	0,98	0,57	95,00	166,67
1:28	45	18,00	1,52	0,97	0,55	90,00	163,64
1:30	46	18,00	1,53	0,96	0,57	90,00	157,89
1:32	47	18,00	1,55	0,96	0,59	90,00	152,54
1:34	48	18,50	1,65	1,00	0,65	92,50	142,31
1:36	49	18,00	1,62	0,98	0,64	90,00	140,63

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
1:38	50	18,00	1,59	0,95	0,64	90,00	140,63
1:40	51	18,00	1,69	0,98	0,71	90,00	126,76
1:42	52	18,00	1,62	0,95	0,67	90,00	134,33
1:44	53	18,00	1,72	1,00	0,72	90,00	125,00
1:46	54	16,00	1,31	0,75	0,56	80,00	142,86
1:48	55	16,00	1,20	0,62	0,58	80,00	137,93
1:50	56	15,50	1,30	0,70	0,60	77,50	129,17
1:52	57	17,00	1,48	0,80	0,68	85,00	125,00
1:54	58	17,50	1,65	0,90	0,75	87,50	116,67
1:56	59	15,00	1,08	0,59	0,49	75,00	153,06
1:58	60	15,00	1,13	0,59	0,54	75,00	138,89
2:00	61	15,50	1,15	0,60	0,55	77,50	140,91
2:02	62	14,50	0,95	0,50	0,45	72,50	161,11
2:04	63	14,50	0,95	0,49	0,46	72,50	157,61
2:06	64	15,50	1,19	0,60	0,59	77,50	131,36
2:08	65	15,00	1,20	0,60	0,60	75,00	125,00
2:10	66	15,50	1,20	0,60	0,60	77,50	129,17
2:12	67	16,00	1,30	0,65	0,65	80,00	123,08
2:14	68	16,50	1,33	0,66	0,67	82,50	123,13
2:16	69	16,00	1,33	0,69	0,64	80,00	125,00
2:18	70	17,00	1,39	0,69	0,70	85,00	121,43
2:20	71	17,00	1,39	0,69	0,70	85,00	121,43
2:22	72	16,00	1,37	0,69	0,68	80,00	117,65
2:24	73	16,00	1,40	0,69	0,71	80,00	112,68
2:26	74	16,50	1,40	0,69	0,71	82,50	116,20
2:28	75	16,00	1,43	0,69	0,74	80,00	108,11
2:30	76	16,00	1,43	0,69	0,74	80,00	108,11
2:32	77	16,00	1,43	0,69	0,74	80,00	108,11
2:34	78	16,00	1,43	0,69	0,74	80,00	108,11
2:36	79	15,50	1,42	0,68	0,74	77,50	104,73
2:38	80	15,50	1,42	0,65	0,77	77,50	100,65
2:40	81	15,50	1,42	0,64	0,78	77,50	99,36
2:42	82	15,50	1,41	0,63	0,78	77,50	99,36
2:44	83	15,50	1,40	0,61	0,79	77,50	98,10
2:46	84	15,00	1,26	0,55	0,71	75,00	105,63
2:48	85	15,00	1,29	0,55	0,74	75,00	101,35
2:50	86	15,00	1,31	0,55	0,76	75,00	98,68
2:52	87	15,00	1,25	0,51	0,74	75,00	101,35
2:54	88	15,00	1,29	0,52	0,77	75,00	97,40
2:56	89	15,00	1,30	0,50	0,80	75,00	93,75
2:58	90	15,00	1,25	0,50	0,75	75,00	100,00
3:00	91	15,00	1,25	0,50	0,75	75,00	100,00
3:02	92	14,50	1,19	0,48	0,71	72,50	102,11
3:04	93	14,50	1,20	0,49	0,71	72,50	102,11
3:06	94	14,50	1,20	0,48	0,72	72,50	100,69
3:08	95	14,50	1,21	0,46	0,75	72,50	96,67
3:10	96	14,50	1,23	0,48	0,75	72,50	96,67
3:14	98	19,50	1,50	1,25	0,25	97,50	390,00
3:16	99	20,00	1,65	1,30	0,35	100,00	285,71
3:18	100	19,50	1,65	1,25	0,40	97,50	243,75

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [ bar ]	Fluks [ l/h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [ l/h m <sup>2</sup> bar ]
3:20	101	18,50	1,75	1,45	0,30	92,50	308,33
3:22	102	18,50	1,80	1,40	0,40	92,50	231,25
3:24	103	17,50	1,60	1,20	0,40	87,50	218,75
3:26	104	17,50	1,50	1,10	0,40	87,50	218,75
3:28	105	17,50	1,50	1,10	0,40	87,50	218,75
3:30	106	17,50	1,65	1,20	0,45	87,50	194,44
3:32	107	17,50	1,63	1,18	0,45	87,50	194,44
3:34	108	17,50	1,60	1,12	0,48	87,50	182,29
3:36	109	17,50	1,65	1,20	0,45	87,50	194,44
3:38	110	17,50	1,62	1,19	0,43	87,50	203,49
3:40	111	17,50	1,70	1,20	0,50	87,50	175,00
3:42	112	17,50	1,70	1,20	0,50	87,50	175,00
3:44	113	17,50	1,65	1,15	0,50	87,50	175,00
3:46	114	17,50	1,75	1,30	0,45	87,50	194,44
3:48	115	17,50	1,72	1,20	0,52	87,50	168,27
3:50	116	17,50	1,70	1,13	0,57	87,50	153,51
3:52	117	17,50	1,70	1,15	0,55	87,50	159,09
3:54	118	17,50	1,80	1,20	0,60	87,50	145,83
3:56	119	17,50	1,82	1,20	0,62	87,50	141,13
3:58	120	17,50	1,72	1,10	0,62	87,50	141,13
4:00	121	17,50	1,65	1,05	0,60	87,50	145,83
4:02	122	17,00	1,70	1,10	0,60	85,00	141,67
4:04	123	17,00	1,70	1,03	0,67	85,00	126,87
4:06	124	17,00	1,72	1,03	0,69	85,00	123,19
4:08	125	17,00	1,75	1,05	0,70	85,00	121,43
4:10	126	17,00	1,72	1,03	0,69	85,00	123,19
4:12	127	16,50	1,70	1,00	0,70	82,50	117,86
4:14	128	16,50	1,55	0,90	0,65	82,50	126,92
4:16	129	16,00	1,60	0,90	0,70	80,00	114,29
4:18	130	16,00	1,62	0,95	0,67	80,00	119,40
4:20	131	16,00	1,65	0,95	0,70	80,00	114,29
4:22	132	15,50	1,40	0,75	0,65	77,50	119,23
4:24	133	15,50	1,40	0,75	0,65	77,50	119,23
4:26	134	15,50	1,42	0,76	0,66	77,50	117,42
4:28	135	15,00	1,40	0,75	0,65	75,00	115,38
4:30	136	14,50	1,28	0,68	0,60	72,50	120,83
4:32	137	14,50	1,28	0,65	0,63	72,50	115,08
4:34	138	14,50	1,30	0,68	0,62	72,50	116,94
4:36	139	14,50	1,35	0,69	0,66	72,50	109,85
4:38	140	14,50	1,32	0,62	0,70	72,50	103,57
4:40	141	14,50	1,40	0,65	0,75	72,50	96,67
4:42	142	14,50	1,45	0,65	0,80	72,50	90,63
4:44	143	19,50	1,24	0,70	0,54	97,50	180,56
4:46	144	19,50	1,30	0,75	0,55	97,50	177,27
4:48	145	19,50	1,30	0,72	0,58	97,50	168,10
4:50	146	19,50	1,31	0,72	0,59	97,50	165,25
4:52	147	19,50	1,35	0,73	0,62	97,50	157,26
4:54	148	19,50	1,40	0,70	0,70	97,50	139,29
4:56	149	19,50	1,32	0,70	0,62	97,50	157,26
4:58	150	19,50	1,40	0,72	0,68	97,50	143,38

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
5:00	151	19,50	1,40	0,73	0,67	97,50	145,52
5:02	152	19,00	1,30	0,65	0,65	95,00	146,15
5:04	153	19,00	1,40	0,70	0,70	95,00	135,71
5:06	154	19,00	1,40	0,70	0,70	95,00	135,71
5:08	155	18,00	1,30	0,62	0,68	90,00	132,35
5:10	156	19,00	1,43	0,65	0,78	95,00	121,79
5:12	157	19,00	1,40	0,65	0,75	95,00	126,67
5:14	158	18,00	1,43	0,68	0,75	90,00	120,00
5:16	159	18,00	1,45	0,68	0,77	90,00	116,88
5:18	160	18,00	1,45	0,68	0,77	90,00	116,88
5:20	161	17,50	1,30	0,58	0,72	87,50	121,53
5:22	162	17,50	1,30	0,59	0,71	87,50	123,24
5:24	163	17,50	1,30	0,55	0,75	87,50	116,67
5:26	164	17,50	1,38	0,59	0,79	87,50	110,76
5:28	165	17,50	1,30	0,60	0,70	87,50	125,00
5:30	166	17,50	1,35	0,55	0,80	87,50	109,38
5:32	167	17,50	1,38	0,56	0,82	87,50	106,71
5:34	168	17,00	1,30	0,50	0,80	85,00	106,25
5:36	169	17,00	1,30	0,50	0,80	85,00	106,25
5:38	170	17,00	1,25	0,50	0,75	85,00	113,33
5:40	171	17,00	1,20	0,49	0,71	85,00	119,72
5:42	172	17,00	1,31	0,50	0,81	85,00	104,94
5:44	173	16,50	1,30	0,50	0,80	82,50	103,13
5:46	174	16,50	1,30	0,50	0,80	82,50	103,13
5:48	175	16,00	1,15	0,43	0,72	80,00	111,11
5:50	176	16,00	1,18	0,45	0,73	80,00	109,59
5:52	177	15,50	1,15	0,43	0,72	77,50	107,64
5:54	178	15,00	1,05	0,40	0,65	75,00	115,38
5:56	179	15,00	1,09	0,40	0,69	75,00	108,70
5:58	180	15,00	1,10	0,40	0,70	75,00	107,14
6:00	181	15,00	1,00	0,35	0,65	75,00	115,38
6:02	182	15,00	1,06	0,38	0,68	75,00	110,29
6:04	183	14,50	1,10	0,35	0,75	72,50	96,67
6:06	184	14,50	1,10	0,38	0,72	72,50	100,69
6:08	185	14,50	0,90	0,20	0,70	72,50	103,57
6:10	186	14,50	0,98	0,21	0,77	72,50	94,16
6:12	187	20,00	1,40	0,98	0,42	100,00	238,10
6:14	188	20,00	1,40	0,90	0,50	100,00	200,00
6:16	189	20,00	1,40	0,95	0,45	100,00	222,22
6:18	190	20,00	1,35	0,88	0,47	100,00	212,77
6:20	191	20,00	1,42	0,93	0,49	100,00	204,08
6:22	192	20,00	1,42	0,90	0,52	100,00	192,31
6:24	193	20,00	1,40	0,88	0,52	100,00	192,31
6:26	194	20,00	1,40	0,85	0,55	100,00	181,82
6:28	195	20,00	1,42	0,88	0,54	100,00	185,19
6:30	196	20,00	1,50	0,90	0,60	100,00	166,67
6:32	197	20,00	1,45	0,89	0,56	100,00	178,57
6:34	198	20,00	1,50	0,90	0,60	100,00	166,67
6:36	199	20,00	1,50	0,90	0,60	100,00	166,67
6:38	200	20,00	1,51	0,95	0,56	100,00	178,57



URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
6:40	201	20,00	1,52	0,86	0,66	100,00	151,52
6:42	202	20,00	1,60	0,90	0,70	100,00	142,86
6:44	203	20,00	1,60	0,90	0,70	100,00	142,86
6:46	204	20,00	1,63	0,90	0,73	100,00	136,99
6:48	205	20,00	1,65	0,89	0,76	100,00	131,58
6:50	206	19,50	1,52	0,80	0,72	97,50	135,42
6:52	207	19,50	1,53	0,80	0,73	97,50	133,56
6:54	208	19,50	1,60	0,80	0,80	97,50	121,88
6:56	209	19,50	1,55	0,80	0,75	97,50	130,00
6:58	210	19,50	1,62	0,80	0,82	97,50	118,90
7:00	211	19,00	1,60	0,80	0,80	95,00	118,75
7:02	212	18,50	1,50	0,75	0,75	92,50	123,33
7:04	213	18,50	1,55	0,75	0,80	92,50	115,63
7:06	214	17,50	1,40	0,68	0,72	87,50	121,53
7:08	215	17,50	1,48	0,65	0,83	87,50	105,42
7:12	217	17,50	1,40	0,60	0,80	87,50	109,38
7:14	218	17,50	1,40	0,58	0,82	87,50	106,71
7:16	219	17,50	1,33	0,58	0,75	87,50	116,67
7:18	220	17,50	1,40	0,60	0,80	87,50	109,38
7:20	221	17,50	1,40	0,60	0,80	87,50	109,38
7:22	222	17,00	1,30	0,55	0,75	85,00	113,33
7:24	223	16,00	1,32	0,55	0,77	80,00	103,90
7:26	224	16,00	1,32	0,50	0,82	80,00	97,56
7:28	225	15,00	1,05	0,43	0,62	75,00	120,97
7:30	226	15,00	1,02	0,42	0,60	75,00	125,00
7:32	227	15,00	1,12	0,42	0,70	75,00	107,14
7:34	228	15,00	1,05	0,40	0,65	75,00	115,38
7:36	229	15,00	1,09	0,40	0,69	75,00	108,70
7:38	230	15,00	1,20	0,45	0,75	75,00	100,00
7:40	231	15,00	1,11	0,42	0,69	75,00	108,70
7:42	232	14,50	1,00	0,39	0,61	72,50	118,85
7:44	233	14,50	1,10	0,40	0,70	72,50	103,57
7:46	234	14,50	0,98	0,35	0,63	72,50	115,08
7:48	235	14,50	1,10	0,40	0,70	72,50	103,57
7:50	236	14,50	1,10	0,40	0,70	72,50	103,57
7:52	237	20,00	1,35	0,95	0,40	100,00	250,00
7:54	238	20,00	1,32	0,90	0,42	100,00	238,10
7:56	239	20,00	1,35	0,90	0,45	100,00	222,22
7:58	240	20,00	1,35	0,88	0,47	100,00	212,77
8:00	241	20,00	1,40	0,92	0,48	100,00	208,33
8:02	242	20,00	1,39	0,80	0,59	100,00	169,49
8:04	243	20,00	1,41	0,89	0,52	100,00	192,31
8:06	244	20,00	1,42	0,88	0,54	100,00	185,19
8:08	245	20,00	1,45	0,85	0,60	100,00	166,67
8:10	246	20,00	1,45	0,85	0,60	100,00	166,67
8:12	247	20,00	1,50	0,90	0,60	100,00	166,67
8:14	248	20,00	1,51	0,90	0,61	100,00	163,93
8:16	249	20,00	1,52	0,89	0,63	100,00	158,73
8:18	250	20,00	1,60	0,90	0,70	100,00	142,86
8:20	251	20,00	1,63	0,90	0,73	100,00	136,99

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
8:22	252	20,00	1,58	0,85	0,73	100,00	136,99
8:24	253	20,00	1,59	0,85	0,74	100,00	135,14
8:26	254	20,00	1,70	0,90	0,80	100,00	125,00
8:28	255	19,50	1,60	0,80	0,80	97,50	121,88
8:30	256	19,50	1,60	0,80	0,80	97,50	121,88
8:32	257	19,50	1,62	0,80	0,82	97,50	118,90
8:34	258	19,50	1,70	0,85	0,85	97,50	114,71
8:36	259	19,50	1,62	0,78	0,84	97,50	116,07
8:38	260	19,00	1,55	0,72	0,83	95,00	114,46
8:40	261	18,50	1,70	0,78	0,92	92,50	100,54
8:42	262	18,00	1,60	0,70	0,90	90,00	100,00
8:44	263	17,50	1,39	0,60	0,79	87,50	110,76
8:46	264	17,50	1,50	0,65	0,85	87,50	102,94
8:48	265	17,00	1,30	0,55	0,75	85,00	113,33
8:50	266	17,00	1,31	0,55	0,76	85,00	111,84
8:52	267	17,00	1,31	0,52	0,79	85,00	107,59
8:54	268	17,00	1,35	0,58	0,77	85,00	110,39
8:56	269	16,00	1,25	0,50	0,75	80,00	106,67
8:58	270	16,00	1,25	0,49	0,76	80,00	105,26
9:00	271	16,00	1,30	0,48	0,82	80,00	97,56
9:02	272	16,00	1,30	0,50	0,80	80,00	100,00
9:04	273	15,00	1,10	0,40	0,70	75,00	107,14
9:06	274	15,00	1,10	0,40	0,70	75,00	107,14
9:08	275	15,00	1,12	0,40	0,72	75,00	104,17
9:10	276	15,00	1,15	0,40	0,75	75,00	100,00
9:12	277	14,50	1,00	0,35	0,65	72,50	111,54
9:14	278	14,50	1,19	0,39	0,80	72,50	90,63
9:16	279	14,50	1,10	0,35	0,75	72,50	96,67
9:18	280	20,00	1,60	0,95	0,65	100,00	153,85
9:20	281	20,00	1,70	0,95	0,75	100,00	133,33
9:22	282	20,00	1,62	0,88	0,74	100,00	135,14
9:24	283	20,00	1,70	0,95	0,75	100,00	133,33
9:26	284	19,50	1,62	0,85	0,77	97,50	126,62
9:28	285	19,00	1,55	0,78	0,77	95,00	123,38
9:30	286	19,00	1,55	0,75	0,80	95,00	118,75
9:32	287	18,00	1,50	0,73	0,77	90,00	116,88
9:34	288	17,50	1,40	0,65	0,75	87,50	116,67
9:36	289	17,50	1,40	0,62	0,78	87,50	112,18
9:38	290	16,00	1,30	0,55	0,75	80,00	106,67
9:40	291	15,50	1,20	0,50	0,70	77,50	110,71
9:42	292	15,50	1,20	0,50	0,70	77,50	110,71
9:44	293	15,00	1,09	0,45	0,64	75,00	117,19
9:46	294	15,00	1,09	0,45	0,64	75,00	117,19
9:48	295	15,00	1,10	0,45	0,65	75,00	115,38
9:50	296	14,50	1,00	0,38	0,62	72,50	116,94
9:52	297	14,50	1,02	0,39	0,63	72,50	115,08
9:54	298	14,50	1,00	0,39	0,61	72,50	118,85
9:56	299	17,00	1,50	1,10	0,40	85,00	212,50
9:58	300	15,00	1,20	0,80	0,40	75,00	187,50
10:00	301	15,00	1,22	0,80	0,42	75,00	178,57

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
10:02	302	15,00	1,23	0,85	0,38	75,00	197,37
10:04	303	15,00	1,23	0,80	0,43	75,00	174,42
10:06	304	15,00	1,29	0,80	0,49	75,00	153,06
10:08	305	15,00	1,31	0,82	0,49	75,00	153,06
10:10	306	15,00	1,29	0,81	0,48	75,00	156,25
10:12	307	15,00	1,35	0,89	0,46	75,00	163,04
10:14	308	15,00	1,35	0,85	0,50	75,00	150,00
10:16	309	15,00	1,38	0,85	0,53	75,00	141,51
10:18	310	15,00	1,38	0,85	0,53	75,00	141,51
10:20	311	15,00	1,35	0,85	0,50	75,00	150,00
10:22	312	15,00	1,38	0,83	0,55	75,00	136,36
10:24	313	15,00	1,38	0,82	0,56	75,00	133,93
10:26	314	15,00	1,40	0,80	0,60	75,00	125,00
10:28	315	15,00	1,40	0,82	0,58	75,00	129,31
10:30	316	15,00	1,42	0,80	0,62	75,00	120,97
10:32	317	15,00	1,42	0,82	0,60	75,00	125,00
10:34	318	15,00	1,40	0,78	0,62	75,00	120,97
10:36	319	15,00	1,45	0,75	0,70	75,00	107,14
10:38	320	15,00	1,48	0,80	0,68	75,00	110,29
10:40	321	15,00	1,50	0,83	0,67	75,00	111,94
10:42	322	15,00	1,49	0,80	0,69	75,00	108,70
10:44	323	15,00	1,50	0,80	0,70	75,00	107,14
10:46	324	15,00	1,50	0,83	0,67	75,00	111,94
10:48	325	15,00	1,50	0,81	0,69	75,00	108,70
10:50	326	15,00	1,50	0,80	0,70	75,00	107,14
10:52	327	15,00	1,50	0,75	0,75	75,00	100,00
10:54	328	14,50	1,50	0,80	0,70	72,50	103,57
10:56	329	14,50	1,45	0,75	0,70	72,50	103,57
10:58	330	14,50	1,43	0,72	0,71	72,50	102,11
11:00	331	14,50	1,40	0,70	0,70	72,50	103,57
11:02	332	19,00	1,09	0,72	0,37	95,00	256,76
11:04	333	19,00	1,10	0,72	0,38	95,00	250,00
11:06	334	19,00	1,08	0,68	0,40	95,00	237,50
11:08	335	19,00	1,10	0,71	0,39	95,00	243,59
11:10	336	19,50	1,40	0,75	0,65	97,50	150,00
11:12	337	19,50	1,35	0,70	0,65	97,50	150,00
11:14	338	19,50	1,30	0,70	0,60	97,50	162,50
11:16	339	19,50	1,30	0,70	0,60	97,50	162,50
11:18	340	19,50	1,30	0,70	0,60	97,50	162,50
11:20	341	19,50	1,40	0,72	0,68	97,50	143,38
11:22	342	19,50	1,42	0,72	0,70	97,50	139,29
11:24	343	19,50	1,40	0,70	0,70	97,50	139,29
11:26	344	19,50	1,45	0,75	0,70	97,50	139,29
11:28	345	19,50	1,49	0,75	0,74	97,50	131,76
11:30	346	19,50	1,45	0,72	0,73	97,50	133,56
11:32	347	19,50	1,42	0,70	0,72	97,50	135,42
11:34	348	19,50	1,50	0,73	0,77	97,50	126,62
11:36	349	19,50	1,50	0,70	0,80	97,50	121,88
11:38	350	19,00	1,50	0,70	0,80	95,00	118,75
11:40	351	18,50	1,10	0,70	0,40	92,50	231,25

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
11:42	352	18,50	1,08	0,68	0,40	92,50	231,25
11:44	353	18,50	1,43	0,70	0,73	92,50	126,71
11:46	354	18,00	1,40	0,69	0,71	90,00	126,76
11:48	355	18,00	1,40	0,65	0,75	90,00	120,00
11:50	356	17,50	0,95	0,57	0,38	87,50	230,26
11:52	357	17,50	0,95	0,58	0,37	87,50	236,49
11:54	358	17,50	0,96	0,59	0,37	87,50	236,49
11:56	359	17,50	1,00	0,60	0,40	87,50	218,75
11:58	360	17,50	0,92	0,58	0,34	87,50	257,35
12:00	361	17,50	1,00	0,60	0,40	87,50	218,75
12:02	362	17,50	1,00	0,60	0,40	87,50	218,75
12:04	363	17,50	1,00	0,58	0,42	87,50	208,33
12:06	364	17,50	0,98	0,58	0,40	87,50	218,75
12:08	365	17,50	1,00	0,59	0,41	87,50	213,41
12:10	366	17,50	1,10	0,60	0,50	87,50	175,00
12:12	367	17,50	0,99	0,52	0,47	87,50	186,17
12:14	368	17,50	1,00	0,58	0,42	87,50	208,33
12:16	369	17,50	1,00	0,59	0,41	87,50	213,41
12:18	370	17,50	1,00	0,60	0,40	87,50	218,75
12:20	371	17,50	1,00	0,55	0,45	87,50	194,44
12:22	372	17,50	0,96	0,55	0,41	87,50	213,41
12:24	373	17,50	1,02	0,58	0,44	87,50	198,86
12:26	374	17,50	1,05	0,60	0,45	87,50	194,44
12:28	375	17,50	1,00	0,56	0,44	87,50	198,86
12:30	376	17,50	1,00	0,55	0,45	87,50	194,44
12:32	377	17,50	1,02	0,59	0,43	87,50	203,49
12:34	378	17,50	1,01	0,56	0,45	87,50	194,44
12:36	379	17,50	1,30	0,60	0,70	87,50	125,00
12:38	380	17,50	1,30	0,60	0,70	87,50	125,00
12:40	381	17,00	1,25	0,50	0,75	85,00	113,33
12:42	382	17,00	1,30	0,59	0,71	85,00	119,72
12:44	383	16,50	1,00	0,56	0,44	82,50	187,50
12:46	384	16,50	1,00	0,53	0,47	82,50	175,53
12:48	385	16,50	0,95	0,50	0,45	82,50	183,33
12:50	386	16,50	1,00	0,50	0,50	82,50	165,00
12:52	387	16,50	1,20	0,53	0,67	82,50	123,13
12:54	388	16,00	0,90	0,50	0,40	80,00	200,00
12:56	389	16,00	0,90	0,50	0,40	80,00	200,00
12:58	390	16,00	0,90	0,50	0,40	80,00	200,00
13:00	391	16,00	0,95	0,50	0,45	80,00	177,78
13:02	392	16,00	0,98	0,50	0,48	80,00	166,67
13:04	393	16,00	1,20	0,50	0,70	80,00	114,29
13:06	394	16,00	1,10	0,50	0,60	80,00	133,33
13:08	395	15,00	0,85	0,40	0,45	75,00	166,67
13:10	396	15,00	0,80	0,40	0,40	75,00	187,50
13:12	397	15,00	0,79	0,40	0,39	75,00	192,31
13:14	398	15,00	0,75	0,40	0,35	75,00	214,29
13:16	399	15,00	0,80	0,40	0,40	75,00	187,50
13:18	400	15,00	0,82	0,41	0,41	75,00	182,93
13:20	401	15,00	0,75	0,35	0,40	75,00	187,50

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
13:22	402	15,50	1,05	0,45	0,60	77,50	129,17
13:24	403	15,50	1,07	0,40	0,67	77,50	115,67
13:26	404	15,00	0,90	0,38	0,52	75,00	144,23
13:28	405	15,00	0,98	0,39	0,59	75,00	127,12
13:30	406	15,00	0,99	0,39	0,60	75,00	125,00
13:32	407	14,50	0,90	0,35	0,55	72,50	131,82
13:34	408	14,50	0,85	0,32	0,53	72,50	136,79
13:36	409	14,50	0,85	0,32	0,53	72,50	136,79
13:38	410	14,50	0,90	0,32	0,58	72,50	125,00
13:40	411	14,50	0,90	0,32	0,58	72,50	125,00
13:42	412	14,50	0,90	0,32	0,58	72,50	125,00
13:44	413	19,50	1,25	0,65	0,60	97,50	162,50
13:46	414	19,50	1,30	0,70	0,60	97,50	162,50
13:48	415	19,50	1,30	0,72	0,58	97,50	168,10
13:50	416	19,50	1,31	0,70	0,61	97,50	159,84
13:52	417	19,50	1,30	0,65	0,65	97,50	150,00
13:54	418	19,50	1,31	0,65	0,66	97,50	147,73
13:56	419	19,00	1,35	0,70	0,65	95,00	146,15
13:58	420	19,00	1,39	0,69	0,70	95,00	135,71
14:00	421	19,00	1,30	0,65	0,65	95,00	146,15
14:02	422	19,00	1,40	0,65	0,75	95,00	126,67
14:04	423	19,00	1,45	0,65	0,80	95,00	118,75
14:06	424	18,50	1,40	0,61	0,79	92,50	117,09
14:08	425	18,00	1,30	0,60	0,70	90,00	128,57
14:10	426	18,00	1,40	0,60	0,80	90,00	112,50
14:12	427	17,50	1,23	0,52	0,71	87,50	123,24
14:14	428	17,50	1,20	0,50	0,70	87,50	125,00
14:16	429	17,50	1,25	0,50	0,75	87,50	116,67
14:18	430	17,50	1,25	0,50	0,75	87,50	116,67
14:20	431	17,50	1,29	0,50	0,79	87,50	110,76
14:22	432	16,50	1,18	0,50	0,68	82,50	121,32
14:24	433	16,50	1,19	0,45	0,74	82,50	111,49
14:26	434	16,00	1,05	0,40	0,65	80,00	123,08
14:28	435	16,00	1,05	0,40	0,65	80,00	123,08
14:30	436	16,00	1,00	0,39	0,61	80,00	131,15
14:32	437	16,00	1,05	0,38	0,67	80,00	119,40
14:34	438	15,00	0,98	0,38	0,60	75,00	125,00
14:36	439	15,00	0,98	0,36	0,62	75,00	120,97
14:38	440	15,00	0,95	0,35	0,60	75,00	125,00
14:40	441	15,00	0,98	0,35	0,63	75,00	119,05
14:42	442	15,00	1,00	0,35	0,65	75,00	115,38
14:44	443	15,00	1,00	0,32	0,68	75,00	110,29
14:46	444	15,00	0,99	0,35	0,64	75,00	117,19
14:48	445	15,00	1,00	0,32	0,68	75,00	110,29
14:50	446	14,50	1,00	0,30	0,70	72,50	103,57
14:52	447	19,50	1,10	0,50	0,60	97,50	162,50
14:54	448	19,50	1,15	0,48	0,67	97,50	145,52
14:56	449	19,00	1,08	0,43	0,65	95,00	146,15
14:58	450	19,00	1,10	0,40	0,70	95,00	135,71
15:00	451	19,00	1,15	0,42	0,73	95,00	130,14

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
15:02	452	18,00	1,20	0,40	0,80	90,00	112,50
15:04	453	17,50	1,15	0,40	0,75	87,50	116,67
15:06	454	17,50	1,05	0,35	0,70	87,50	125,00
15:08	455	17,50	1,05	0,35	0,70	87,50	125,00
15:10	456	17,50	1,10	0,35	0,75	87,50	116,67
15:12	457	17,50	1,10	0,38	0,72	87,50	121,53
15:14	458	17,50	1,10	0,32	0,78	87,50	112,18
15:16	459	17,50	1,02	0,35	0,67	87,50	130,60
15:18	460	17,00	1,05	0,30	0,75	85,00	113,33
15:20	461	17,00	1,10	0,32	0,78	85,00	108,97
15:22	462	17,50	0,75	0,25	0,50	87,50	175,00
15:24	463	17,00	0,78	0,25	0,53	85,00	160,38
15:26	464	16,50	0,72	0,23	0,49	82,50	168,37
15:28	465	16,50	0,75	0,23	0,52	82,50	158,65
15:30	466	16,50	0,78	0,23	0,55	82,50	150,00
15:32	467	16,50	0,80	0,23	0,57	82,50	144,74
15:34	468	16,50	0,80	0,22	0,58	82,50	142,24
15:36	469	16,50	1,00	0,32	0,68	82,50	121,32
15:38	470	16,50	1,00	0,30	0,70	82,50	117,86
15:40	471	16,50	1,05	0,30	0,75	82,50	110,00
15:42	472	16,00	1,00	0,30	0,70	80,00	114,29
15:44	473	16,00	1,00	0,28	0,72	80,00	111,11
15:46	474	16,00	1,00	0,25	0,75	80,00	106,67
15:48	475	16,00	1,00	0,28	0,72	80,00	111,11
15:50	476	16,00	1,00	0,25	0,75	80,00	106,67
15:52	477	16,00	1,00	0,28	0,72	80,00	111,11
15:54	478	16,00	1,00	0,30	0,70	80,00	114,29
15:56	479	16,00	1,02	0,30	0,72	80,00	111,11
15:58	480	16,00	1,05	0,30	0,75	80,00	106,67
16:00	481	15,50	1,00	0,30	0,70	77,50	110,71
16:02	482	15,00	0,95	0,28	0,67	75,00	111,94
16:04	483	15,00	1,00	0,28	0,72	75,00	104,17
16:06	484	15,00	1,00	0,30	0,70	75,00	107,14
16:08	485	15,00	1,00	0,28	0,72	75,00	104,17
16:10	486	15,00	1,00	0,25	0,75	75,00	100,00
16:12	487	15,00	1,00	0,23	0,77	75,00	97,40
16:14	488	15,00	0,98	0,23	0,75	75,00	100,00
16:16	489	14,50	0,90	0,20	0,70	72,50	103,57
16:18	490	19,00	1,45	0,60	0,85	95,00	111,76
16:20	491	18,50	1,35	0,55	0,80	92,50	115,63
16:22	492	18,00	1,30	0,50	0,80	90,00	112,50
16:24	493	17,50	1,22	0,50	0,72	87,50	121,53
16:26	494	17,50	1,30	0,50	0,80	87,50	109,38
16:28	495	17,00	1,22	0,48	0,74	85,00	114,86
16:30	496	17,00	1,25	0,45	0,80	85,00	106,25
16:32	497	16,50	1,20	0,40	0,80	82,50	103,13
16:34	498	16,00	1,10	0,40	0,70	80,00	114,29
16:36	499	15,50	1,05	0,35	0,70	77,50	110,71
16:38	500	15,00	1,00	0,32	0,68	75,00	110,29
16:40	501	15,00	0,98	0,30	0,68	75,00	110,29

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
16:42	502	15,00	1,00	0,32	0,68	75,00	110,29
16:44	503	15,00	1,00	0,32	0,68	75,00	110,29
16:46	504	15,00	1,03	0,32	0,71	75,00	105,63
16:48	505	15,00	1,03	0,33	0,70	75,00	107,14
16:50	506	15,00	1,00	0,31	0,69	75,00	108,70
16:52	507	15,00	1,00	0,30	0,70	75,00	107,14
16:54	508	15,00	1,05	0,32	0,73	75,00	102,74
16:56	509	15,00	1,03	0,32	0,71	75,00	105,63
16:58	510	15,00	1,00	0,29	0,71	75,00	105,63
17:00	511	15,00	1,00	0,29	0,71	75,00	105,63
17:02	512	15,00	1,00	0,30	0,70	75,00	107,14
17:04	513	15,00	1,05	0,30	0,75	75,00	100,00
17:06	514	15,00	1,00	0,28	0,72	75,00	104,17
17:08	515	14,50	0,98	0,28	0,70	72,50	103,57
17:10	516	19,00	1,60	0,65	0,95	95,00	100,00
17:12	517	18,00	1,50	0,60	0,90	90,00	100,00
17:14	518	18,00	1,50	0,55	0,95	90,00	94,74
17:16	519	17,50	1,40	0,50	0,90	87,50	97,22
17:18	520	16,50	1,20	0,40	0,80	82,50	103,13
17:20	521	16,00	1,10	0,35	0,75	80,00	106,67
17:22	522	15,00	1,00	0,30	0,70	75,00	107,14
17:24	523	15,00	1,05	0,30	0,75	75,00	100,00
17:26	524	15,00	1,05	0,30	0,75	75,00	100,00
17:28	525	14,50	1,00	0,25	0,75	72,50	96,67
17:30	526	17,00	1,80	1,20	0,60	85,00	141,67
17:32	527	17,50	1,75	0,80	0,95	87,50	92,11
17:34	528	16,00	1,38	0,62	0,76	80,00	105,26
17:36	529	16,00	1,40	0,65	0,75	80,00	106,67
17:38	530	16,00	1,40	0,60	0,80	80,00	100,00
17:40	531	16,00	1,35	0,60	0,75	80,00	106,67
17:42	532	16,00	1,40	0,60	0,80	80,00	100,00
17:44	533	15,00	1,30	0,55	0,75	75,00	100,00
17:46	534	15,00	1,30	0,55	0,75	75,00	100,00
17:48	535	15,00	1,35	0,55	0,80	75,00	93,75
17:50	536	15,00	1,30	0,55	0,75	75,00	100,00
17:52	537	14,50	1,25	0,58	0,67	72,50	108,21
17:54	538	14,50	1,20	0,55	0,65	72,50	111,54
17:56	539	14,50	1,20	0,55	0,65	72,50	111,54
17:58	540	14,50	1,20	0,55	0,65	72,50	111,54
18:00	541	14,50	1,30	0,51	0,79	72,50	91,77
18:02	542	14,50	1,30	0,52	0,78	72,50	92,95
18:04	543	14,50	1,30	0,52	0,78	72,50	92,95
18:06	544	14,50	1,30	0,51	0,79	72,50	91,77
18:08	545	14,50	1,30	0,50	0,80	72,50	90,63
18:10	546	14,50	1,35	0,55	0,80	72,50	90,63
18:12	547	18,00	1,60	0,75	0,85	90,00	105,88
18:14	548	18,00	1,50	0,60	0,90	90,00	100,00
18:16	549	17,50	1,80	0,80	1,00	87,50	87,50
18:18	550	16,50	1,50	0,60	0,90	82,50	91,67
18:20	551	15,00	1,35	0,55	0,80	75,00	93,75

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
18:22	552	15,00	1,40	0,55	0,85	75,00	88,24
18:24	553	15,00	1,40	0,55	0,85	75,00	88,24
18:26	554	15,00	1,40	0,50	0,90	75,00	83,33
18:28	555	14,50	1,20	0,45	0,75	72,50	96,67
18:30	556	14,50	1,30	0,50	0,80	72,50	90,63
18:32	557	14,50	1,30	0,50	0,80	72,50	90,63
18:34	558	14,50	1,30	0,50	0,80	72,50	90,63
18:36	559	14,50	1,30	0,48	0,82	72,50	88,41
18:38	560	14,50	1,35	0,50	0,85	72,50	85,29
18:40	561	18,00	1,20	0,90	0,30	90,00	300,00
18:42	562	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
18:44	563	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
18:46	564	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
18:48	565	18,00	1,15	0,80	0,35	90,00	257,14
18:50	566	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
18:52	567	18,00	1,20	0,80	0,40	90,00	225,00
18:54	568	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
18:56	569	18,00	1,20	0,82	0,38	90,00	236,84
18:58	570	18,00	1,20	0,82	0,38	90,00	236,84
19:00	571	18,00	1,20	0,82	0,38	90,00	236,84
19:02	572	18,00	1,22	0,85	0,37	90,00	243,24
19:04	573	18,00	1,20	0,81	0,39	90,00	230,77
19:06	574	18,00	1,20	0,82	0,38	90,00	236,84
19:08	575	18,00	1,20	0,85	0,35	90,00	257,14
19:10	576	18,00	1,20	0,80	0,40	90,00	225,00
19:12	577	18,00	1,25	0,85	0,40	90,00	225,00
19:14	578	18,00	1,28	0,89	0,39	90,00	230,77
19:16	579	18,00	1,25	0,85	0,40	90,00	225,00
19:18	580	18,00	1,25	0,85	0,40	90,00	225,00
19:20	581	18,00	1,21	0,81	0,40	90,00	225,00
19:22	582	18,00	1,30	0,85	0,45	90,00	200,00
19:24	583	18,00	1,20	0,80	0,40	90,00	225,00
19:26	584	18,00	1,29	0,85	0,44	90,00	204,55
19:28	585	18,00	1,25	0,80	0,45	90,00	200,00
19:30	586	18,00	1,30	0,88	0,42	90,00	214,29
19:32	587	18,00	1,30	0,90	0,40	90,00	225,00
19:34	588	18,00	1,32	0,90	0,42	90,00	214,29
19:36	589	18,00	1,25	0,80	0,45	90,00	200,00
19:38	590	18,00	1,25	0,82	0,43	90,00	209,30
19:40	591	18,00	1,35	0,90	0,45	90,00	200,00
19:42	592	18,00	1,50	1,10	0,40	90,00	225,00
19:44	593	18,00	1,50	1,10	0,40	90,00	225,00
19:46	594	18,00	1,50	1,10	0,40	90,00	225,00
19:48	595	18,00	1,50	1,10	0,40	90,00	225,00
19:50	596	18,00	1,48	1,05	0,43	90,00	209,30
19:52	597	18,00	1,45	1,08	0,37	90,00	243,24
19:54	598	18,00	1,48	1,05	0,43	90,00	209,30
19:56	599	18,00	1,50	1,02	0,48	90,00	187,50
19:58	600	18,00	1,50	1,02	0,48	90,00	187,50
20:00	601	18,00	1,50	1,08	0,42	90,00	214,29



URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
20:02	602	18,00	1,50	1,05	0,45	90,00	200,00
20:04	603	18,00	1,50	1,05	0,45	90,00	200,00
20:06	604	18,00	1,50	1,05	0,45	90,00	200,00
20:08	605	18,00	1,45	1,00	0,45	90,00	200,00
20:10	606	18,00	1,50	1,00	0,50	90,00	180,00
20:12	607	18,00	1,50	1,00	0,50	90,00	180,00
20:14	608	18,00	1,55	1,05	0,50	90,00	180,00
20:16	609	18,00	1,52	1,03	0,49	90,00	183,67
20:18	610	18,00	1,55	1,03	0,52	90,00	173,08
20:20	611	18,00	1,50	1,00	0,50	90,00	180,00
20:22	612	18,00	1,55	1,08	0,47	90,00	191,49
20:24	613	18,00	1,55	1,02	0,53	90,00	169,81
20:26	614	18,00	1,55	1,02	0,53	90,00	169,81
20:28	615	18,00	1,60	1,02	0,58	90,00	155,17
20:30	616	18,00	1,60	1,05	0,55	90,00	163,64
20:32	617	18,00	1,58	1,05	0,53	90,00	169,81
20:34	618	18,00	1,58	1,05	0,53	90,00	169,81
20:36	619	18,00	1,60	1,05	0,55	90,00	163,64
20:38	620	18,00	1,60	1,00	0,60	90,00	150,00
20:40	621	18,00	1,60	1,00	0,60	90,00	150,00
20:42	622	18,00	1,60	1,00	0,60	90,00	150,00
20:44	623	18,00	1,70	1,40	0,30	90,00	300,00
20:46	624	18,00	1,70	1,40	0,30	90,00	300,00
20:48	625	18,00	1,68	1,30	0,38	90,00	236,84
20:52	627	18,00	1,65	1,20	0,45	90,00	200,00
20:54	628	18,00	1,68	1,20	0,48	90,00	187,50
20:56	629	18,00	1,65	1,18	0,47	90,00	191,49
20:58	630	18,00	1,65	1,15	0,50	90,00	180,00
21:00	631	18,00	1,70	1,20	0,50	90,00	180,00
21:02	632	18,00	1,70	1,20	0,50	90,00	180,00
21:04	633	18,00	1,65	1,15	0,50	90,00	180,00
21:06	634	18,00	1,70	1,20	0,50	90,00	180,00
21:08	635	18,00	1,70	1,20	0,50	90,00	180,00
21:10	636	18,00	1,70	1,15	0,55	90,00	163,64
21:12	637	18,00	1,70	1,15	0,55	90,00	163,64
21:14	638	18,00	1,70	1,15	0,55	90,00	163,64
21:16	639	18,00	1,70	1,15	0,55	90,00	163,64
21:18	640	18,00	1,75	1,20	0,55	90,00	163,64
21:20	641	18,00	1,75	1,20	0,55	90,00	163,64
21:22	642	18,00	1,80	1,20	0,60	90,00	150,00
21:24	643	18,00	1,78	1,20	0,58	90,00	155,17
21:26	644	18,00	1,85	1,20	0,65	90,00	138,46
21:28	645	18,00	1,80	1,20	0,60	90,00	150,00
21:30	646	18,00	1,78	1,15	0,63	90,00	142,86
21:32	647	18,00	1,82	1,18	0,64	90,00	140,63
21:34	648	18,00	1,85	1,15	0,70	90,00	128,57
21:36	649	18,00	1,85	1,15	0,70	90,00	128,57
21:38	650	18,00	1,88	1,20	0,68	90,00	132,35
21:40	651	18,00	1,90	1,20	0,70	90,00	128,57
21:42	652	18,00	1,90	1,20	0,70	90,00	128,57

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
21:44	653	18,00	1,95	1,21	0,74	90,00	121,62
21:46	654	18,00	1,70	1,35	0,35	90,00	257,14
21:48	655	18,00	1,75	1,38	0,37	90,00	243,24
21:50	656	18,00	1,78	1,40	0,38	90,00	236,84
21:52	657	18,00	1,75	1,38	0,37	90,00	243,24
21:54	658	18,00	1,75	1,35	0,40	90,00	225,00
21:56	659	18,00	1,75	1,35	0,40	90,00	225,00
21:58	660	18,00	1,78	1,38	0,40	90,00	225,00
22:00	661	18,00	1,75	1,35	0,40	90,00	225,00
22:02	662	18,00	1,78	1,35	0,43	90,00	209,30
22:04	663	18,00	1,80	1,40	0,40	90,00	225,00
22:06	664	18,00	1,75	1,35	0,40	90,00	225,00
22:08	665	18,00	1,80	1,38	0,42	90,00	214,29
22:10	666	18,00	1,80	1,38	0,42	90,00	214,29
22:12	667	18,00	1,78	1,32	0,46	90,00	195,65
22:14	668	18,00	1,80	1,35	0,45	90,00	200,00
22:16	669	18,00	1,80	1,35	0,45	90,00	200,00
22:18	670	18,00	1,78	1,30	0,48	90,00	187,50
22:20	671	18,00	1,78	1,32	0,46	90,00	195,65
22:22	672	18,00	1,78	1,30	0,48	90,00	187,50
22:24	673	18,00	1,80	1,32	0,48	90,00	187,50
22:26	674	18,00	1,80	1,32	0,48	90,00	187,50
22:28	675	18,00	1,80	1,35	0,45	90,00	200,00
22:30	676	18,00	1,85	1,40	0,45	90,00	200,00
22:32	677	18,00	1,85	1,40	0,45	90,00	200,00
22:34	678	18,00	1,80	1,30	0,50	90,00	180,00
22:36	679	18,00	1,82	1,32	0,50	90,00	180,00
22:38	680	18,00	1,80	1,30	0,50	90,00	180,00
22:40	681	18,00	1,83	1,32	0,51	90,00	176,47
22:42	682	18,00	1,85	1,32	0,53	90,00	169,81
22:44	683	18,00	1,90	1,38	0,52	90,00	173,08
22:46	684	18,00	1,90	1,40	0,50	90,00	180,00
22:48	685	18,00	1,15	0,65	0,50	90,00	180,00
22:50	686	18,00	1,08	0,62	0,46	90,00	195,65
22:52	687	18,00	1,10	0,65	0,45	90,00	200,00
22:54	688	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
22:56	689	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
22:58	690	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
23:00	691	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
23:02	692	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
23:04	693	18,00	1,10	0,60	0,50	90,00	180,00
23:06	694	18,00	1,12	0,60	0,52	90,00	173,08
23:08	695	18,00	1,15	0,62	0,53	90,00	169,81
23:10	696	18,00	1,15	0,63	0,52	90,00	173,08
23:12	697	18,00	1,15	0,60	0,55	90,00	163,64
23:14	698	18,00	1,20	0,65	0,55	90,00	163,64
23:16	699	18,00	1,20	0,62	0,58	90,00	155,17
23:18	700	18,00	1,20	0,62	0,58	90,00	155,17
23:20	701	18,00	1,20	0,60	0,60	90,00	150,00
23:22	702	18,00	1,22	0,60	0,62	90,00	145,16

URA	MERITEV	Q [ l/h ]	Tv [ bar ]	Ti [ bar ]	TMP [bar]	Fluks [l/ h m <sup>2</sup> ]	Prepustnost [l/ h m <sup>2</sup> bar]
23:24	703	18,00	1,22	0,60	0,62	90,00	145,16
23:26	704	18,00	1,22	0,60	0,62	90,00	145,16
23:28	705	18,00	1,25	0,62	0,63	90,00	142,86
23:30	706	18,00	1,25	0,60	0,65	90,00	138,46
23:32	707	18,00	1,25	0,60	0,65	90,00	138,46
23:34	708	18,00	1,28	0,62	0,66	90,00	136,36
23:36	709	18,00	1,30	0,62	0,68	90,00	132,35
23:38	710	18,00	1,28	0,62	0,66	90,00	136,36
23:40	711	18,00	1,28	0,60	0,68	90,00	132,35
23:42	712	18,00	1,25	0,60	0,65	90,00	138,46
23:44	713	18,00	1,30	0,62	0,68	90,00	132,35
23:46	714	18,00	1,30	0,60	0,70	90,00	128,57
23:48	715	18,00	1,30	0,60	0,70	90,00	128,57
23:50	716	18,00	1,10	0,70	0,40	90,00	225,00
23:52	717	18,00	1,10	0,68	0,42	90,00	214,29
23:54	718	18,00	1,10	0,65	0,45	90,00	200,00
23:56	719	18,00	1,20	0,70	0,50	90,00	180,00
23:58	720	18,00	1,15	0,65	0,50	90,00	180,00
0:00	721	18,00	1,15	0,63	0,52	90,00	173,08
0:02	722	18,00	1,15	0,65	0,50	90,00	180,00
0:04	723	18,00	1,15	0,65	0,50	90,00	180,00
0:06	724	18,00	1,20	0,68	0,52	90,00	173,08
0:08	725	18,00	1,22	0,68	0,54	90,00	166,67
0:10	726	18,00	1,20	0,66	0,54	90,00	166,67
0:12	727	18,00	1,20	0,65	0,55	90,00	163,64
0:14	728	18,00	1,25	0,68	0,57	90,00	157,89
0:16	729	18,00	1,25	0,65	0,60	90,00	150,00
0:18	730	18,00	1,25	0,65	0,60	90,00	150,00
0:20	731	18,00	1,28	0,65	0,63	90,00	142,86
0:22	732	18,00	1,28	0,68	0,60	90,00	150,00
0:24	733	18,00	1,30	0,70	0,60	90,00	150,00
0:26	734	18,00	1,30	0,68	0,62	90,00	145,16
0:28	735	18,00	1,30	0,70	0,60	90,00	150,00
0:30	736	18,00	1,30	0,68	0,62	90,00	145,16
0:32	737	18,00	1,30	0,65	0,65	90,00	138,46
0:34	738	18,00	1,35	0,68	0,67	90,00	134,33
0:36	739	18,00	1,35	0,69	0,66	90,00	136,36
0:38	740	18,00	1,35	0,68	0,67	90,00	134,33
0:40	741	18,00	1,40	0,70	0,70	90,00	128,57
0:42	742	18,00	1,40	0,70	0,70	90,00	128,57
0:44	743	18,00	1,42	0,70	0,72	90,00	125,00
0:46	744	18,00	1,40	0,68	0,72	90,00	125,00
0:48	745	18,00	1,45	0,68	0,77	90,00	116,88
0:50	746	18,00	1,45	0,68	0,77	90,00	116,88
0:52	747	18,00	0,85	0,48	0,37	90,00	243,24
0:54	748	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
0:56	749	18,00	0,98	0,50	0,48	90,00	187,50
0:58	750	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:00	751	18,00	0,98	0,50	0,48	90,00	187,50
1:02	752	18,00	0,98	0,50	0,48	90,00	187,50

<b>URA</b>	<b>MERITEV</b>	<b>Q [ l/h ]</b>	<b>Tv [ bar ]</b>	<b>Ti [ bar ]</b>	<b>TMP [bar]</b>	<b>Fluks [l/ h m<sup>2</sup>]</b>	<b>Prepustnost [l/ h m<sup>2</sup> bar]</b>
1:04	753	18,00	1,00	0,51	0,49	90,00	183,67
1:06	754	18,00	0,98	0,50	0,48	90,00	187,50
1:08	755	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:10	756	18,00	1,02	0,51	0,51	90,00	176,47
1:12	757	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:14	758	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:16	759	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:18	760	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:20	761	18,00	1,02	0,51	0,51	90,00	176,47
1:22	762	18,00	1,02	0,51	0,51	90,00	176,47
1:24	763	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:26	764	18,00	1,00	0,50	0,50	90,00	180,00
1:28	765	18,00	1,05	0,52	0,53	90,00	169,81
1:30	766	18,00	1,05	0,50	0,55	90,00	163,64
1:32	767	18,00	1,05	0,50	0,55	90,00	163,64
1:34	768	18,00	1,08	0,52	0,56	90,00	160,71
1:36	769	18,00	1,10	0,55	0,55	90,00	163,64
1:38	770	18,00	1,10	0,55	0,55	90,00	163,64
1:40	771	18,00	1,10	0,55	0,55	90,00	163,64
1:42	772	18,00	1,12	0,55	0,57	90,00	157,89
1:44	773	18,00	1,12	0,53	0,59	90,00	152,54
1:46	774	18,00	1,15	0,52	0,63	90,00	142,86
1:48	775	18,00	1,15	0,53	0,62	90,00	145,16
1:50	776	18,00	1,18	0,55	0,63	90,00	142,86
1:52	777	18,00	1,15	0,52	0,63	90,00	142,86

## **PRILOGA B**

Izpis iz programa MaS control

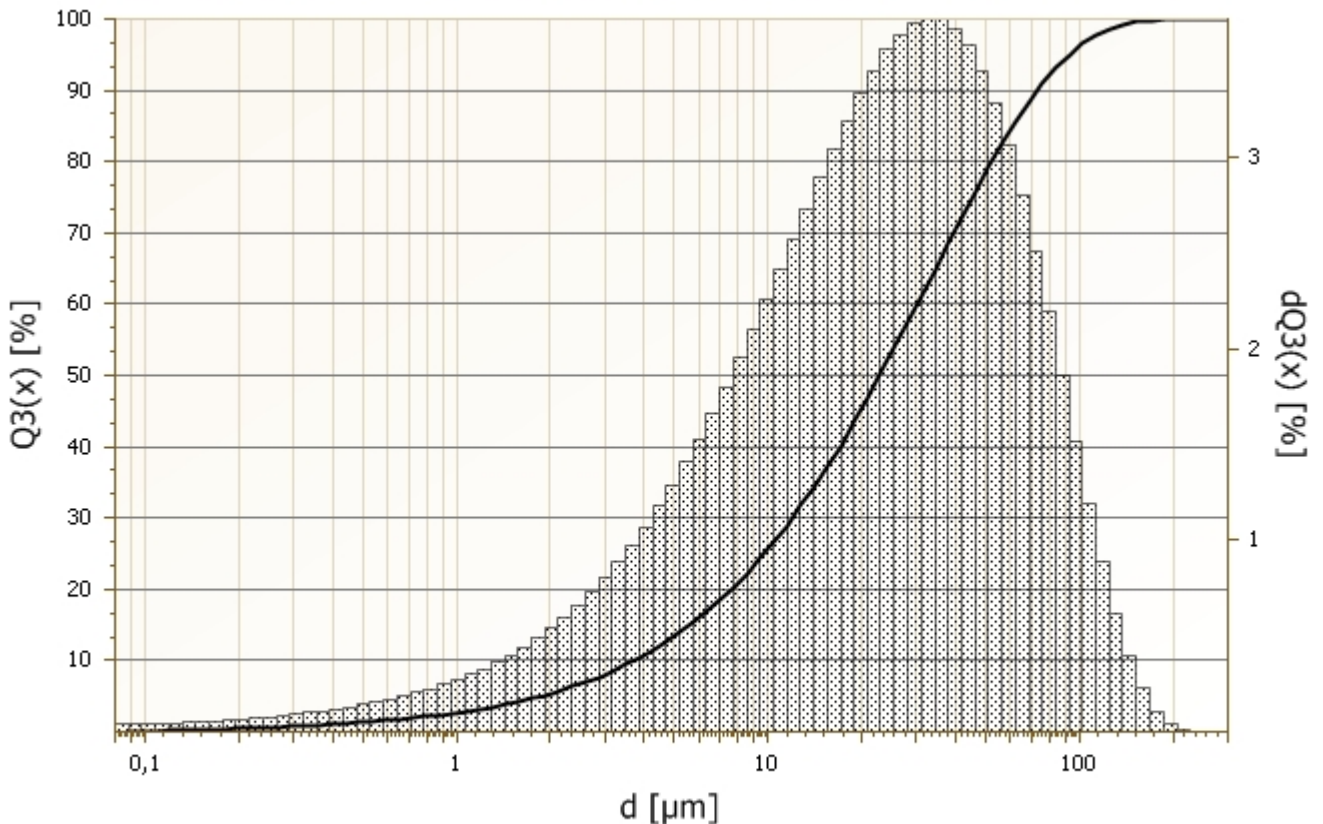
# ANALYSETTE 22 MicroTec plus

Meas.Nr. 76 Date četrtek, 12 maj 2011 11:09

Material

Add. Info

Calculation Fraunhofer TradeOff automatic (75857,8)  
 Scans Fine 100 Scans Coarse 100 Channels 102 Beam Obscuration 87,00 %  
 Meas. Range 0,08 [µm] - 2000,00 [µm] Pump 7 Ultrasonics 10



▲ 76 dQ3(x) — 76 Q3(x)

Mode 36,58 µm

Span (d90-d10)/d50 3,04

D[4,3] 31,9 µm

Size	Freq
0,1	0,1
0,3	0,6
0,7	1,9
1,7	4,6
4,5	12,1
12	30,1
30	59,8
66	87,2
100	96,1
166	99,8
250	100
400	100
500	100

Freq	Size
10	3,7
50	22,8
90	73,3