

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Dokl, A., 2013. Priprava pitne vode iz površinske z uporabo ultrafiltracije in reverzne osmoze. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kompare, B., somentor Bašič, S.): 80 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Dokl, A., 2013. Priprava pitne vode iz površinske z uporabo ultrafiltracije in reverzne osmoze. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kompare, B., co-supervisor Bašič, S.): 80 pp.

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA**

Kandidatka:

ANJA DOKL

**PRIPRAVA PITNE VODE IZ POVRŠINSKE Z UPORABO
ULTRAFILTRACIJE IN REVERZNE OSMOZE**

Diplomska naloga št.: 214/VKI

**DRINKING WATER PREPARATION FROM SURFACE
WATER BY ULTRAFILTRATION AND REVERSE
OSMOSIS**

Graduation thesis No.: 214/VKI

Mentor:

prof. dr. Boris Kompare

Somentor:

dr. Sani Bašič, univ.dipl.inž.str.

Predsednik komisije:

doc. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 25. 10. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Anja Dokl, izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Priprava pitne vode iz površinske z uporabo ultrafiltracije in reverzne osmoze«.

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

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

Ljubljana, 01. 10. 2013

Anja Dokl

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFIKONSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	628.1.033(497.4)(043.2)
Avtor:	Anja Dokl
Mentor:	prof. dr. Boris Kompare
Somentor:	dr. Sani Bašič
Naslov:	Priprava pitne vode iz površinske z uporabo ultrafiltracije in reverzne osmoze
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	80 str., 18 pregl., 32 graf., 34 sl., 7 pril., 6 en.
Ključne besede:	ultrafiltracija, reverzna osmoza, pitna voda, membranska pilotna naprava, površinski vir, obratovalni pogoji, učinek čiščenja

Izvleček

Za pripravo pitne vode se v Sloveniji najpogosteje uporabljajo konvencionalni postopki. Zaradi potrebe po zagotavljanju nemotene dobave in kakovosti pitne vode je vedno večje zanimanje za napredne in učinkovite membranske postopke. V eksperimentu, ki smo ga izvedli za potrebe diplomske naloge, smo testirali membransko pilotno napravo z ultrafiltracijo in reverzno osmozo. Ob tem smo spremljali glavne obratovalne pogoje pilotne naprave in merili fizikalno-kemijske parametre v prečiščeni vodi. Za potrebe pridobivanja pitne vode smo uporabili surovo vodo iz treh različnih površinskih virov: Šoštanjskega jezera, Škalskega jezera in reke Pake. Kakovost vstopne in izstopne vode pilotne naprave smo v nadaljevanju primerjali z izmerjenimi vrednostmi izbranih parametrov z zakonsko predpisanimi mejnimi vrednostmi za pitno vodo. Iz rezultatov meritev smo izračunali učinke čiščenja oziroma zadržke ultrafiltracije, reverzne osmoze in celotne pilotne naprave.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK:	628.1.033(497.4)(043.2)
Author:	Anja Dokl
Supervisor:	Prof. Boris Kompare, Ph.D.
Cosupervisor:	Sani Bašič, Ph.D.
Title:	Drinking water preparation from surface water by ultrafiltration and reverse osmosis
Document type:	Graduation Thesis - University studies
Notes:	80 p., 18 tab., 32 graph., 34 fig., 7 ann., 6 eq.
Key words:	ultrafiltration, reverse osmosis, drinking water, membrane pilot plant, surface source, operating conditions, rejection efficiency

Abstract

In Slovenia the most commonly used method for preparation drinking water are conventional proceedings. The raising need for stable supply of high quality water calls for a growing interest in advanced and efficient membrane processes. In the experiment, which was carried out for the purpose of this thesis, we tested the membrane pilot plant using the processes of ultrafiltration and reverse osmosis. During an ongoing test we simultaneously monitored the main operating conditions of the pilot plant and measured physico-chemical parameters in purified water. For the purposes of preparation drinking water, we used the raw water from three different surface sources: lake Šoštanj, lake Škale and river Paka. The quality of inlet and outlet water of pilot plant was then determined with the comparison of measured values (selected parameters) to the legally prescribed limits for drinking water. The results of our measurements were a foundation for calculating the particular effects of cleansing achieved by ultrafiltration, reverse osmosis and the pilot plant as a whole.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Borisu Komparetu za vodenje in strokovne nasvete pri izdelavi diplomskega dela. Posebna zahvala gre somentorju dr. Saniju Bašiču, ki me je od samega začetka podpiral, motiviral in vodil pri delu ter pisanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se podjetju Esotech, d. d., da so mi omogočili uporabo membranske pilotne naprave in vsem zaposlenim, ki so me podpirali ali pa mi kakorkoli pomagali pri testiranjih. Zahvaljujem se Robertu Hudourniku za možnost sodelovanja na razvojnem projektu v okviru podjetja RCE. Prav tako hvala tistim zaposlenim na RCE, ki so mi pomagali in me podpirali pri delu.

Mateju Čehovinu iz podjetja MAK CMC, d. o. o., sem hvaležna za pomoč, koristne nasvete in ideje, ki so mi zelo pomagale pri spoznavanju membranske pilotne naprave.

Laborantu Renatu Babiču, se zahvaljujem za uvajanje v samostojno delo v laboratoriju in za vse nasvete.

Hvala Davidu za pomoč pri dolgih testiranjih in podporo, ko je bilo najbolj naporno. Hvala družini in prijateljem za spodbudne besede, podporo in potrpežljivost. Zahvala gre tudi Petri Cerjak za pomoč pri lektoriranju diplomske naloge.

Mamici pa se še posebej zahvaljujem, da mi je omogočila super študij.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PRIPRAVA PITNE VODE IZ POVRŠINSKE	3
2.1	Zakonodaja in predpisi.....	4
2.1.1	Kakovost površinskih virov.....	4
2.1.2	Kakovost pitne vode.....	6
2.2	Opis in določanje merjenih parametrov v pitni vodi.....	6
2.2.1	Temperatura.....	7
2.2.2	Električna prevodnost.....	7
2.2.3	Vrednost pH.....	7
2.2.4	Motnost.....	8
2.2.5	Skupna trdota.....	9
2.2.6	TOC.....	9
2.2.7	KPK.....	10
2.2.8	Barva.....	10
2.2.9	Amonij.....	11
2.2.10	Nitrat.....	11
2.2.11	Nitrit.....	12
2.2.12	Klorid.....	12
2.2.13	Sulfat.....	12
2.2.14	Skupne suspendirane snovi (TSS).....	12
2.2.15	Mangan.....	13
2.2.16	Ortofosfat.....	13
2.2.17	Bakterije E. coli.....	14
2.2.18	Skupne koliformne bakterije.....	14
2.3	Izbrani površinski viri v okolici Velenja.....	14
2.4	Membranska tehnologija.....	15

2.4.1	Ultrafiltracija	18
2.4.2	Reverzna osmoza	19
2.4.3	Uporaba ultrafiltracije in reverzne osmoze pri pripravi pitne vode	21
3	MEMBRANSKA PILOTNA NAPRAVA	24
3.1	Sestavni deli membranske pilotne naprave	24
3.2	Opis membranske pilotne naprave	27
3.2.1	Opis delovanja procesnega sklopa čiščenja z UF	28
3.2.1.1	Hidravlično pranje UF modula	29
3.2.1.2	Dodajanje kemikalij	30
3.2.1.3	Merilna oprema na UF	33
3.2.2	Čiščenje filtrata UF na RO	34
3.2.2.1	Dodajanje kemikalij	36
3.2.2.2	Merilna oprema na RO	36
3.2.3	Upravljanje membranske pilotne naprave	37
3.3	Predpriprave na eksperiment	38
3.4	Potek eksperimenta/ opis preizkusa	41
3.5	Opis testiranja membranske pilotne naprave z UF in RO	43
3.5.1	Čas testiranja membranske pilotne naprave	43
3.5.2	Obratovalni pogoji	43
3.5.3	Odčitki in meritve	44
3.5.4	Odvzem vzorcev vode	45
3.5.5	Merilna oprema za merjenje parametrov v vodi na terenu	46
3.5.6	Postopki in princip meritev splošnih fizikalno-kemijskih parametrov v vodi	47
3.6	Analitika vode v laboratoriju	47
4	REZULTATI IN UGOTOVITVE	48
4.1	Delovanje membranske pilotne naprave	48
4.1.1	Kakovost površinskega vira	48

4.1.2	Ultrafiltracija	49
4.1.2.1	Pretok	49
4.1.2.2	Fluks filtrata UF	50
4.1.2.3	Transmembranski tlaki (TMP) UF	51
4.1.2.4	Količine procesne vode	52
4.1.2.5	Temperatura	53
4.1.2.6	Prevodnost	54
4.1.2.7	pH vrednost	55
4.1.2.8	Motnost	56
4.1.3	Reverzna osmoza	57
4.1.3.1	Pretoki	57
4.1.3.2	Tlaki	59
4.1.3.3	Količine procesne vode	60
4.1.3.4	Temperatura	61
4.1.3.5	Prevodnost	62
4.1.3.6	pH vrednost	62
4.1.3.7	Motnost	63
4.2	Učinek čiščenja membranske pilotne naprave	64
4.2.1	Prevodnost	64
4.2.2	pH vrednost	65
4.2.3	Motnost	65
4.2.4	Temperatura	66
4.2.5	Skupna trdota	66
4.2.6	TOC	67
4.2.7	Barva	68
4.2.8	TSS	69
4.2.9	Amonij	69
4.2.10	Nitrat	70
4.2.11	Nitrit	71

4.2.12	Klorid.....	72
4.2.13	Sulfat.....	72
4.2.14	Mangan.....	73
4.2.15	KPK.....	73
4.2.16	Ortofosfat.....	74
4.2.17	Bakterije.....	75
5	ZAKLJUČEK.....	76
VIRI.....		78

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: pH medij glede na koncentracijo hidroksidnih in oksonijevih ionov (Lobnik, 2008: str. 10)	8
Preglednica 2: Primerjava lastnosti različnih membranskih procesov (Čarman, 2007: str. 110).....	16
Preglednica 3: Splošne podatki membranskih modulov (IAEA, 2004: str. 29)	17
Preglednica 4: Prednosti in slabosti ultrafiltracije (Roš, Zupančič, 2010: str. 177).....	19
Preglednica 5: Prednosti in slabosti reverzne osmoze (Roš, Zupančič, 2010: str. 180).....	21
Preglednica 6: Primerjava med membransko filtracijo in reverzno osmozo (Prošek, 2011: str. 21) ...	22
Preglednica 7: Karakteristike in pogoji obratovanja modula z UF membrano	25
Preglednica 8: Karakteristike in pogoji obratovanja naprave s postopkom reverzne osmoze	26
Preglednica 9: Tehnične karakteristike spiralno navite membrane proizvajalca VONTRON Tehnology CO.	26
Preglednica 10: Merilna oprema na UF	33
Preglednica 11: Merilna oprema na RO	37
Preglednica 12: Fizikalno–kemijski, kemijski in mikrobiološki parametri vode v vstopnem rezervoarju	48
Preglednica 13: Količina procesne vode UF	53
Preglednica 14: Meritve temperature	53
Preglednica 15: Meritve pH vrednosti	55
Preglednica 16: Meritve motnosti in zadržek UF.....	56
Preglednica 17: Količine vstopne vode na RO.....	60
Preglednica 18: Stopnja izkoristka RO	61

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava dotoka na UF	50
Grafikon 2: Primerjava fluksa filtrata.....	51
Grafikon 3: Primerjava TMP.....	52
Grafikon 4: Temperatura filtrata UF	54
Grafikon 5: Primerjava prevodnosti	54
Grafikon 6: Primerjava pH vrednosti	55
Grafikon 7: Primerjava motnosti filtrata UF	56
Grafikon 8: Dotok na RO	57
Grafikon 9: Pretok permeata RO	58
Grafikon 10: Pretok koncentrata iz RO	58
Grafikon 11: Tlak na vstopu RO	59
Grafikon 12: Tlak koncentrata iz RO	60
Grafikon 13: Temperatura permeata RO	61
Grafikon 14: Prevodnost permeata RO	62
Grafikon 15: pH vrednost permeata RO.....	62
Grafikon 16: Motnost permeata RO	63
Grafikon 17: Prevodnost.....	64
Grafikon 18: pH vrednost.....	65
Grafikon 19: Motnost	65
Grafikon 20: Temperatura vode	66
Grafikon 21: Skupna trdota	67
Grafikon 22: TOC.....	67
Grafikon 23: Barva.....	68
Grafikon 24: TSS.....	69
Grafikon 25: Amonij	70
Grafikon 26: Nitrat	70
Grafikon 27: Nitrit.....	71

Grafikon 28: Klorid.....	72
Grafikon 29: Sulfat.....	72
Grafikon 30: Mangan	73
Grafikon 31: KPK	74
Grafikon 32: Ortofosfat.....	74

KAZALO SLIK

Slika 1: Parametri, s katerimi se podajajo vrednosti organskih snovi (Lobnik, 2008: str. 3).....	10
Slika 2: Območja čiščenja polprepustnih membran glede na velikosti por (IAEA, 2004: str. 11).....	15
Slika 3: Shematska primerjava prečne in konvencionalne filtracije (IAEA, 2004: str. 14).....	16
Slika 4: Povečan prerez votlega vlakna (EPA, 2005: str. 11).....	18
Slika 5: a.) osmoza, b.) osmotski tlak ($\Delta\Pi$) v ravnotežju, c.) reverzna osmoza.....	20
Slika 6: Spiralno navitje membrane (Simonič, 2004: str. 173).....	20
Slika 7: Shema membrane VONTRON-4040 (VONTRON Tehnology Co. Ltd.: str. 28).....	27
Slika 8: RO modul s spiralno navito membrano.....	27
Slika 9: Membranska pilotna naprava za pripravo pitne vode	27
Slika 10: Vstopni 10 m ³ rezervoar vode.....	28
Slika 11: Iztok iz rezervoarja VG1	28
Slika 12: Centrifugalna črpalka PC1	28
Slika 13: Sitast 0,13 mm filter (levo), vodomer FQ1 (desno)	29
Slika 14: Vtok UF filtrata v vmesni rezervoar VG2.....	29
Slika 15: Centrifugalna črpalka PC2	30
Slika 16: Iztoki membranske pilotne naprave, speljani po ceveh v jašek meteorne vode.....	30
Slika 17: Pomožni rezervoar VG3 za vodo obremenjeno s kemikalijami	31
Slika 18: Dodajanje kemikalij na UF	32
Slika 19: Manometri in pipice za odvzem vzorcev na UF procesnem sklopu.....	34
Slika 20: Reverzna osmoza.....	35
Slika 21: Svečni 5-mikronski (levi) in 1-mikronski filter (desni)	36
Slika 22: Glavne krmilna in napajalna električna omara.....	37
Slika 23: Krmilno napajalna električna omarica UF v fazi filtracije.....	38
Slika 24: Vklon RO v fazo filtracije.....	38
Slika 25: Sitast 0,13 mm filter po in pred testiranjju	39
Slika 26: Zamenjava svečnih filtrov z novimi (Levo: stara filtra, Desno: nova filtra).....	39
Slika 27: Lokacije črpanja iz površinskih virov in lokacija eksperimenta	40

Slika 28: Meritve na terenu	40
Slika 29: Dezinfekcija vzorčne pipice za odvzem filtrata UF	41
Slika 30: Dezinfekcija vzorčne pipice za odvzem RO permeata	41
Slika 31: Polnjenje vstopnega rezervoarja (VG1) z načrpano površinsko vodo	42
Slika 32: Laboratorij za analitiko vode	42
Slika 33: Multimeter HQd HACH	46
Slika 34. Umerjanje turbidimetra TurbiCheck WL.....	46

Ta stran je namenoma prazna.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
CEB	Kemično pospešeno pranje (ang. Chemically enhanced backwash)
EDI	Elektrodeionizacija
IVZ RS	Inštitut za varovanje zdravja Republike Slovenije
KPK	Kemijska potreba po kisiku
MDK	Mejna dovoljena koncentracija
MF	Mikrofiltracija
NF	Nanofiltracija
PES	Polietersulfon
PVC	Polivinil klorid
RCE	Razvojni center Energija
RO	Reverzna osmoza
TMP	Transmembranski tlak
TOC	Celotni organski ogljik
TSS	Skupne suspendirane snovi
UF	Ultrafiltracija

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

V Sloveniji prevladuje uporaba konvencionalnih postopkov priprave pitne vode, ki zagotavljajo zdravstveno skladno pitno vodo na območjih, kjer ni velikih količinskih in kakovostnih nihanj vodnega vira. V večini primerov je ta vir podzemna voda, le malo pa je površinskih voda, zajetih za vodooskrbo.

Problem pri pripravi pitne vode iz površinske vode predstavljajo zunanji atmosferski vplivi, površina oz. lokacija, kjer stoji/teče površinski vir in onesnaženja, ki so posledica človekove dejavnosti in vplivajo na kakovost površinskega vira. S slovenskim zakonodajnim okvirjem se že spremljajo ocene ekoloških in kemijskih stanj nekaterih površinskih virov (155 vodnih teles), vendar te temeljijo zgolj na nekaj (4–12) opravljenih meritvah (monitoringih) v letu. Izsledki monitoringa navajajo, da se kakovost površinskih virov izboljšuje glede na preteklost, kajti z vstopom v Evropsko unijo smo v naš zakonodajni okvir vpeljali zaostritve glede izpustov v okolje in tako sprejeli strožji nadzor nad kakovostjo površinskih virov.

Za zagotavljanje zdravstveno skladne in neoporečne pitne vode iz površinskega vira je potrebno konvencionalne postopke priprave pitne vode nadgraditi ali nadomestiti s sodobnimi tehnologijami, uveljavljenimi v svetu. Med najbolj uporabljene in zelo učinkovite se v svetu šteje stopke membranske filtracije, ki z dovršeno tehnologijo in izboljšanimi materiali membran zadnjih 10 let spadajo v sam vrh čiščenja vseh vrst voda. Te se pri nas manj uporabljajo zaradi slabšega poznavanja delovanja novih tehnologij in zaradi relativno dobro delujočih vpeljanih konvencionalnih postopkov. Slednji v večini primerov priprave pitne vode iz podzemne v Sloveniji zagotavljajo relativno ustrezno kakovost pitne vode, vendar se kažejo problemi povezani s kvaliteto oskrbe. Kljub dobremu količinskemu stanju podzemnih voda, na območjih s posebnimi zahtevami varovanja 12,6 odstotka vodnjakov in izvirskih zajetij v dobrem kemijskem stanju (Bauman et. al., 2011).

V prihodnje bodo v Sloveniji membranske tehnologije imele večji pomen za pripravo pitne vode, tako podzemnega kot površinskega izvora. Za pripravo pitne vode v Šaleški dolini (in okolici) že izboljšujejo tehnologijo priprave pitne vode z uvedbo membranskih postopkov (ultrafiltracija). Zato bodo poznavanje delovanja in učinkovita izraba tovrstnih tehnologij zelo pomembni v prihodnje, ko bodo potrebe po bolj kakovostni pitni vodi v Sloveniji še večje.

Temo diplomske naloge sem si izbrala z željo osvojiti in razširiti znanje o obratovanju in delovanju membranskih postopkov. V podjetju Esotech, d. d., so mi omogočili uporabo obstoječe membranske pilotne naprave, ki so jo v preteklosti že uporabljali za testiranja in čiščenja različnih vrst voda. Po tem, ko nekaj časa ni delovala, je bilo potrebno pilotno napravo najprej usposobiti za izvedbo eksperimentalnega dela. Ko smo jo usposobili, sem premišljevala, kakšno učinkovitost čiščenja surove vode lahko dosežemo z njeno uporabo. Na tej osnovi se je razvila tema diplomske naloge.

Namen diplomske naloge je bil testirati membransko pilotno napravo z različnimi kakovostmi vstopne vode pri enakih začetnih obratovalnih pogojih. Za določevanje kakovosti vstopne vode površinskega vira in učinka čiščenja membranskih postopkov (UF in RO) je bil namen razširiti znanje na področju monitoringa in analitike vode. Za predmet priprave pitne vode sem izbrala tri različne površinske vire v okolici Velenja (Šoštanjsko jezero, Škalsko jezero in reka Paka).

Cilj diplomske naloge je z eksperimentom skozi zaporedna testiranja treh različnih površinskih virov surove vode pripraviti skladno pitno vodo in s tem dokazati učinkovitost čiščenja površinskih virov s sodobnimi membranskimi tehnologijami UF in RO ne glede na kakovost vstopne vode. Med posameznimi testiranjimi smo si po drugi strani zadali cilj, da preučimo vpliv fizikalno-kemijskih parametrov (kakovosti) vode iz površinskega vira na obratovalne pogoje ultrafiltracije in reverzne osmoze.

Diplomska naloga v prvem delu zajema teoretični del z zakonsko podlago, ki se navezuje na kakovost površinskih virov za pripravo pitne vode, kakovost pitne vode ter posamezne parametre, katerih vrednosti smo merili in jih podaja tudi Pravilnik o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04). V tem delu so predstavljeni tudi površinski viri, ki smo jih izbrali za pripravo pitne vode ter membranska tehnologija s poudarkom na ultrafiltraciji in reverzi osmozi. Na kratko je povzeta tudi uporaba teh postopkov pri pripravi pitne vode v Sloveniji. V drugem delu smo opisali membransko pilotno napravo, predpriprave na eksperiment in sam eksperiment, ki je bil sestavljen iz dveh delov, in sicer preučevanja delovanja membranske pilotne naprave in analitike vstopne/prečiščene vode. V zadnjem delu naloge so podani rezultati in ugotovitve eksperimentalnega dela.

2 PRIPRAVA PITNE VODE IZ POVRŠINSKE

Za številne države Evropske unije (Španija, Portugalska, Nemčija, Grčija, Finska, Nizozemska, Velika Britanija) je površinska voda eden najpomembnejših virov pitne vode, zato je njena kakovost izrednega pomena (ARSO, 2008). V Sloveniji predstavlja glavni vir pitne vode podtalnica skupaj z kraškimi izviri, s katerimi se oskrbuje več kot 95 % prebivalcev. Razlogi so predvsem geološke razmere v Sloveniji in dobro količinsko stanje podtalnice ter kraških izvirov (Bauman et al., 2011). Tako se samo 3 % prebivalcev oskrbuje z vodo iz površinskih virov (ARSO, 2008).

Za preskrbo s pitno vodo se v Sloveniji tradicionalno uporabljajo podzemne vode, saj velja splošno prepričanje, da so podzemne vode (podtalnica) najvišje kakovosti. Premalo ljudi se zaveda, da to prepričanje temelji na starodavnih izkušnjah, ko onesnaženje oz. kemizacija okolja še ni bila tako izražena in je glavno grožnjo za kvaliteto vode predstavljalo mikrobiološko onesnaženje. Danes težko razgradljive in strupene organske ali anorganske snovi povzročajo huda onesnaženja podzemnih voda. Zaradi majhnih pretokov v primerjavi z vodnatimi površinskimi vodami prihaja do manjšega razredčenja in daljših zadrževalnih časov. Zato so lahko podzemne vode v nekaterih primerih bistveno bolj onesnažene kot površinske vode (Kompore, 2005).

Bauman s soavtorji (2011) navaja, da kljub dobremu količinskemu stanju podzemnih voda na območjih s posebnimi zahtevami varovanja 12,6 % vodnjakov in izvirskih zajetij ni v dobrem kemijskem stanju.

Pri pripravi zdravstveno skladne pitne vode iz površinskih virov se mora ta pred vstopom v vodovodni sistem obdelati s primernimi tehnološkimi postopki, dodatno pa se mora izvajati stalen nadzor kakovosti s pogostostjo, odvisno od števila odjemalcev (Bauman et al., 2011).

Za pripravo vode se uporabljajo klasični (konvencionalni) ali napredni (sodobni) postopki. Enaki postopki kot za pripravo površinske vode se načeloma lahko uporabljajo za pripravo podzemne vode, pri čemer postopke in korake obdelave virov narekuje kakovost vodnih virov.

Za zagotavljanje ustrezne pitne vode izvajalci oskrbe s pitno vodo v Sloveniji uporabljajo po zakonodaji predpisane standardne postopke, ki so za razliko od zakonodaje EU vezani na kakovost vodnega vira. Na osnovi kategorizacije vodnega vira so predpisani naslednji postopki obdelave, pri čemer A1 pomeni boljšo, A3 pa slabšo kakovost vodnega vira (Bauman et al., 2011):

- A1: enostavna fizikalna obdelava (hitro filtriranje) in dezinfekcija;
- A2: običajna fizikalna obdelava, kemijska obdelava in dezinfekcija, tj. predkloriranje, koagulacija, flokulacija, dekantiranje, filtriranje, dezinfekcija;
- A3: intenzivna fizikalna in kemijska obdelava, dodatna obdelava in dezinfekcija, npr. kloriranje, koagulacija, flokulacija, dekantiranje, filtriranje, adsorpcija (aktivno oglje), dezinfekcija (obdelava z ozonom in končno kloriranje).

Predkloriranje vode je izrazito nezaželeno, saj z organskimi snovmi tvori trihalometane, ki so zdravju nevarni.

Glede na ekološko stanje ter razvrščenost vodnih virov površinske vode v kakovostne razrede (monitoring kakovosti PVOPV in Odredba o prvi razvrstitvi površinskih voda, ki se jih odvzema za

pitno vodo (Ur. l. RS, št. 56/2002, 14/2009)) se za oskrbo s pitno vodo v slovenskih vodarnah uporabljajo postopki v različnih konfiguracijah (Bauman et al., 2011).

Postopki obdelave voda, povzeti po evropski zakonodaji, so v uporabi že dolgo časa za pripravo pitne vode. Napredni postopki sodobnih tehnologij membranskih filtracij (kot so mikrofiltracija (MF), ultrafiltracija (UF), nanofiltracija (NF) in reverzna osmoza (RO)) danes predstavljajo alternativno rešitev in možnost nadgradnje omenjenih postopkov. Te tehnologije učinkovito odstranjujejo širok spekter onesnaževal iz vode.

Zavedanje o potrebi oskrbe s kvalitetno pitno vodo ter zagotavljanje nemotene dobave in ustrezne kakovosti pitne vode v skladu z zakonodajo upravljalce vodovodov čedalje bolj usmerjata k uporabi naprednih oz. sodobnejših postopkov priprave vode (Bauman et al., 2011a).

Filtracijske tehnologije sodijo med najbolj zastopane obdelave vseh vrst voda. Pri pripravi pitne vode omogočajo učinkovito odstranjevanje velikih raztopljenih molekul, kot so obarvanost, TOC in motnost, huminske snovi in nekateri pesticidi. V modernejših vodarnah po Evropi se uporabljajo kombinacije novejših tehnik, ki omogočajo odstranjevanje onesnaževal, npr. adsorpcija na aktivno oglje, nanofiltracija/reverzna osmoza v kombinaciji z ultrafiltracijo, pred dezinfekcijo (Bauman et al., 2011).

Bauman s soavtorji (2011) navaja, da se membranska filtracija običajno uporablja pred dezinfekcijo, saj so določeni mikroorganizmi odporni na dezinfekcijska sredstva. Na ta način se poleg virusov najučinkoviteje odstrani organske snovi, ki so lahko osnova za nastanek stranskih produktov dezinfekcije.

2.1 Zakonodaja in predpisi

Pitna voda je pomembna javna dobrina, zato so ravnanje z viri pitne vode, oskrba s pitno vodo in zagotavljanje skladnosti pitne vode zelo podrobno urejeni s predpisi. Posebnega pomena je upravljanje z vodnimi viri in s sistemi za oskrbo s pitno vodo ter organizacija formalnega nadzora nad skladnostjo pitne vode s predpisi. Institucionalni okvir tega področja je v veliki meri prepuščen upravni in zakonodajni ureditvi posameznih držav, saj je to področje v veliki meri odvisno od organizacije državne in lokalne uprave (Kus, 2007).

2.1.1 Kakovost površinskih virov

Nadzor nad kakovostjo voda v Sloveniji opravlja država v skladu z Vodno direktivo 2000/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. 10. 2000. Vodna direktiva je v nacionalno zakonodajo prenesena s predpisi na področju voda in varstva okolja (Podbežnik et al., 2011).

Vodna direktiva vključuje začetni opis značilnosti, ovrednotenje rezultatov z ukrepi, klasifikacijo površinskih vodnih teles glede na pripadajoči razred ekološkega stanja, klasifikacijo vseh vodnih teles glede na pripadajoči razred kemijskega stanja in izvajanje ukrepov s ciljem zmanjšanja obremenitev vodnih teles in ohranjanja dobrega stanja voda.

Načrt upravljanja voda je sestavni del izvajanja Okvirne vodne direktive v Sloveniji, njen cilj pa je dobro stanje voda do leta 2015. Doseganje zastavljenega cilja temelji na šestletnih procesih

načrtovanja in pripravi programa ukrepov. V prvem načrtovalskem obdobju 2009–2015 so kot prednostni ukrepi izpostavljeni: zagotovitev varstva vodnih virov za pitno vodo, izboljšanje stopnje odvajanja in čiščenja, preprečitev onesnaženja z nevarnimi snovmi iz kmetijskih in drugih virov, zmanjšanje obsega škodljivega delovanja voda, izboljšanje ekološkega stanja in ekološkega potenciala površinskih voda (Podbežnik et al., 2011).

V Sloveniji področje monitoringa površinskih voda ureja Pravilnik o monitoringu površinskih voda (Ur. l. RS, št. 10/2009), medtem ko merila in način ocenjevanja stanja voda določa Uredba o stanju površinskih voda (Ur. l. RS, št. 14/2009, 98/2010). Spremljanje kakovosti voda na območjih s posebnimi zahtevami je določeno še z nekaterimi dodatnimi predpisi (Podbežnik et al., 2011).

V program nadzornega monitoringa so vključeni naslednji elementi kakovosti (ARSO, 2011):

- splošni fizikalno-kemijski parametri,
- biološki elementi kakovosti,
- parametri kemijskega stanja (prednostne in prednostno nevarne snovi), ki se odvajajo v vode v porečju,
- posebna onesnaževala, ki se v Program monitoringa stanja voda za obdobje 2010–2015 v pomembnih količinah odvajajo v vode v porečju in
- hidromorfološki elementi kakovosti.

Agencija Republike Slovenije za okolje (2011) v okviru državnega stanja vodnih teles že izvaja monitoring na naravnih in umetnih jezerih ter močno preoblikovanih vodnih telesih s površino vodne gladine, večje od 0,5 km². Nadzorni monitoring se izvaja tudi na vodnih telesih, kjer je pretok pomemben za vodno območje kot celoto, vključno z vodnimi telesi na velikih rekah, kjer je prispevna površina večja od 2.500 km².

Površinske vode Slovenije pripadajo dvema vodnima območjema – Donave in Jadranskega morja. Pri tem vode večjega dela našega ozemlja (80 %) odtekajo v Donavo in po njej v Črno morje. Le okoli petina ozemlja pa pripada vodnemu območju Jadranskega morja. Na obeh vodnih območjih je bilo v letu 2005 skladno s Pravilnikom o določitvi in razvrstitvi vodnih teles površinskih voda (Ur. l. RS, št. 63/2005) ob upoštevanju naravnih značilnosti voda, pripadajočih ekosistemov in vplivov človeka, določenih 155 vodnih teles površinskih voda. Za posamezno vodno telo, ki predstavlja osnovno enoto upravljanja voda, je po zahtevah Vodne direktive potrebno spremljati in ocenjevati kemijsko in ekološko stanje (ARSO, 2011).

Na omenjenem seznamu vodnih teles sta tudi reka Paka in od leta 2010 Šoštanjsko jezero. Ocena njunega kemijskega in ekološkega stanja se torej že spremlja. Šoštanjsko jezero glede na Pravilnik o določitvi in razvrstitvi vodnih teles ni samostojno vodno telo, zato je bilo v program monitoringa vključeno na osnovi podatkov Premogovnika Velenje. Ti se navezujejo na poročilo jamomerstva iz leta 2009 o izrednem povečanju površine (716.204 m²) in volumna (19,21 mio. m³) jezera, ki ga povzroča intenzivno ugrezanje (največja globina jezera 85,90 m). Poleg tega kažejo meritve osnovnih fizikalno kemijskih in bioloških parametrov bistvene razlike v primerjavi s sosednjim Velenjskim jezerom (ARSO, 2011).

V skladu z Uredbo o stanju površinskih voda monitoring površinskih virov pitne vode spada v program operativnega monitoringa in vključuje vodna telesa ali njihove dele, kjer se površinska voda odvzema za oskrbo s pitno vodo in v povprečju zagotavljajo več kot 100 m³ vode na dan. Nadzoruje se kakovost "surove vode", ki se pred vstopom v vodooskrbni sistem še ustrezno obdelata (ARSO, 2011).

Vodno telo ali del vodnega telesa površinske vode, ki se uporablja za preskrbo s pitno vodo, je ustrezne kakovosti, če:

- dosega dobro kemijsko stanje in
- za nobeno od snovi, ki se odvajajo v površinsko vodo v pomembnih količinah in bi lahko vplivale na stanje tega vodnega telesa ter se spremljajo v skladu s predpisom, ki ureja pitno vodo, ne izkazuje poslabšanja glede na rezultate predhodnega leta (ARSO, 2011).

Kemijsko stanje predstavlja obremenjenost površinskih voda s prednostnimi snovmi, za katere so za Evropsko unijo (EU) postavljeni enotni okoljski standardi kakovosti. Na ravni EU je bilo 33 snovi ali skupin snovi zaradi njihove razširjene uporabe in zaradi ugotovljenih povišanih vsebnosti v površinskih vodah določenih kot prednostnih. Trinajst od teh snovi je zaradi visoke obstojnosti, bioakumulacije in strupenosti določenih kot prednostno nevarnih (npr. kadmij, živo srebro, endosulfan, nonilfenol idr.) (ARSO, 2011).

2.1.2 Kakovost pitne vode

Da zagotovimo sprejemljivo in varno pitno vodo, določajo predpisi obvezne standarde, ki jim mora ustrezati pitna voda za javno oskrbo. V Sloveniji imamo že več kot deset let popolnoma »evropske« in zelo stroge predpise, ki določajo načine in pravila za zagotavljanje skladnosti pitne vode. Od vseh živil je prav pitna voda pod najstrožjim stalnim nadzorom na večih nivojih.

Za Slovenijo kot državo članico Evropske unije je Direktiva sveta 98/83/EC z dne 3. novembra o kakovosti pitne vode, ki je namenjena za prehrani ljudi, najpomembnejši temeljni dokument z zakonsko veljavo na področju zagotavljanja varne pitne vode. Cilj Direktive je varovanje zdravja ljudi pred škodljivimi vplivi vsakršnega onesnaženja vode, namenjene za prehrano ljudi, z zagotavljanjem, da je zdravstveno ustrezna in čista. V predpristopnem postopku je Republika Slovenija leta 1994 sprejela pravilnik, ki je že upošteval določbe starejše direktive. Pravilnik je bil na osnovi novih spoznanj in dopolnitev z vstopom v članstvo EU dopolnjen z določbami nove direktive in v sedanjih obliki (Pravilnika o pitni vodi) sprejet leta 2004 (Kus, 2007).

Pravilnik o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04) je bil izdan na podlagi zakona o zdravstveni ustreznosti živil in izdelkov ter snovi, ki prihajajo v stik z živili (ZUZIS, Ur. l. RS št. 52/00, 42/02, 47/04), saj mora pitna voda kot živilo izpolnjevati določene pogoje tega zakona.

Vzorčevanje in analiziranje oz. monitoring pitne vode in virov pitne vode je predpisano v Pravilniku o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04), kjer so določene mejne vrednosti in predpisani prilagoditveni roki. V pravilniku so se posamezni parametri, ki opredeljujejo kakovost pitne vode, zelo zaostriili.

2.2 Opis in določanje merjenih parametrov v pitni vodi

Na podlagi Pravilnika o pitni vodi (Priloga A) smo v eksperimentu upoštevali mejne dovoljene koncentracije (v nadaljevanju: MDK) oz. vrednosti parametrov pitne vode, pridobljene z čiščenjem površinskih virov Šoštanjkega jezera, Škalskega jezera in reke Pake z membransko pilotno napravo. Pravilnik o pitni vodi ne predpisuje vrednosti za fosfate, zato smo upoštevali MDK (0,3 mgPO₄/l) iz starega Pravilnika o zdravstveni ustreznosti pitne vode (Ur. l. RS, št. 46/97, 52/97, 54/98, 7/00 in 52/00 in 19/04), ki ga je nadomestil Pravilnik o pitni vodi.

Parametri, ki smo jih merili za določanje kakovosti oz. skladnosti pitne vode, spadajo med indikatorske parametre in med mikrobiološke parametre, medtem ko nitrit in nitrat sodita v kemijske parametre (Priloga A).

Metodologija merjenja in merilni parametri so bili izbrani na podlagi razpoložljive merilne opreme in z namenom pridobivanja splošne (grobe) informacije skladnosti pitne vode.

Opis in izvor parametrov, ki so prisotni in izmerjeni v površinski vodi za pripravo skladne pitne vode, so opisani v nadaljevanju.

2.2.1 Temperatura

V površinskih vodah je temperatura pomemben dejavnik, ki vpliva na biološke, kemijske in fizikalne procese ter s tem na kakovost naravne vode (Urbanič, Toman, 2002). Temperatura naravnih vodnih sistemov je odvisna pretežno od temperature podlage, po kateri teče voda, od hladnih in toplih pritokov, temperature ozračja in jakosti sevalnega toplotnega toka sonca oziroma od letnega in dnevnega časa. Povišana temperatura je lahko znak onesnaženosti vode. Višja kot je temperatura vode, manj je v njej raztopljenih plinov in s tem kisika ter obratno (Lobnik, 2008). V Sloveniji imajo površinske netermalne vode običajno temperaturo med 0 in 30 °C (Urbanič, Toman, 2002). Temperatura pitne vode v Pravilniku o pitni vodi (Priloga A) ni predpisana.

2.2.2 Električna prevodnost

Prevodnost oz. elektroprevodnost je sposobnost vode, da prevaja električni tok. Odvisna je od temperature vode in koncentracije ionov v vzorcu vode, stopnje disociiranosti snovi v ione, električnega naboja posameznih ionov in mobilnosti ionov (Urbanič, Toman, 2002). Raztopine anorganskih snovi so večinoma dobri prevodniki, molekule organskih snovi, ki ne disociirajo v vodi pa prevajajo električni tok slabo ali pa ga sploh ne (IVZ RS, 2011).

Bolj kot je vodno telo onesnaženo z hranili, višja je prevodnost, saj se z dotokom hranil poveča količina nabitih delcev. V večini površinskih voda je prevodnost med 10 in 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, v zelo obremenjenih in mineralnih vodah pa je mejna vrednost presežena (Urbanič, Toman, 2002). Tako ima na primer morska voda električno prevodnost približno 50.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, deževnica pa 5–30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (IVZ RS, 2011).

Na električno prevodnost pitne vode običajno vplivajo koncentracije kalcijevih, magnezijevih, natrijevih, kalijevih, hidrogenkarbonatnih, sulfatnih in kloridnih ionov. Električna prevodnost je indikatorski parameter in njena sprememba kaže na morebitno onesnaženost pitne vode. Vrednost oziroma spremembo električne prevodnosti ocenjujemo v povezavi z vrednostmi ostalih parametrov. Mejna vrednost za pitno vodo je 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pri 20 °C (IVZ RS, 2011).

2.2.3 Vrednost pH

Parameter pH vpliva na mnoge biotske in kemijske procese v vodi. Definiran je kot negativni desetiški logaritem vodikovih (H^+) ionov ($\text{pH} = -\log_{10}\text{H}^+$). Vrednosti (Preglednica 1) se lahko nahajajo med 0

(zelo kislo) in 14 (zelo bazično), pri čemer $\text{pH}=7$ predstavlja nevtralno območje (Urbanič, Toman, 2002).

Na vrednost pH neonesnažene površinske vode vpliva predvsem kamninska podlaga, geologija tal in prsti. Tako je pH bolj kisel v naravnih vodah, ki imajo podlago iz sedimentnih kamnin, medtem ko je bolj bazičen pH v naravnih vodah s podlago iz apnenca ali dolomita. V čistih vodah je pH v območju od 4,5 do 8,5. Takšen pH dajejo v vodi raztopljene huminske snovi in CO_2 (Lobnik, 2008).

V večini naravnih vod je pH povezan z ravnotežjem ogljikovega dioksida, hidrogenkarbonata in karbonata in s tem tudi s trdoto vode (mehke vode imajo nižjo pH vrednost, trde vode pa višjo) (Lobnik, 2008). Na naravno karbonatno ravnotežje lahko vplivajo industrijski efluenti in atmosfersko obremenjevanje s kislimi snovmi. Spremembe v pH so lahko odraz prisotnosti efluentov, še zlasti, če je z meritvami ugotovljena tudi povišana prevodnost (Urbanič, Toman, 2002).

Preglednica 1: pH medij glede na koncentracijo hidroksidnih in oksonijevih ionov (Lobnik, 2008: str. 10)

Medij	pH vrednost	Koncentracija hidroksidnih ionov $[\text{OH}^-]$	Koncentracija oksonijevih ionov $[\text{H}_3\text{O}^+]$
Kisel	$1 < \text{pH} \leq 6$	$< 10^{-7} \text{ Mol/L}$	$> 10^{-7} \text{ Mol/L}$
Nevtralen	$\text{pH}=7$	10^{-7} Mol/L	10^{-7} Mol/L
Bazičen	$7 < \text{pH} \leq 14$	$> 10^{-7} \text{ Mol/L}$	$< 10^{-7} \text{ Mol/L}$

Za pitno vodo je določena mejna vrednost med 6,5 in 9. Vpliv koncentracije vodikovih ionov (pH vrednost) na zdravje ljudi je lahko posreden ali neposreden. Neposredna izpostavljenost ekstremno visokemu ali nizkemu pH povzroča draženje oči, sluznic in kože ter okvaro tkiva. Ekstremne vrednosti, ki bi povzročile take poškodbe (npr. pod 4 ali nad 11), v sistemih za oskrbo s pitno vodo niso običajne. Med posredne vplive štejemo povečanje korozije materialov v stiku z vodo z nizko pH vrednostjo. Posledica korozije je lahko kontaminacija vode, sprememba okusa in videza ter tudi poškodbe na materialu. Zlasti pomembna je ustrezna pH vrednost pri pripravi vode za zagotavljanje učinkovite koagulacije in dezinfekcije. Za učinkovito dezinfekcijo vode s klorom naj bo pH manj kot 8. (IVZ RS, 2011)

2.2.4 Motnost

Motnost vode je pokazatelj prisotnosti delcev, velikosti od 1 nm do 1 mm. Delce tvorijo anorganske in organske snovi ter mikroorganizmi (glineni delci, mulj, koloidni delci, huminske snovi, alge, plankton, bakterije). Posamezne komponente se med seboj lahko povezujejo: npr. glineno-organski del. Večja motnost je izmerjena v površinskih vodah, v podtalnici je običajno nizka, če ta ni v stiku s površinsko vodo (Drev, 2009).

V površinskih vodah je motnost že po naravi višja kot v podtalnici, če le-ta ne pride v stik z pronicajočo površinsko vodo. Povečana motnost lahko pomeni onesnaženje vodnih teles. Ker pa ne moremo definirati vrste onesnaženja, motnost ne predstavlja pomembnega parametra za ocenitev kakovosti vode površinskih voda (IVZ RS, 2011).

V slovenski zakonodaji se motnost izraža v nefelometričnih turbidimetričnih enotah – NTU (ang. NTU – Nefelometric Turbidity Unit). V primeru priprave pitne vode iz površinske vode motnost ne sme presegati 1 NTU v vodi po izstopu iz naprave za pripravo pitne vode. Motnost je eden od parametrov, ki sam pove zelo malo, zato spremembe motnosti ocenjujemo v povezavi z vrednostmi ostalih parametrov. Ta parameter pomaga pri globalni oceni kakovosti vode in je pomemben parameter v procesu nadzora, priprave in distribucije vode (IVZ RS, 2011). Primesi, ki povzročajo motnost pitne vode, imajo običajno veliko sposobnost absorpcije drugih zdravju škodljivih snovi. Zato je dezinfekcija motne vode zelo težavna (Lobnik, 2008).

2.2.5 Skupna trdota

Večina naravnih vod vsebuje kalcijev in magnezijev hidrogen karbonat ter manjše množine sulfatov, kloridov in nitratov. V odvisnosti od koncentracije soli pravimo, da so vode bolj ali manj trde. Raztopine hidrogenkarbonatov dajejo v vodi alkalno reakcijo. Če vsebuje voda le kalcijev in magnezijev hidrogenkarbonat, govorimo o karbonatni trdoti, če pa vsebuje tudi druge (natrijev), govorimo o alkalnosti vode. Ločimo karbonatno in nekarbonatno ter – glede na koncentracijo kalcijevih in magnezijevih ionov – kalcijevo in magnezijevo trdoto. Tako vsota karbonatne in nekarbonatne kot tudi vsota kalcijeve in magnezijeve trdote nam podata skupno trdoto vode (Drev, 2009).

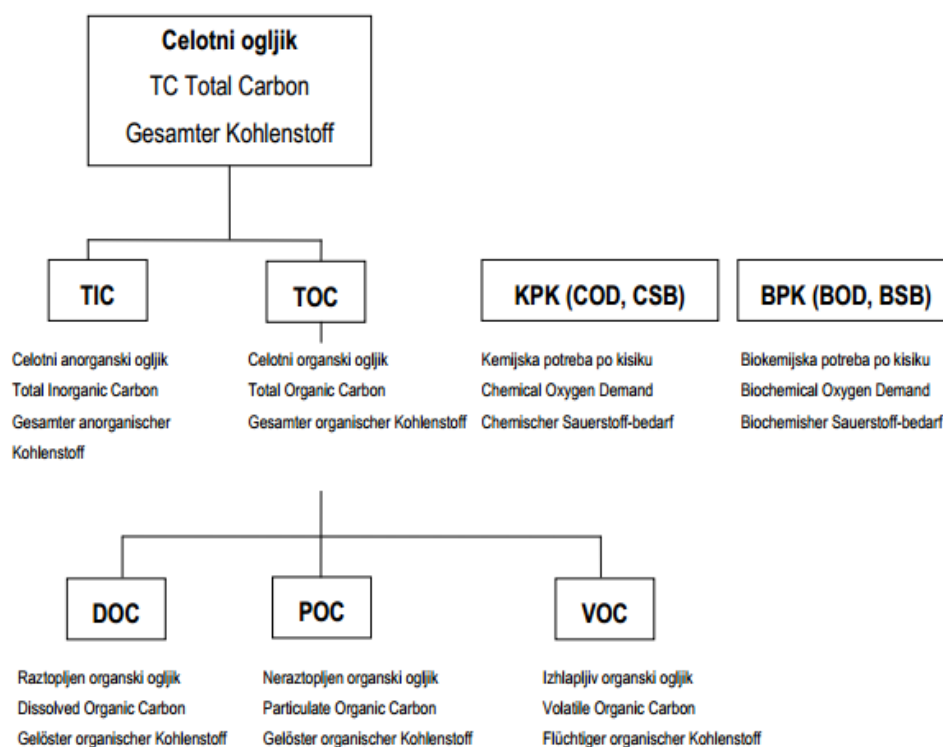
Trdoto vode navadno izražamo v nemških stopinjah dH°. Eno nemško trdotno stopinjo ima voda, ki vsebuje 1 mg CaO na 100 ml vode. Trdoto vode lahko izražamo kot vsoto koncentracij kalcija in magnezija (oba izražena kot CaCO₃, v mg/l) (Drev, 2009).

V pravilniku o pitni vodi (Priloga A) ni podana mejna vrednost skupne trdote v pitni vodi. Za distribucijo in uporabnike ni zaželena trda voda, ker povzroča vodne obloge na ceveh in gospodinjskih aparatih (pralni stroji, pomivalni stroji ipd.).

2.2.6 TOC

TOC predstavlja koncentracijo celotnega organskega ogljika v vodi, vezanega na raztopljene ali suspendirane snovi (Slika 1). Vključene so najrazličnejše oblike, kot so elementarni ogljik in delci ter onesnaževala, kot so benzen, toluen, cikloheksan, kloroform, cianidi itd. (IVZ RS, 2011).

V površinskih vodah povezujemo visoke vrednosti celotnega organskega ogljika z industrijskim in kmetijskim onesnaževanjem, čeprav se običajno organske snovi izražajo s parametroma BPK₅ in KPK.



Slika 1: Parametri, s katerimi se podajajo vrednosti organskih snovi (Lobnik, 2008: str. 3)

Organske spojine v pitni vodi lahko predstavljajo direktno ali indirektno tveganje za zdravje, saj so med njimi številne toksične, predstavljajo hrano za rast neželenih mikroorganizmov, lahko reagirajo s prisotnimi dezinfekcijskimi sredstvi v toksične stranske produkte ipd. (IVZ RS, 2011). Zato je zakonsko predpisana mejna vrednost 0,4 mg/l celotnega organskega ogljika v pitni vodi.

2.2.7 KPK

Količino kisika, ki je potrebna za oksidacijo organskih snovi, imenujemo kemijska potreba po kisiku in jo označimo s KPK (angl. COD – Chemical Oxygen Demand). Določanje kemijske potrebe po kisiku zagotovi hitro oceno celotne organske snovi v vzorcu vode (razgradljive in nerazgradljive) (Lobnik, 2008). Parameter se podaja pogosto za odpadne vode, višje vrednosti pa nakazujejo organsko onesnaženje površinskih voda.

V pitni vodi ni določena MDK za organske snovi v obliki KPK, temveč so zakonsko podane vrednosti za TOC.

2.2.8 Barva

Barvo vode, ki je posledica raztopljenih in neraztopljenih suspendiranih snovi, imenujemo navidezna barva, medtem ko barvo vode, ki je posledica raztopljenih snovi in po odstranitvi suspendiranih snovi ostane, imenujemo resnična ali dejanska barva vode (Lobnik, 2008).

Zaradi organskih snovi, kot so listje dreves, lesni odpadki in razni ostanki rastlin, se v vodi pojavijo razni tanini in organske kisline, ki povzročajo rumeno-rjavo barvo. Železovi oksidi povzročajo rdečo,

magnezijevi oksidi pa rjavo-črno obarvanost vode. Največji vpliv na obarvanost naravnih površinskih voda imajo izpusti raznih odpadnih voda tekstilne, papirne, prehrabne, procesne in metalurške industrije, ki vsebujejo velike koncentracije najrazličnejših organskih in anorganskih barvil (Lobnik, 2008).

Obarvanost pitne vode velikokrat, ne glede na to, ali je škodljiva, ni sprejemljiva za uporabnike in za uživanje. Za rezultate monitoringa pitne vode v Sloveniji je za oceno skladnosti dogovorjena mejna vrednost za barvo $0,50 \text{ m}^{-1}$ (rezultat je podan v -1 – spektralni absorpcijski koeficient) (IVZ RS).

2.2.9 Amonij

Amoniak se zelo dobro topi v vodi. Pri reakciji z vodo nastane amoniiev ion (NH_4^+), ki ga določimo pri preskušanju vode in ga imenujemo amonij. Amonij v vodi v okolju je posledica komunalnega, kmetijskega in industrijskega onesnaženja. Koncentracije v podzemni in površinski vodi so običajno pod $0,2 \text{ mg/l}$.

Prag zaznavanja vonja v vodi za amonij je približno $1,5 \text{ mg/l}$, prag zaznavanja okusa pa je 35 mg/l . Če vsebuje voda več kot $0,2 \text{ mg}$ amonija na liter, se po kloriranju lahko pojavi neprijeten okus in vonj (dikloramin, trikloramin). Zmanjša se tudi učinkovitost dezinfekcije, saj lahko več kot polovica klora reagira z amonijem in tako ni na voljo dovolj klora za dezinfekcijo.

Predpisana mejna vrednost amonija v pitni vodi je $0,5 \text{ mg/l}$. V koncentracijah, ki jih pričakujemo v pitni vodi, ne predstavlja neposredne nevarnosti za zdravje (IVZ RS, 2011).

2.2.10 Nitrat

Nitratni ioni (NO_3^-) so pogosto prisotni v naravnih vodnih telesih, ker so končni produkt aerobne razgradnje organskih dušikovih spojin. Nitratni ion je potrebna hranilna snov za fotoavtotrofne organizme, saj ga le-ti asimilirajo in vgrajujejo v lastne celične proteine. Naravni viri nitratov v površinskih vodah so spiranje površin, odmrli deli rastlin in živali ter vulkanske kamnine. V neonesnaženih vodah so sezonske spremembe nitratov posledica primarne produkcije in odmiranja organizmov, vendar vrednosti običajno ne presegajo 1 mg/l . Koncentracije nad to mejo so posledica spiranja gnojnih kmetijskih površin. Tu so zato v predelih z večjim deležem kmetijskih površin večje tudi količine nitratov v vodotokih. Vrednosti običajno ne presegajo 10 mg/l . Prisotnost višjih koncentracij nitratov v vodnem okolju nakazuje prisotnost komunalnih in industrijskih odpadnih voda. Vrednosti dosežajo 25 mg/l , v primerih ekstremnega onesnaženja pa tudi 900 mg/l . V jezerih vrednosti nad 1 mg/l stimulirajo rast alg, kar nakazuje možne probleme povezane z evτροφnostjo (Urbanič, Toman, 2002).

Visoke koncentracije predstavljajo nevarnost predvsem za dojenčke, mlajše od 3 mesecev. pH v njihovem želodcu je višji kot pri ostalih ljudeh in favorizira mikrobo redukcijo nitratov v nitrite. Nitriti se transportirajo v kri. Nitritni ion se veže v hemoglobin in tvori metahemoglobin, ki pa ni prenašalec kisika. Sprememba hemoglobina v metahemoglobin ni edina nevarnost za ljudi, saj nitrit v želodcu reagira tudi z amini in tvori potencialno kancerogene snovi (Urbanič, Toman, 2002).

Slovenska zakonodaja uvršča nitrat (NO_3) med kemijske parametre z mejno dovoljeno koncentracijo 50 mg/l . Pogoji za mejno vrednost je odvisen od vrednosti izmerjenega nitrita (NO_2) v vodi (glej 2.2.11 Nitrit).

2.2.11 Nitrit

V površinskih vodah je nitrit vmesna stopnja oksidacije amonija v nitrat in predstavlja eno stopnjo dušikovega cikla v naravi. Višje koncentracije so posledica fekalnega onesnaženja.

Nitriti v pitni vodi predstavljajo, tako kot nitrati, nevarnost za zdravje nosečnic in dojenčkov. Ti povzročajo nezmožnost prenosa kisika po telesu (metahemoglobinija) in so pri višjih koncentracijah tudi strupeni (glej poglavje 2.2.10).

V pravilniku o pitni vodi (Priloga A) je nitrit med kemijskimi parametri z mejno vrednostjo 0,50 mg/l. Pogoji za doseganje te vrednosti je veljavnost izračuna: $[\text{nitrat}]/50 + [\text{nitrit}]/3 = <1$ kjer je, [nitrat] mejna vrednost za nitrat (NO_3) v [mg/l] in [nitrit] mejna vrednost za nitrit (NO_2) v mg/l.

2.2.12 Klorid

Kloridi v okolju so prisotni kot natrijeva, kalijeve ali kalcijeve soli. Odvisno od tipa surove vode so kloridi v pitni vodi lahko naravnega izvora, lahko pa so iz komunalnih ali industrijskih odpadnih vod. Lahko so posledica površinskega spiranja zaradi soljenja cest ali uporabe gnojil ali vdora slanice. Kloridi so zelo mobilni ter se z vodo prenašajo v okolju (IVZ RS, 2011).

Kloridi nad mejno vrednostjo 250 mg/l dajejo pitni vodi okus, kar je nezaželeno s strani povprečnega uporabnika. Zato je v pravilniku o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04 in 35/04) prav vrednost 250 mg/l izbrana kot mejna vrednost klorida. Te koncentracije so daleč pod tistimi, ki bi lahko imele zdravstvene učinke. Visoke koncentracije kloridov v vodi povečujejo korozijo kovin, kar lahko sekundarno vodi do povečanih koncentracij kovin v vodi (IVZ RS, 2011).

2.2.13 Sulfat

Sulfati so naravno prisotni v mnogih kamninah. Pogosto se uporabljajo v kemijski industriji. V okolje pridejo tudi preko odpadkov oz. odplak in iz atmosfere preko emisij žveplovega dioksida in nato kot »kisli dež« (IVZ RS, 2011).

Sulfat v pitni vodi je lahko vzrok spremenjenega okusa vode pri koncentracijah nad 250 mg/l, kar je odvisno tudi od spremljajočega kationa. S tem vpliva na sprejemljivost – uživanje vode. Pri koncentracijah v pitni vodi 1000–1200 mg/l ima sulfat odvajalni učinek (IVZ RS, 2011). Pravilnik o pitni vodi (Priloga A) podaja mejno vrednost 250 mg/l z opombo, da voda ne sme biti agresivna..

2.2.14 Skupne suspendirane snovi (TSS)

Izraz skupne suspendirane snovi se nanaša na suho maso snovi, ki jih s filtracijo skozi stekleni filter odstranimo iz znanega volumna vodnega vzorca. Prisotnost velikih količin anorganskih delcev negativno deluje tudi na mikroorganizme v vodi. Razen omenjenega neposrednega delovanja suspendirane snovi vplivajo na organizme tudi posredno s povečanjem kalnosti vode in z usedanjem. Zmanjša se primarna produkcija in izraba nutrientov, kar vodi v povečano verjetnost evtrofnih procesov v stoječih telesih (povečan je t. i. evtrofni potencial vodotoka). Najpomembnejši viri anorganskih suspendiranih snovi so kamnolomi in rudniške odplake ter spiranja površin ob nalivih. Za

razliko od anorganskih predstavljajo organske suspendirane snovi za heterotrofne organizme vir hrane, povečana je respiratorna aktivnost, posledica pa je zniževanje koncentracije raztopljenega kisika in slabšanje kakovosti vode (Urbanič, Toman, 2003).

V pitni vodi se parameter suspendiranih snovi ne meri, ker se v postopkih čiščenja iz površinske vode odstrani. Merijo se delci (koloidi), ki povzročajo motnost in drugi parametri po pravilniku o pitni vodi.

2.2.15 Mangan

Je eden od najbolj razširjenih elementov v zemeljski skorji, kjer ga pogosto najdemo skupaj z železom. Poleg naravnega pojavljanja v vodi, zraku ali zemlji ga lahko najdemo v okolju tudi kot posledico uporabe v različnih industrijskih panogah in v različnih odpadkih (IVZ RS, 2011).

Mangan predstavlja predvsem tehnično-estetski in ne zdravstveni problem. Ob stiku z zračnim kisikom se iz raztopljene brezbarvne oblike izloči kot manganov temno rjavi do črni oksid. Izločeni mangan se nabira v distribucijskih sistemih, kjer ob naselitvi bakterij nastanejo sluzaste obloge (biofilmi) že pri 0,02 mg/l in lahko pride do zamašitve cevi, luščenja oblog ali sproščanja mangana iz njih. Koncentracije mangana v območju 0,05–0,1 mg/l so običajno še sprejemljive za porabnike, v višjih koncentracijah pa izločeni mangan obarva perilo oz. sanitarno in kuhinjsko opremo ter daje vodi, predvsem pa pijačam, tuj okus (IVZ RS, 2011).

V Pravilniku o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04 in 35/04) je mangan uvrščen kot indikatorski parameter z mejno vrednostjo 50 mg/l. V skupini indikatorskih parametrov (del C) je zato, ker vrednost ne temelji na podatkih o nevarnostih za zdravje ljudi. Kot zdravstveno utemeljeno dopustno koncentracijo lahko upoštevamo vrednost 0,4 mg/l, ki je smernica Svetovne zdravstvene organizacije (IVZ RS, 2011).

2.2.16 Ortofosfat

V vodah je fosfor prisoten predvsem vezan v raztopljenih ortofosfatu in polifosfatu ter v trdnih organskih spojinah. Pretvorbe med temi spojinami v vodnih telesih potekajo kontinuirno v odvisnosti od razgradnje in sinteze organskih spojin ter oksidacije anorganskih spojin. Naravni vir fosforja so prepearele kamnine, ki vsebujejo fosfor in razgrajene organske snovi. V vodi je fosfor redko prisoten v višjih koncentracijah, predvsem zaradi aktivnega privzemanja primarnih producentov. V neobremenjenih vodnih telesih koncentracije ne presegajo vrednosti 0,1 mg/l. Kmetijske površine prispevajo k povišanim koncentracijam v vodotokih. V vodotokih, ki tečejo skozi ekstenzivna kmetijska območja, se vrednosti povzpnejo na 0,25 mg/l, povišanje pa povzročijo komunalne in industrijske odpadne vode. V anoksičnih razmerah se fosfor spušča v sloje stoječe vode tik ob dnu, zato so tam njihove koncentracije višje. Zvišanje koncentracij fosforja kot posledica človeške aktivnosti velja za osnovni vzrok evtrofikacije (Urbanič, Toman, 2003).

Fosfati v pitni vodi nimajo neposrednega vpliva na zdravje ljudi, vplivajo pa na poslabšanje kakovosti površinskih virov, ki so vir pitne vode. Zato v Pravilniku o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04) ni določenih mejnih vrednosti. V Pravilniku o zdravstveni ustreznosti pitne vode (Ur. l. RS, št. 46/97, 52/97, 54/98 in 7/00) je bila mejna vrednost 0,3 mg PO₄/l, pri mehčanju vode z dodajanjem fosfatov pa 6,7 mg PO₄/l za celotni fosfor.

2.2.17 Bakterije E. coli

E. coli bakterije so prisotne v človeškem in živalskem blatu v velikem številu ter posledično v odplakah in vodah, ki so onesnažene s fekalijami (človeka, domačih in divjih živali, uporaba v poljedelstvu). Prisotnost E. coli v pitni vodi zanesljivo dokazuje, da je bila voda fekalno onesnažena. Po Pravilniku o pitni vodi (Priloga A) so bakterije Escherichia coli uvrščene v Prilogo I, del A, med mikrobiološke parametre. Mejna vrednost za E. coli v pitni vodi je 0 /100 ml (IVZ RS, 2011).

2.2.18 Skupne koliformne bakterije

So skupina različnih bakterij, ki se ne nahajajo samo v človeškem ali živalskem blatu, temveč tudi v okolju. Če v vzorcu pitne vode ni bilo potrjene tudi prisotnosti E. coli in/ali enterokokov, se jih ne more uporabljati kot pokazatelje fekalnega onesnaženja (Drev, 2009).

Po Pravilniku o pitni vodi (Ur.l. RS, št. 19/04, 35/04) ta ne sme vsebovati koliformnih bakterij.

2.3 Izbrani površinski viri v okolici Velenja

Velenje z okolico je bogato z vodnimi viri, tako površinskimi kot podzemnimi. V eksperimentu smo uporabili tri različne površinske vire in ugotavljali skladnost prečiščene vode z pitno vodo.

Med potencialnimi površinskimi vodnimi viri za pripravo pitne vode so prvotno bila vsa Šaleška jezera. Na koncu smo v eksperiment vključili samo dva, Šoštanjsko in Škalsko jezero.

Šaleška jezera so posledica izkopavanja lignita, ki ga v Šaleški dolini izkoriščajo že sto trideset let. Premogovniške ugreznine so nastale sredi kotlinskega dna Šaleške doline, ki je bilo pred tem v veliki meri v kmetijski rabi, delno pa tudi poseljeno. Tam, kjer so danes jezera, je bilo več podeželskih naselij, ki so delno ali v celoti izginila (Škale, Družmirje, Preloge). Podoba doline se zaradi premogovništva še vedno spreminja, prav tako pa se spreminjajo tudi Šaleška jezera. Prostornina ugrezninske kotanje leta 2005 presega 120 milijonov m³ in zavzema dobrih 6 km² površine. Najglobleje dele te kotanje je napolnila voda in nastala so tri jezera, ki predstavljajo približno tretjino prostornine (več kot 46 mio m³) in prav tako tretjino površine ugreznine (2,1 km²). Jezera, ki jih napajajo potoki, so dobila imena po naseljih, ki so se morala umakniti ojezerjevanju (Škalsko, Družmirsko), oziroma po mestu, ki je zaradi premogovništva postalo objezersko naselje (Velenjsko) (MOV, 2013).

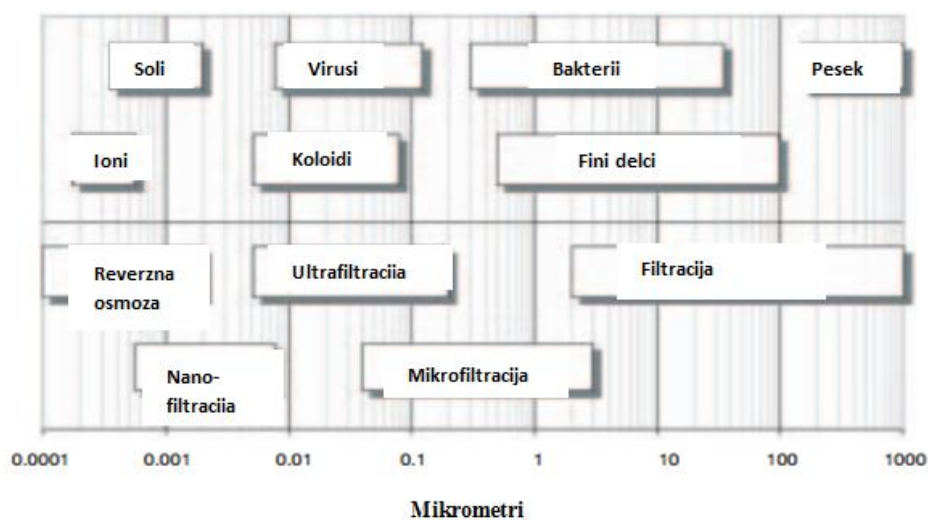
Tretji vodno bogat vir površinske vode med dvema stoječima vodnima telesoma je vodotok oz. reka Paka, ki teče skozi mesto Velenje. Lokacija črpanja je bila izbrana v okolici Velenja, in sicer v Skornem pri Šoštanju. Izbrana je bila z namenom, da bo pretok reke vključeval vse pritoke in dotoke meteornih voda, industrijskih in drugih obremenitev Velenja in Šoštanja. Lokacija se nahaja dolvodno od šaleške komunalne čistilne naprave odpadnih voda, zato vključuje tudi njen iztok. Paka se vključno z vsemi pritoki in dotoki izlije južno od naselja Rečica ob Paki kot levi pritok v Savinjo.

Opisi in še več podatkov o izbranih površinskih virih so v Prilogi B.

2.4 Membranska tehnologija

V globalnem pomenu predstavlja uporaba različnih membranskih tehnologij, ki omogočajo doseganje zahtevane kakovosti pripravljene vode brez uporabe dodatnih kemikalij v procesih čiščenja, recikliranja, priprave tehnološke in pitne vode, nepogrešljivo tehnološko rešitev (Bauman et al., 2010). Membranske tehnologije vedno bolj pogosteje uporabljajo za pripravo pitne vode, tako iz površinskih kot podzemnih virov. Z njimi lahko pri pripravi pitne vode nadomestimo konvencionalne postopke čiščenja voda (koagulacijo, flokulacijo, sedimentacijo in filtracijo), hkrati pa procese čiščenja nadgradimo z učinkovitejšim čiščenjem površinskih voda.

Glede na vrsto gonilne sile membranskega procesa so se za pripravo pitne vode najbolj uveljavili tlačno gnani separacijski membranski procesi UF, MF, RO in NF. Ti se razlikujejo predvsem v velikosti por uporabljenih membran, zaradi česar še posebej učinkovito odstranjujejo nečistoče znotraj specifičnih območij (Slika 2).



Slika 2: Območja čiščenja polprepustnih membran glede na velikosti por (IAEA, 2004: str. 11)

Manjši kot so delci v topljencu, katere je potrebno odstraniti, manjše so dovoljene velikosti por membrane in večji je potreben obratovalni tlak. To vpliva tako na investicijske kot na obratovalne stroške (IAEA, 2004).

Reverzna osmoza se uporablja za odstranitev vseh vrst ionov in ima najmanjše velikosti por na membrani. Nanofiltracija je znana kot "nizko tlačna reverzna osmoza", saj lahko odstrani dvovalentne ione in nizko molekularne snovi, hkrati pa prepušča monovalentne ione. Ultrafiltracije se uporablja za odstranjevanje makromolekul, kot so virusi, proteini in koloidi, ne pa ionske molekule. Mikrofiltracija se uporablja za odstranjevanje delcev, praživali, bakterij in koloidov (IAEA, 2004).

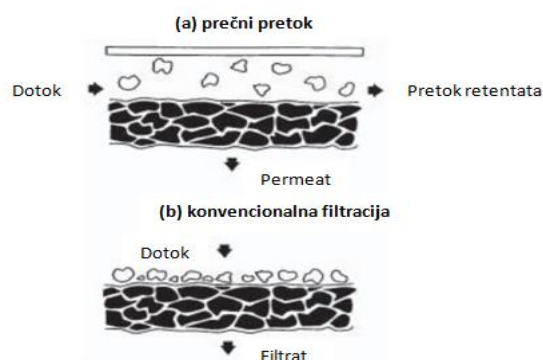
V tlačno gnanih membranskih procesih omogoča tlak vstopne raztopine prehod skozi polprepustne membrane. Pri tem loči snovi, manjše od velikosti por na membrani. Gonilno silo tlaka zagotavljajo črpalke. V preglednici 2 je primerjava tlačnih membranskih procesov glede na velikost por, debilno membrane in višino tlaka obratovanja. Vključuje pa tudi materiale membran in tipe membranskih modulov, ki se običajno uporabljajo.

Preglednica 2: Primerjava lastnosti različnih membranskih procesov (Čarman, 2007: str. 110)

	Reverzna osmoza	Nanofiltracija	Ultrafiltracija	Mikrofiltracija
Debelina membrane	150 µm	150 µm	150 - 250 µm	10 - 150 µm
Velikost por	< 0,002 µm	< 0,002 µm	0,02 - 0,2 µm	0,02 - 4 µm
Odstranitev	visoko molekularne komponente, nizko molekularne komponente, NaCl, glukoza, aminokisliline	visoko molekularne komponente, mono-, di- in oligosaharidi, polivalentni negativni ioni	makromolekule, beljakovine, polisaharidi	različni delci, pesek, bakterije
Obratovalni tlak	15 - 150 bar	5 - 35 bar	1 - 10 bar	< 2 bar
Membranski material	CA	CA	keramika, PSO, PVDF, CA	keramika, PSO, PVDF
Membranski modul	cevni, spiralno naviti, ploščni	cevni, spiralno naviti, ploščni	cevni moduli z votlimi vlakni, spiralno naviti, ploščni	cevni moduli z votlimi vlakni,

CA - celuloza-acetat, PSO - polisulfon, PVDF - polivinildenedifluorid

Filtracija raztopine skozi membranske module se razlikuje glede na način filtracije pretoka in posledično vrste iztoka. International Atomic Energy Agency (2004) deli tlačno gnane procese na dva načina filtracije skozi membrano (Slika 3). Prečna filtracija (ang. cross-flow) ali dinamična filtracija se pogosto uporablja pri UF in RO modulih z spiralnim navitjem. Čelna (ang. dead end) ali statična filtracija, ki je podobna principu konvencionalne filtracije, pa se pogosteje uporablja pri UF modulih z votlimi vlakni.

**Slika 3: Shematska primerjava prečne in konvencionalne filtracije (IAEA, 2004: str. 14)**

Za ustrezno zaščito in preprosto uporabo v praksi se velike površine membrane vgrajuje v module, tako da nudijo (Prošek, 2011):

- dovolj veliko specifično površino (površina membrane/enota volumna [m^2/m^3]),
- dobre turbulentne pogoje, ki pospešujejo prehajanje snovi skozi membrano,
- majhno porabo energije,
- enostavno čiščenje in vzdrževanje,
- preprosto vgrajevanje in menjavo membran,
- majhne padce tlaka,
- nizke investicijske in obratovalne stroške.

Najbolj pogosto se uporabljajo ploščati, cevni, spiralno naviti ali moduli z votlimi vlakni. V preglednici 3 so podani splošni podatki posameznih membranskih modulov.

Preglednica 3: Splošne podatki membranskih modulov (IAEA, 2004: str. 29)

Modul parameter	Tip membranskega modula			
	ploščati	spiralno naviti	cevni	z votlimi vlakni
Gostota vgradnje [m ³]	zmerna (200-500)	visoka (500-1000)	nizka-zmerna (100-500)	visoka-zelo visoka (500-10.000)
Energijska poraba	nizka-zmerna (laminarni pretok)	zmerna (odvisno od oblike)	visoka (turbulentni pretok)	nizka (laminarni/statični pretok)
Čiščenje	zmerno	težko	dobro (fizično čiščenje površine)	dobro (povratno izpiranje)
Zamenjava	posameznega dela ali elementa	celotnega modula	cevi ali celotnega modula	celotnega modula
Material	polimeri, keramika	polimeri	keramika/polimeri/ogljik/sintrne kovine	polimeri, steklo
Uporaba	MF, UF (majhni do srednji obsegi)	NF, RO (veliki obsegi)	MF, UF, RO (majhni do srednji obsegi)	MF (veliki obsegi)

Številne prednosti postavljajo napredne postopke filtracije pred konvencionalne: boljša kakovost pitne vode, fleksibilnost procesa, manjša poraba energije, učinkoviti procesi brez dodajanja kemikalij in manjši prostor za postrojenje.

Sta pa tudi naslednji dve pomanjkljivosti: mašenje membran in stranski produkt koncentrat (retentat). Zamašitev membran je na splošno določena z zmanjšanjem pretoka permeata skozi membrano, koncentracijsko polarizacijo in nastajanjem plasti gela (Simončič et al., 2004).

Koncentracijska polarizacija in nastajanje plasti gela sta mehanizma, ki zmanjšujeta pretok skozi membrano. Posledica koncentracijske polarizacije je zadrževanje sestavin na membrani. Visoka koncentracija delcev v bližini membrane zmanjša pretok. Višja koncentracija na strani napajalne raztopine povzroča spremembo osmotskega tlaka, ki je nasproten zunanji uporabljeni razliki tlaka. Zaradi tega se zmanjša razlika tlaka skozi membrano in zmanjša se tok raztopine (Simončič et al., 2004).

Plast gela lahko nastane, če koncentracija posamezne komponente zelo naraste, tako da so presežene meje topnosti. Posledično nastane usedlina na vrhu membrane, ki deluje kot hidravlični upor. Rezultat takšnega delovanja je zmanjšanje pretoka skozi membrano (Simončič et al., 2004).

Zamašitev membrane je lahko ireverzibilna, če sestavine plasti gela reagirajo druga z drugo in pri tem nastaja na vrhu membrane gosta, trda zmes, ki jo težko odstranimo. Na delovanje membrane vpliva absorbcija sestavin v porah sten. Premer por se zmanjšuje, pri tem pa se povečuje hidravlični odpor. Rezultat tega je manjši pretok (Simončič et al., 2004).

Uspešna tehnika, ki se lahko uporabi v tem primeru, je čiščenje s povratnim tokom, kjer se vključuje razlika tlakov v kratkem časovnem obdobju. Čiščenje s povratnim tokom pomeni izmenično naraščanje in upadanje tlaka s spreminjanjem smeri toka raztopine (Simončič et al., 2004).

Možnosti čiščenja membran so odvisne od tipa zamašitve. Če je zamašitev reverzibilna, kot pri nastajanju gela, je uporabno izpiranje s čisto vodo. Pri ireverzibilni zamašitvi je potrebno uporabiti druge tehnike, kot so izpiranje z močno alkalno ali kislo raztopino pri višji temperaturi. Vpliv teh mehanizmov na padec pretoka je odvisen od naslednjih dejavnikov: velikosti por membran, raztopljenih snovi, razporeditve delcev, vrste membrane in obratovalnih pogojev (Simončič et al., 2004).

Količina koncentrata odpadne vode, ki nastaja kot stranski produkt v membranskih procesih, se razlikuje glede na vrsto membrane in glede na kakovost vstopne vode. Koncentrat predstavlja na čistilni napravi izgube, zato se ga velikokrat vrača na začetek procesa priprave vode.

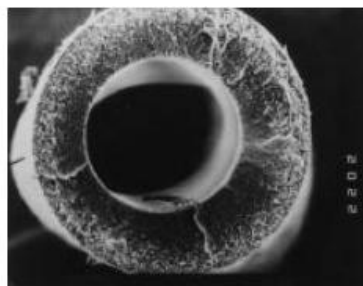
V glavnem se uporabljajo za čiščenja vode MF in UF membrane z votlimi vlakni, NF in RO membrane pa v spiralnem navitju.

Pri pripravi pitne vode iz površinske smo v eksperimentu uporabili tlačno membransko filtracijo UF z votlimi vlakni za predčiščenje makromolekul (bakterij, koloidov in drugih delcev) iz površinske vode pri nižjih tlakih in RO s spiralnim navitjem za nadaljnje odstranjevanje raztopljenih snovi (vseh vrst ionov) ter bakterij (če jih UF ne bi učinkovito odstranila) pri relativno višjih tlakih. Zato je večji poudarek v nadaljevanju diplomske naloge na opisu in delovanju UF modula z votlimi vlakni in RO modula s spiralnim navitjem.

2.4.1 Ultrafiltracija

Ultrafiltracija z votlimi vlakni deluje po principu filtracije z »mrtvim koncem« (ang. dead end), znanim kot statična oz. čelna filtracija. V UF konfiguraciji eksperimenta je modul sestavljen iz votlih vlaknen membrane. Ta so združena v šop, katerega konci so potopljeni v smolo in vgrajeni v tlačno cev, ki je sestavni del modula. Ti moduli so običajno nameščeni navpično, čeprav se lahko uporabijo tudi v horizontalni legi. Na tržišču so na voljo moduli z več sto do več kot 10.000 vlaken (EPA, 2005).

MF in UF membrane se izdelujejo iz različnih materialov, kot so: acetatna celuloza (ang. cellulose acetate – CA), poliviniliden (ang. polyvinylidene fluoride – PVFD), poliakrilonitril (ang. polyacrylonitrile – PAN), polisulfon (ang. polysulfone – PS), polietersulfon (ang. polyethersulfone – PES) in drugi polimeri (EPA, 2005).



Slika 4: Povečan prerez votlega vlakna (EPA, 2005: str. 11)

Princip filtracije skozi membrano je možen od zunaj-navznoter (ang. outside-in) in od znotraj-navzven (ang. inside-out). Med filtracijo od znotraj-navzven vstopi tok pod tlakom v notranjost vlakna in pronica skozi stene vlakna v obliki filtrata. Le ta se zbere zunaj vlaken. Pri filtraciji od zunaj-navznoter se filtrat zbira v notranjosti vlakna (Slika 4) po pronicanju skozi zunanje stene vlakna.

Večina sistemov z votlimi vlakni deluje po principu čelne (ang. dead end) filtracije (EPA, 2005). Pri tej filtraciji vsa vstopna voda prehaja skozi membrano kot filtrat. Vsebinsko delcev v vodi membrana zadrži, zato se nakopičijo v porah na površini membrane. Zaradi akumuliranih delcev na membrani (mašenje membrane) naraste tlak na vstopu, fluks (pretok) skozi membrano pade in izkoristek se postopoma zniža. Pri znižanju do določene stopnje je potrebno membranske module izklopiti, povratno sprati in periodično kemično čistiti.

Vrednosti transmembranskega fluksa vode so odvisne od kvalitete in temperature vstopne vode, stopnje predčiščenja, značilnosti membrane in parametrov sistema obratovanja (Asano et al., 2007).

Prednosti in slabosti ultrafiltracije so podane v spodnji preglednici (4).

Preglednica 4: Prednosti in slabosti ultrafiltracije (Roš, Zupančič, 2010: str. 177)

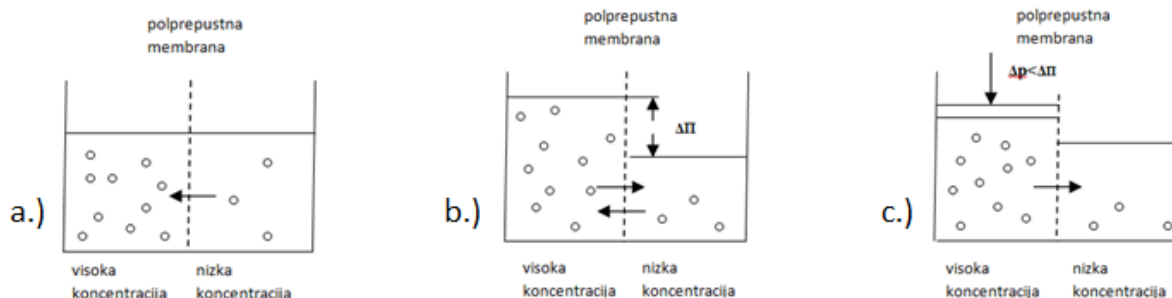
Prednosti	Slabosti
<ul style="list-style-type: none">• Lahko zmanjša količino obdelanih kemikalij.• Manjše zahteve po prostoru: membranska oprema zahteva 50 do 80 % manj prostora od konvencionalne naprave.• Zmanjšuje zahteve po delu; lahko so popolno avtomatizirane.• Novejše membrane delujejo z uporabo nižjih tlakov; cena je primerljiva s konvencionalnimi procesi čiščenja odpadne vode.• Odstranjuje praživali in jajčeca glist: lahko odstrani omejeno količino bakterij in virusov.	<ul style="list-style-type: none">• Potrebuje več elektrike; sistem za visoki tlak mora biti energetsko intenziven.• Lahko zahteva predčiščenje, da bi preprečili zamašitev membrane; predčiščenje zahteva večjo površino in celotne stroške.• Lahko zahteva ravnanje s preostanki in odlaganje koncentrata.• Zahteva zamenjavo membran na 3 do 5 let.• Tvori obloge, kar je lahko resen problem. Tvorbo oblog je težko napovedati brez predhodnih preizkusov na terenu• Pretok vode skozi membrano se s časom postopno zmanjšuje. Izkoristki so znatno manjši od 100 %.• Primanjkuje zanesljivih poceni načinov spremljanja uspešnosti čiščenja.

Za čiščenje vode se uporabljajo številne UF konfiguracije z prečno filtracijo. Čelna (ang. dead end) filtracija se lahko uporablja za predčiščenje ali pa za direktno filtracijo vode (Asano et al, 2007).

2.4.2 Reverzna osmoza

Reverzno osmoza (RO) je tlačno vodena separacijska tehnologija za odstranjevanje topljenca (soli in drugih raztopljenih snovi) iz raztopine. RO se uporablja v številnih procesih razsoljevanja morske vode za pridobivanje pitne vode in za pridobivanje ultračiste vode.

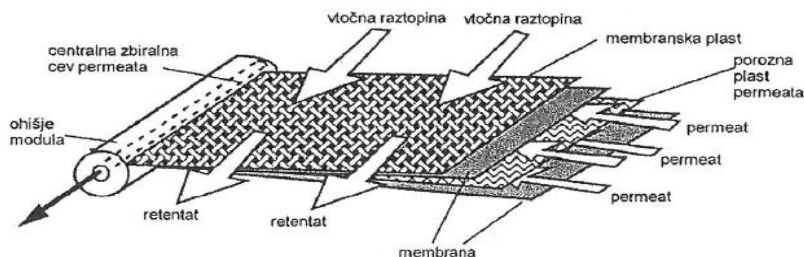
Za razumevanje procesa reverzne osmoze je osnova naravni proces osmoze. Tega lahko razložimo na primeru posode, ki je razdeljena na dva dela s polprepustno membrano. V enem delu je raztopina z višjo koncentracijo snovi, v drugem delu pa z nižjo koncentracijo (Slika 5a). V procesu osmoze membrana prepušča vodo iz manj koncentrirane raztopine k bolj koncentrirani, vse dokler se ne vzpostavi osmotsko ravnotežje (Slika 5b). Pri reverzni osmozi na del z raztopino višje koncentracije delujemo z zunanjim tlakom, ki je večji od osmotskega tlaka ($\Delta p > \Delta \Pi$). Posledično se pretok vode obrne in deluje obraten osmotski proces oz. t. i. reverzna osmoza (Slika 5c). Pri odstranjevanju raztopljenih snovi iz vode poteka difuzijski transport snovi skozi membrano.



Slika 5: a.) osmoza, b.) osmotski tlak ($\Delta \Pi$) v ravnotežju, c.) reverzna osmoza

Za razliko od običajne filtracije je pri reverzni osmozi tok tekoče faze vzporeden s separacijsko membrano, tako da pride do ločitve v dva tokova z različnimi koncentracijami. V idealnem primeru ostanejo vsi raztopljeni delci na levi strani membrane, medtem ko je permeat čista voda (Čarman, 2007).

Membrane s spiralnim navitjem pogosto delujejo po principu prečne filtracije (ang. cross flow). Tako v večini membranskih separacijskih procesov tlačna črpalka potiska vstopno raztopino vzdolž membranske površine s prečnim pretokom, namesto pravokotno na površino membrane. Prečna filtracija zmanjša nabiranje delcev na površini membrane z odnašanjem sloja delcev iz površine (IAEA, 2004).



Slika 6: Spiralno navitje membrane (Simonič, 2004: str. 173)

Na sliki 6 je prikazan modul membrane z reverzno osmozo. Ta je sestavljen iz večih membran, ki so med seboj ločene z vmesnimi permeatnimi plastmi in so skupaj ovite okrog centralne perforirane cevi.

Spiralno navite konfiguracije imajo nizko modularno ceno in so ekonomične za obratovanje zaradi nizke porabe električne energije. Tlak pade v razponu med 100 in 140 kPa. Površina spiralnega navitja membrane glede na volumen (modula) je med tistimi membranami s cevastimi in votlimi vlakni.

Mašenje spiralno navitih membran lahko zmanjšamo s filtracijo vstopne vode na filterjih velikosti od 1 do 10 μm . (Asano et al., 2007).

Na delovanje reverzne osmoze in na njeno učinkovitost vpliva poleg kakovosti vode pretok vode oz. fluks skozi membrano in prepustnost membrane. Literatura navaja (Asano et al., 2007), da se fluks poveča pri višji temperaturi vode zaradi manjše viskoznosti tekočine. Zato se fluks skozi membrano poveča za tri odstotke na stopinjo Celzija. Posledično narasteta tlak in fluks, hkrati pa se izboljša kvaliteta prečiščene vode.

Prednosti in slabosti reverzne osmoze so podane v naslednji preglednici.

Preglednica 5: Prednosti in slabosti reverzne osmoze (Roš, Zupančič, 2010: str. 180)

Prednosti	Slabosti
<ul style="list-style-type: none">• Lahko odstrani raztopljene sestavine.• Lahko dezinficira prečiščeno vodo.• Lahko odstrani večino organskih spojin.• Lahko odstrani nevarne organske snovi in anorganske snovi.	<ul style="list-style-type: none">• Najbolje deluje za čiščenje podtalnice ali predobdelanega iztoka odpadne vode.• Primanjkuje zanesljivih poceni načinov spremljanja uspešnosti čiščenja.• Lahko zahteva ravnanje s preostanki in odlaganje koncentrata.• V primerjavi z konvencionalnim čiščenjem dražja.

2.4.3 Uporaba ultrafiltracije in reverzne osmoze pri pripravi pitne vode

V preglednici 6 je prikazana primerjava izbranih membranskih procesov čiščenja vode. Ultrafiltracija se je uveljavila za čiščenje vseh površinskih virov za pripravo pitne vode, medtem ko se reverzna osmoza uporablja večinoma za čiščenje oz. razsoljevanje morske vode z namenom pridobivanja pitne vode. Bauman s soavtorji (2010) uvršča večstopenjske razsoljevalne membranske naprave med najcenejše tehnologije, saj cena priprave vode znaša okoli 0,4 EUR/m³.

Preglednica 6: Primerjava med membransko filtracijo in reverzno osmozo (Prošek, 2011: str. 21)

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

Membranske filtracije se kljub učinkovitosti in pestri izbiri membranskih filtrov za pripravo vode v Sloveniji zelo malo uporabljajo (vodarna Rižana). Vseeno je za pričakovati, da bo ultrafiltracija v prihodnosti vpeljana na nekaterih drugih objektih (npr. Zg. Bistrica, Ljubija). Razlog, da je ultrafiltracija manj uveljavljena ni več cena ali težavnost vgradnje, temveč neseznanjenost slovenskega trga in vpeljani obstoječi (konvencionalni) procesi, ki so dovolj učinkoviti. Ultrafiltracija samostojno zagotavlja primarno dezinfekcijo, saj odstrani suspendirane snovi in vse delce, ki so večji od 0,01 mikrona in povzročajo motnost. Je dovolj učinkovita za preprečevanje razvoja legionele in zadrži vse mikroorganizme, vključno z bakterijami, virusi, cistami in paraziti. Proizvodnja pitne vode s pomočjo ultrafiltracije je količinsko in kakovostno vedno enaka in ni odvisna od sprememb kakovosti surove vode, ki so pri kraških izviri pogoste in hitre zaradi majhne samočistilne sposobnosti kraškega podtalja. Strokovni viri navajajo, da so se filtracijski postopki uveljavili v zadnjih 10 letih in je polovica vseh ultrafiltracijskih naprav v obratovanju namenjenih obdelavi površinskih voda (Bauman et al., 2011).

V Sloveniji se vedno bolj uveljavljajo napredne membranske tehnologije za pripravo pitne vode, ki so okolju bolj prijazne in zagotavljajo kakovostno oskrbo s pitno vodo.

V letu 2011 je bila zgrajena nova vodarna Frankolovo oz. čistilna naprava, ki je bila glede na cilje in omejitve (velikosti potrebnega prostora, kvalitete obdelave vode, cene) zgrajena z optimalno rešitvijo ultrafiltracije. Podjetje Vodovod-kanalizacija Celje (VO-KA Celje, 2013) zagotavlja, da naprava učinkovito čisti iz vodnega vira Frankolovo (vrtin Toplica) bakterije, viruse in delce, ki povzročajo motnost (večjih od pet stotink mikrometra) celo v času intenzivnih padavin, ko vodni vir zakali. Na ta

način vodarna Frankolovo dovaja v vodovodni sistem 85 l/h pitne vode za širše celjsko območje (Celje, Vojnik, Štore, Teharje).

Konvencionalno čiščenje vodnih virov za pripravo pitne vode bo v širši okolici Velenja nadomestila ali posodobila ultrafiltracija s predpripravo vode na novih čistilnih napravah Mazej, Grmov vrh in Čujež. Te so v fazi izgradnje. Čistilna naprava Mazej bo zagotavljala čiščenje vode (filtracija z aktivnim ogljem, 2 liniji UF modulov po 15 l/s in dezinfekcija) iz izvira Mazej in tako zagotavljala do 30 l/s pitne vode za vodovodno omrežje Šoštanj (KS Topolšica, Lom, Zavodnje, Ravne, Gaberke, Plešivec, Škale, Hrastovec in Cirkovce), po potrebi pa še za vodovodno omrežje Velenje. Čistilna naprava Grmov vrh bo po predpripravi vode (koagulacija, flokulacija, sedimentacija) s 4 sklopi UF po 30 l/s zagotavljala čiščenje vode iz Topolšice in Ljubije, po potrebi pa še iz izvira Mazej (skupno do 120 l/s) za pitno vodo vodovodnega omrežja Velenje in (ko bo zgrajena vodovodna povezava) za vodovodno omrežje Šmartno ob Paki. Preostanek oz. presežek vodnih virov se bo vračal v okolje (bližnji potok). Del potreb pitne vode za Velenje bo zagotavljala čistilna naprava Čujež. Ta bo iz vodnih izvirov Dolič, Toplice, Ločan, Jablanice in Lampret prečistila s predpripravo (flokulacijo) vode in s 3 sklopi UF po 40 l/s vode ter tako zagotovila do 120 l/s kakovostne pitne vode.

V Sloveniji ni takšne vodarne oz. čistilne naprave, ki za pripravo pitne vode uporablja postopek reverzne osmoze. Ta postopek čiščenja je pogost v svetu za pripravo pitne vode iz morske vode in slanice za izločanje visokih koncentracij raztopljenih soli in ostalih onesnaževal. Tudi v Sloveniji imamo morje, vendar ga ne izkoriščamo za pripravo pitne vode, ker imamo dovolj podzemnih in ostalih površinskih virov. Zanimanje za uporabo tehnologije čiščenja z RO (v kombinaciji z UF) v Sloveniji je predvsem za čiščenje odpadnih voda in za namene pridobivanja ultračiste ter demineralizirane vode v industriji (avtomobilski, prehrambeni, energetski, farmacevtski idr.). Zanimanje za membranske tehnologije narašča predvsem zaradi potrebnih manjših prostorskih kapacitet v primerjavi s konvencionalnimi postopki, ekonomske dostopnosti, porabe kemikalij (te se uporabljajo le občasno za kemično spiranje membran), učinkovitega čiščenja ne glede na kakovost, kapacitete vstopne vode in zaradi izboljšanih materialov membran (bolj odporni, z daljšo življenjsko dobo idr.).

V Evropi in drugod po svetu je problematika slabe kakovosti vode in količinske pomanjkljivosti (površinskih in podzemnih) virov veliko bolj izrazita, zato se pogosto uporabljata sodobni membranski tehnologiji, kot sta ultrafiltracija in reverzna osmoza. Priporočljivo je kombiniranje procesov (UF/RO, koagulacija/flokulacije/UF, idr.) in predčiščenje vode pred membransko filtracijo zaradi daljše življenjske dobe membran in učinkovitejšega čiščenja.

3 MEMBRANSKA PILOTNA NAPRAVA

Membranska pilotna naprava je bila zgrajena s pomočjo investicijskih sredstev, katerih del je prispevalo podjetje Esotech d.d., del pa vlada RS in Evropska unija. Izdelava projektne dokumentacije, nabava komponent in montaža pilotne naprave so stali okrog 35.000 EUR. Obratovalni stroški, ki se pojavljajo med uporabo naprave, zajemajo porabo električne energije in komprimiranega zraka, porabo nekaj različnih kemikalij ter delo operaterjev in vzdrževalcev. Ocenjena povprečna vrednost obratovalnih stroškov znaša okrog 0,5 EUR/m³ prečiščene surove vode.

Shema membranske pilotne naprave z vsemi sestavnimi deli je prikazana v Prilogi C.

3.1 Sestavni deli membranske pilotne naprave

Procesni sklop čiščenja z ultrafiltracijo se pri pripravi pitne uporablja za predčiščenje oz. kot predfiltracija pred reverzno osmozo.

Sestavni deli naprave z ultrafiltracijo:

- tlačno PVC ohišje oz. modul z UF membrano,
- avtomatski odzračevalni ventil,
- sitast filter 0,13 mm,
- merilniki kapacitete vode – t. i. vodomeri,
- senzorji in merilci tlaka – t. i. manometri,
- dozirna črpalka za flokulant,
- sistem za hidravlično pranje,
- dozirni sistem za kemijsko pranje,
- vzorčevalne pipice za odvzem surove vode po predčiščenju in filtrata po UF,
- interne PVC povezave,
- nosilna konstrukcija iz nerjavečega jekla,
- napajalna črpalka,
- kompresor za krmilni zrak.

Za učinkovito delovanje membrane v katerikoli kombinaciji tehnologije čiščenja vode ali priprave čiste vode proizvajalec navaja maksimalne vrednosti pH, koncentracije, tlake in temperaturo med filtracijo ali pranjem membrane. Te vrednosti parametrov se ne smejo preseči, prav tako pa je potrebno, da modul z UF deluje znotraj obratovalnih pogojev proizvajalca, saj s tem vplivamo na daljšo življenjsko dobo membrane.

V preglednici 7 so izpisane tehnične specifikacije modula (Norit, 2013 in Norit-X-flow) z UF membrano in njegovi maksimalni ter delovni obratovalni pogoji.

Preglednica 7: Karakteristike in pogoji obratovanja modula z UF membrano

Tehnične specifikacije modula z UF membrano		Maksimalni pogoji in pogoji obratovanja UF	
PODATEK	SPECIFIKACIJA	PARAMETER	VREDNOST
Proizvajalec	Norit X-flow	Maksimalni dopustni TMP	-3 do 3 bar
Tip modula	SXL 225 FSFC PVC	pH dotoka	2 - 12
Material modula	PVC	Max. izpostavljenost kloru	250000 ppm.h
Št membran	1	Obratovalna temperatura	0 - 40 °C
Vrsta membrane	vošla vlakna, asimetrična	Obratovalni TMP	0,1 - 1,0 bar
Material membrane	PES	Vstopni tlak	3 bar
Filtracija	od znotraj - navzven (ang. inside-out)	Obratovalni fluks filtracije	60 - 135 l/(m ² .h)
Velikost por membrane	20 - 25 nm	Čas filtracije	15 - 60 min
Notranji premer vlakna	0,08 mm	Fluks povratnega hidr. pranje	250 - 300 l/(m ² .h)
Površina membrane	40 m ²	Čas povratnega hidr. pranja	15 - 60 s
Dolžina modula	1537 mm	Kemično pranje (CEB)	12 - 48 h
Premer modula	200 mm	Kemikalije za CEB	HCl (500 ppm), NaClO (200 ppm), NaOH (500 ppm).

Membrana UF je zmerno hidrofilna in obdelana z glicerinom za zaščito por.

Za napajanje naprave je potreben dovod električne energije 2,5 kW.

Sestavni deli naprave z reverzno osmozo:

- vodomer dotočnih kapacitet,
- dotočna centrifugalna črpalka,
- visokotlačna črpalka,
- dva merilca trenutnih pretokov permeata in koncentrata,
- pipica za odvzem vzorca permeata,
- manometri za kontrolo tlaka vode na vstopu in izstopu iz RO,
- dva mehanska filtra: 5 µm in 1 µm,
- visokotlačni spiralno naviti moduli v tlačnem ohišju (2 x 2 modula),
- vstopno krmilni zaporni ventil,
- tlačno stikalo,
- interne cevne povezave,
- nosilna konstrukcija iz nerjavečega jekla,
- dozirni sistem za dodajanje kemikalij,
- merilec električne prevodnosti permeata,
- krmilna električna omarica.

Specifikacija in splošni obratovalni pogoji naprave s postopkom reverzne osmoze, ki jih navaja prodajalec (MAK CMC, 2013), so podani v preglednici 8.

Preglednica 8: Karakteristike in pogoji obratovanja naprave s postopkom reverzne osmoze

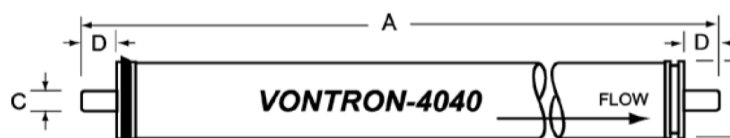
Tehnični podatki		Priporočeni pogoji obratovanja	
PODATEK	SPECIFIKACIJA	PARAMETER	VREDNOST
Prodajalec	MAK CMC	Vstopni tlak	min. 1,5 bar
Tip naprave	INITRO 100	Izstopni tlak permeata	max. 0,5 bar
Število modulov	2	Obratovalna temp.	5 - 30 °C
Število membran	4	Max. koncentracija raztopljenih soli	2000 mg/l (kot NaCl)
Proizvajalec membrane	VONTRON Technology Co. Ltd.	Vrednost pH vstopne vode	3 - 11
Tip membrane	LP21-4040	Delovni tlak	12,5 bar
Dimenzije naprave	Dolžina 2600 mm Višina 1800 mm Širina 600 mm	Pretok permeata	1000 l/h
		Delež permeata	75 %
		Pretok vstopne vode	1340 l/h

Za napajanje naprave je potreben dovod električne energije 2,8 kW.

Tehnične karakteristike posamezne spiralno navite membrane, ki jih podaja proizvajalec VONTRON Technology Co. Ltd. (2013), so navedene v preglednici 9.

Preglednica 9: Tehnične karakteristike spiralno navite membrane proizvajalca VONTRON Tehnology CO.

Tip RO membrane	LP21-4040
Vrsta membrane	Nizko tlačna membrana
Material membrane	aromatična kompozitna
Tip modula (Slika 8)	spiralno navitje
Aktivna površina membrane	7,9 m ²
Povprečni pretok permeata	9,1 m ³ /d
Delovni tlak	15,5 bar, max. 41 bar
Maksimalni delovni tlak	600 psi (4,14 MPa)
Maksimalni padec tlaka za posamezno membrano	1 bar
Maksimalni dotok vode	3,6 m ³ /h
Maksimalna temperatura vstopne vode	45 °C
Vrednost pH vstopne vode	3 - 10
Dimenzije membrane (Slika 7)	A= 1016 mm, B= 99,7 mm C = 19,1 mm, D=26,7 mm



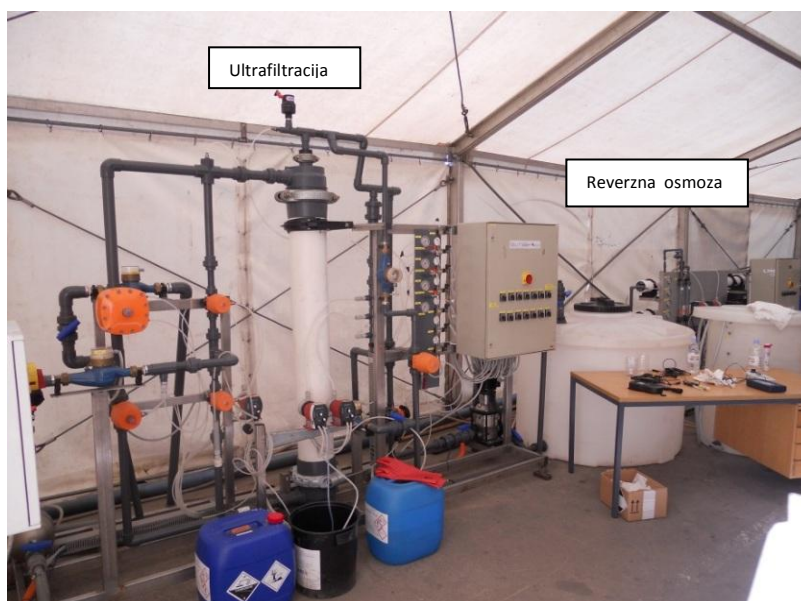
Slika 7: Shema membrane VONTRON-4040 (VONTRON Tehnology Co. Ltd.: str. 28)



Slika 8: RO modul s spiralno navito membrano

3.2 Opis membranske pilotne naprave

Membranska pilotna naprava je bila v osnovi zasnovana za čiščenje in pripravo deionizirane vode za uporabo le-te v tehnološke namene. V celoti jo sestavljajo trije glavni sklopi čiščenja: ultrafiltracija (UF), reverzna osmoza (RO) in elektrodeionizacija (EDI). Mi smo za čiščenje površinske vode uporabili procesne sklope z ultrafiltracijo (UF) in reverzno osmozo (RO). Proces čiščenja vode na membranski pilotni napravi (Slika 9) temelji na fizikalnem čiščenju površinske vode brez dodajanja kemikalij, ker te niso bile potrebne. Dodajali smo jih samo za potrebe kemičnega spiranja UF membrane. Membranska pilotna naprava je zasnovana tako, da je možno po potrebi dodajati kemikalije pred vstopom na UF modul in pred vstopom na RO modul.



Slika 9: Membranska pilotna naprava za pripravo pitne vode

3.2.1 Opis delovanja procesnega sklopa čiščenja z UF

Vir površinske vode, ki ga je potrebno očistiti, se nahaja v vstopnem 10 m³ rezervoarju (Slika 10). Ta predstavlja dotok vode na ultrafiltracijo. Rezervoar je možno sprazniti ali samo odvzeti vzorec na dnu vgrajenega ventila (Slika 11).



Slika 10: Vstopni 10 m³ rezervoar vode



Slika 11: Iztok iz rezervoarja VG1

Drugi iztok iz VG1 vodi preko varnostnega (ročnega) ventila na centrifugalno črpalko PC1 (slika 12), ki črpa vodo preko sitastega 0,13 mm filtra in vodomera FQ 1 (slika 13) na modul z ultrafiltracijo.



Slika 12: Centrifugalna črpalka PC1



Slika 13: Sitast 0,13 mm filter (levo), vodomer FQ1 (desno)

Filter zagotavlja mehansko predčiščenje in preprečuje večjim delcem, da bi prehitro zamašili pore membrane UF. S tem delno zaščitimo membrano pred muljem in drugimi nečistočami iz površinske vode.

UF modul vsebuje membrano z votlimi vlakni, kjer poteka filtracija vode od znotraj-navzven po principu statične filtracije. Prečiščena voda je t. i. filtrat ultrafiltracije, ki se zbere v osrednji odprtini modula in izstopa iz zgornjega iztoka modula. Filtrat ultrafiltracije potuje preko vodomera FQ2 v vmesni rezervoar VG2 velikosti 1 m³. Na vtoku v rezervoar je ročni ventil, s katerim lahko reguliramo pretok in hkrati fluks filtrata UF (Slika 14).



Slika 14: Vtok UF filtrata v vmesni rezervoar VG2

3.2.1.1 Hidravlično pranje UF modula

Hidravlično pranje ali povratno izpiranje modula poteka s čisto vodo iz rezervoarja VG2. Spiranje por votlih vlaken membrane poteka pri hidravličnem pranju od zunaj-navznoter (ang. outside-inside), torej obratno kot filtracija. Fluks pralne vode je okvirno nastavljen preko ročnega ventila RV3 na 200–250 l/(m²h).

Rezervoar VG2 predstavlja glavni dovod vode za povratno hidravlično izpiranje UF preko centrifugalne črpalke PC2 (Slika 15).



Slika 15: Centrifugalna črpalka PC2

Hidravlično pranje akumuliranih delcev iz zamašenih por membrane poteka avtomatsko preko krmilno napajalne električne omarice in traja skupaj cca. 1 minuto.

Pralna voda z umazanijo iz por membrane potuje iz UF preko vodomera FQ3 po cevi v jašek meteorne kanalizacije (Slika 16).



Slika 16: Iztoki membranske pilotne naprave, speljani po ceveh v jašek meteorne vode

3.2.1.2 Dodajanje kemikalij

Dodajanje kemikalij v času testiranja ni bilo potrebno, ker je bila voda iz izbranih površinskih virov dovolj čista. Procesni sklop čiščenja vode z UF ima 3 črpalke za doziranje kemikalij in s tem omogoča napravi:

- doziranje flokulanta

Procesni sklop z ultrafiltracijo ima možnost doziranja kemikalij preko črpalke MP1 v fazi filtracije. Dozirno mesto kemikalij je pred vstopom vode v modul, takoj za sitastim filtrom in vodomerom FQ1 (Slika 18). Kemikalije je potrebno dodajati za zaščito membrane ali pa za izboljšanje učinka čiščenja, ko je vstopna voda zelo kalna in obarvana. Proizvajalec membrane priporoča dodajanje flokulanta PAC (polihidroksi aluminijev klorid).

- doziranje kemikalij za kemijsko pranje UF membrane

Kemično pranje ultrafiltracije je ročno vodeno in po ločeni cevni povezavi od filtracije in hidravličnega izpiranja. Izvaja se po potrebi, ko je mašenje por membrane ireverzibilno, pri tem transmembranski tlaki (TMP) narastejo, fluks pa se zniža. Proizvajalec priporoča kemično čiščenje (CEB) oz. spiranje ultrafiltracije na 12 do 48 ur, če naprava konstantno deluje in ko TMP narastejo od 0,01 do 1,0 bara. Membranska pilotna naprava ne deluje konstantno, ampak le v času testiranj in le po potrebi. Zato se izvaja kemično pranje ultrafiltracije preventivno, ko transmembranski tlaki narastejo do 0,8 bara.

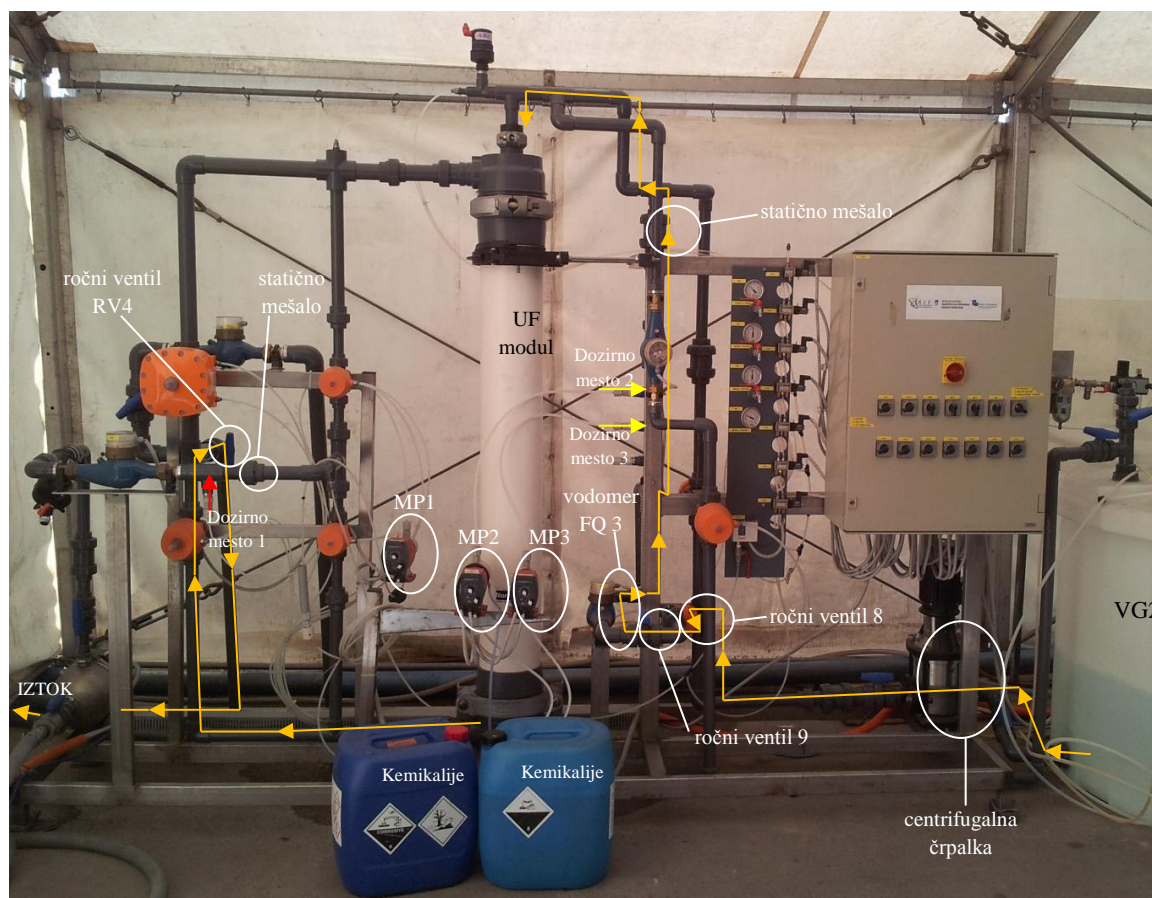
Za kemično pranje ultrafiltracije (Slika 18) je potrebno odpreti ločeno cevno povezavo z zasukom ročnega ventil RV9. Smer toka vode skozi modul je enaka kot pri hidravličnem povratnem pranju. Pri tem je iztok raztopine kemikalij ločen zaradi negativnih vplivov na okolje. Zato je potrebno odpreti ročni ventil RV4, da voda s kemikalijami ne gre po cevi v meteorni jašek. Ta se zajame v 0,3 m³ rezervoarju VG3 (Slika 17) in se ustrezno nevtralizira pred iztokom v jašek.



Slika 17: Pomožni rezervoar VG3 za vodo obremenjeno s kemikalijami

Z membranskim ročnim ventilom RV8 lahko reguliramo pretok čiste vode za kemično pranje. Ta se črpa iz rezervoarja VG2 preko črpalke CP2 v ločeno cevno povezavo z vodomerom FQ3, kjer preko črpalke MP2 in MP3 črpamo kemikalije na dozirni mesti 2 in 3.

Pri delu s kemikalijami je potrebna tudi ustrezna zaščita osebe, ki izvaja kemijsko pranje UF. Zato je nepogrešljiva oprema plašč, zaščitna očala in rokavice ter ustrezna obutev.



Slika 18: Dodajanje kemikalij na UF

Za kemično pranje proizvajalec priporoča raztopino klorovodikove kisline (HCl) s koncentracijo 500 ppm, natrijev hipoklorit (NaClO) s koncentracijo 200 ppm in natrijev hidroksid (NaOH) s koncentracijo 500 ppm. Doziranje kemikalij poteka v dveh fazah. V prvi fazi istočasno dodajamo natrijev hipoklorit in natrijev hidroksid za izboljšanje učinka čiščenja por membrane. V drugi fazi dodajamo samo klorovodikovo kislino. Smer toka vode pri kemičnem pranju UF prikazujejo rumene puščice na sliki 18. V nadaljevanju je podan opis posameznih faz.

V prvi fazi kemičnega pranja UF se dozira klorovodikova kislina z črpalko MP2 na dozirno mesto 2 v ločeno cevno povezavo, kjer se skupaj premeša s pralno vodo (iz VG2). Dobro premešanje zagotavlja statično mešalo na cevovodu pred vtokom na UF. Kemično pranje membrane z raztopino poteka do znižanja pH vrednosti na 2 v iztoku iz UF. Nato se istočasno izklopi črpalka MP2 za črpanje HCl in črpalka CP2 (ki črpa čisto vodo) ter elektromagnetni ventil EV3. Tako se ustvari podtlak, pri katerem pustimo stati membrano v raztopini cca. 15 min, da reakcija poteče. Pri tem se odstranjujejo CaCO_3 in ostale mineralne obloge. Po 15 minutah reakcijskega časa se pri spiranju s pralno (čisto) vodo doseže v iztoku iz UF vrednost pH okoli 8. Črpalke se sperejo s čisto vodo in nadaljuje se 2. faza kemičnega pranja UF.

Druga faza kemičnega pranja ultrafiltracije poteka z doziranjem hipoklorita (NaOCl) s pomočjo dozirne črpalke MP2 v dozirno mesto 2 in istočasno natrijevega hidroksida (NaOH) s pomočjo dozirne črpalke MP3 v dozirno mesto 3 v ločeno cevno povezavo. Tukaj se pomešajo kemikalije skupaj s pralno vodo (iz VG2).

Glede na delovanje UF, naprava deluje pod enakim principom kot v prvi fazi kemičnega spiranja, s tem da tokrat delujeta obe črpalki (MP2 in MP3), ki dozirata NaOCl in NaOH v sistem pranja do zvišanja pH vrednosti na 12 v iztoku iz UF. Nato se istočasno izklopi črpanje kemikalij (MP2 in MP3) in vode (CP2) ter elektromagnetni ventil EV3. Po 15-minutnem reakcijskem času se odluščijo organske obloge in očistijo pore, z natrijevim hipokloritom dosežemo dezinfekcijo membrane. Membrano se nato povratno izpira (z ročnim delovanjem) s čisto vodo iz rezervoarja VG2 do zelene vrednosti pH 8 v iztoku iz UF.

Po končanem kemičnem pranju je pomembno spiranje dozirnih črpalk in ustrezno hranjenje kemikalij.

3.2.1.3 Merilna oprema na UF

Merilno opremo (Preglednica 10) na procesnem sklopu UF sestavljajo 4 vodomeri za merjenje pretočnih kapacitet vode in 4 manometri za merjenje tlaka (Slika 19).

Preglednica 10: Merilna oprema na UF

Oznaka	Merilnik
FQ1	Vodomer na dotoku surove vode
FQ2	Vodomer na izstopu iz UF
FQ3.1	Vodomer čiste vode za hidravlično pranje UF na iztoku
FQ3	Vodomer čiste vode, potrebne za kemično pranje UF pred doziranjem kemikalij
PI1	Manometer tlaka surove vode
PI2	Manometer tlaka na vstopu v UF modul pri filtraciji
PI3	Manometer tlaka na izstopu iz UF modula pri filtraciji
PI4	Manometer tlaka na UF modulu pri pranju

Manometri imajo analogni prikaz trenutnih vrednosti.

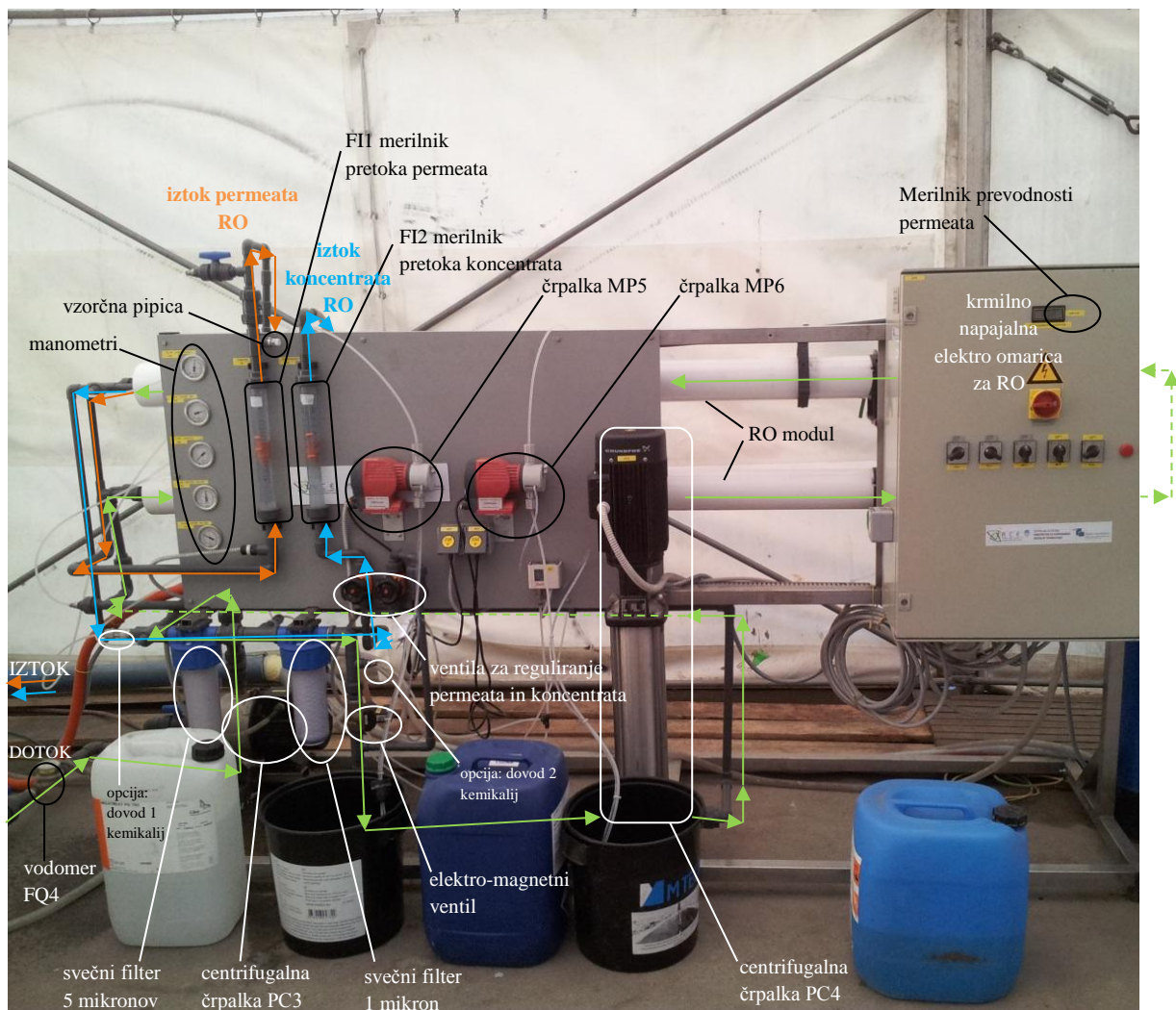


Slika 19: Manometri in pipice za odvzem vzorcev na UF procesnem sklopu

Za merjenje pretoka žal naprava nima ustreznih merilnikov, zato se lahko pretok okvirno nastavi preko ventila pred izstopom filtrata v vmesni rezervoar VG2 (Slika 14). Pretoka dotoka in filtrata UF ne moremo izmeriti, lahko pa ga izračunamo iz odčitkov vodomeroev.

3.2.2 Čiščenje filtrata UF na RO

Vmesni rezervoar VG2 razen zagotavljanja pralne vode za UF služi kot zadrževalni bazen filtrata UF pred nadaljnjim čiščenjem na procesnem sklopu z reverzno osmozo (Slika 9). V rezervoarju je merilnik nivoja, ki avtomatsko izklopi RO, ko je prenizek nivo vode za čiščenje. Pretok UF je večji od pretoka RO, zato se razlika kapacitete vode zadržuje v VG2. V primeru, ko je rezervoar VG2 poln, je potrebno UF izklopiti in hidravlično izprati. V odvisnosti od nastavljenih pretokov UF in RO se razlikuje tudi zadrževalni čas UF filtrata v VG2.



LEGENDA:

- Dotok UF filtrata
- Permeat RO
- Koncentrat RO

Slika 20: Reverzna osmoza

Filtrat ultrafiltracije se črpa s centrifugalno črpalko PC3 iz rezervoarja VG2 najprej na mehansko predčiščenje zaporednih vezanih svečnih filtrov velikosti 5 mikronov in 1 mikron (Slika 21). Filtra služita kot zaščita reverzni osmozi pred delci, ki bi zaradi neučinkovitega čiščenja UF lahko ogrozili membrano RO.



Slika 21: Svečni 5-mikronski (levi) in 1-mikronski filter (desni)

Po dodatnem mehanskem predčiščenju sledi elektromagnetni ventil, ki skrbi za delovanje visokotlačne centrifugalne črpalke PC4. Črpalka zagotavlja konstanten tlak, ki je potreben za čiščenje vode na reverzni osmozi. Gonilna sila tlaka potiska vodo skozi spiralno navitje membrane in pri tem loči večino raztopljenih snovi v vodi. Pretok se po principu prečne filtracije skozi membrano razdeli na prečiščeno vodo oziroma t. i. permeat in na koncentrat s solmi in drugimi raztopljenimi snovmi. Koncentrat glede na kakovost surove vode spustimo v jašek meteorne vode ali pa v kanalizacijo. Pretok permeata in koncentrata lahko na procesnem sklopu RO reguliramo z ročnima membranskima ventiloma ter njuni količini preverjamo na rotametrah.

Procesni sklop čiščenja z reverzno osmozo tipa INITRO 100 vsebuje 2 PVC modula, v katerih sta po 2 elementa spiralno navitih membran. Naprava RO je bila zasnovana za delovanje pri določenih obratovalnih pogojih (Preglednica 8), medtem ko jo mi v eksperimentu uporabljamo v nekoliko spremenjenih pogojih.

3.2.2.1 Dodajanje kemikalij

Z dodajanjem kemikalij RO dosežemo boljše pogoje in boljši učinek čiščenja membrane RO. S tem pa podaljšujemo življenjsko dobo membrane. Kemikalije se dodajajo po potrebi, glede na kakovost vstopne vode in glede na nadaljnje čiščenje. Za nevtraliziranje vodnega kamna se lahko inhibitor oblog s pomočjo črpalke MP5 dozira v sistem pred svečna filtra. Za potrebe uravnavanja pH vrednosti se lahko s pomočjo črpalke MP6 v sistem med svečna filtra dozira natrijev hidroksid.

Za pripravo deionizirane vode je potrebno dodajanje kemikalij, ker pred RO ni mehčalne naprave. Pri pripravi pitne vode iz izbranih površinskih virov dodajanje teh ni bilo potrebno

3.2.2.2 Merilna oprema na RO

Procesni sklop čiščenja vode z RO vsebuje 1 vodomer, 5 manometrov, 2 rotametra in merilnik električne prevodnosti permeata (Preglednica 11).

Preglednica 11: Merilna oprema na RO

Oznaka	Merilnik - meritev
FQ4	Vodomer - dotočne kapacitete vode na RO
PI5	Manometer - tlaka vode pred svečnimi filtri
PI6	Manometer - tlaka vode za svečnimi filtri
PI7	Manometer - tlaka vstopa na RO
PI8	Manometer - tlaka izstopa permeata
PI9	Manometer- tlaka koncentrata RO
FI1	Rotameter - pretok permeata
FI2	Rotameter - pretok koncentrata
-	Merilnik električne prevodnosti permeata

3.2.3 Upravljanje membranske pilotne naprave

Membranska pilotna naprava je avtomatsko vodena preko glavne krmilne in napajalne električne omare (Slika 22), na katero so priklopljene še ostale krmilno napajalne električne omarice posameznih procesnih sklopov čiščenja (UF, RO in EDI). Pred zagonom naprave je potreben vklop vseh glavnih stikal na električnih omaricah, pregled odprtosti ročnih ventilov (RV) na cevnih povezavah za dotok in iztok vode na vse procesne sklope čiščenja ter vklop dovoda komprimiranega zraka iz kompresorja na UF. Za delovanje membranske pilotne naprave je nastavljen dovod konstantne vrednosti 3 bar.



Slika 22: Glavne krmilna in napajalna električna omara

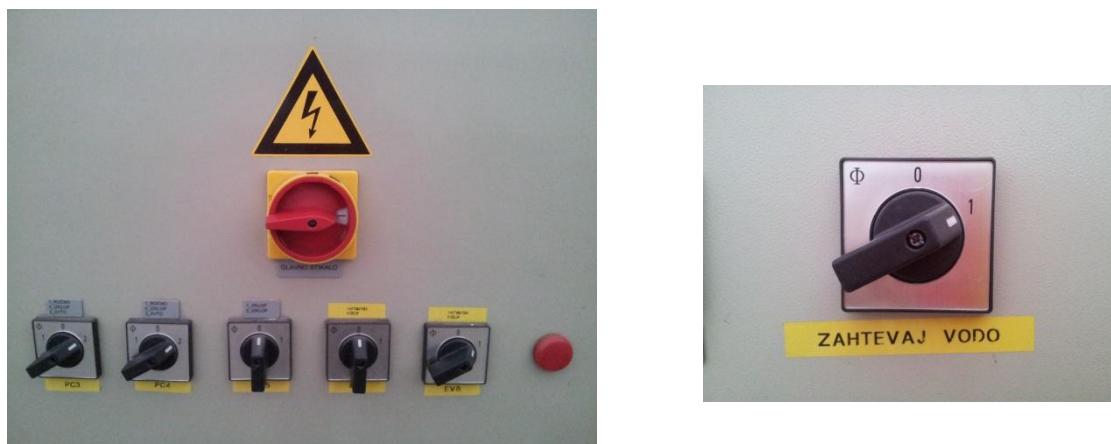
Za filtracijo skozi UF modul se nastavijo vsi pnevmatski (membranski) ventili in obe črpalki v avtomatsko delovanje. Takrat se posamezni pnevmatski ventili odprejo glede na želeno fazo delovanja (filtracija ali hidravlično izpiranje ali mirovanje) in s tem usmeri tok vode v ustrezno oz. potrebno smer cevnih povezav.

Za povratno hidravlično izpiranje UF je potrebno preklopiti gumb na električne omarici iz filtracije (Slika 23) v hidravlično pranje, ki prav tako deluje avtomatsko.



Slika 23: Krmilno napajalna električna omarica UF v fazi filtracije

Procesni sklop čiščenja z reverzno osmozo zaženemo s preklopom stikala na električni omarici na avtomatsko delovanje črpalk (PC2 in PC3), z vklopom ventila EV8 v avtomatsko delovanje ter preklopom stikala za doziranje vode iz 0 v fazo 1 (Slika 24).



Slika 24: Vklon RO v fazo filtracije

3.3 Predpriprave na eksperiment

Pred glavnimi testiranjimi membranske pilotne naprave smo naredili poskusna enotedenska testiranja, da smo zasnovali merilni protokol in ugotovili okvirno obnašanje membranske pilotne naprave pri filtraciji različnih površinskih voda. Hkrati smo preizkusili merilno opremo in pridobili podatke o časovnih potekih posameznih faz eksperimentalnega dela.

Po testnem preizkusu in meritvah je bilo potrebno membransko pilotno napravo očistiti in merilno opremo umeriti. V nadaljevanju (1–7) so opisane predpriprave na eksperiment.

(1) Kemično čiščenje UF membrane

Kemično čiščenje UF membrane je bilo potrebno, ker hidravlično povratno izpiranje ni bilo več učinkovito za čiščenje zamašenih por (ireverzibilna zamašitev) v membrani. Pri filtraciji površinske vode je bil fluks filtrata pod pričakovano vrednostjo. Potek kemičnega čiščenja je opisan v poglavju 3.2.1.2.

(2) Čiščenje mehanskih filtrov

Pred začetkom eksperimenta in po vsakem testiranju oz. zaključeni filtraciji posameznega površinskega vira za pripravo pitne vode smo spihali in očistili sitast 0,13 mm filter (Slika 25), ki zagotavlja mehansko predčiščenje. Svečna filtra (5-mikronskega in 1-mikronskega), ki zagotavljata mehansko predčiščenje pred RO, smo zamenjali pred začetkom eksperimenta z novimi (Slika 26). Med posameznimi testiranjmi to ni bilo potrebno, saj je UF učinkovito odstranila večje delce.



Slika 25: Sitast 0,13 mm filter po in pred testiranjem



Slika 26: Zamenjava svečnih filtrov z novimi (Levo: stara filtra, Desno: nova filtra)

(1) Čiščenje rezervoarjev

Potrebno je bilo sprazniti in očistiti vse rezervoarje za transport površinske vode (1 m^3), glavni vstopni rezervoar VG1 (10 m^3) in vmesni rezervoar VG2 (1 m^3) pred začetkom eksperimenta in po vsakem testiranju s posameznim površinskim virom. Namen čiščenja rezervoarjev je bil, da se voda iz posameznega površinskega vira ne premeša z drugo vodo (spremenimo kakovost vode) in da dosežemo vedno enake pogoje začetnih količin v rezervoarjih.

(2) Popis stanja vodomero

Pred in po testiranju membranske pilotne naprave s površinskim virom smo popisali vse števec vodomero. Podatke smo uporabili za primerjavo prečiščenih (in dotočnih) količin vode med posameznim testiranjem.

(3) Črpanje vode iz izbranih površinskih virov

Membranska pilotna naprava za pripravo pitne vode iz površinske je locirana na sedežu podjetja Esotech, d. d. Za potrebe testiranj smo se v zgodnjih jutranjih urah (6.00) odpeljali s tovornjakom, napolnjenim s praznimi rezervoarji (pet 1 m^3) črpat vodo na izbrano lokacijo. Črpanje v rezervoarje je

potekalo s pomočjo agregata in črpalke po gasilski cevi. Za napolnitev 10 m³ vstopnega rezervoarja smo opravili dve vožnji oz. dve črpanji. Rezervoarje smo praznili v vstopni rezervoar s pomočjo viličarja, ki je dvignil rezervoar na višjo koto in gravitacijsko prelivl vodo oziroma polnil vstopni rezervoar (Slika 31). Črpanje in testiranje membranske pilotne naprave se je posledično začelo s časovnim zamikom, vendar pri vsakem testiranju z drugim površinskim virom je bilo to še isti dan ob 10.00. V času eksperimenta smo 22. 7. črpali vodo iz Šoštanjskega jezera, 24. 7. vodo iz Škalskega jezera in 26. 7. vodo iz reke Pake.



Slika 27: Lokacije črpanja iz površinskih virov in lokacija eksperimenta

Vsi trije površinski viri so bili v okolici lokacije testiranja (Slika 27), tako da je bil čas transporta vode relativno kratek. Izbira lokacije črpanja je temeljila na podlagi dostopnosti površinskega vira in da je bilo možno črpanje izvesti nemoteče (za ljudi ter živali v vodnem okolju). V površinskem viru smo pred začetkom črpanja izmerili temperaturo, prevodnost, pH in motnost (Slika 28). Vodo smo črpali ob brežini na globini okoli 0,5 metra.



Slika 28: Meritve na terenu

(1) Umerjanje merilnih naprav

Kalibracija oz. umerjanje merilne opreme za določevanje fizikalno-kemijskih parametrov v vodi je potekala vedno pred začetkom testiranja membranske pilotne naprave z izbranim površinskim virom. Umerili smo multimeter za merjenje vrednosti pH, temperature in prevodnosti vode ter turbidimeter za merjenje motnosti v vodi.

(2) Dezinfekcija vzorčnih pipic in priprava vzorčnih posod

Pred začetkom testiranj in odvzemom vzorcev vode med testiranjmi smo razkužili vzorčne pipice. Dezinfekcija odvzemnih mest je bila še posebej pomembna pri mikrobioloških vzorcih za dokazovanje prisotnosti/odsotnosti bakterij. Z dezinfekcijskimi robčki smo dobro očistili vzorčna mesta iz vstopnega rezervoarja, filtrata UF (Slika 29) in permeata RO (Slika 30).



Slika 29: Dezinfekcija vzorčne pipice za odvzem filtrata UF



Slika 30: Dezinfekcija vzorčne pipice za odvzem RO permeata

Pred testiranjmi smo sprali šest litrskih plastičnih posod z demineralizirano vodo. Te smo pred zajemom vzorca še dodatno sprali z vzorčno vodo.

3.4 Potek eksperimenta/ opis preizkusa

Eksperimentalno delo je bilo sestavljeno iz dveh delov:

1. Preučevanja delovanja membranske pilotne naprave pri enakih obratovalnih pogojih s tremi izbranimi površinskimi viri.
2. Analize prečiščene vode v primerjavi z vstopno površinsko vodo z namenom ugotavljanja učinka čiščenja membranske pilotne naprave in z namenom pridobivanja pitne vode.

Prvi del eksperimentalnega dela je potekal na sedežu Esotecha, kjer je membranska pilotna naprava locirana. V času testiranja je bila začasno postavljena v šotoru zaradi prostorske omejitve. Zaradi logističnih in drugih težav transporta ter zagotavljanja ustreznih razmer se nismo odločili za postavitve naprave ob površinskem viru. Za dovod vode iz izbranih površinskih virov je bilo organizirano črpanje, transport in praznjenje rezervoarjev (Slika 31).



Slika 31: Polnjenje vstopnega rezervoarja (VG1) z načrpano površinsko vodo

Drugi del eksperimentalnega dela pa je potekal v laboratoriju (Slika 32).



Slika 32: Laboratorij za analitiko vode

Prvi del eksperimenta vključuje 3 testiranja membranske pilotne naprave za pripravo pitne vode pod enakimi obratovalnimi pogoji, ki so potekala z vodo iz Šoštanjskega jezera dne 22. 7., z vodo iz Škalskega jezera 24. 7. in z vodo iz reke Pake 26. 7. 2013.

Drugi del eksperimenta, ki vključuje analitiko vstopne in prečiščene vode membranske pilotne naprave, je potekal po koncu testnega obratovanja še isti in naslednji dan. Zato je bilo potrebno vzorce ustrezno hraniti.

3.5 Opis testiranja membranske pilotne naprave z UF in RO

Zjutraj načrpano in prelito vodo iz izbranega površinskega vira v vstopni 10 m³ zbirni rezervoar smo najprej mehansko predčistili na 0,13 mm sitastem filtru, nato pa se je filtrirala skozi UF modul v vmesni rezervoar. Ko se je le ta napolnil, je bilo potrebno filtracijo izklopiti in UF membrano hidravlično povratno izprati s čisto filtrirano vodo iz vmesnega rezervoarja. V času čiščenja površinske vode na UF in v času mirovanja naprave UF je neprekinjeno delovala naprava z RO. Tukaj se je filtrat UF najprej mehansko prečistil na dveh svečnih filtrih, nato pa se je tlačno črpal na čiščenje z reverzno osmozo. Rezultat reverzne osmoze je permeat in koncentrat, ki predstavlja odpadek.

Za zagotavljanje enakih časovnih in količinsko določenih obratovalnih pogojev smo izdelali merilni protokol, po katerem smo testirali pilotno napravo. Ta je v nadaljevanju na kratko povzet.

3.5.1 Čas testiranja membranske pilotne naprave

Skupni čas filtracije površinske vode med posameznim testiranjem skozi UF je znašal 200 minut, skozi filtracijo RO pa 330 minut. V tem času smo naredili na UF 20 odčitkov in meritev, na RO pa 33.

Testiranje in obratovanje UF z posameznim površinskim virom je potekalo v štirih ciklih:

- UF1: filtracija 50 min, hidravlično izpiranje in pavza 30 min,
- UF2: filtracija 50 min, hidravlično izpiranje in pavza 40 min,
- UF3: filtracija 50 min, hidravlično izpiranje in pavza 40 min,
- UF4: filtracija 50 min, hidravlično izpiranje in izklop UF.

Čiščenje UF filtrata iz vmesnega rezervoarja in testiranje naprave s postopkom reverzne osmoze pri nastavljenih začetnih obratovalnih pogojih je potekalo neprekinjeno 330 minut.

3.5.2 Obratovalni pogoji

Nastavljeni začetni obratovalni pogoji ultrafiltracije so bili:

- konstantni dovod komprimiranega zraka 3 bar,
- pretok vstopne vode 2560 l/h,
- fluks filtrata 63,4 l/(m².h),
- začetni TMP= 0 bar.

Pretok na ultrafiltracijo in filtracijski fluks lahko okvirno nastavimo s pomočjo ročnega ventila RV7 in centrifugalne črpalke s konstantno hitrostjo motorja. Za naš tip UF modula je priporočen pretok 2,4–4,8 m³/h. Na začetku testiranj (v eksperimentu) smo nastavili manjši pretok vstopne vode (2560 l/h). Manjši pretok je bil izbran, ker membranska pilotna naprava ni locirana ob površinskemu viru in je bilo potrebno vso vodo transportirati do pilotne naprave, in ker RO ne premore višjih pretokov. Zaradi slednjega se vmesni rezervoar z UF filtratom hitreje napolni. Nižji pretok je priporočen za daljšo življenjsko dobo UF membrane

Nastavljeni začetni obratovalni pogoji reverzne osmoze so bili:

- delovni tlak, ki ga ustvari visokotlačna črpalka,
- pretok permeata 1100 l/h in koncentrata 250 l/h,

- začetni tlaki se glede na kakovost površinskega vira vstopne vode razlikujejo

Skupni dotok na reverzno osmozo je bil na podlagi nastavitvev 1350 l/h, od tega je bilo 18,5 % koncentrata in 81,5 % izkoristka v obliki prečiščene (pitne) vode oz. RO permeata.

Stopnjo izkoristka smo izračunali po enačbi (1) (Assano et al., 2007):

$$r = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 [\%], \quad (1)$$

kjer je:

Q_p = pretok toka permeata [l/h, m³/h, m³/s],

Q_f = tok vstopne vode [l/h, m³/h, m³/s].

Med testiranjem membranske pilotne naprave s tremi različnimi površinskimi viri obratovalnih pogojev nismo spreminjali, vendar so se ti spreminjali s časom obratovanja glede na kakovost vode površinskega vira.

3.5.3 Odčitki in meritve

Na membranski pilotni napravi smo med testiranjem s posameznim površinskim virom opravili 20 odčitkov na UF in 33 na RO.

V obratovalnem filtracijskem ciklu UF smo odčitavali meritve 5 minut in nato še 5 minut na RO. Na UF smo odčitavali količino vstopne vode na UF in filtrata UF na vodomerih FQ1 in FQ2 ter tlake na manometrih PI1 (tlak surove vode), PI2 (tlak na vstopu na UF) in PI3 (tlak na izstopu iz UF).

Po izračunu transmembranskega tlaka, ki ga podaja Asano s soavtorji (2007), smo iz odčitkov vstopnega (PI2) in izstopnega tlaka (PI3) iz UF modula izračunali razliko z enačbo (2) in dobili vrednost transmembranskih tlakov (TMP) med filtracijo površinske vode skozi modul UF.

$$\text{TMP} = \text{PI2} - \text{PI3} [\text{bar}] \quad (2)$$

Ultrafiltracija nima merilnikov pretoka (rotametrov), zato smo trikrat zaporedoma izmerili čas (t_1 , t_2 , t_3) v katerem preteče 10 litrov vode (V_{vode}) skozi vodomer (FQ1) dotoka površinske vode na UF in vodomer (FQ2) filtrata iz UF. Iz povprečja časov po enačbi (3) smo izračunali dotok vode na UF in pretok filtrata iz UF (enačba 4). Teoretično je dotok vode enak filtratu, ampak lahko prihaja do odstopanj zaradi merilne metode. Natančnost merilne metode je sorazmerno odvisna od refleksov osebe, ki meri čas, zato dopušča manjša odstopanja.

Za izračun povprečnega časa smo uporabili naslednji izraz:

$$t_{\text{povp.}} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3 = \text{_____} [\text{s}] \quad (3)$$

Izračun pretoka:

$$Q = (t_{\text{povp.}} \times V_{\text{vode}}) / 3,6 = \text{_____} [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4)$$

Po izračunu celotnega pretoka permeata, ki ga podaja Asano s soavtorji (2007), smo iz izračunanih pretokov permeata (Q_{filtrata}) in glede na površino membrane ($A_m = 40 \text{ m}^2$) po enačbi (5) dobili fluks filtrata (F).

Izračun fluksa filtrata UF:

$$F = Q_{\text{filtrata}} / A_m \quad (5)$$

Med testiranjem procesnega sklopa z RO smo na vodomestu FQ4 odčitavali količino vstopne vode UF filtrata, na rotametri F11 pretok permeata in na rotametri pretok koncentrata. Na manometrih (PI7, PI8 in PI9) pa smo odčitavali tlak na vstopu na RO, tlak permeata in tlak koncentrata.

Rezultati izračunov UF meritev in odčitki UF ter meritve in odčitki RO so podani v Prilogi F.

3.5.4 Odvzem vzorcev vode

V času testiranja smo na pilotni napravi uporabili pipice za odvzem vzorcev na vstopnem rezervoarju površinske vode (VG1), po filtraciji UF (filtrata) in po filtraciji RO za vzorce permeata. Za merjenje parametrov temperature, pH, električne prevodnosti in motnosti prečiščene vode smo po filtraciji iz UF odvzeli 20 manjših vzorcev filtrata (5 na cikel obratovanja) in 33 manjših vzorcev permeata RO. Odvzemi manjših vzorcev vode in meritev so bili namenjeni pridobivanju podatkov o vplivanju teh parametrov na sam proces filtracije in ugotavljanju učinka čiščenja površinske vode. Iz podatkov meritev smo izračunali povprečne vrednosti za posamezne parametre. Te smo uporabili za izračun učinka čiščenja UF (R_1), RO (R_2) in celotne membranske pilotne naprave (R) po spodnji enačbi (6) za izračun zadržka posamezne snovi.

Zadržek koncentracij podaja delež snovi, ki jih odstrani membrana (Asano et al., 2007):

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} \times 100 = \left(1 - \frac{c_p}{c_f}\right) \times 100 [\%], \quad (6)$$

kjer je:

c_f = koncentracija topljenca v surovi vodi [g/m^3],

c_p = koncentracija topljenca v permeatu [g/m^3].

Vzorca 1 l in 100 ml prečiščene vode smo odvzeli na koncu 2. ($t_{\text{obr.}} = 100 \text{ min}$) in 4. cikla ($t_{\text{obr.}} = 200 \text{ min}$) filtracije skozi UF ter po 110, 220 in 330 minutah obratovanja RO na pipici permeata RO. Večji vzorec smo uporabili za analitiko vode v laboratoriju, 100 ml vzorec pa smo v vzorčni posodici za mikrobiološke teste dali v inkubator na segrevanje.

Pri testiranju membranske pilotne naprave s posameznim površinskim virom za pripravo pitne vode smo skupaj imeli šest 1 literskih vzorcev in šest mikrobioloških vzorcev:

1. Vzorec vstopne površinske vode,
2. Vzorec filtrata po UF2,
3. Vzorec filtrata po UF4,
4. Vzorec permeata RO1 ($t_{\text{obr.}} = 110 \text{ min}$),
5. Vzorec permeata RO2 ($t_{\text{obr.}} = 220 \text{ min}$),

6. Vzorec permeata RO3 ($t_{obr.} = 330$ min).

Na podlagi izmerjenih koncentracij parametrov pri analitiki vode smo izračunali povprečno vrednost UF filtrat in povprečno vrednost RO permeata za vsak posamezen parameter pri vsakem testiranju (Šoštanjsko jezero, Škalsko jezero in reka Paka). Te smo uporabili za izračun učinka čiščenja UF (R1), RO (R2) in celotne membranske pilotne naprave (R) po enačbi (6) za izračun zadržka snovi (Priloga G).

3.5.5 Merilna oprema za merjenje parametrov v vodi na terenu

Za pridobivanje splošnih fizikalno-kemijskih parametrov za določevanje kakovosti vode in učinka čiščenja med testiranjem smo uporabili multimeter HQ 40d s sondami proizvajalca HACH LANGE (Slika 33) in turbidimeter Turbi Check WL (merilno območje od 0,01 do 1100 NTU) proizvajalca Lovibond. Multimeter smo z zamenjavo priključenih sond uporabili kot elektronski termometer, konduktometer in pH-meter.



Slika 33: Multimeter HQd HACH

Oba merilnika je bilo potrebno zjutraj pred številnimi meritvami umeriti. Pri multimetru smo umerjali sonde s predpisanimi standardnimi raztopinami: pH sondo s pufrom 4 in 7 ter sondo za merjenje električne prevodnosti z raztopino NaCl 1000 $\mu\text{S}/(\text{cm})$. Turbidimeter smo umerili s kivetami, ki vsebujejo tekočino motnosti 1000 NTU, 10 NTU in 0,02 NTU (Slika 34).



Slika 34. Umerjanje turbidimetra TurbiCheck WL

3.5.6 Postopki in princip meritev splošnih fizikalno-kemijskih parametrov v vodi

Med testiranjem membranske pilotne naprave smo v vzorcih vode z merilniki merili naslednje parametre:

- temperatura,
- prevodnost,
- pH vrednost
- in motnost.

Uporaba merilne opreme in metode merjenja za posamezni parameter je podrobneje opisana v Prilogi D.

3.6 Analitika vode v laboratoriju

Za analitiko vode smo pri eksperimentu uporabili naslednje instrumente in reagente:

- termoreaktor DRB (9x13/2x20) proizvajalca HACH LANGE,
- spektrofotometer DR2800 (območje valovnih dolžin 340–900 nm), proizvajalca HACH LANGE,
- inkubator Thermocult za mikrobiološke teste,
- UV lučka proizvajalca HACH LANGE,
- steklovino (kivete, čaše, pipete idr.),
- hitri test za določevanje TOC in KPK proizvajalca HACH LANGE,
- pripravljene reagenti proizvajalca HACH LANGE,
- tablete AF424 MINKIT proizvajalca Lovibond,
- mikrobiološki testi prisotnosti ali odsotnosti skupnih koliformnih bakterij in E. coli proizvajalca HACH LANGE.

Pri določanju izbranih parametrov v vodi smo sledili opisanim postopkom v Prilogi E, katere v osnovi podaja proizvajalec dodanih reagentov.

Za določevanje (analitiko) izbranih parametrov v vodi smo skoraj za vse parametre uporabili spektrofotometrični princip merjenja koncentracije snovi s spektrofotometrom. Izjema je bila skupna trdota vode, ki smo jo določevali s tabletno metodo kolorimetrično. Prisotnost mikrobiološke aktivnosti (E. coli in skupnih koliformnih bakterij) pa smo ugotavljali s hitrimi mikrobiološkimi testi na podlagi spremembe barve in s pomočjo UV lučke.

Spektrofotometrija je absorpcijska molekulska metoda, pri kateri koncentracijo analita v vzorcu ugotavljamo z merjenjem absorpcije monokromatske svetlobe pri prehodu svetlobe skozi raztopino vzorca. Pri prehodu svetlobnega žarka skozi stekleno celico, v kateri je obarvana raztopina vzorca, se del svetlobe absorbira v raztopini (absorpcija), del svetlobe pa gre skozi raztopino (prepustnost). Absorpcija je komplementarna prepustnosti (Drev, 2009).

Absorbanco običajno merimo pri valovni dolžini, pri kateri je absorptivnost iskane spojine največja. Podatke lahko dobimo v literaturi ali posnamemo absorpcijski spekter spojine (Drev, 2009). V našem primeru (pri analitiki vode) pa so bile valovne dolžine glede na merilno metodo posameznega parametra v spektrofotometru DR2800 že določene.

4 REZULTATI IN UGOTOVITVE

4.1 Delovanje membranske pilotne naprave

Vzporedno z merjenjem obratovalnih pogojev (pretokov, tlakov, količin procesne vode) membranske pilotne naprave smo v prečiščeni vodi merili splošne fizikalno-kemijske parametre (temperatura, pH, prevodnost, motnost), ki vplivajo na delovanje membran. Povprečne vrednosti teh parametrov smo primerjali s predpisano kakovostjo vode, da smo dobili učinek čiščenja UF in RO oz. učinek čiščenja celotne pilotne naprave.

4.1.1 Kakovost površinskega vira

Kakovost načrpane vode iz površinskih virov (Šoštanjško jezero, Škalsko jezero in reka Paka) ima velik vpliv na delovanje oz. na obratovalne pogoje pilotne naprave ter posledično na učinek čiščenja. Vodo smo črpali v enakem času, vsak drugi dan na drugi lokaciji površinskega vira.

V preglednici 12 so podani izbrani fizikalno-kemijski, kemijski in mikrobiološki parametri, izmerjeni v vzorcu vode iz vstopnega rezervoarja. Vzorec smo vzeli 30 minut pred začetkom testiranja pilotne naprave s posameznim površinskim virom.

Preglednica 12: Fizikalno–kemijski, kemijski in mikrobiološki parametri vode v vstopnem rezervoarju

Št.	Parameter	Izražen kot	MDK	Enota	Šoštanjško jezero	Škalsko jezero	reka Paka
1	Prevodnost		2500	μS/cm	370	449	611
2	pH		6,5-9,5	/	7,98	8,02	8,37
3	Motnost		<1	NTU	3,98	5,02	11,9
4	Temperatura		-	°C	23,7	25	24,9
5	Skupna trdota		-	°dH	10,6	12,9	16,24
6	TOC	C	4	mg/l	8,47	10,4	6,78
7	Barva		0,5	m-1	0,585	0,718	0,685
8	Amonij	NH ₄ ⁺	0,5	mg/l	0,13	0,16	0,43
9	Nitrat	NO ₃ ⁻	50	mg/l	1,8	1,8	7,6
10	Nitrit	NO ₂ ⁻	0,5	mg/l	0,023	0,041	0,257
11	Klorid	Cl	250	mg/l	7,2	10,8	24,6
12	Sulfat	SO ₄ ²⁻	250	mg/l	62	49	88
13	TSS		-	mg/l	9	14	9
14	Mangan	Mn	50	mg/l	0,039	0,054	0,045
15	KPK	O ₂	-	mg/l	12,6	11,3	8,98
16	Fosfati	PO ₄ ³⁻	0,3*	mg/l	0,13	0,07	0,85
17	Koliform. bakt.		0	št./100ml	prisotne	prisotne	prisotne
18	E. coli		0	št./100ml	prisotne	prisotne	prisotne

MDK so mejne dovoljene koncentracije parametra v pitni vodi, ki jih podaja Pravilnik o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09).

* MDK je iz Pravilnika o zdravstveni ustreznosti pitne vode (Ur. l. RS, št. 46/97, 52/97, 54/98, 7/00 in 52/00 in 19/04)

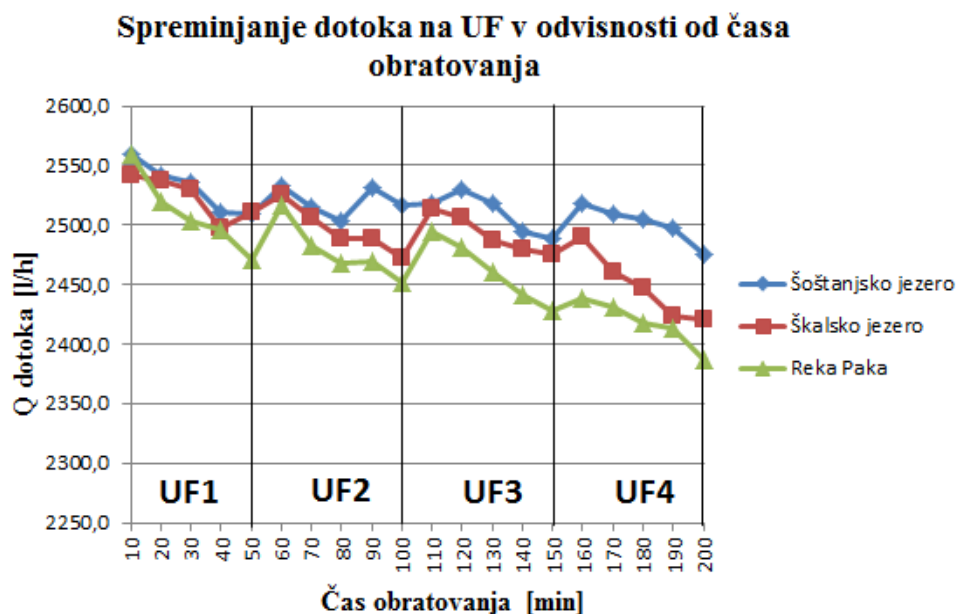
Glede na MDK v pitni vodi so bile vrednosti parametrov, kot so motnost, TOC, barva, bakterije (E. coli in koliformne bakterije) in fosfati (v reki Paki), v vodi na vstopu na membransko pilotno napravo presežene (Preglednica 12). Prav zaradi tega je bil glavni cilj priprave pitne vode iz površinskega vira znižati te koncentracije in odstraniti prisotne bakterije, ki v pitni vodi niso dovoljene. Ostale izmerjene vrednosti izbranih parametrov v površinski vodi niso bile presežene glede na MDK v pitni vodi. Prevodnost vode, ki podaja grobo informacijo koncentracije raztopljenih snovi, ni bila presežena, vendar s tem ne dobimo podatka, koliko znaša vsebnost posameznih raztopljenih snovi in če so bile te vrednosti presežene. Zaradi neustrezne opreme in manjkajočih reagentov v laboratoriju nismo izmerili vseh parametrov za določevanje kakovosti (zdravstveno skladne) pitne vode, temveč smo na podlagi izmerjenih parametrov podali zgolj njihovo oceno.

Najmanj raztopljenih snovi smo na osnovi prevodnosti zaznali v vodi iz Šoštanjskega jezera, nato v vodi iz Škalskega jezera, največ pa v vodi iz reke Pake. V takšnem zaporedju si sledi tudi vsebnost snovi, ki povzročajo motnost, pH in skupno trdoto v vodi. Iz teh vhodnih podatkov razberemo, da je bila najmanj obremenjena oz. da je bila najboljše kakovosti voda iz Šoštanjskega jezera, sledi ji voda iz Škalskega jezera in nazadnje voda iz reke Pake. Paka je vsebovala več hranil (amonij, nitrat, nitrit, fosfat) kot voda iz jezer. Ostale vrednosti izmerjenih parametrov v vodi niso vedno najvišje v reki Paki in najnižje v vodi Šoštanjskega jezera.

4.1.2 Ultrafiltracija

4.1.2.1 Pretok

Teoretično je pretok vtoka na UF enak iztoku (pretoku filtrata) iz UF, in sicer zaradi statične (ang. dead end) filtracije. Pretoka pri testiranjih nista bila enaka (glej Priloga F). Zaradi natančnosti merjenja prihaja pri filtraciji vode skozi modul do časovnega zamika oziroma odstopanja za cca. < 1 % (ali manj).



Grafikon 1: Primerjava dotoka na UF

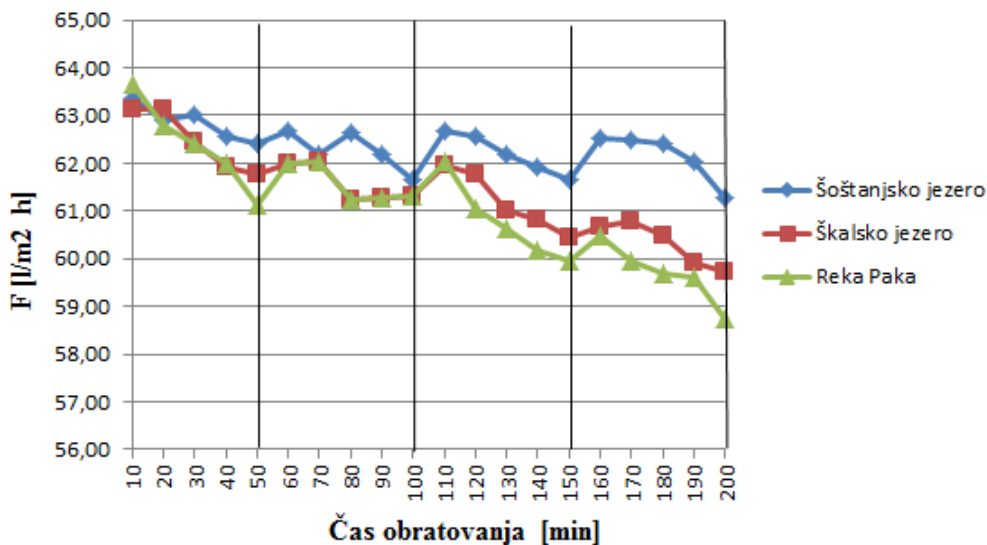
Na ultrafiltraciji smo na začetku testiranja nastavili pretok dotoka 2560 l/h. Iz grafikona 1 je razvidno, da pretok vtoka za vse tri vire površinske vode tekom testiranja upada. Po vsakem ciklu filtracije (50 min, 100 min, 150 min in 200 min) se pore membrane postopoma zasitijo in pretok ustrezno temu nekoliko pade. Po hidravličnem spiranju s čisto vodo se pore delno očistijo, zato se pretok na začetku novega cikla UF poveča, ampak nikoli ne na začetno vrednost. Bolj kot je voda obremenjena (s koloidnimi delci in drugimi makromolekulami), hitreje se pore mašijo in bolj intenzivno padajo vrednosti pretoka, kar je razvidno tudi iz grafikona 1. Šoštanjska voda je najmanj obremenjena z delci, ki povzročajo motnost, zato je krivulja manj strma. Tudi razlika med začetno ($t_{obr.}=10$ min) in končno ($t_{obr.}=200$ min) vrednostjo dotoka na UF modul je nižja kot pri Škalskem jezeru in reki Paki. Pri reki Paki, ki je najbolj obremenjena v primerjavi z našimi površinskimi viri, znaša razlika dotokov 173 l/h, pri Škalskem jezeru 121 l/h in pri najmanj obremenjenem Šoštanjskem jezeru 85 l/h.

Povprečen dotok vode iz Šoštanjskega jezera na UF je bil 2515 l/h, vode iz Škalskega jezera 2490 l/h in vode iz reke Pake 2466 l/h. Pretok vtoka in filtrata UF se zmanjšuje v odvisnosti od časa filtracije in od obremenjenosti vstopne vode.

4.1.2.2 Fluks filtrata UF

Fluks je pretok vode na površino membrane. Tipičen fluks filtracije, ki ga priporoča proizvajalec membrane, je 60–135 l/(m².h). V eksperimentu smo s pretokom skozi UF modul istočasno nastavili filtracijski fluks. Ta je znašal 63,4 l/(m².h) (< 1 % odstopanja zaradi merilne metode), kar je relativno nizka vrednost, ampak za naše potrebe in za dolgo obratovanje pilotne naprave je bila optimalna.

Spreminjanje fluksa v odvisnosti od časa obratovanja



Grafikon 2: Primerjava fluksa filtrata

Na količino fluksa vpliva tudi temperatura vode (viskoznost vode). Višja kot je temperatura vstopne vode, manjša je viskoznost in boljša je prepustnost membrane, vendar se površina membrane z mašitvijo por manjša. Zaradi tega se manjša pretok, večajo pa se membranski tlaki. Posledično fluks filtrata s časom obratovanja UF pada.

Iz grafikona 2 je razvidno, da je bil nastavljen fluks na začetku testiranja UF pri vseh virih površinske vode največji. Nato vrednosti pri vsakem ciklu znatno padejo in po hidravličnem spiranju s čisto vodo narastejo, vendar ne na začetno vrednost. Bolj kot je bila voda obremenjena s koloidnimi in drugimi delci velikosti med $0,02 \mu\text{m}$ in $0,2 \mu\text{m}$, hitreje so se mašile pore membrane (manjšala se je prepustnost membrane). Reka Paka je bila najbolj obremenjena s takšnimi delci, zato je krivulja bolj padajoča. Sledita ji Škalsko in Šoštanjško jezero. Povprečna vrednost fluksa filtrata med testiranjem UF modula z vodo iz Šoštanjškega jezera je v primerjavi s testiranjem z ostalima površinskima viroma najvišja, in sicer $62,4 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Povprečna vrednost fluksa filtrata vode iz Škalskega jezera je znašala $61,4 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in reke Pake pa $61,1 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

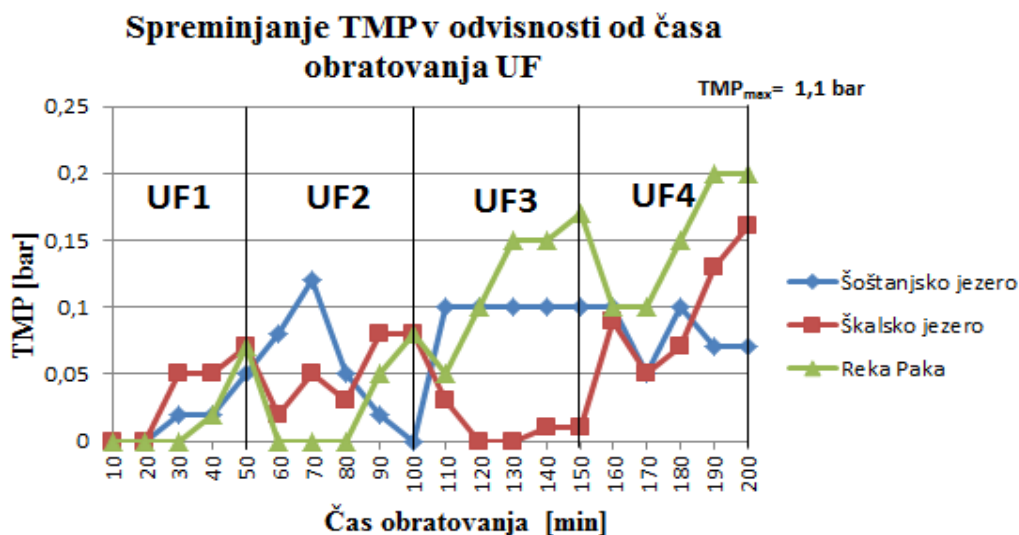
Vrednosti fluksa so med filtracijo padale. Zato bi se lahko odločili za povečanje pretoka in s tem fluksa filtracije. Zaradi zagotavljanja enakih obratovalnih pogojev UF med testiranjem z različnimi površinskimi viri vode se za to nismo odločili.

4.1.2.3 Transmembranski tlaki (TMP) UF

Med filtracijo vode skozi UF modul smo odčitavali vrednosti na manometrih (PI1, PI2 in PI3). Ti merijo tlak surove vode, tlak na vstopu in tlak na izstopu iz ultrafiltracijskega modula. Razlika tlaka na vstopu in izstopu iz UF modula nam poda vrednost TMP, s katerim spremljamo mašenje in oblaganje por membrane.

Delovni tlak UF je bil 3 bar. Tega smo zagotovili s komprimiranim zrakom kompresorja.

Proizvajalec membrane predpisuje obratovalne vrednosti TMP od 0,1 do 1,0 bar. Težimo k temu, da so ne glede na obremenjenost vode vrednosti membranskih tlakov čim manjše. Zato smo UF modul redno hidravlično izpirali s čisto vodo. S tem podaljšujemo življenjsko dobo membrane in prihranimo kemikalije, ki so potrebne za kemično spiranje pri maksimalnem TMP. Mi smo pri testiranju UF postopka modul hidravlično povratno spirali s čisto vodo po vsakem filtracijskem ciklu (po 50 minutah filtracije).



Grafikon 3: Primerjava TMP

Na začetku testiranja UF modula z različnimi površinskimi viri so začetne vrednosti TMP vedno 0, saj so pore membrane očiščene. Tekom filtracije se zasitijo z nečistočami v tolikšni meri, da membranski tlaki narastejo. S povratnim hidravličnim spiranjem membrane po vsakem ciklu delno očistimo pore membrane, tako da vrednosti TMP padejo, kar je razvidno iz Grafikona 3. Vrednosti TMP pa lahko padejo tudi med obratovanjem, ko v vstopni rezervoar (VG1) dodajamo sveže načrpano vodo z manjšo motnostjo. Tekom obratovanja oz. testiranja UF modula se manjši (1 m^3) rezervoarji prej načrpane vode iz površinskega vira praznijo v velik (10 m^3) rezervoar, od koder se črpa preko centrifugalne črpalke na UF. Takšen primer padca TMP je razviden iz Grafikona 3. In sicer pri filtraciji vode iz Šoštanjskega jezera, znotraj cikla UF2 in UF4 ter filtraciji vode Škalskega jezera, znotraj cikla UF2 in UF4.

Dosežene vrednosti TMP pri testiranju UF z različnimi viri površinske vode so nizke. Zaradi nizkega fluksa in relativno čiste vode je prepustnost membrane velika. Maksimalna vrednost TMP pri filtraciji vode iz Šoštanjskega jezera je bila 0,12 bara, Škalskega jezera 0,16 bara in reke Pake 0,2 bara. Ultrafiltracija je delovala skupaj 200 minut. Zato sklepamo, da bi lahko vrednosti TMP z daljšim časom filtracije in redkeje izvajanim povratnim hidravličnim izpiranjem še bolj intenzivno naraščale.

4.1.2.4 Količine procesne vode

Količina vstopne vode v UF je enaka količini filtrata. V preglednici 13 so podane količine procesne vode UF pri pripravi pitne vode iz vseh treh površinskih virov vode.

Preglednica 13: Količina procesne vode UF

Površinski vir	Šoštanjsko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Količina filtrata UF [l]	8476	8328	7976

Iz predhodnih poglavij je bilo ugotovljeno, da sta povprečni vrednosti dotoka in fluks filtrata najnižji za vodo iz reke Pake, nato za vodo iz Škalskega jezera in najvišji za vodo iz Šoštanjskega jezera. S slednjimi ugotovitvami so bile količine procesne vode iz preglednice 13 pričakovane. Tako smo v celotni filtraciji skozi UF modul, ki je trajala 200 minut s površinsko vodo iz Šoštanjskega jezera dobili največ prečiščene vode (8476 l), malo manj z vodo iz Škalskega jezera (8328 l) ter najmanj (7976 l) s filtracijo vode iz reke Pake.

4.1.2.5 Temperatura

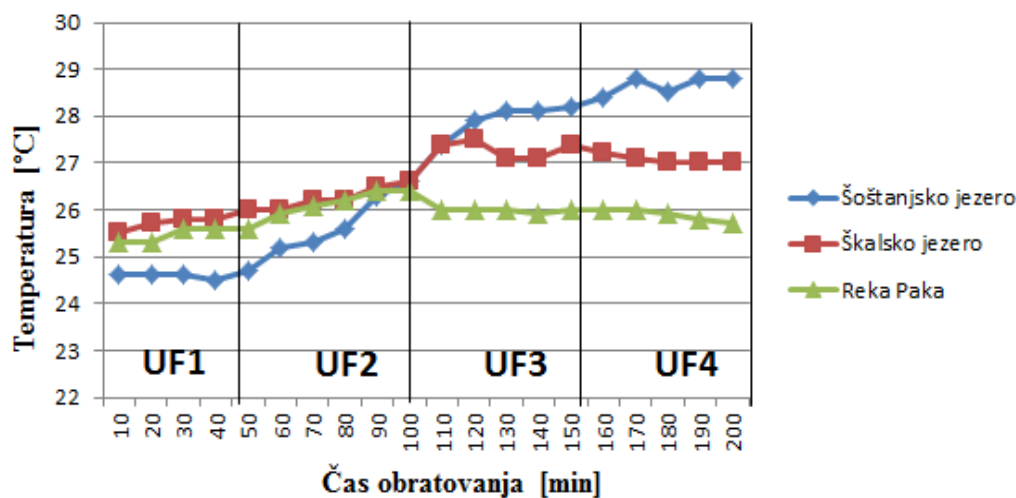
Temperatura je pomemben dejavnik za večino bioloških in kemijskih procesov v površinski vodi. Spreminja se glede na globino merjenja oz. glede na globino odvzetega vzorca. Mi smo vodo črpali iz površinskih virov ob brežini (globina 0,5 m). Z globino površinske vode običajno temperatura pada, a ker je bila načrpana voda odvzeta v plitvini, je temperatura načrpane vode višja od dejanske temperature površinskega vira. Načrpano vodo smo transportirali v rezervoarjih, kjer je še nekaj časa (cca. 30 min) mirovala do praznjenja na vedno bolj segretem poletnem ozračju.

Preglednica 14: Meritve temperature

Površinski vir	Šoštanjsko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Na terenu (6:30)	21,3 °C	23,4 °C	19,9 °C
Iz VG1 (9:30)	23,7 °C	25 °C	24,9 °C
Filtrat $t_{obr.}=10$ min	24,4 °C	25,5 °C	25,3 °C

Iz preglednice 14 je razvidno, da je temperatura površinskega vira nižja od temperature surove vode v rezervoarju VG1, višja pa je temperatura filtrata. Višja temperatura vstopne vode v UF vpliva na večjo prepustnost membrane, saj je teoretično viskoznost vode nižja.

Temperatura filtrata med obratovanjem UF

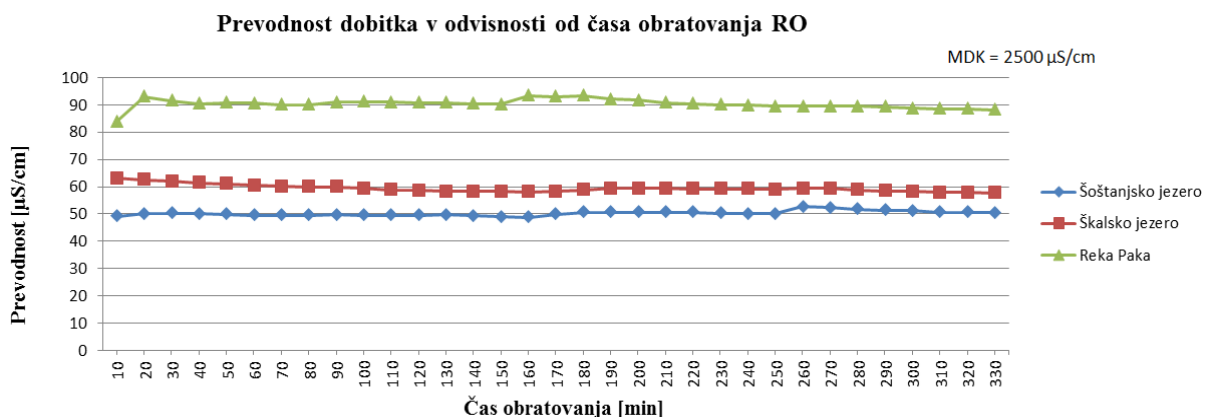


Grafikon 4: Temperatura filtrata UF

Temperatura filtrata se je spreminjala v odvisnosti od temperature ozračja, vremenskih razmer in v odvisnosti od časovnega zaporedja praznjenja (1 m^3) rezervoarjev z zjutraj zajeto površinsko vodo v velik (10 m^3) rezervoar. Dnevi testiranja so bili sončni in topli/vroči, zato se je filtrat segrel, kar je razvidno iz grafikona 4. Povprečna temperatura filtrata vode iz Šoštanjskega jezera je bila $26,8 \text{ }^\circ\text{C}$, Škalskega jezera $26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ in reke Pake $25,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.2.6 Prevodnost

Iz grafikona 5 lahko razberemo, da se prevodnost filtrata UF bistveno ne spremeni, ker UF ne odstranjuje raztopljenih snovi (ionov) iz vode.



Grafikon 5: Primerjava prevodnosti

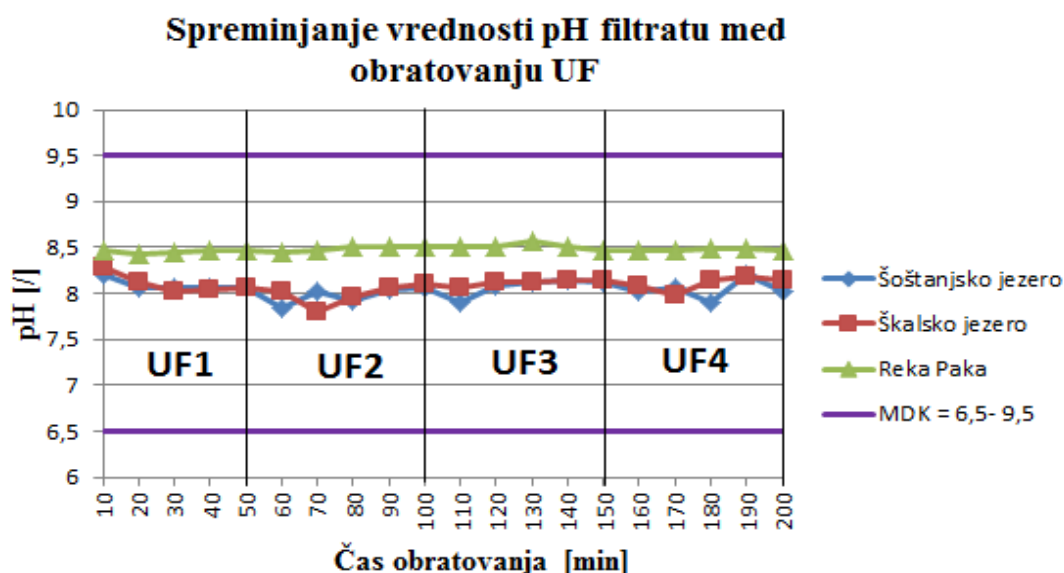
Glede na izmerjene vrednosti prevodnosti površinskih virov na terenu in filtrata po UF smo ugotovili, da je reka Paka vsebovala največ raztopljenih snovi (soli in ostalih ionov), potem ji sledita Škalsko in Šoštanjsko jezero. Povprečna vrednost prevodnosti filtrata reke Pake je znašala $643 \text{ } \mu\text{S/cm}$, Škalskega jezera $451 \text{ } \mu\text{S/cm}$ in Šoštanjskega jezera $377 \text{ } \mu\text{S/cm}$. Vse izmerjene vrednosti so nižje od MDK.

4.1.2.7 pH vrednost

Vrednost pH minimalno naraste (< 3 %) v načrpani površinski vodi, ker smo jo ozračili pri črpanju in pretakanju v končni rezervoar. Višanje vrednosti pH v vodi za posamezen površinski vir je prikazano v preglednici 15. Glede na izmerjeno vrednost na terenu in na ostale meritve pH vrednosti se je najbolj zvišala vrednost pH za površinski vir reke Pake. Reki, ki je tekoči površinski vir, se v primerjavi z stoječimi površinskimi viri pH vrednost s časom hitreje spreminja v odvisnosti od zunanjih vplivov, od (bioloških in kemijskih) procesov, ki potekajo v vodnem okolju in od pritokov, ki se spreminjajo tekom dneva. Mi smo izmerili vrednost pH v času prvega črpanja, vendar je možno, da je dejanska vrednost nekoliko odstopala, saj je črpanje vode potekalo dlje časa.

Preglednica 15: Meritve pH vrednosti

Površinski vir	Šoštanjsko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Na terenu	7,79	7,89	7,42
Iz VG1	7,98	8,02	8,37
Filtrat $t_{obr.}=10$ min	8,20	8,28	8,46



Grafikon 6: Primerjava pH vrednosti

Ultrafiltracija ne odstranjuje oksonijevih in hidrosilnih ionov, ki predstavljajo pH vrednost vzorca filtrata. Zaradi tega sam proces filtracije ne vpliva na spreminjanje pH vrednosti. Iz grafikona 6 so razvidna nihanja vrednosti pH, ki so posledica praznjenja manjših rezervoarjev in polnjenje velikega rezervoarja s svežo vodo.

Pri izmeničnem merjenju pH vrednosti UF filtrata in RO permeata med obratovanjem pilotne naprave je imela pH sonda manjše težave z odčitavanjem pH vrednosti. Zato je možno, da so prisotna odstopanja meritev pri filtratu Šoštanjskega in Škalskega jezera. Pri meritvah pH vrednosti filtrata reke Pake smo uporabili novo sondo in so bile meritve hitrejše, pa tudi nihanja izmerjenih vrednosti so bila manjša.

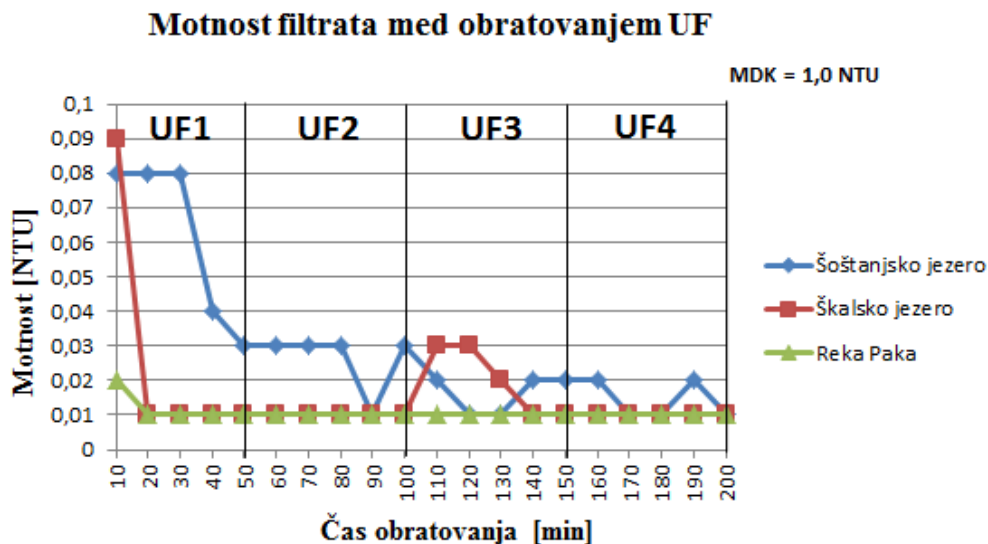
Vrednost pH je zakonsko predpisana za pitno vodo, in sicer na vrednosti med 6,5 in 9,5, medtem ko za filtracijo skozi membrano proizvajalec predpisuje vrednosti med 2 in 12. Vsi trije filtrati naših površinskih virov izpolnjujejo te omejitve. Povprečna vrednost pH filtrata vode iz Šoštanjkega je 8,05, Škalskega jezera 8,08 in reke Pake 8,48.

4.1.2.8 Motnost

Motnost pitne vode ne sme presegati 1 NTU. Ta vrednost je bila v vseh treh površinskih virih večja (Preglednica 16). Z ultrafiltracijo smo učinkovito odstranili koloidne delce in ostale delce velikosti od 0,13 μm (večje od 0,13 μm odstrani sitast filter) do 20 nm, ki povzročijo motnost v površinski vodi (Grafikon 7). Iz preglednice 16 je razvidno, da že po 10 minutah filtracije odstranimo skoraj vso motnost (99,2–99,9 %) do želenih vrednosti v pitni vodi.

Preglednica 16: Meritve motnosti in zadržek UF

Površinski vir	Šoštanjko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Motnost na terenu	4,08 NTU	5,10 NTU	12,07 NTU
Motnost iz VG1	3,98 NTU	5,02 NTU	11,90 NTU
Filtrat, $t_{\text{obr.}}=10$ min	0,08 NTU	0,09 NTU	0,02 NTU
R [%], $t_{\text{obr.}}=10$ min	97,99	98,2	99,8
Povp. motnost filtrata	0,03 NTU	0,02 NTU	0,01 NTU
R [%]	99,2	99,6	99,9



Grafikon 7: Primerjava motnosti filtrata UF

Ne glede na čas obratovanja, rast TMP (Grafikon 2) in nižanje fluksa (Grafikon 3) so izmerjene vrednosti motnosti za vse površinske vire bile pod 1 NTU (v povprečju med 0,01 in 0,03 NTU), torej v skladu s predpisi za pitno vodo.

Merilna metoda je 99-odstotno natančna, vendar so možna odstopanja zaradi prisotnosti zraka v kivetu, saj smo vzorec vode točili iz pipce. Na kivetu so se tekom številnih meritev pojavile manjše mehanske

poškodbe (praske). Zato smo po testiranjih z vodo iz Šoštanjskega in Škalskega jezera kiveto za merjenje motnosti v turbidimetru sprali z klorovodikovo kislino in dobili še bolj natančne meritve brez nihanj pri čiščenju vode iz reke Pake (Grafikon 7).

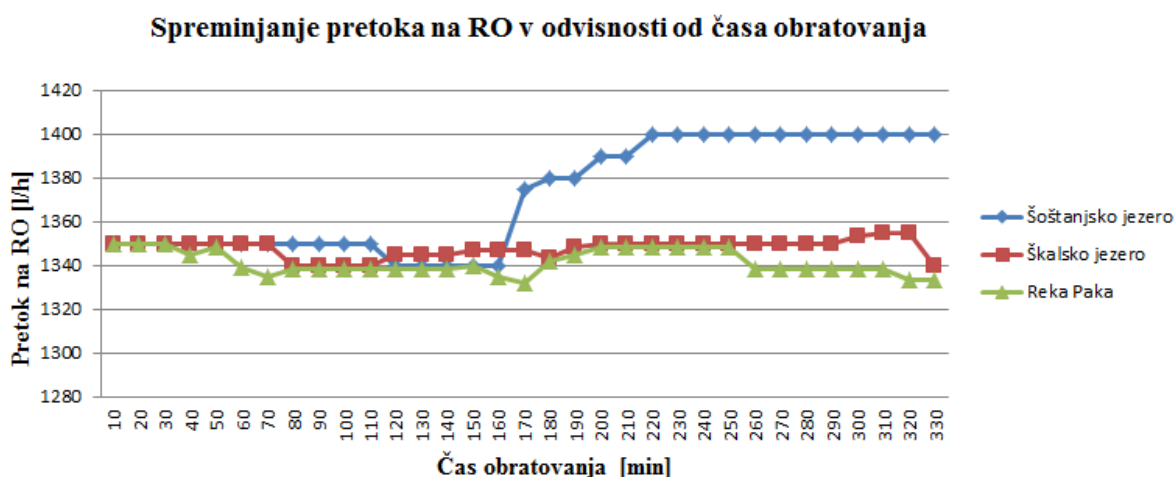
4.1.3 Reverzna osmoza

Pri testiranjih reverzne osmoze z vodo iz izbranih površinskih virov je filtracija potekala neprekinjeno (330 min).

4.1.3.1 Pretoki

Dotok filtrata na reverzno osmozo se pri prečni filtraciji skozi spiralno navitje membrane v modulu razdeli na prečiščeno vodo oz. t. i. permeat in koncentrat (odpadek). Na začetku čiščenja UF filtrata nastavimo na modulu za reverzno osmozo željena pretoka permeata RO na 1100 l/h in pretok koncentrata na 250 l/h. Vrednosti pretokov odčitavamo iz rotametrov (FI1 in FI2).

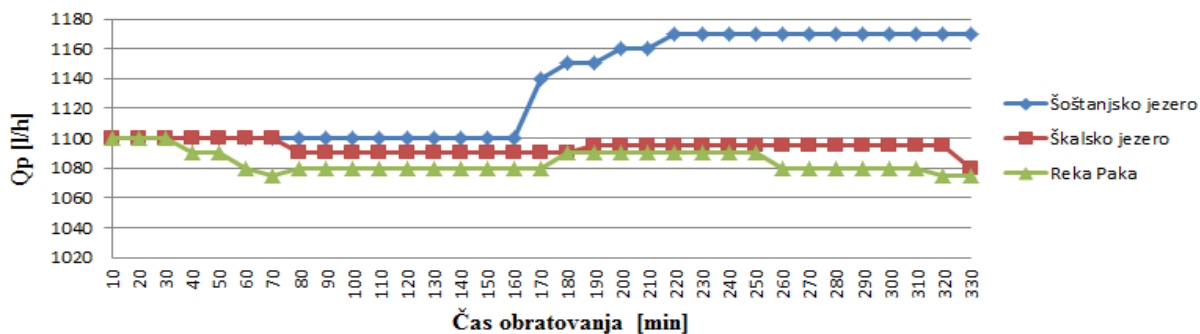
Dotoka filtrata UF na RO nismo izmerili, temveč smo ga izračunali iz seštevka pretoka permeata in koncentrata iz RO (masna bilanca modula).



Grafikon 8: Dotok na RO

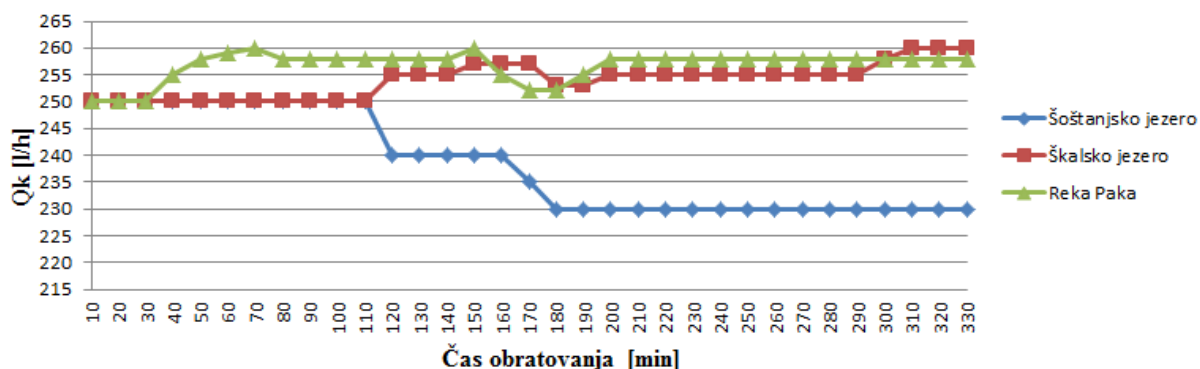
Na spreminjanje (začetnih) nastavljenih pretokov RO imata pomembno vlogo mašenje (koncentracijska polarizacija, plast gela) in prepustnost membrane, ki sta odvisna od kakovosti vstopne vode (koncentracije topljenca, temperature). Kljub temu da smo nastavili pretoke RO na konstantno vrednost, je RO modul dosegel delovno točko po obratovanja cca. 220 min (po polarizacijski koncentraciji). Kasneje se pretoki niso bistveno spreminjali ($< \pm 2\%$, torej manj od 20 l/h). Manjša nihanja (Grafikon 8) so posledica reverzibilnega mašenja membrane (s topljencem raztopine), ki vpliva na prepustnost membrane.

Spreminjanje pretoka permeata v odvisnosti od časa obratovanja



Grafikon 9: Pretok permeata RO

Spreminjanje pretoka koncentrata v odvisnosti od časa obratovanja



Grafikon 10: Pretok koncentrata iz RO

Voda iz Šoštanjskega jezera je bila glede na fizikalno-kemijske parametre v primerjavi z ostalima površinskima viroma najmanj obremenjena. Zaradi tega je bil filtrat UF najmanj obremenjen s topljencem in je imel najvišjo povprečno temperaturo. To je vplivalo na delovanje reverzne osmoze tako, da je bila membrana bolj prepustna. Iz tega razloga se je povečal pretok permeata za 70 l/h (Grafikon 9) in zmanjšal koncentrat iz RO za 20 l/h (Grafikon 10). Posledično se je pretok dotoka vode na RO povečal za 50 l/h (Grafikon 8), ki se kasneje ni več spreminjal. S spreminjanjem pretoka so se spremenili tudi tlaki na RO (glej poglavje 4.1.3.2).

Filtrata UF iz Škalskega jezera in reke Pake sta bila bolj obremenjena z raztopljenimi snovmi (povprečni temperaturi pa nižji), to je imelo nasproten vpliv na RO membrano (prepustnost se zmanjša) kot v primeru vode iz Šoštanjskega jezera.

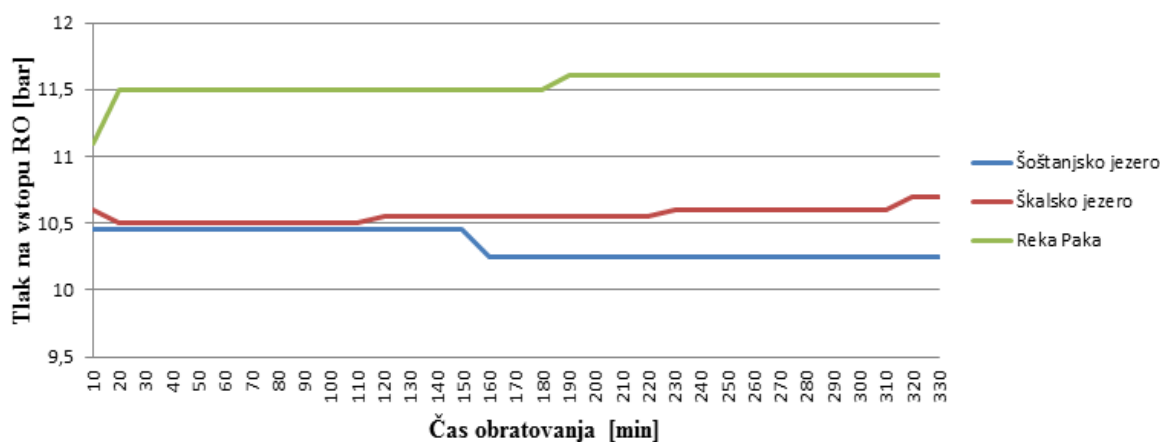
Pretok permeata RO se je zmanjšal pri čiščenju vode iz Škalskega jezera za 5–20 l/h (Grafikon 9), pretok koncentrata pa je narastel za 5–10 l/h (Grafikon 10). Posledično se je dotok med delovanjem RO modula zmanjšal za 5–10 l/h (Grafikon 8). Pri najbolj obremenjenem UF filtratu iz reke Pake je bila membrana manj prepustna kot pri ostalih dveh virih vode. Pretok permeata se je znižal za 10–25 l/h (Grafikon 9), koncentrat iz RO pa se je povečal za 5–10 l/h (Grafikon 10). To je vplivalo na znižanje dotoka za 2–17 l/h (Grafikon 8).

Pri pripravi vode iz Šoštanjskega jezera sta bila največja povprečni dotok na RO (1372 l/h) in pretok permeata (1133 l/h) ter najnižji povprečni pretok koncentrata (238 l/h). Pri pripravi vode iz Škalskega jezera je bil povprečen pretok dotoka na RO 1348 l/h, permeata 1094 l/h in koncentrata 254 l/h. V primerjavi s Šoštanjskim in Škalskim jezerom je bil, pri pripravi vode iz reke Pake, povprečen pretok permeata najnižji (1084 l/h) in najvišji pretok koncentrata (257 l/h). Povprečen dotok na RO je tako znašal 1341 l/h.

4.1.3.2 Tlaki

Reverzna osmoza je v vseh treh testiranjih priprave pitne vode delovala pod enakim delovnim tlakom in začetnim nastavljenim pretokom. Glede na kakovost vode ter količino topljenca v njej se je z nastavljenimi pretoki permeata in koncentrata (iz RO) avtomatsko nastavljal začetni tlak obratovanja RO na manometrih PI7, PI8 in PI9. Ker je bila voda iz reke Paka najbolj obremenjena, so bili tudi začetni tlaki višji. Ker pa sta preostala površinska vira bila manj obremenjena, so začetni tlaki v teh primerih bili ustrezno nižji. Začetni tlak na vstopu na RO filtrata UF reke Pake je bil 11,1 bara, Škalskega jezera 10,6 bara in Šoštanjskega jezera 10,45 bara (Grafikon 11).

Tlak na vstopu RO v odvisnosti od časa obratovanja



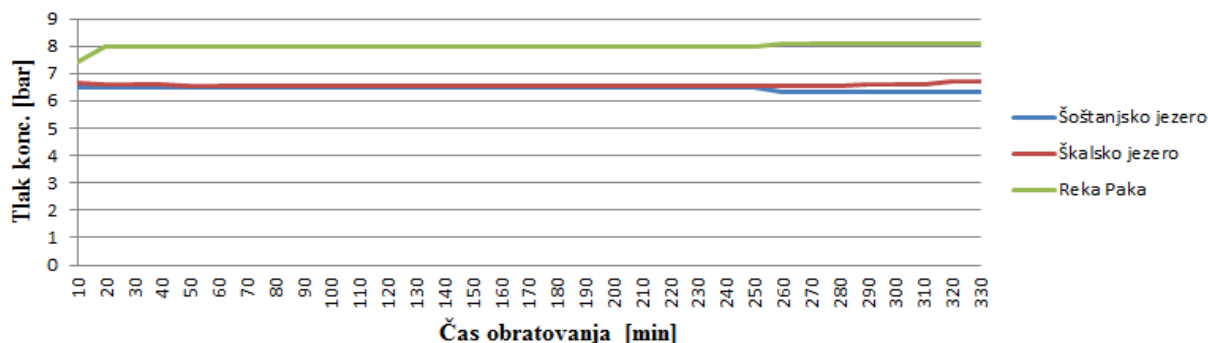
Grafikon 11: Tlak na vstopu RO

Iz grafikonov 8 in 11 je razvidno, da se z vzpostavitvijo delovnih pogojev RO (polarizacijske koncentracije in prepustnosti membrane) spremenijo pogoji obratovanja (pretoki, tlaki).

Pri čiščenju vode iz Šoštanjskega jezera tlaki na vstopu RO padejo za 0,20 bara. Zaradi večje prepustnosti membrane se poveča pretok permeata in zmanjša koncentrat (ravnotežno stanje). Pri čiščenju vode iz Škalskega jezera pa tlaki na vstopu RO narastejo za 0,10 bara. Zaradi manjše prepustnosti membrane se zniža pretok permeata in zviša pretok koncentrata. Pri čiščenju vode iz reke Pake je dvig tlaka (na vstopu RO) z 11,1 na 11,6 bara toliko bolj izrazit, ker je tlak že na začetku višji, kot pri šoštanjski in škalski vodi. Paka je najbolj obremenjena s topljencem, ki ga membrana odstranjuje in je zato bil potreben večji tlak za doseg ravnotežnega stanja (pri koncentracijski polarizaciji). Pri tem se je prepustnost membrane znižala (pretok permeata se je znižal in pretok koncentrata povečal).

Pri pripravi vode iz Šoštanjskega jezera je bil povprečni tlak na vstopu RO najnižji in je znašal 6,4 bara. Preostala dva površinska vira sta imela povprečni tlak višji glede na povprečni tlak Šoštanjskega jezera, in sicer pri Škalskem jezeru je znašal 6,6 bara, pri vodi iz reke Pake pa 8,0 bar.

Tlak koncentrata v odvisnosti od časa obratovanja



Grafikon 12: Tlak koncentrata iz RO

Iz zgornjega grafikona razberemo, da se tlaki koncentrata iz RO niso bistveno spreminjali. Manjše spremembe je možno zaznati med obratovanjem RO, in sicer zaradi spremembe pretoka koncentrata. S povečanjem pretoka koncentrata iz RO se je tlak koncentrata zmanjšal in obratno. Tlak permeata iz RO se ni spreminjal in je bil pri vseh testiranjih med 0,20 in 0,25 bara.

4.1.3.3 Količine procesne vode

V preglednici 17 so podane količine vstopne vode na RO pri pripravi pitne vode iz treh površinskih virov. RO ima vodomer samo na začetku, zato smo podali samo količino vode na dotoku. Iz pretoka permeata in koncentrata lahko smiselno določimo količine prečiščene vode oz. permeata in koncentrata iz RO.

Preglednica 17: Količine vstopne vode na RO

Površinski vir	Šoštanjsko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Dotok RO [l]	8101	7831	7784

Na RO se je očistilo najmanj UF filtrata vode iz reke Pake, nato Škalskega jezera in največ iz Šoštanjskega jezera (Preglednica 17). Iz količin dotoka na RO in na podlagi povprečnega pretoka permeata ter koncentrata lahko sklepamo in izračunamo, da je bilo največ prečiščene vode pri pripravi pitne vode iz Šoštanjskega jezera (82,6 %) in najmanj pri pripravi pitne vode iz reke Pake (80,9 %), kar je razvidno iz preglednice 18.

Glede na povprečen pretok dotoka vstopne vode (Q_f) in pretok permeata (Q_p) smo izračunali stopnjo izkoristka r membrane oz. delež prečiščene vode za posamezni površinski vir (Preglednica 18).

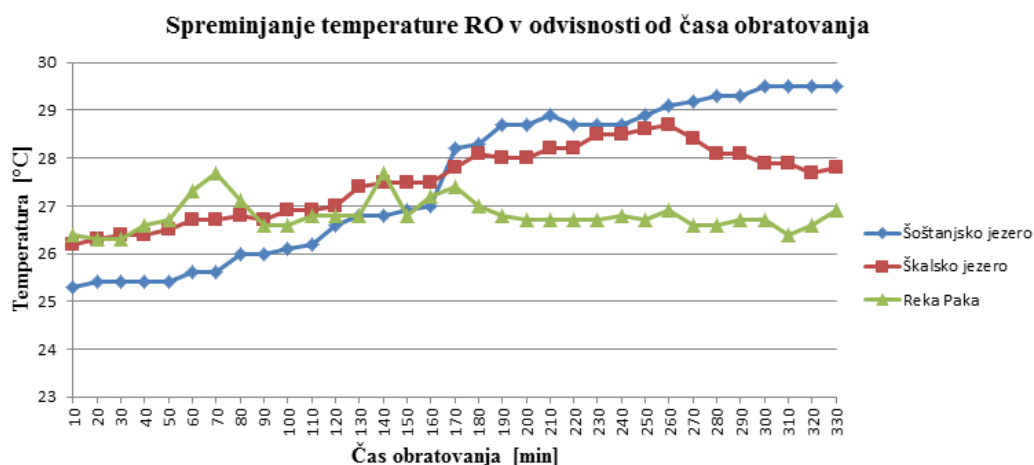
Preglednica 18: Stopnja izkoristka RO

Površinski vir	Šoštanjsko jezero	Škalsko jezero	Reka Paka
Q_f [l/h]	1372	1348	1341
Q_p [l/h]	1133	1094	1084
r [%]	82,6	81,2	80,9

Preostanek izkoristka do 100 % je delež koncentrata, ki smo ga odvajali v jašek meteorne vode. Za pripravo pitne vode to vsekakor ni ekonomično. Ta odločitev je bila pogojena z zagotavljanjem enakih obratovalnih pogojev. Pri testiranju RO z različnimi površinskimi viri so se količine koncentrata spreminjale. Z vračanjem teh količin bi vplivali na različne obratovalne pogoje med posameznimi testiranjmi. Na večjih čistilnih napravah z reverzno osmozo koncentrat vračajo na začetek priprave pitne vode, kjer se premeša z vstopno vodo.

4.1.3.4 Temperatura

Temperatura načrpane površinske vode se je zaradi vpliva ozračja spreminjala. Prečiščen filtrat smo zadrževali v vmesnem rezervoarju, kjer se je zaradi toplega ozračja segreval in črpal na reverzno osmozo.



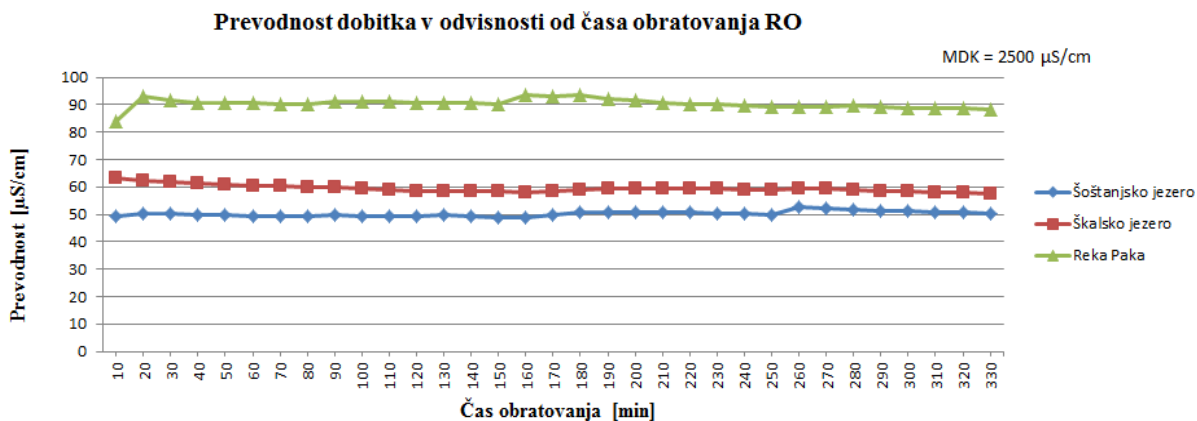
Grafikon 13: Temperatura permeata RO

Zaradi višjih temperatur ozračja, se je segreval permeat RO. Trend naraščanja temperature permeata je razviden iz grafikona 13. Nihanja temperature permeata med obratovanjem RO so posledica svežega dotoka filtrata UF v vmesni rezervoar.

Temperatura permeata vode iz Šoštanjskega jezera je bila sprva najnižja, 25,3 °C, in je v času obratovanja narastla na največ 29,5 °C. Temperatura permeata iz Škalskega jezera se je prav tako segrevala z 26,2 °C na 27,8 °C. Najmanj se je segrevala temperatura permeata reke Pake z začetnih 26,4 °C na končnih 26,9 °C. Najnižja povprečna temperatura permeata je bila za vodo iz reke Pake, in sicer 26,8 °C, nato permeata Škalskega jezera (27,5 °C) in na koncu iz Šoštanjskega jezera (27,6 °C).

Temperatura vode je vplivala na vzpostavitev ravnotežja ionov v vodi in na osmotski tlak ter s tem na prepustnost membrane.

4.1.3.5 Prevodnost

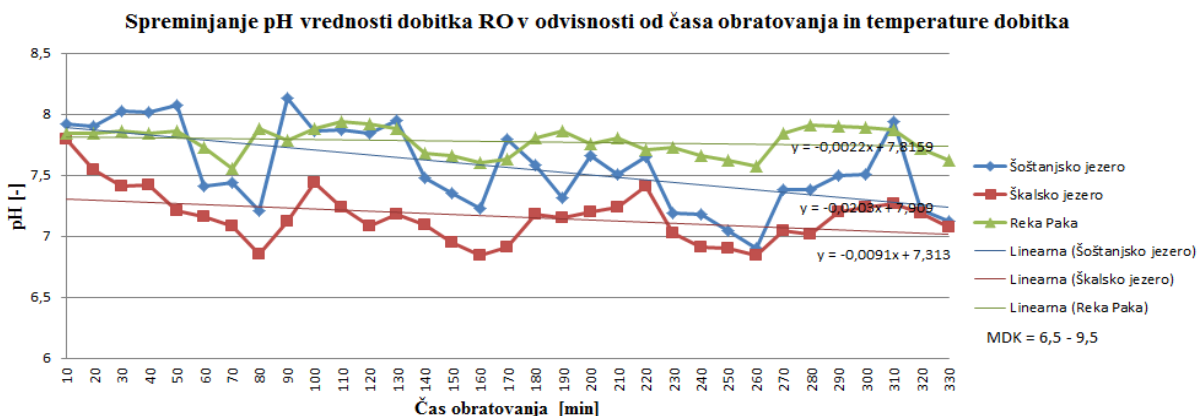


Grafikon 14: Prevodnost permeata RO

Kot je razvidno iz grafikona 14, je bila najnižja prevodnost permeata Šoštanjškega jezera in najvišja permeata reke Pake. Prevodnost permeata se med obratovanjem bistveno ni spremenila, kljub vmesnim spremembam pretoka in tlaka. Na izmerjeno prevodnost permeata je vplivala prevodnost vstopne vode (glej poglavje 4.1.2.6). Povprečna vrednost prevodnosti permeata RO iz vode reke Pake je bila najvišja, in sicer 91,3 µS/cm, sledila ji je prevodnost vode iz Škalskega jezera s 55,4 µS/cm in nazadnje iz Šoštanjškega jezera z 48 µS/cm.

Izmerjene vrednosti parametra prevodnosti permeata RO iz vseh površinskih virov so bile v skladu z predpisano mejno vrednostjo 2500 µS/cm.

4.1.3.6 pH vrednost



Grafikon 15: pH vrednost permeata RO

Kot nam zgornji Grafikon prikazuje, pH vrednosti v dobitku RO pri vseh površinskih virih nihajo. Na nihanje te vrednosti vpliva temperatura permeata (temperatura ozračja v času meritve) in ravnotežje ionov v vodi. Pri delovanju RO moramo upoštevati tudi to, da je bila membrana namočena in

prepojena z površinsko vodo iz predhodnjega testiranja in da smo z vklopom UF dovajali svežo vodo v vmesni rezervoar (temperatura, ozračnost). Nihanja za nekaj desetink vrednosti pH so lahko tudi posledica natančnosti merilne metode.

Iz grafikona 15 je vsekakor možno zaznati trend padanja vrednosti pH v dobitku s časom obratovanja RO, kar je tudi posledica odstranjevanja raztopljenih snovi v vodi. Voda ima v fazi odstranjevanja ionov zmožnost, da preide v elektrolitsko stanje in nase veže CO₂, ki tvori ogljikovo kislino (posledično se pH zniža).

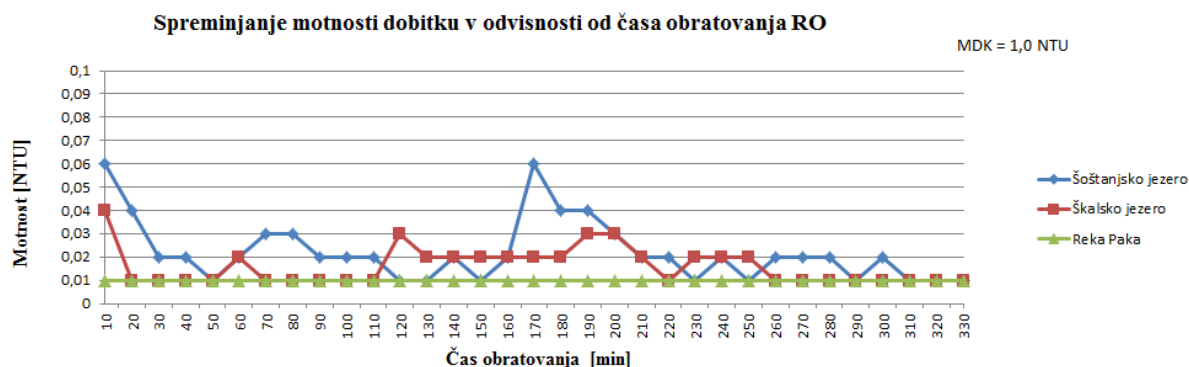
Povprečne vrednosti pH permeata so bile naslednje:

- iz vode Šoštanjskega jezera - 7,56,
- iz vode Škalskega jezera - 7,16,
- iz vode reke Pake - 7,78.

Vse izmerjene vrednosti permeata so v območju predpisane vrednosti pH (6,5–8,5) pitne vode in v območju predpisane vrednosti pH (3–11) proizvajalca membrane.

4.1.3.7 Motnost

Za merjenje motnosti smo uporabili turbidimeter, ki ima merilno območje od 0,01 do 1000 NTU, tako da nižjih vrednosti nismo mogli izmeriti. Z namenom, da zaščitimo RO odstranjujemo motnost površinske vode z UF.



Grafikon 16: Motnost permeata RO

Izmerjene vrednosti za motnost v dobitku RO (Grafikon 16) so bile zadovoljive, saj so bile veliko nižje od predpisane vrednosti za motnost pitne vode. Povprečna vrednost permeata RO iz Šoštanjske in Škalske vode je bila 0,02 NTU ter iz reke Pake 0,01 NTU. Začetne vrednosti so bile na začetku nekoliko višje, vendar ne čez predpisano vrednost 1 NTU. Nihanja motnosti v dobitku RO (Grafikon 16) so posledica merilne metode pri testiranju vode iz Šoštanjskega in Škalskega jezera. Pri merilni metodi so se pojavila odstopanja zaradi mehurčkov zraka v vzorcu (ki se težje odstranijo iz vzorca), prask na kivetu in vlažnosti kivete. Meritve motnosti permeata RO reke Pake so bile bolj natančne, ker smo zamenjali in očistili kiveto.

Dejstvo je, da se v postopku RO motnost ne zviša oz. je enaka kot na izstopu iz UF, saj so pore RO membran še manjše (in bolj fine) kot pore UF in ni možno, da se motnost poveča.

4.2 Učinek čiščenja membranske pilotne naprave

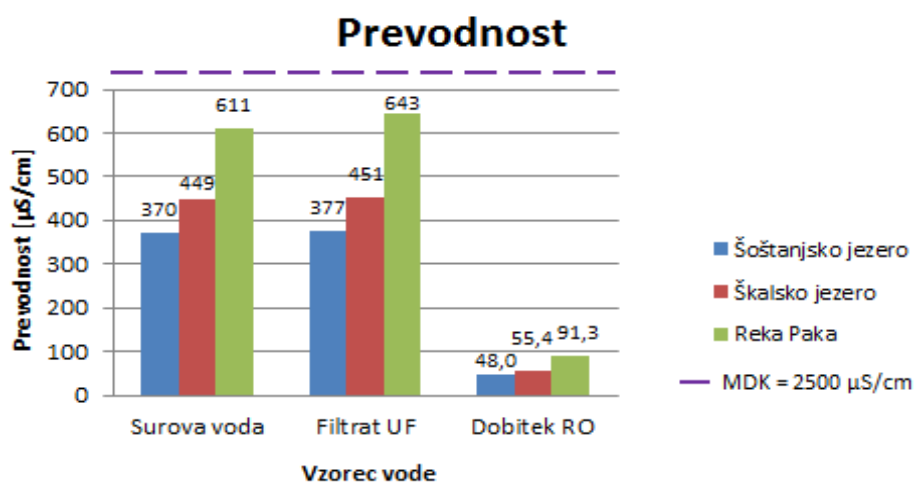
Za primerjavo učinka čiščenja oz. zadržka membranske pilotne naprave smo vzeli povprečne vrednosti fizikalno-kemijskih parametrov filtrata UF in permeata RO za posamezni površinski vir.

Z analitiko vode izbranih parametrov smo dobili okvirno oceno raztopljenih snovi in možno prisotnost bakterij v odvzetih vzorcih (1x vstopna voda, 2x filtrat UF in 3x vzorec permeata RO). Na podlagi teh vrednosti in MDK smo ugotavljali skladnost pitne vode. Za izračun učinka čiščenja oz. t. i. zadržka R na UF, RO in celotne pilotne membranske naprave smo upoštevali povprečne vrednosti.

Povprečni podatki meritev parametrov in učinek čiščenja membranske pilotne naprave so podani za vse tri površinske vire v Prilogi G. V grafikoni podpoglavij smo prikazali vrednosti parametrov vstopne oz. načrpane površinske vode, povprečne vrednosti filtrata ultrafiltracije (UF filtrat) in povprečne vrednosti permeata reverzne osmoze (dobitek RO).

4.2.1 Prevodnost

Mejna dovoljena koncentracija prevodnosti v pitni vodi je 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V eksperimentu površinski viri niso presegali te vrednosti, kar pomeni, da voda na podlagi tega podatka ni preobremenjena in je primerna za pitje. Ta parameter je zgolj groba ocena raztopljenih snovi, ki so lahko tudi kancerogene in nevarne za ljudi v primeru zaužitja v prekomernih količinah. Zato je potrebno te snovi odstraniti in posledično zmanjšati prevodnost.

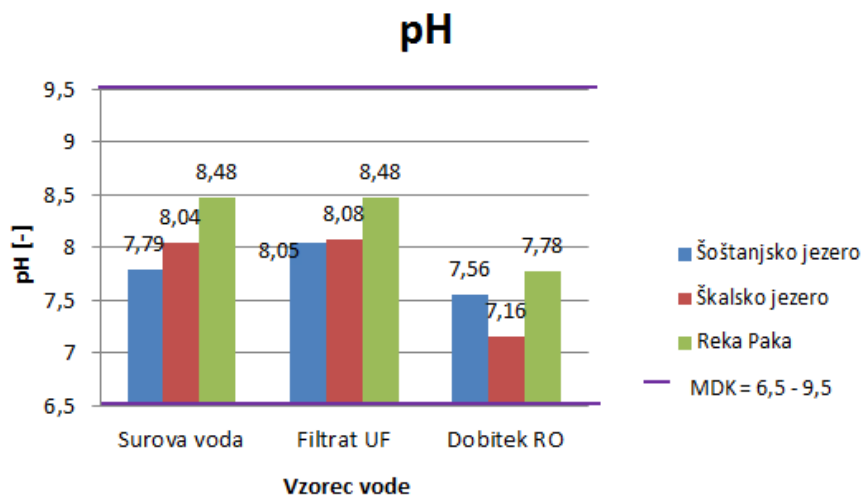


Grafikon 17: Prevodnost

Iz grafikona 17 je razvidno, da se prevodnost z UF ne zniža, temveč naraste (0,4–1,9 %). Z RO prevodnost učinkovito znižamo. UF ne odstranjuje raztopljenih snovi (ionov), ki povzročajo električno prevodnost vode. Zaradi kemičnih reakcij v surovi vodi se je prevodnost UF filtrata zvišala. Učinek čiščenja prevodnosti na RO je tako malo višji od učinka čiščenja membranske pilotne naprave. Pri pripravi pitne vode iz Šoštanjskega jezera smo dosegli povprečno prevodnost 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kar predstavlja 87,0 % zadržek membranske pilotne naprave. Pri Škalskem jezeru smo dosegli povprečno vrednost 55,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in glede na vstopno vodo višji zadržek 87,7 %. Pri reki Paki smo dosegli najvišjo povprečno vrednost 91,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in najnižji zadržek 85,1 % glede na najvišjo vstopno prevodnost.

4.2.2 pH vrednost

Spreminjanje in nižanje vrednosti pH filtratu UF in permeatu RO v času priprave pitne vode je podrobneje razloženo v poglavjih 4.1.2.7 in 4.1.3.6

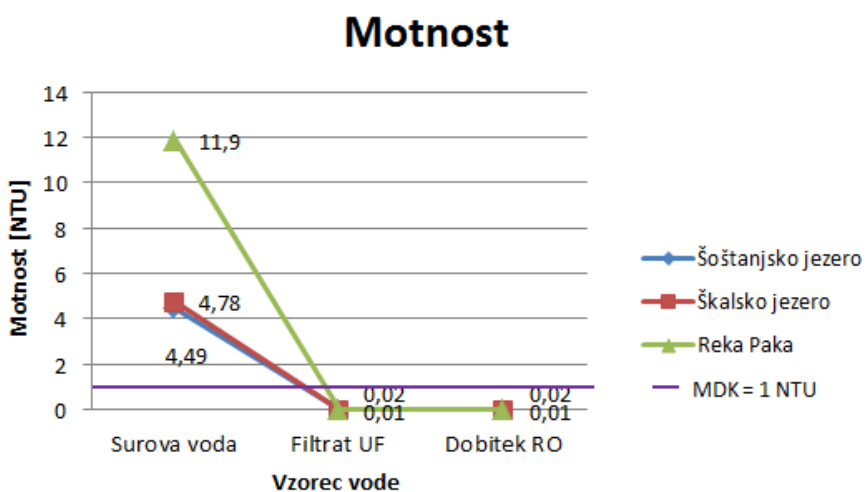


Grafikon 18: pH vrednost

Iz zgornjega grafikona je razvidno, da vrednosti pH pri pripravi pitne vode na pilotni napravi minimalno padejo. Vse vrednosti so znotraj predpisane mejne vrednosti (6,5–9,5).

4.2.3 Motnost

Potek motnosti filtrata UF in permeata RO v odvisnosti od časa obratovanja pilotne naprave je podan v poglavjih 4.1.2.8 in 4.1.3.7



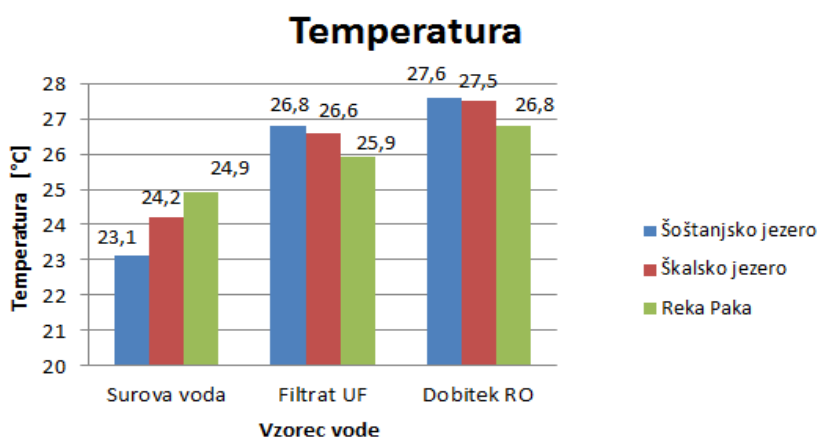
Grafikon 19: Motnost

Iz grafikona 19 je razvidno, da je bila motnost površinske vode nad mejno vrednost 1,0 NTU. Anorganske in organske snovi ter mikroorganizmi vplivajo na višjo motnost. Najvišjo motnost je imela reka Paka, kar pomeni, da je vsebovala največ glinenih in koloidnih delcev, alg, planktona, bakterij idr. Podatek je povsem predvidljiv glede na to, da je Paka tekoča voda in da s seboj prenaša material in več raztopljenih snovi. V jezeru kot stoječi vodi pa se snovi posedajo. Z ultrafiltracijo odstranimo motnost pri vseh površinskih virih do vrednosti 0,01 NTU. Po RO se vrednosti ne spremenijo, ker nikjer v sistemu ne prihaja do onesnaženja z delci, ki povzročajo motnost. Nižjih vrednosti pod 0,01 z razpoložljivo merilno metodo nismo mogli izmeriti.

Vse izmerjene vrednosti motnosti v UF filtratu in RO dobitku so bile v skladu s predpisano motnostjo pod 0,1 NTU. Učinek čiščenja membranske pilotne naprave je enak zadržku povprečne motnosti na UF. Pri pripravi pitne vode iz Šoštanjskega jezera je učinek čiščenja motnosti 99,5 %, Škalskega jezera 99,6 % in reke Pake 99,9 %.

4.2.4 Temperatura

Temperatura filtrata UF in permeata RO v odvisnosti od časa obratovanja pilotne naprave je podana v poglavjih 4.1.2.5 in 4.1.3.4

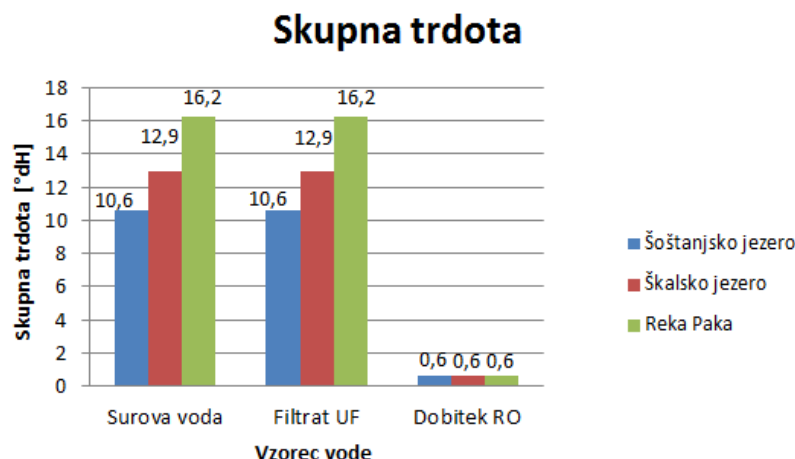


Grafikon 20: Temperatura vode

Iz grafikona 20 je razvidno, da temperatura pri pripravi vode narašča. Zaradi višjih temperatur ozračja so tudi temperature prečiščene vode višje, saj so bila vsa testiranja opravljena sredi poletja. V pravilniku o pitni vodi ni predpisane temperature vode. Pri povišani temperaturi vode so ugodnejše razmere za rast in razvoj bakterij v cevovodih in rezervoarju. Hladnejša voda pa je boljša za odžejanje oz. pitje.

4.2.5 Skupna trdota

Pravilnik o pitni vodi ne podaja vrednosti trdote skladne pitne vode, prevladuje pa mnenje, da mora biti med 8 - 18 °dH.



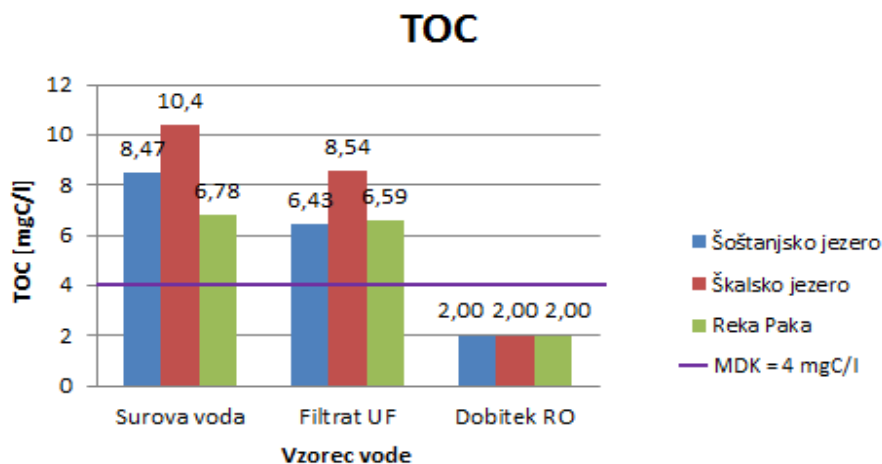
Grafikon 21: Skupna trdota

Iz Grafikona 21 je razvidno, da se skupna trdota po UF ni spremenila, kar smo tudi pričakovali. Reverzna osmoza odstranjuje raztopljene soli, predvsem kalcijeve in magnezijeve, ki povzročajo skupno trdoto. Pri vseh treh površinskih vodnih virih smo z RO znižali skupno trdoto na 0,6 °dH. Vrednost nam pove, da je voda mehka in skoraj brez mineralov (kalcijevih in magnezijevih). Takšna voda je primerna za gospodinjske stroje in za cevovode, saj se v njih ne nalaga vodni kamen. Za pitje in redno uživanje mehke vode so si mnenja strokovnjakov glede trdote nasprotujoča. Nekateri trdijo, da vse minerale dobimo s hrano, drugi pa, da se naravni minerali v človeškem telesu nalagajo in da je dejansko mehka voda bolj ustrezna za pitje. Pojavljajo se tudi mnenja, da redno uživanje mehke vode povzroča izgubo potrebnih mineralnih snovi v človeškem telesu.

Glede na višino skupne trdote vode površinskega vira in glede na skupno trdoto permeata se viša zadržek RO, ki je enak zadržku celotne membranske pilotne naprave. Ta znaša za vodo iz Šoštanjskega jezera 94,3 %, za vodo iz Škalskega jezera 95,3 %, medtem ko je največji za vodo iz reke Pake 96,3 %.

4.2.6 TOC

Pri pripravi pitne vode iz površinske je predpisana vrednost skupnega organskega ogljika TOC 4 C mg/l.

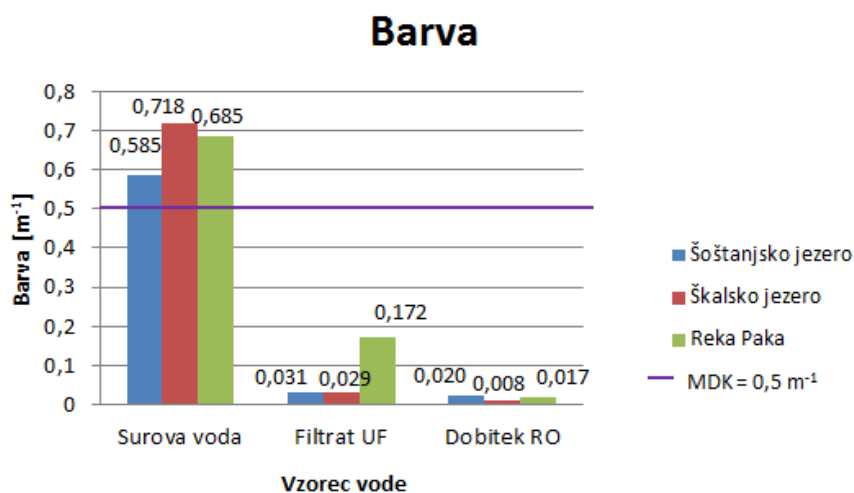


Grafikon 22: TOC

Kot je razvidno iz grafikona 22, so površinski viri preobremenjeni s skupnimi organskimi snovmi (TOC). Najnižja vrednost TOC vstopne (surove) vode je bila izmerjena v reki Paki, sledita Šoštanjsko ter nato Škalsko jezero, ki ima najvišjo vrednost. Z UF smo odstranili neraztopljenе organske snovi iz vode. Zadržki teh na UF so znašali za vodo iz Šoštanjskega jezera 24,1 %, za vodo iz Škalskega jezera 17,9 % in za vodo iz reke Pake 2,8 %. Koncentracije TOC v dobitkih RO nismo mogli izmeriti, ker je merilna metoda omogočala meritve v območju med 2 in 65 C mg/l. Izmerjene vrednosti TOC so bile nižje, zato dobljeni rezultati pod 2 mg/l niso bili natančni. Membranska pilotna naprava je zagotavljala ustrezno kakovost vode glede na mejno vrednost TOC. Zadržek naprave je za vodo iz Šoštanjskega jezera znašal več kot 76,4 %, za vodo iz Škalskega jezera več kot 80,8 % in za vodo iz reke Pake več kot 70,5 %.

4.2.7 Barva

Barva je posledica raztopljenih in neraztopljenih snovi. Pomembno je, da je barva sprejemljiva za potrošnike pitne vode. Zakonsko je predpisana mejna vrednost (izmerjena pri valovni dolžini 436 nm) pod $0,5 \text{ m}^{-1}$.



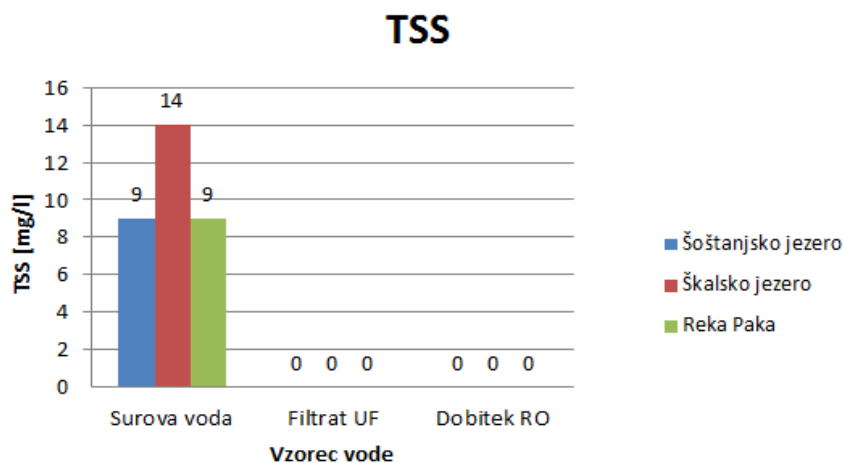
Grafikon 23: Barva

Iz grafikona 23 je razvidno, da je bila najbolj obarvana voda iz Škalskega jezera, ki je vsebovala največ neraztopljenih suspendiranih snovi (Glej TSS). Te smo odstranili z UF, zato je bil tudi zadržek najvišji (96 %). Preostale raztopljenе snovi, ki vplivajo na obarvanje vode, smo odstranili z RO. Skupni zadržek membranske pilotne naprave je znašal 98,8 %.

Voda iz reke Pake je bila tudi zelo obarvana (rjavkasta). Z UF smo očistili večino obarvanja, in sicer za 75 %, preostali zadržek do 97,5 % pa še z RO. Zadržek obarvanja vode iz Šoštanjskega jezera je bil nekoliko nižji, saj je bila voda v primerjavi z ostalima viroma najmanj obarvana. Na UF je znašal 94,7 %, preostanek do 96,5 % pa smo odstranili z RO. Vse meritve UF filtrata in RO permeata so v skladu z MDK obarvanosti vode.

4.2.8 TSS

TSS oz. skupne suspendirane snovi je parameter, ki zakonsko ni podan v pravilniku o pitni vodi (Priloge A), lahko pa ga smiselno povežemo z drugimi parametri. TSS so neraztopljene snovi, ki povzročajo obarvanost vode in motnost.

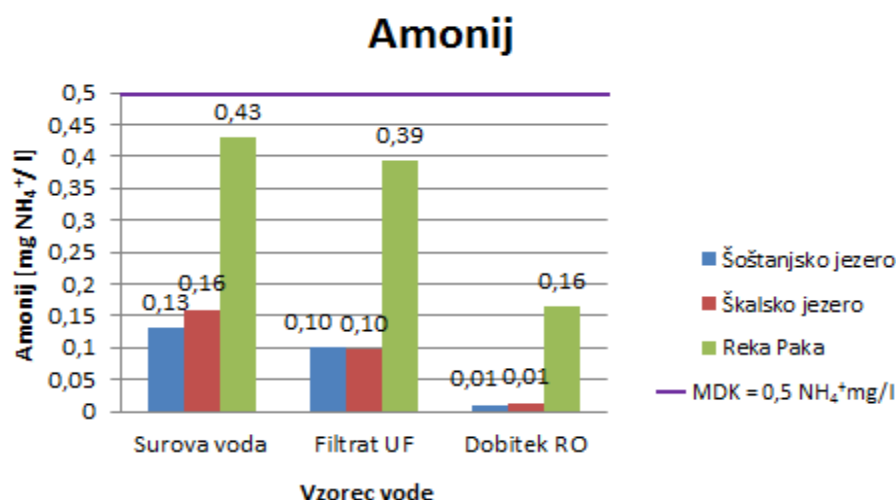


Grafikon 24: TSS

Iz zgornjega grafikona je razvidno, da največ suspendiranih snovi vsebuje voda iz Škalskega jezera. V vzorcu vode iz reke Pake in vode iz Šoštanjskega jezera smo izmerili enaki koncentraciji, in sicer 9 mg/l. Bilo je pričakovano, da bomo z UF odstranili vse suspendirane snovi, kar potrdimo z izračunanim 100 % zadržkom UF za vodo iz vseh površinskih virov. Zadržek suspendiranih snovi na UF je bil enak zadržku suspendiranih snovi celotne pilotne naprave.

4.2.9 Amonij

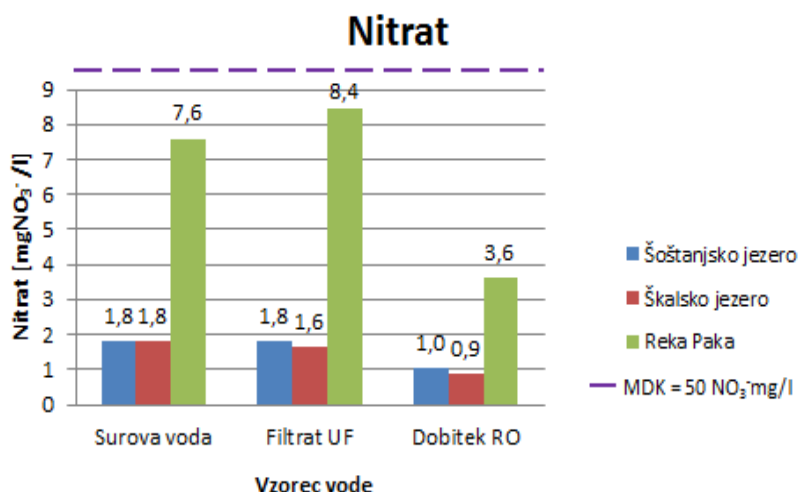
Za amoniak, ki se raztopi v vodi in nastane amonijev ion, podaja pravilnik o pitni vodi MDK 0,50 mg/l. V načrpani površinski vodi ta vrednost ni bila presežena, kar pomeni, da voda na lokaciji črpanja ni bila kontaminirana (organsko oz. fekalno onesnažena). Višje koncentracije dajejo vodi vonj in okus, zato so nezaželeni.



Grafikon 25: Amonij

Kot nam prikazuje zgornji grafikon, so vrednosti amonija v UF filtratu nekoliko nižje od tistih v vstopni površinski vodi. Razlog za znižanje koncentracij amonija je oksidacija (voda se pri pretakanju ozrači). Iz literature je znano, da UF ne odstranjuje raztopljenih snovi, med katere spadajo tudi amonijski ioni in druge raztopljene snovi (več v nadaljevanju). Te snovi smo odstranili s pomočjo, in sicer z zadržkom 90 % pri Šoštanjskem jezeru, 86,2 % pri Škalskem jezeru in 58,2 % pri reki Paki. Vrednosti zadržkov membranske pilotne naprave padajo glede na vstopne obremenitve. Tako je npr. Paka v primerjavi z ostalimi viri najbolj obremenjena z amonijski ioni in ima najnižji zadržek (62 %) v primerjavi s Škalskim (91,7 %) in Šoštanjskim jezerom (92,3 %). Vendar še vedno gre za vrednosti, ki so nižje od MDK pitne vode. Glede na izmerjene vrednosti amonija je voda primerna za pitje.

4.2.10 Nitrat



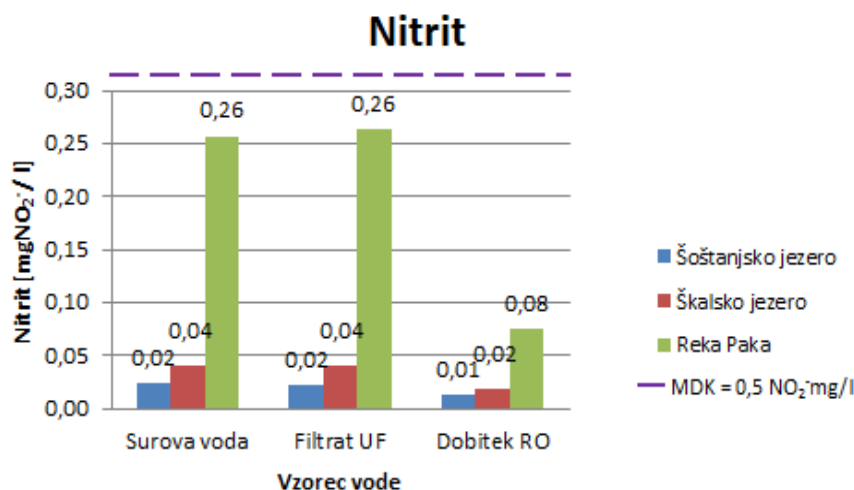
Grafikon 26: Nitrat

Iz grafikona 26 je razvidno, da se vrednosti nitrata v filtratu reke Pake po čiščenju z UF zvišajo. Razlog za zvišanje je oksidacija amonija v nitrat. Nitrata odstranjujemo z RO, katerih zadžki so bili procentualno nižji v primerjavi z ostalimi parametri. Vstopne koncentracije nitratov v vodi sicer niso

bile izrazito visoke. Zadržek RO je za vodo iz Škalskega jezera znašal 42,6 %, iz Šoštanjskega jezera 46,9 % in za reko Pako 57,3 %. Glede na vstopno vodo je bil zadržek membranske pilotne naprave za vodo iz Šoštanjskega jezera enak kot po RO (42,6 %), za vodo iz Škalskega jezera je znašal 51,9 %, za vodo iz reke Pake pa 52,6 %. Paka je bila v primerjavi z ostalimi površinskimi viri najbolj obremenjena z nitrati. Zaradi tega je bil učinek čiščenja nitratov med pripravo pitne vode večji. Izmerjene vrednosti koncentracije nitrata v permeatu RO so bile med 0,7 in 3,8 NO_3^{2-} mg/l, kar je pod MDK za pitno vodo, ki znaša 50 NO_3^{2-} mg/l.

4.2.11 Nitrit

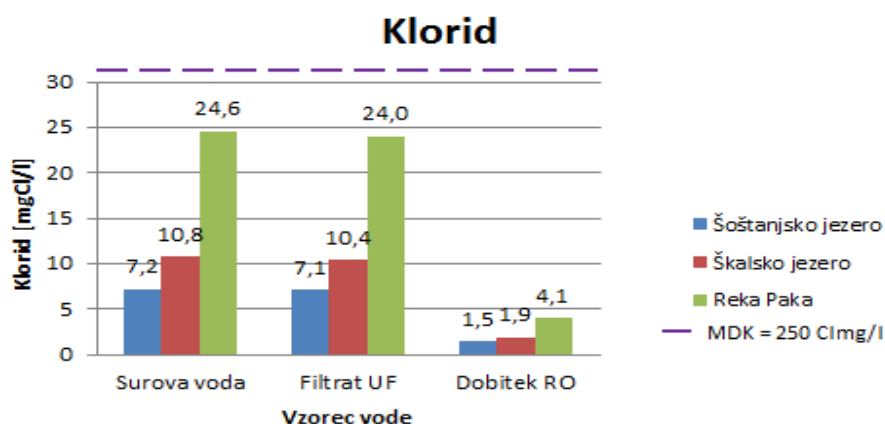
Visoke koncentracije nitritov v površinski vodi so pokazatelj močnega onesnaženja s fekalijami. Prisotnost prekomerne količine nitrita v pitni vodi je nevarna za zdravje ljudi, še posebej za dojenčke. Zato je zakonsko predpisana mejna vrednost nitritov za pitno vodo 0,5 mg/l (Priloga A).



Grafikon 27: Nitrit

Kot prikazuje zgornji grafikon, smo nitrite odstranili z reverzno osmozo, zato je zadržek RO skoraj enak (< 0,5 %) zadržku membranske pilotne naprave. Za vodo iz Šoštanjskega jezera je znašal 47,8 %, za vodo iz Škalskega jezera 53,7 % in za vodo iz reke Pake 70,8 %. Bolj kot je voda obremenjena z nitriti, boljši je učinek njihovega čiščenja. Vse vrednosti nitrita (v surovi vodi, filtratu in permeatu) v vseh površinskih virih so bile v skladu z MDK za nitrit. Voda bi bila na podlagi tega parametra ustrezna za pitje.

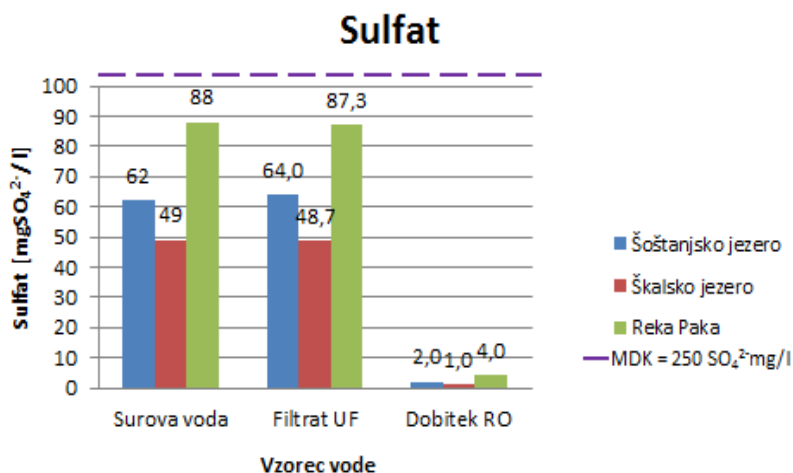
4.2.12 Klorid



Grafikon 28: Klorid

Iz grafikona 28 je razvidno, da se koncentracije klorida po UF znižajo za minimalne vrednosti, veliko več pa se jih izloči z RO, kar je bilo tudi pričakovano. Zadržek RO je znašal 79,3 % za vodo iz Šoštanjskega jezera, nekoliko več (81,8 %) za vodo iz Škalskega jezera in največ (83,1 %) za vodo iz reke Pake. Bolj ko je voda bila obremenjena s kloridi, večji so bili zadržki RO in celotne pilotne naprave. Tako je učinek čiščenja pilotne naprave znašal za Šoštanjsko jezero 79,6 %, Škalsko jezero 82,4 % in reko Pako 83,5 %. Vrednosti klorida so bile skladne s pitno vodo.

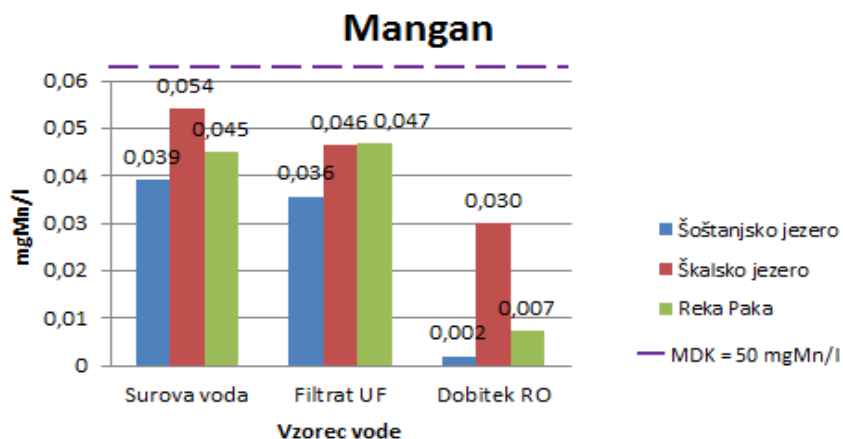
4.2.13 Sulfat



Grafikon 29: Sulfat

Iz zgornjega grafikona je razvidno, da so vse koncentracije sulfata pod MDK za pitno vodo. Z UF se vrednosti sulfata reke Pake in Škalskega jezera minimalno znižajo, medtem ko se vrednosti za Šoštanjsko jezero minimalno zvišajo. Ultrafiltracija ne odstranjuje raztopljenih snovi, zato se večina sulfatov izloči na RO. RO pilotne naprave omogoča visoke zadržke sulfata pri čiščenju vode, in sicer za Šoštanjsko jezero 96,8 %, Škalsko jezero 98,0 % in za reko Pako 95,5 %.

4.2.14 Mangan

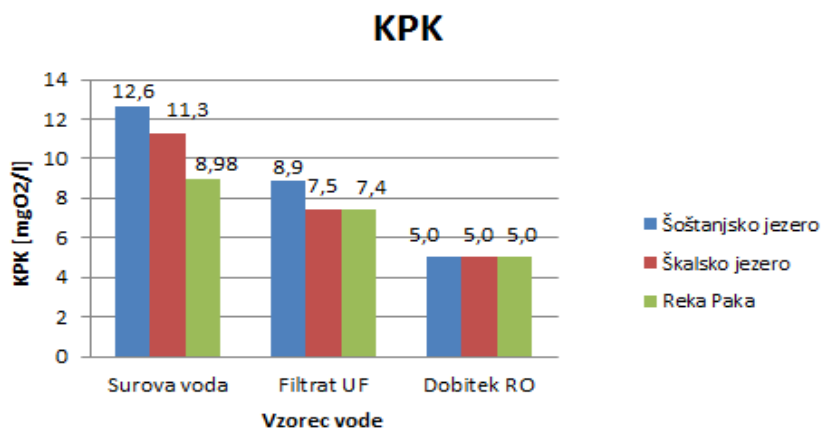


Grafikon 30: Mangan

Iz grafikona 30 je razvidno, da se koncentracije mangana po UF znižajo. Pri vodi iz Šoštanjskega jezera se znižajo za 8,5 %, pri vodi iz Škalskega jezera pa za 14,2 %. V vodi je ta delež mangana oksidiral (ter oboril) in se izločil na UF membrani. Minimalno povišanje (3,7 %) mangana v filtratu reke Pake je lahko posledica nehomogenega zajetega vzorca vstopne vode. Glede na višje vstopne koncentracije mangana na RO se zadržek na membrani RO niža. Zadržek RO je za vodo iz Škalskega jezera znašal 35,3 %, za reko Pako 84,3 % in za Šoštanjsko jezero 94,4 %. Posledično si v tem zaporedju sledi tudi učinek čiščenja membranske pilotne naprave. Slednji je glede na vstopno vodo iz Škalskega jezera znašal 44,4 %, iz reke Pake 83,7 % in iz Šoštanjskega jezera 94,9 %. Koncentracije mangana v permeatih RO, pridobljenih iz vseh treh površinskih virov, so v skladu z MDK za pitno vodo in zadovoljujejo tudi priporočila za uporabnike.

4.2.15 KPK

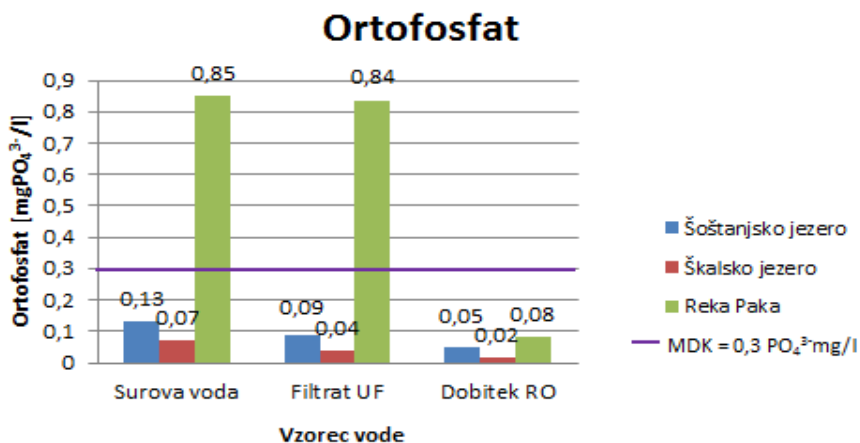
Parameter kemijske potrebe po kisiku (KPK) je merilo organskega onesnaženja v površinskih in odpadnih vodah. Mi smo ga merili tudi v prečiščeni vodi. Organsko onesnaženje parametra KPK smo izmerili v filtratu UF, medtem ko pri meritvah v permeatu RO nismo dobili natančnih rezultatov. RO učinkovito odstranjuje organske snovi, ki podajajo vrednost KPK. Merilna metoda za določevanje KPK v vodi podaja rezultate znotraj območja koncentracij 5–65 O₂ mg/l. V permeatu RO pa so bile izmerjene nižje koncentracije od 5 O₂ mg/l.



Grafikon 31: KPK

Iz grafikona 31 je razvidno, da se vrednosti KPK po UF znižajo. Zadržek UF za vodo iz Šoštanjskega jezera je znašal 29,4 %, Škalskega jezera 34 % in reke Pake 29,4 %. Zadržka snovi na RO nismo mogli natančno definirati. Zaradi izmerjenih nižjih vrednosti KPK od merilnega območja (metode), smo lahko podali najnižji zadržek (organskih) snovi pri posameznem površinskem viru. Za Šoštanjsko jezero je znašal nad 43,8 %, za Škalsko jezero nad 33 % in za reko Pako nad 32,5 %. Tudi skupni učinki odstranjevanja KPK celotne pilotne naprave si sledijo v naslednjem zaporedju, za vodo iz Šoštanjskega jezera nad 60,3 %, za vodo iz Šoštanjskega jezera nad 55,8 % in za vodo iz reke Pake nad 44,3 %. Dejanski učinki čiščenja RO in celotne pilotne naprave so bili pri vseh površinskih virih višji od najnižjega zadržka.

4.2.16 Ortofosfat



Grafikon 32: Ortofosfat

Vrednost ortofosfata v reki Paki je izrazito presegala MDK (Grafikon 32). Z RO smo njegovo vrednost učinkovito znižali, s čimer smo dosegli 90 % zadržek ortofosfata. Zadržek celotne pilotne naprave pa je znašal 90,2 %. Izračunani zadržki in učinki čiščenja membranske pilotne naprave se manjšajo z zniževanjem vstopne koncentracije (ortofosfata) glede na najvišjo in najnižjo vstopno koncentracijo. Učinek čiščenja ortofosfatov iz vstopne vode z membransko pilotno napravo znaša za vodo iz Šoštanjskega jezera 64,1 % in za vodo iz Škalskega jezera 76,2 %. Koncentracije ortofosfatov v permeatu RO so bile v skladu s pitno vodo.

4.2.17 Bakterije

Za mikrobiološko skladno pitno vodo je zelo pomembno, da ne vsebuje bakterij. Pravilnik o pitni vodi določa (Priloga A) nič bakterij *E. coli* in koliformnih bakterij na 100 ml odvzetega vzorca pitne vode s standardno metodo merjenja. Mi smo s preprostejšo metodo izmerili zgolj njihovo prisotnost oz. odsotnost, ne pa tudi njihovega števila.

V vseh površinskih virih smo zasledili prisotnost *E. coli* in skupnih koliformnih bakterij, ki smo jih z UF učinkovito odstranili, tako da jih z mikrobiološkim testom nismo zaznali. Prav tako jih tudi v permeatu RO nismo zasledili. Zato lahko potrdimo učinkovito mikrobiološko čiščenje pilotne naprave za te vrste bakterij (ne pa za vse ostale) brez dezinfekcije.

5 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga se ukvarja z monitoringom delovanja pilotne naprave za pripravo pitne vode in analiznimi postopki za vrednotenje kakovosti vode v posameznih fazah njene predelave. S pomočjo izbranih eksperimentalnih metod smo določili kakovost različnih vzorcev vstopne vode iz površinskih virov, ki so bili izbrani za potrebe testiranja. Primerjava teh nam je pokazala, da je bila voda iz reke Pake najbolj, voda iz Šoštanjskega jezera pa najmanj obremenjena z onesnaženjem. S pilotno napravo smo učinkovito odstranili izmerjene parametre v skladu s predpisanimi mejnimi koncentracijami pitne vode ne glede na kakovost surove vode na vstopu. Pri testiranjih smo s pomočjo membranskih postopkov UF in RO zagotovili želene učinke čiščenja brez dodajanja kemikalij. Zato sta se ta membranska postopka izkazala kot okolju prijazna tehnologija za pripravo pitne vode.

S slabostmi omenjenih membranskih postopkov smo se seznanili pri analizi obratovalnih pogojev. Princip čiščenja temelji na filtraciji skozi polprepustno membrano, ki s pomočjo tlaka omogoča ločevanje delcev od prečiščene vode. Pri tem se pore membrane mašijo in oblagajo. S preučevanjem tlakov in pretokov UF smo potrdili predpostavljena pričakovanja, da kakovost vode vpliva na obratovalne pogoje. Bolj kot je bila voda obremenjena z delci, ki povzročajo motnost (obarvanost in bakteriološko onesnaženje), hitreje sta se nižala pretok in fluks filtrata, medtem ko so transmembranski tlaki naraščali. Ne glede na kakovost površinskega vira smo z izmerjenimi fizikalno-kemijskimi parametri potrdili, da ta ne vpliva na učinek čiščenja ultrafiltracije. UF je v času obratovanja z različnimi površinskimi viri vedno zagotavljala odstranjevanje motnosti v skladu s predpisano mejno vrednostjo. V eksperimentu se je redno hidravlično izpiranje UF modula izkazalo kot dobra odločitev, kajti tudi pri najbolj obremenjeni surovi vodi transmembranski tlaki po opravljenem testiranju niso dosegali maksimalnih vrednosti. Zaradi ireverzibilnega mašenja membrane bi v takšnih primerih bilo potrebno modul kemično spirati. Gostota pretoka skozi membrano oz. t. i. fluks je pri vseh testiranjih zadovoljila naše potrebe, kljub njenemu zniževanju med obratovanjem. Višje temperature vstopne vode so vplivale na boljšo prepustnost membrane. Na preostala dva fizikalno-kemijska parametra, prevodnost in pH vrednost, ultrafiltracija ni imela večjega vpliva, saj se nista bistveno spreminjala. Pri pH vrednosti vstopne vode je pomembno dejstvo, da je slednja znotraj območja vrednosti, ki jo predpisuje proizvajalec membrane UF. V našem primeru je vstopna voda zadovoljevala ta kriterij, zato parameter pH ni vplival na delovanje membrane.

Pri procesu reverzne osmoze se vstopna voda prečisti v permeat, topljenec (raztopljene snovi) pa izloči kot koncentrat. Izmerjeni tlaki so se spremenili v odvisnosti od teh pretokov. Pri preučevanju obratovalnih pogojev so imeli fizikalno-kemijski parametri kakovost vode veliko večji vpliv na delovanje RO kot na delovanje UF. Bolj kot je bila voda obremenjena z onesnaženji, višji je bil začetni vstopni tlak. Vrednosti slednjega so se zvišale med obratovanjem RO, istočasno pa se je pretok vstopne vode in permeata med obratovanjem znižal glede na začetne nastavljene vrednosti. Po vzpostavitvi ravnotežja membrane (po koncentracijski polarizaciji) so se pretoki koncentrata zvišali. Kapacitete prečiščene (permeata) in odpadne vode (koncentrata) so bile premo sorazmerne s kakovostjo in količino pretoka, saj je naprava vedno delovala enako dolgo. Tako je največji izkoristek imela RO pri obdelavi vode iz Šoštanjskega jezera in najmanjšega pri pripravi načrpane vode iz reke Pake.

Namen in cilj diplomske naloge sta bila z eksperimentom dosežena. Ugotovljeno je bilo, kako posamezni fizikalno-kemijski parametri pri različnih površinskih virih vode vplivajo na membranska

procesa UF in RO. Ti so vplivali nanje v takšni meri, da je proces priprave pitne vode potekal nemoteno po planu testiranj in dosegal željene učinke čiščenja.

Z osvojitvijo praktičnega znanj merilnih metod monitoringa in analitike vode smo v drugem delu eksperimenta izmerili kakovost vstopne vode in prečiščene vode ter izračunali učinke čiščenja pilotne naprave. Na podlagi teh rezultatov smo dokazali, da napredni membranski tehnologiji učinkovito odstranjujeta vse zasledovane fizikalno - kemijske, kemijske in mikrobiološke parametre pri različnih površinskih virih. Brez dodajanja kemikalij smo s pomočjo fizikalnih postopkov filtracije odstranili vse prekoračene vrednosti posameznih parametrov. Izmerjene vrednosti prečiščene vode UF in RO smo primerjali z zakonsko predpisanimi vrednostmi. Membranska pilotna naprava učinkovito očisti izmerjene parametre glede na predpisane mejne vrednosti parametrov v Pravilniku o pitni vodi (Priloga A), in sicer ne glede na izbran površinski vir (Šoštanjsko jezero, Škalsko jezero in reka Paka). Prečiščena površinska voda z membransko pilotno napravo je na podlagi izmerjenih parametrov skladna s pitno vodo.

UF predstavlja učinkovito predčiščenje površinskega vira pred RO. Z ultrafiltracijo smo zadržali delce, ki povzročajo motnost in obarvanost ter bakterije, ki so v pitni vodi prepovedane. S tem preprečujemo hitrejšo mašenje por membrane, zagotavljamo učinkovitejšo čiščenje RO in daljšo življenjsko dobo RO membrane. Raztopljenih snovi UF ne odstranjuje, zato smo te učinkovito odstranili z reverzno osmozo.

Reverzna osmoza je zagotavljala pitno vodo, a je ta bila skoraj brez mineralnih snovi (skupna trdota 0,6 °dH). Slovenska zakonodaja ne podaja minimalne vrednosti skupne trdote, zato je RO permeat glede na izmerjene vrednosti skupne trdote pitna voda. Mineralne snovi ljudje zaužijejo večinoma s hrano in manjši delež tudi z vodo, zato s tega vidika uživanje mehke vode ni problematično. V čistilnih napravah za pripravo pitne vode, kjer vodo razsoljujejo z reverzno osmozo, to naknadno mineralizirajo. Pilotna naprava dopušča možnosti nadgradnje, zato je v naslednji fazi možna razširitev s postopkom mineralizacije permeata RO. Odprte so tudi možnosti dopolnitve procesa čiščenja in priprave pitne vode še z ostalimi konvencionalnimi postopki, kot so recimo dezinfekcija pred distribucijo pitne vode v omrežje, filtracija v plasti aktivnega oglja ipd.

Cilj, ki smo si ga zadali za nadaljnje delo, je izboljšanje membranske pilotne naprave z digitalnimi merilniki. Ti bi že v tej fazi eksperimenta bili še kako dobrodošli. Prav tako bi lahko oblikovali računalniški program, ki bi omogočil daljinsko vodenje in nadzor delovanja s pomočjo računalnika. S tem bi lahko spremljali osnovne procesne parametre (tlake, pretoke) ter vstopne in izstopne fizikalno-kemijske parametre (temperatura, prevodnost, pH, motnost) vode. V ozadju programa bi lahko delovala podatkovna baza, v katero bi se sproti shranjevale vse meritve. Ena od možnosti dodatne izpopolnitve naprave je njena rekonstrukcija z namenom doseganja mobilnosti. Slednjo bi lahko dosegli s postavitvijo naprave v mobilni kontejner, ki bi bil ustrezno opremljen za delo na poljubni lokaciji ob izbranem vodnem viru.

VIRI

ARSO. 2008. Kakovost površinskih virov pitne vode v Sloveniji.

http://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/PVOPV_publikacija-01.pdf
(Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2011. Program monitoringa stanja voda za obdobje 2010 – 2015.

<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Program%202010%20-%202015.pdf> (Pridobljeno 5. 5. 2013.)

ARSO. 2012. Ocena stanja rek v Sloveniji v letih 2009 in 2010.

http://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/POROCILO_REKE_2007_2008.pdf (Pridobljeno 8. 8. 2013.)

ARSO. 2013. Ocena stanja jezer v Sloveniji v letu 2012.

http://www.arso.gov.si/vode/jezera/Porocilo_JEZERA_2012.pdf (Pridobljeno 6. 7. 2013.)

Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G. 2007. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. New York, McGraw Hill: str. 425-444, 463-499.

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
(Pridobljeno 10. 5. 2013)

Bauman, M., Pobežnik, M., Lobnik A. 2011. Metode čiščenja in priprave površinskih in podzemnih voda. V: Volfand, J. (ur.) Upravljanje voda v Sloveniji, Zbirka Zelena Slovenija. Celje: Fit media d.o.o.: str. 85-98.

Čarman, I. 2007. Reciklacija odpadnih voda za tehnološko rabo. V: Raspor, P. (ur.). Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost: voda, Ljubljana, 18-19 januarja 2007. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za Živilstvo: str. 101-113.

Drev, D. 2009. Vodovod. Ljubljana

<http://sl.scribd.com/doc/23335105/13/ADSORBCIJA> (Pridobljeno 6. 7. 2013.)

Environmental Protection Agency (EPA), Office of Water. 2005. Membrane Filtration Guidance Manual. Office of Water: str. 3-18.

http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/lt2/pdfs/guide_lt2_membranefiltration_final.pdf
(Pridobljeno 9. 8. 2013.)

Gros, N. 2013. Analize vod z drugimi prenosnimi instrumenti, Merjenje prevodnosti vode in ocena vsebnosti raztopljenih trdnih snovi (TDS). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.

<http://www.ki3.ntf.uni-lj.si/analchemvoc2/file.php/1/html/slo/spektra/water9.htm>
(Pridobljeno 8. 7. 2013.)

HACH Company. 1997. Hach Water analysis handbook 3rd edition. Hach company, Združene države Amerike.

Inštitut za varovanje zdravja Republike Slovenije (IVZ RS). 2011. Parametri, ki jih določamo v pitni vodi

http://www.ivz.si/Mp.aspx?ni=115&pi=5&_5_id=405&_5_PageIndex=0&_5_groupId=245&_5_newsCategory=&_5_action>ShowNewsFull&pl=115-5.0. (Pridobljeno 10. 6. 2013.)

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2004. Application of membrane technologies for liquid radioactive waste processing, Technical reports series no. 431. Vienna: str. 11-17.

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS431_web.pdf (Pridobljeno 18. 7. 2013.)

Kompare, B. 2005. Možnosti uporabe površinskih voda za pripravo pitne vode. V: Vodni dnevi 2005. Zbornik referatov. Ljubljana, Slovensko društvo za zaščito voda

http://www.sdzv-drustvo.si/si/vodni_dnevi/2005/referati/09-Kompare.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2013.)

Kus, J. 2007. Pitne vode. V: Raspor, P. (ur.). Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost: voda, Ljubljana, 18-19 januarja 2007. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za Živilstvo: str. 31-39.

Lobnik, A. 2008. Ekologija in okoljevarstvo, Navodila za vaje. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.

<http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itkek/lakbp/izpiti/Ekologija%20in%20Okoljevarstvo%20-%20gradivo%20in%20vaje/vaje%2008-09/Navodila%20za%20vaje%2008-09.pdf>
(Pridobljeno 4. 3. 2013.)

Lovibond. 2009. Turbidimeter TurbiCheck WL, Instruction manual. Nemčija: str. 8-9.

Mak CMC. 2013

<http://www.mak-cmc.si/Proizvod/47/NAPRAVE-S-POSTOPKOM-REVERZNE-OSMOZE-TIP-MINIRO-IN-INIRO> (Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Mestna občina Velenje (MOV). 2013. Jezera.

<http://www.velenje.si/3538> (Pridobljeno 6. 7. 2013.)

Norit. 2013.

<http://www.watersurplus.com/watersurplus-technical-library.cfm?l=N&n=100437>
(Pridobljeno 6. 6. 2013.)

Norit X-Flow. 2013. Technical Instruction Manual CAPFIL membrane modules: AquaFlex TM Low Solids: str. 1-6.

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

Prošek, E. 2011. Testiranje membranskega modula za ultrafiltracijo. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva (samozaložba E. Prošek): str. 13, 21.

Počkaj, H. D. 1999. Velenjsko in Konjiško hribovje. V: Slovenija - pokrajina in ljudje. Ljubljana, Mladinska knjiga: str. 735.

Pobežnik, M., Bauman, M., Lobnik A. 2011. Temeljni ukrep mora biti stalni nadzor onesnaževal. V: Volfand, J. (ur.) Upravljanje voda v Sloveniji, Zbirka Zelena Slovenija. Celje: Fit media d.o.o.: str. 118-128.

Roš, M., Zupančič, D. G. 2010. Čiščenje odpadnih voda. Velenje, Visoka šola za okolje: str. 172, 180.

Simonič, M. 2004. Tehnologija vod, Laboratorijske vaje. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.

http://atom.uni-mb.si/edu/egradiva/tehnologija_vod_vaje.pdf (Pridobljeno 12. 6. 2013.)

Simonič, M., Petrinič, I., Turk, S. Š. 2004. Čiščenje odpadnih voda iz industrijske pralnice z uporabo membranske tehnologije. Tekstilec, 47, 5-6: str. 167-174.

Urbanič, G., Toman, M. J. 2003. Varstvo celinskih voda. Ljubljana, Študentska založba: str. 22-47.

VO-KA Celje, Vodovodni sistem Celja in krajevni vodovodni sistemi. 2013.

<http://www.vo-ka-celje.si/dejavnosti/oskrba-s-pitno-vodo/26-podjetje/podjetje/150-vodovodni-sistem-celja-in-krajevni-vodovodni-sistemi#3> (Pridobljeno 1. 9. 2013.)

Vontron Technology Co., Ltd. 2013. Manual of Product, Technical Support and Service: str. 26-29.

<http://www.vontron.com/upload/accessory/20123/2012321429464461959.pdf>

(Pridobljeno 7. 7. 2013.)

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.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: MEJNE VREDNOSTI PARAMETROV SKLADNE PITNE VODE, PODANE V PRILOGAH PRAVILNIKA O PITNI VODI

PRILOGA B: OPISI IZBRANIH POVRŠINSKIH VIROV

PRILOGA C: SHEMA MEMBRANSKE PILOTNE NAPRAVE

PRILOGA D: OPISI METOD FIZIKALNO-KEMIJSKIH PARAMETROV

PRILOGA E: OPIS MERILNIH METOD PRI ANALITIKI

PRILOGA F: UREJENE MERITVE IN ODČITKI ULTRAFILTRACIJE IN REVERZNE OSMOZE ZA 3 TESTIRANJA (ŠOŠTANJSKO JEZERO, ŠKALSKO JEZERO IN REKA PAKA)

Priloga F.1: Urejene meritve in odčitki UF - Šoštanjsko jezero, ponedeljek 22.7.2013

Priloga F.2: Urejene meritve in odčitki UF - Škalsko jezero, sredo 24.7.2013

Priloga F.3: Urejene meritve in odčitki UF - reka Paka, petek 26.7.2013

Priloga F.4: Odčitki in meritve RO - Šoštanjsko jezero, ponedeljek 22.7.2013

Priloga F.5: Odčitki in meritve RO - Škalsko jezero, sredo 24.7.2013

Priloga F.6: Odčitki in meritve RO - reka Paka, petek 26.7.2013

PRILOGA G: IZRAČUNI UČINKA ČIŠČENJA ULTRAFILTRACIJE (R_1) IN REVERZNE OSMOZE (R_2) TER CELOTNE MEMBRANSKE PILOTNE NAPRAVE (R) PRI PRIPRAVI PITNE VODE, GLEDE NA 3 POVRŠINSKE VIRE VSTOPNE VODE

Priloga G.1: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R_1) in reverzne osmoze (R_2) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz Šoštanjskega jezera

Priloga G.2: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R_1) in reverzne osmoze (R_2) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz Škalskega jezera

Priloga G.3: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R_1) in reverzne osmoze (R_2) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz reke Pake

Ta stran je načeloma prazna.

PRILOGA A: MEJNE VREDNOSTI PARAMETROV SKLADNE PITNE VODE, PODANE V PRILOGAH PRAVILNIKA O PITNI VODI

Priloga I Pravilnika o pitni vodi (Ur. l. RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09)

PARAMETRI IN MEJNE VREDNOSTI PARAMETROV

DEL A

Mikrobiološki parametri

Splošne zahteve za pitno vodo

Parameter	Mejna vrednost parametra (število/100 ml)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0
Enterokoki	0

Zahteve za vodo, namenjeno za pakiranje:

Parameter	Mejna vrednost parametra
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0/250 ml
Enterokoki	0/250 ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/250 ml
Število kolonij 22 °C	100/ml
Število kolonij 37 °C	20/ml

DEL B

Kemijski parametri

Parameter	Mejna vrednost parametra	Enota	Opombe
Akrilamid	0,10	µg/l	Opomba 1
Antimon	5,0	µg/l	
Arzen	10	µg/l	
Baker	2,0	mg/l	Opomba 2
Benzen	1,0	µg/l	
Benzo(a)piren	0,010	µg/l	
Bor	1,0	mg/l	
Bromat	10	µg/l	Opomba 3
Cianid	50	µg/l	
1,2-dikloroetan	3,0	µg/l	
Epiklorohidrin	0,10	µg/l	Opomba 1
Fluorid	1,5	mg/l	
Kadmij	5,0	µg/l	
Krom	50	µg/l	
Nikelj	20	µg/l	Opomba 2
Nitrat	50	mg/l	Opomba 4
Nitrit	0,50	mg/l	Opomba 4
Pesticidi	0,10	µg/l	Opombi 5 in 6
Pesticidi – vsota	0,50	µg/l	Opombi 5 in 7
Policiklični aromatski ogljikovodiki	0,10	µg/l	Vsota koncentracij izbranih spojin, navedenih v Opombi 8
Selen	10	µg/l	
Svinec	10	µg/l	Opombi 2 in 9
Tetrakloroeten in Trikloroeten	10	µg/l	Vsota koncentracij izbranih parametrov
Trihalometani - vsota	100	µg/l	Vsota koncentracij izbranih spojin, navedenih v Opombi 10
Vinil klorid	0,50	ug/l	Opomba 1
Živo srebro	1,0	µg/l	

Opomba 1: Mejna vrednost parametra se nanaša na koncentracijo preostalega monomera v pitni vodi, izračunano v skladu s specifikacijami glede na najvišje sprostitev iz ustreznega polimera v stiku z vodo.

Opomba 2: Mejna vrednost velja za vzorec pitne vode, ki je bil odvzet po ustrezni metodi vzorčenja iz pipe tako, da predstavlja tedensko povprečno koncentracijo, ki jo zaužijejo uporabniki.

Opomba 3: Upravljevec mora zagotavljati čim nižjo vrednost, pod pogojem, da to ne vpliva na uspešnost dezinfekcije. Za vodo iz 1., 2. in 4. točke 8. člena tega pravilnika mora vrednost za bromat izpolniti zahteve najpozneje do 1. novembra 2008. Do takrat je mejna vrednost za bromat 25 µg/l.

Opomba 4: Pogoj za mejno vrednost je, da je $[\text{nitrat}]/50 + [\text{nitrit}]/3 \leq 1$, pri čemer je vrednost za nitrat (NO₃) in nitrit (NO₂), v oglatih oklepajih, izražena v mg/l. Za nitrite mora biti dosežena vrednost 0,10 mg/l v vodi pri izstopu iz naprave za pripravo vode.

Opomba 5: 'Pesticidi' pomeni:

- organski insekticidi,
- organski herbicidi,
- organski fungicidi,
- organski nematocidi,
- organski akaricidi,
- organski algicidi,
- organski rodenticidi,
- organski pripravki, ki preprečujejo nastajanje sluzi (slimacidi),
- sorodni proizvodi (med drugim regulatorji rasti)

in njihovi relevantni metabolni, razgradni in reakcijski produkti. Spremljajo se samo tisti pesticidi, ki so lahko prisotni v posameznem sistemu za oskrbo s pitno vodo.

Opomba 6: Mejna vrednost parametra velja za vsak posamezni pesticid. Za aldrin, dieldrin, heptaklor in heptaklor epoksid je mejna vrednost parametra 0,030 µg/l.

Opomba 7: 'Pesticidi - vsota' pomeni vsoto vseh posameznih najdenih in količinsko določenih pesticidov.

Opomba 8: Izbrane spojine so: benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(ghi)perilen, indeno(1,2,3-cd)piren.

Opomba 9: Za vodo iz 1., 2. in 4. točke 8. člena tega pravilnika mora vrednost za svinec izpolniti zahteve najpozneje do 1. novembra 2013. Do takrat je mejna vrednost za svinec 25 µg/l. Do roka iz prejšnjega odstavka mora upravljevec sprejeti vse potrebne ukrepe za čim večje znižanje koncentracije svinca v pitni vodi. Pri izvajanju ukrepov za doseganje mejne vrednosti je treba prednostno poskrbeti za območja, kjer so koncentracije svinca v pitni vodi najvišje.

Opomba 10: Upravljevec mora zagotavljati čim nižjo vrednost, pod pogojem, da to ne vpliva na uspešnost dezinfekcije. Izbrane spojine so: kloroform, bromoform, dibromoklorometan, bromodiklorometan.

DEL C
Indikatorski parametri

Parameter	Mejna vrednost parametra/specifikacija	Enota	Opombe
Aluminij	200	µg/l	
Amonij	0,50	mg/l	
Barva	Sprejemljiva za potrošnike in brez neobičajnih sprememb		
Celotni organski ogljik (TOC)	Brez neobičajnih sprememb		Opomba 1
<i>Clostridium perfringens</i> (vključno s sporami)	0	število/100 ml	Opomba 2
Električna prevodnost	2500	µS cm ⁻¹ pri 20 °C	Opomba 3
Klorid	250	mg/l	Opomba 3
Koliformne bakterije	0	število/100 ml	Opomba 4
Koncentracija vodikovih ionov (pH vrednost)	≥ 6,5 in ≤ 9,5	enote pH	Opombi 3 in 5
Mangan	50	µg/l	
Motnost	Sprejemljiva za uporabnike in brez neobičajnih sprememb		Opomba 6
Natrij	200	mg/l	
Oksidativnost	5,0	mg O ₂ /l	Opomba 7
Okus	Sprejemljiv za potrošnike in brez neobičajnih sprememb		
Sulfat	250	mg/l	Opomba 3
Število kolonij pri 22 °C	Brez neobičajnih sprememb		
Število kolonij pri 37 °C	Manj kot 100	število/ml	
Vonj	Sprejemljiv za potrošnike in brez neobičajnih sprememb		
Železo	200	µg/l	

RADIOAKTIVNOST

Parameter	Mejna vrednost parametra	Enota	Opombe
Tritij	100	Bq/l	Opombi 8 in 10
Skupna prejeta doza	0,10	mSv/leto	Opombi 8, 9 in 10

Opomba 1: Ni potrebno meriti pri sistemih za oskrbo s pitno vodo, ki zagotavljajo manj kot 10.000 m³ na dan.

Opomba 2: Določa se le, če je pitna voda po poreklu površinska voda ali pa ta nanjo vpliva. V primeru neskladnosti mora upravljavec opraviti dodatna preskušanja in zagotoviti, da pitna voda ne predstavlja potencialne nevarnosti za zdravje ljudi zaradi prisotnosti patogenih mikroorganizmov, npr. kriptosporidija.

Opomba 3: Voda ne sme biti agresivna.

Opomba 4: Za vodo, namenjeno pakiranju, je enota število/250 ml.

Opomba 5: Za vodo, namenjeno pakiranju je lahko najnižja vrednost 4,5. Za vodo, namenjeno pakiranju, ki je naravno bogata ali umetno obogatena z ogljikovim dioksidom, je spodnja vrednost lahko še nižja.

Opomba 6: V primeru priprave pitne vode iz površinske vode, motnost ne sme presegati 1,0 NTU (nefelometrijske turbidimetrijske enote) v vodi pri izstopu iz naprave za pripravo pitne vode.

Opomba 7: Parametra ni potrebno meriti, če se preskuša Celotni organski ogljik (TOC).

Opomba 8: Monitoring radioaktivnosti pitne vode se izvaja v skladu s predpisi, ki urejajo spremljanje stanja radioaktivnosti okolja in so izdani na podlagi Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list RS, št. 50/03 - prečiščeno besedilo).

Opomba 9: Mejna vrednost parametra ne upošteva prispevkov tritija ^3H , kalija ^{40}K , radona ^{222}Rn in njegovih razpadnih produktov.

Opomba 10: Monitoring pitne vode glede vsebnosti tritija ali radioaktivnosti zaradi preverjanja skupne prejete doze ni potreben tam, kjer so na podlagi izvajanja drugega monitoringa ravni tritija ali izračunane doze znatno pod mejnimi vrednostmi parametrov.

PRILOGA B: OPISI IZBRANIH POVRŠINSKIH VIROV

Šoštanjско jezero



Slika B1.1: Šoštanjско jezero

Šoštanjско jezero (Slika B1.1) je znano tudi kot Družmirsko jezero, kajti pojavilo se je sredi istoimenskega polja in najkasneje med jezери v Šaleški dolini. Nastajati je pričelo leta 1975, leta 2005 pa je obsegalo več kot 63 ha in vsebovalo skoraj 15,3 milijonov m³ vode. Ima največje pojezerje (čez 30 km²). Velunja, ki je poleg padavin njegov edini vir vode, je dovolj vodnata, da se voda v njem teoretično menja dva- do šestkrat letno. Vprašljiva pa je njena kakovost. Nad jezerom je večje strnjeno naselje (Gaberke) z intenzivnim kmetijstvom, zato obstaja nevarnost, da se stanje jezera poslabša. Padavine in Velunja prispevajo v jezero povprečno 24,5 milijonov m³ vode letno. Če odštejemo izhlapevanje, bi moralo iz Velunje v Pako steči povprečno 24 milijonov m³ vode, vendar je priteče dosti manj. Vzrok za bistveno spremenjeno naravno bilanco dotokov je, poleg večanja prostornine jezera in posledično večjega izhlapevanja, predvsem dejstvo, da je Družmirsko jezero (zlasti ob nizkih pretokih Pake) glavni vir tehnološke vode šoštanjске elektrarne. Družmirsko jezero ima dve kotanji. Zahodna je manjša in predvsem plitvejša (globina manj kot 5 m) od večje osrednje kotanje z dvema poglobitvama. Glavna jezerska kotanja leži v smeri vzhod–zahod in je podobno podolgovata kot kotanja Škalskega jezera. Razmerje med največjo dolžino in širino je 2,2 : 1. Bregovi so nekoliko bolj razčlenjeni kot pri Velenjskem jezeru, obseg je 3,4 km, jezero pa se bo zaradi nadaljnega izkopavanja lignita še bistveno povečalo. Spreminjalo se bo na vseh straneh, razen na jugozahodni, kjer meji na Šoštanj in Pako. Po načrtih Premogovnika Velenje naj bi leta 2020 obsegalo blizu 170 hektarov in tako postalo po površini in količini vode največje jezero v Šaleški dolini (MOV, 2013).

Glede na oceno Agencije Republike Slovenije (2013) za stanje jezer v Sloveniji v letu 2012 ni bilo zaznanih preseženih koncentracij onesnaževal (okoljskih standardov kakovosti), katere določajo kemijsko stanje in so določene v Uredbi o stanju površinskih voda (Ur.l. RS, št. 14/2009). To pomeni dobro kemijsko stanje za vsa kontrolirana jezera, vključno s Šoštanjskim, kjer so se izvajale njihove meritve. Kemijsko stanje jezer in zadrževalnikov je bilo ocenjeno na osnovi podatkov uradne evidence Agencije RS za okolje o emisijah snovi in toplote v vodno okolje. Šoštanjско jezero je imelo srednjo stopnjo zaupanja ocene kemijskega stanja, zaradi manj pogostih meritev spremljanja parametra (samo 4-krat letno, namesto 12-krat).

Glede na pridobljene rezultate analiz v letu 2012 za biološke elemente, splošne fizikalno-kemijske parametre in posebna onesnaževala, Šoštanjsko jezero ni dosegalo dobrega ekološkega stanja jezera. Problematična je bila preobremenjenost s posebnimi onesnaževalom (molibdenom).

Škalsko jezero

Škalsko jezero (Slika B1.2), ki se je začelo oblikovati že pred drugo svetovno vojno, a je bilo še takoj po njej približno polovico manjše kot danes. Njegova oblika je dokončna, saj je izkopavanje lignita v tem predelu doline že zaključeno. Ker je posledica začetnega, manj intenzivnega obdobja premogovništva v Šaleški dolini, je najmanjše med tremi jezери (meri 16 hektarov, vsebuje pa manj kot milijon kubičnih metrov vode). Škalsko jezero leži v porečju Lepene. Glavna os jezera poteka v smeri vzhod-zahod, razmerje med dolžino in širino je približno 2,3 : 1. Pojezerje Škalskega jezera meri dobrih 10 km² in je povečini gozdnato, več kot tretjina tal (37 %) je kmetijskih, poseljuje pa ga okoli tisoč prebivalcev. Razmerje med pojezerjem in jezerom ni ugodno, saj je jezero glede na površino pojezerja premajhno (MOV, 2013)



Slika B1.2: Škalsko jezero

Splošni podatki (leta 2009) Škalskega jezera:

- površina 16,7 ha,
- prostornina 1,0 milijonov m³,
- največja globina 19,2 m,
- povprečna globina 5,5 m,
- letni dotok 5,2 milijonov m³,
- čas menjave vode: 70 dni.

Mestna občina Velenje (2013) podaja naslednje podatke o Škalskem jezeru, povzete od Ramšaka in ostalih soavtorjev (2004). Na kakovost in količino vode v jezeru vpliva dotok Lepene (3.721.248 m³/leto), načrpana jamska voda (800.000 m³), padavine (več kot 200.000 m³/leto) in drugi manjši pritoki (okrog 700.000 m³/leto). Skupno dotoki znašajo letno okrog 5,4 milijona l voda, okrog 944 l/m² (158.000 m³) pa jo z jezerske gladine izhlapi. Tako se jezerska voda teoretično zamenja več kot petkrat letno, kar je za jezero po eni strani ugodno, po drugi strani pa neugodno, ker z vodo vanj pride tudi veliko organskih in mineralnih snovi iz relativno velikega pojezerja.

Škalsko jezero ne spada med površinske vode, za katere se izvaja monitoring za določanje kemijskega in ekološkega stanja voda, zato zanj ARSO ni podal ocene kemijskega in ekološkega stanja jezer za pretekla leta.

Reka Paka

Rečna mreža je v Šaleški dolini gosta, največ voda pa se odmika v reko Pako. Med njenimi pretoki je izrazita nesorazmernost, saj je zaradi bolj vodnatih desnih pretokov reka Paka potisnjena na južni rob doline, levi pretoki so manjši, krajši in manj vodnati. Desne pretoke predstavljajo potoki Ljubela, Velunja, ki je tudi njen največji pritok Bečovnica, Toplica in Šentflorjanščica. Na levi strani porečja se v Pako izlivajo potoki Jablanski greben, Loka, Trebušnica, Lokoviški potok, Hudi potok in Pozničev greben (Počkaj, 1999).

Reka Paka je hudourniška reka s snežno-dežnim režimom. Najnižji pretok ima avgusta, najvišjega spomladi, srednji letni pretok v Šoštanju znaša 2,5 m³/s. Je levi pritok Savinje, v katero se izliva pri kraju Rečica ob Paki (Počkaj, 1999).

Kakovost vode se dolvodno spreminja (bolj obremenjena) zaradi izlivanja industrijskih in komunalnih voda iz Velenja in Šoštanja. V Šoštanju se voda iz reke Pake črpa za potrebe tehnološke vode termoelektrarne Šoštanj, zato je spremenjen rečni režim in posledično tudi vpliva na kakovost vode. Velik in pomemben razbremenilnik oz. obremenilnik reke je tudi centralna čistilna naprava Šaleške doline, ki mora zagotavljati ustrezen učinek čiščenja visoko obremenjenih odpadnih voda in kljub temu minimalno obremenjevat Pako z prečiščeno vodo (z manj organskimi snovmi, hranili in drugimi snovmi).

Na spodnji sliki (B1.3) je struga reke Pake izven mesta, kjer smo za eksperiment črpali vodo.



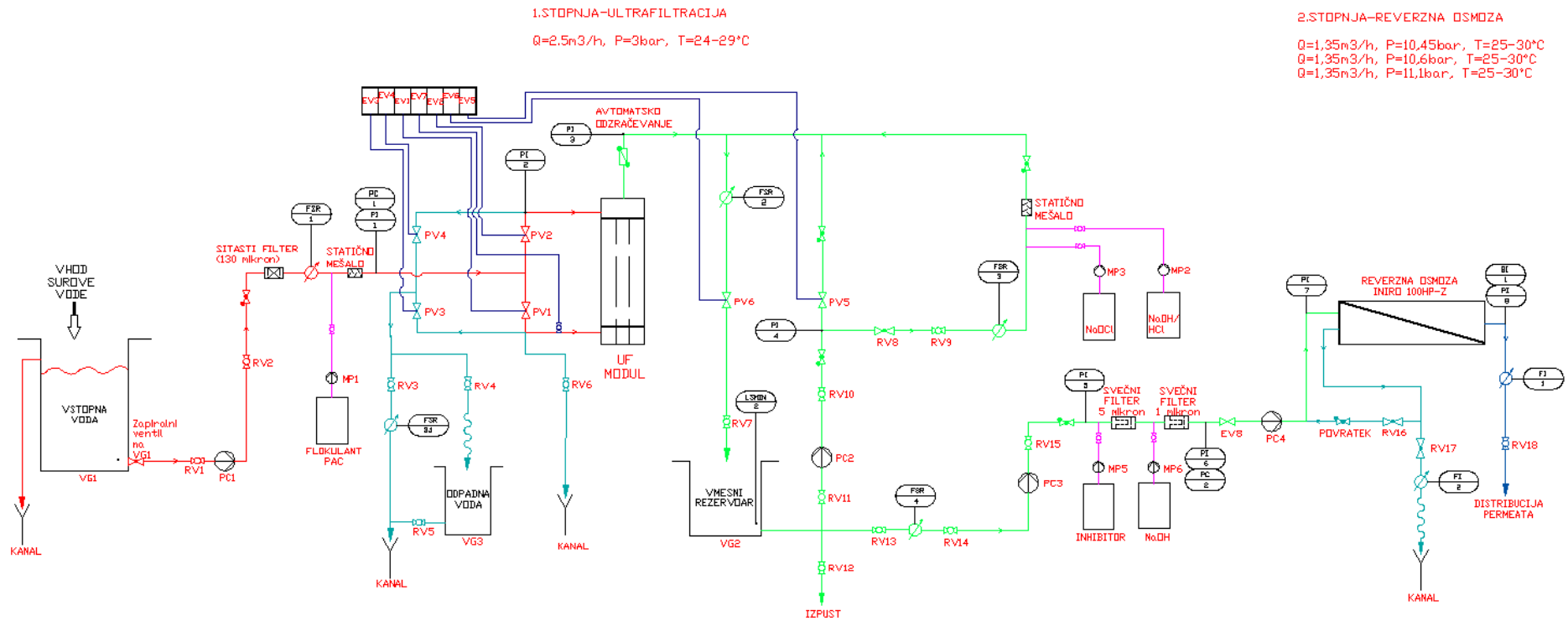
Slika B1.3: Struga reke Pake izven mesta

Agencija Republike Slovenije za okolje (2011) podaja za leti 2009 in 2010 v operativnem monitoringu vodnih teles rek (letno) oceno kemijskega in ekološkega stanja reke Pake (dolvodno) na treh lokacijah (Šoštanj, Skorno, Slatina). V letu 2009 je bilo ocenjeno dobro kemijsko stanje reke Pake na vseh treh lokacijah. Raven zaupanja je bila v Šoštanju in Slatini visoka, v Skornem pa srednja zaradi manj pogostih meritev kovin (namesto 12/leto samo 4/leto). V letu 2010 je bilo ocenjeno dobro kemijsko

stanje za reko Pake v Šoštanju in Slatini, za Skorno pa ne podajajo ocene. Raven zaupanja za oceno kemijskega stanja v Šoštanju je bila nizka, zaradi manj meritev kovin in pentaklorofenola (4/leto). Prav tako je bila nizka raven zaupanja za Slatino, zaradi manj meritev kovin in pesticidov (4/leto).

Ocena ekološkega stanja reke Pake v Skornem in Slatini je bila v letu 2009 dobra, z visoko ravniyo zaupanja. V Šoštanju pa zmerna, zaradi višjih obremenitev molibdena (30,8 mg/l). Raven zaupanja za ocene ekološkega stanja so bile visoke, zaradi pogostih meritev (12/leto). V letu 2010 je bila ugotovljena dobra ocena ekološkega stanja za vse tri lokacije, z visoko ravniyo zaupanja pri Skornem in Slatini ter srednjo pri Šoštanju.

PRILOGA C: SHEMA MEMBRANSKE PILOTNE NAPRAVE



Legenda sheme membranske pilotne naprave:

GLAVNA PROCESNA OPREMA :

	ULTRAFILTRACIJSKI MODUL (SPIRALND)		ZAPIRALNI VENTIL ZA REGULACIJO PRETOKA KEMIKALIJ	VG	REZERVUAR, POSODA		VODA VSTOPNA
	MODUL ZA REVERZNO OSMOZO		PNEVMATSKI VENTIL	PC	CENTRIFUGALNA ČRPALKA		VODA FILTRIRANA
	CENTRIFUGALNA ČRPALKA		VENTIL KROGELNI	MP	ČRPALKA-DOZIRNA		KONCENTRAT
	ČRPALKA-DOZIRNA		VENTIL KROGELNI-DOZIRNI PRI KEMIKALIJAH	PV	VENTIL-PNEVMATSKI		KEMIKALIJE
	REZERVUAR, DOZIRNA POSODA		VENTIL PROTIPOVRTNI	RV	VENTIL-ROČNI		PERMEAT RO
	SITASTI FILTER		VENTIL ODRZRAČEVALNI	EV	VENTIL-ELEKTROMAGNETNI		POVEZAVA ELEKTROVENTILOV Z MEMBRANSKIMI VENTILI
	SVEČNI FILTER		MERILNIK PRETOKA				
	STATIČNO MEŠALO		MERILNO-KRMILNA REGULACIJSKA OPREMA				

REZERVUARJI :

VG1	REZERVUAR SUROVE VODE, V=10m ³
VG2	VNESNI REZERVUAR FILTRIRANE VODE, V=1m ³
VG3	REZERVUAR ODPAadne VODE OB PRANJU UF MODULA, V=0,3m ³ -nevr-talilzočlja vode pred iztokom
VG4	REZERVUAR VODE IZ RO, V=0,1m ³ -odvzen vzorca

ČRPALKE :

PC1	VSTOP NA UF-GRUNDFOS CHI4-40, Q=4,5m ³ /h, p=3,4bar, P=1,1kW
PC2	PRANJE UF MODULA-GRUNDFOS CR10-3, Q=10m ³ /h, p=2,3bar, P=1,1kW
PC3	VNESNI REZERVUAR >RO-GRUNDFOS CH12-30, Q=2,5m ³ /h, p=2,6bar, P=0,85kW
PC4	VSTOP NA RO-GRUNDFOS CRNS-29, Q=3m ³ /h, p=18bar, P=2,2kW

DOZIRNE ČRPALKE :

MP1	DOZIRANJE FLOKULATA (po potrebi) - PROMMET CNPA 160L, Q=1,1L/h, P=16bar
MP2	DOZIRANJE HCl (kemijsko pranje UF modula) - PROMMET CNPA 160L, Q=1,1L/h, P=16bar
MP3	DOZIRANJE NaOCl (dezinfekcija UF modula) - PROMMET CNPA0704, Q=4L/h, P=7bar
MP4	DOZIRANJE NaOH (kemijsko pranje UF modula) - PROMMET CNPA 160L, Q=1,1L/h, P=16bar
MP5	DOZIRANJE INHIBITORJA (inhibitor oblog na RO membranah) - PROMMET CNPA 160L, Q=1,1L/h, P=16bar
MP6	DOZIRANJE NaOH (korekcija pH-RO) - PROMMET CNPA 160L, Q=1,1L/h, P=16bar

MANOMETRI :

PI1	TLAK SUROVE VODE
PI2	TLAK UF MODUL VSTOP - filtracija, TLAK UF MODUL IZSTOP - povratno izpiranje
PI3	TLAK UF MODUL IZSTOP - filtracija, TLAK UF MODUL VSTOP - povratno izpiranje
PI4	TLAK VODE ZA PRANJE UF MODULA
PI5	TLAK VODE PRED RO - pred nehanskim filtrom
PI6	TLAK VODE PRED RO - za nehanski filter
PI7	TLAK - VSTOP NA RO
PI8	TLAK - PERMEAT RO
PI9	TLAK - KONCENTRAT RO

OSTALA MERILNA OPREMA :

PC1	PRESSTAT - PRED UF
PC2	PRESSTAT - PRED RO
LSMIN	NIVDINO STIKALO - NA VG2
QI1	MERITLNIK ELEKTRIČNE PREVODNOSTI
TA	TERMOSTAT

MERILNIKI IN INDIKATORJI PRETOKA-VODOMERI IN ROTAMETRI

FR1	VSTOPNA VODA NA UF
FR2	FILTRAT UF
FR3	POVRATNO IZPIRANJE UF MODULA - DOZIRANJE KEMIKALIJ
FR3.1	ODPADNA VODA OD POVRATNEGA IZPIRANJA UF
FR4	VSTOP NA RO
FI1	TRENTUTNI PRETOK PERMEATA RO
FI2	TRENTUTNI PRETOK KONCENTRATA RO

PRILOGA D: OPIS MERILNIH METOD FIZIKALNO-KEMIJSKIH PARAMETROV

Temperatura

Postopek določevanja temperature, hkrati pa pH vrednosti, sta opisana pri postopku določevanja vrednosti pH v vodi.

Princip meritve:

Temperaturo vzorca vode smo merili elektrometrično istočasno z vsemi merilnimi sondami, ki imajo vgrajen termistorij multimetra HQd. Multimeter deluje kot elektronski termometer, ki izkorišča spreminjanje električnega upora s temperaturo. Podana vrednost temperature vode je bila prva izmerjena vrednost.

Vrednost pH

Postopek določevanja vrednosti pH:

Na multimeter priklopimo pH sondo, jo speremo z demineralizirano vodo ter jo obrišemo. Namočimo jo v vzorec vode in na multimetru pritisnemo tipko READ. Počakamo, da se meritev na ekranu multimetra ustali in odčitamo vrednost pH [-] pri trenutni temperaturi vode v stopinjah celzija [°C].

Princip meritve:

Meritev vrednosti pH v vodi je elektrometrična in deluje na principu merjenja razlike električnih potencialov med dvema elektrodama z kombinirano stekleno elektrodo priklopljeno na pH meter oz t.i. multimeter HQd. V kombinirani stekleni sondi je Ag/AgCl žička potopljena v 0,1 M HCl v tanki stekleni membrani. Srebrova elektroda je referenčna elektroda, ki je v stiku s stekleno elektrodo (Simonič, 2004).

Ko stekleno elektrodo potopimo v kisel vzorec, potujejo protoni v vzorcu k elektrodi, medtem ko protoni v referenčni raztopini znotraj steklene membrane potujejo proti notranjosti membrane, stran od stene, posledica je sprememba električnega potenciala znotraj elektrode, kar odčitamo kot pH vrednost raztopine (Simonič, 2004).

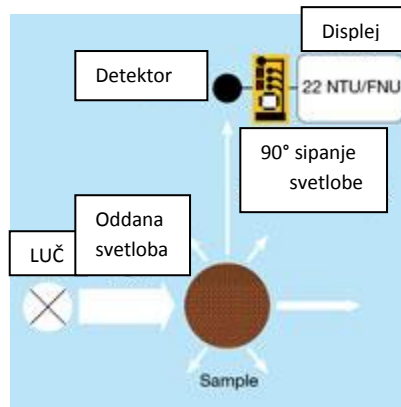
Motnost

Postopek določevanja motnosti:

Vklopimo turbidimeter (on). Nato 10 ml kiveto najprej speremo z vzorcem vode in jo hkrati še napolnimo. Iz kivete obrišemo prstne odtise in kapljice vode ter jo vstavimo v turbidimeter. Za izmero motnosti vzorca vode v kivetu, pritisnemo tipko s puščico. Meritev je podana na ekranu v merskih enotah NTU.

Princip meritve (Slika D1.1):

Meritev motnosti je turbidimetrična in jo merimo s turbidimetrom TurbiCheck WL z določitvijo absorbirane svetlobe v motni/nemotni vodi pri svetlobnem viru določene jakosti. Metoda merjenja motnosti temelji na primerjavi sipanja svetlobe pri prehodu skozi vzorec vode in skozi standardno suspenzijo z znano motnostjo (Drev, 2009). Posebna žarnica z znano intenziteto oddaja svetlobo skozi vzorec v kivetu. Koloidni (in drugi) delci razpršijo in absorbirajo svetlobo. Razpršeno svetlobo na drugi strani kivete pod kotom 90 stopinj zajame fotodioda, ki s pomočjo pretvornika poda motnost v nefelometričnih turbidimetričnih enotah [NTU].



Slika D1.1: Določanje motnosti (Lovibond, 2009: str 8)

Električna prevodnost

Postopek določevanja prevodnosti v vodi:

Na multimeter priklopimo sondo za merjenje električne prevodnosti, jo speremo z demineralizirano vodo ter jo obrišemo. Namočimo jo v vzorec vode in na multimetru pritisnemo tipko READ. Počakamo, da se meritev na ekranu multimetra ustali in odčitamo vrednost električne prevodnosti v mikro Siemensih na centimeter (mS/cm) pri trenutni temperaturi vode v stopinjah celzija [°C].

Princip meritve:

Meritev prevodnosti je elektrometrična s konduktometrom oz. t. i. multimetrom HQd s prevodnostno sondo (Slika D1.2), ki ima vgrajen temperaturni senzor (4) v standardni konduktometrični celici. Na sliki D1.2 so označeni njeni sestavni deli: par napetostnih sond (2) in par tokovnih sond (3-obroč). Napetostni elektrodi sta priključeni na vir izmenične napetosti, tokovni elektrodi pa sta merilni elektrodi (Gros, 2013).



Slika D1.2: Prevodnostna sonda (Gros, 2013)

Konduktometer meri upornost preiskovane raztopine. Prevodnost je recipročna vrednost upornosti. Enota za merjenje prevodnosti je Siemens (S), ki je $1/\Omega$. Rezultate meritev izražamo v S/cm. Z določitvijo prevodnosti vode dobimo prvo oceno o celotni koncentraciji raztopljenih elektrolitov oz. celotni koncentraciji raztopljenih trdnih snovi (TDS) (Gros, 2013). Višja prevodnost pomeni višjo koncentracijo ionov v raztopini ter več raztopljenih trdnih snovi v vodi.

PRILOGA E: OPIS MERILNIH METOD PARAMETROV PRI ANALITIKI VODE

Določanje barve

Določevanje barve vode s fotometrično metodo:

1. Na spektrofotometru nastavimo program 777 Barva.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml demineralizirane vode (mehurčke zraka odstranimo tako, da zavrtimo kiveto).
3. Dobro premešamo 500 ml vzorca vode.
4. V 2. kiveto prelijemo 10 ml vzorca (mehurčke zraka odstranimo tako, da zavrtimo kiveto).
5. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 436, 525 in 620 nm izmerimo ničelni vzorec s 1. kiveto in barvo vode v 2. kiveti.

Princip meritve:

Barvo vode smo merili spektrofotometrično s spektrofotometrom DR2800. V ničelnem vzorcu in vzorcu vode smo izmerili absorbanco pri treh valovnih dolžinah in sicer pri $\lambda = 436$ nm v rumenem območju, pri $\lambda = 525$ nm v modrem območju in pri $\lambda = 620$ nm v rdečem območju. Na podlagi izmerjene absorbance se določi spektralni absorpcijski koeficient SAK z enačbo (Simonič, 2004):

$$SAK = A/d \quad (e1)$$

kjer je:

A - absorbanca vzorca vode pri določeni valovni dolžini λ ,

d - dolžina poti svetlobe, ki je enaka širini kivete [mm],

SAK - spektralni absorpcijski koeficient pri določeni valovni dolžini [m^{-1}].

Določanje TSS

Določevanje suspendiranih snovi (SS) s fotometrično metodo:

1. Na spektrofotometru nastavimo program 630 Suspendirane snovi.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml demineralizirane vode (mehurčke zraka odstranimo tako, da zavrtimo kiveto).
3. V 2. kiveto prelijemo 10 ml vzorca (mehurčke zraka odstranimo tako, da zavrtimo kiveto).
4. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 810 nm izmerimo ničelni vzorec s 1. kiveto in suspendirane snovi v 2. kiveti.

Princip meritve:

Merjenje suspendiranih snovi v vzorcih vode je spektrofotometrično. Pomembno je, da se s filtracijo (v našem primeru s sedimentacijo) vzorca odstranijo večji delci in da je vzorec homogen brez mehurčkov zraka. Spektrofotometer izmeri koncentracijo TSS pri valovni dolžini 810 nm v ničelnem vzorcu, ki ne vsebuje TSS in nato še v vzorcu vode. Na podlagi primerjave izmerjene svetlobe, ki preide skozi kiveto z vzorcem do detektorja izmeri koncentracijo v miligramih na liter [mg/l].

Standardna metoda določevanja TSS v vodi je gravimetrična.

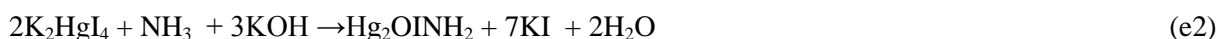
Določanje amonija

Določevanje amonija po Nesslerjevi metodi (merilno območje: 0,02–2,5 mg/l NH₃-N):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 380N Aminiak Ness.
2. 1. mešalni valj napolnimo s 25 ml vzorca vode, 2. mešalni valj pa s 25 ml demineralizirane vode.
3. V oba valja dodamo 3 kapljice mineralnega stabilizerja in nekajkrat pretresemo zaprta valja.
4. V oba valja dodamo 3 kapljice reagenta polivinilnega dispergiranega alkohola in nekajkrat pretresemo zaprta valja.
5. Nato dodamo v oba valja še 1 ml Nesslerjevega reagenta in nekajkrat pretresemo zaprta valja.
6. Odštevalnik nastavimo na 1 min in pustimo valja stati, da reakcija poteče.
7. 1. in 2. kiveto napolnimo z 10 ml posamezne spojine iz mešalnih valjev.
8. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 425 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in amonijeve ione v 1. kiveti.

Nesslerjeva metoda je kolometrična metoda določevanja dušika v obliki amonijevih ionov v vodi. Z dodanim mineralnim stabilizatorjem kompleksiramo trdoto v vzorcu. Z reagentom dispergiranega polivinilnega alkohola pa spodbudimo nastanek barve pri reakciji Nesslerjevega reagenta (mešanica K₂HgI₄ in NaOH ali KOH raztopine) z amonijevimi ioni (Hach, 1997). V postopku Nesslerjev reagent reagira z amoniakom v vzorcu vode pod močno alkalnimi pogoji (enačba e2) in zaradi tega dobimo rumeno obarvanje (Slika E1.1). Intenziteta barve je neposredno odvisna od koncentracije amonijaka (Hach, 1997). Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 425 nm valovne dolžine.

Kemijska reakcija (Hach, 1997):



Slika E1.1: Določanje amonijevih ionov

Določanje nitrata

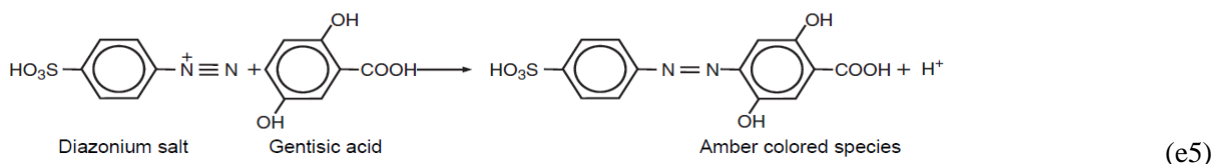
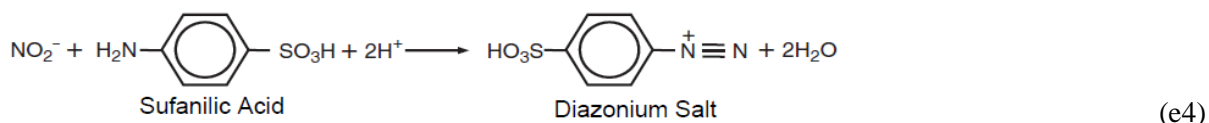
Določevanje nitrata po metodi redukcije kadmija (srednje merilno območje: 0,1 - 10 mg/l NO₃-N):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 353N Nitrat MR.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.

3. Nato dodamo v 1. kiveto prašek NitraVer5 (iz zavojčka) in pokrijemo kiveto.
4. Odštevalnik nastavimo na 1 min in mešamo, da se prašek raztopi.
5. Nastavimo odštevalnik in pustimo stati 5 min, da reakcija poteče.
6. V 2. kiveto napolnimo 10 ml vzorca vode
7. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 515 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in nitrate v 1. kiveti.

Metoda z redukcijo kadmija je kolorimetrična metoda, pri kateri dodamo v vzorec pripravljen reagent NitraVer5 v obliki praška. Kovina kadmija (Cd) reducira v vzorcu vode nitrate v nitrit (enačba e3). Nitritni ioni reagirajo v kislem mediju z dodano sulfanilno kislino (4-aminobenzensulfonska kislina) tako, da nastanejo vmesne diazonijeve soli (enačba e4). Soli se združijo z gentisično kislino, zato nastane oranžno obarvana raztopina (enačba e5, Slika E1.2) (Hach, 1997). Intenzivnost barve spojine je odvisna od koncentracije nitrata v vzorcu vode. Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 400 nanometrih valovne dolžine.

Kemijske reakcije (Hach, 1997):



Slika E1.2: Določanje nitrata

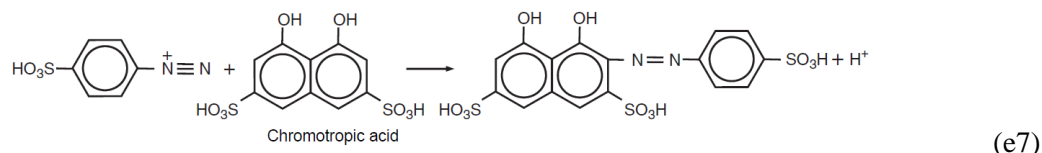
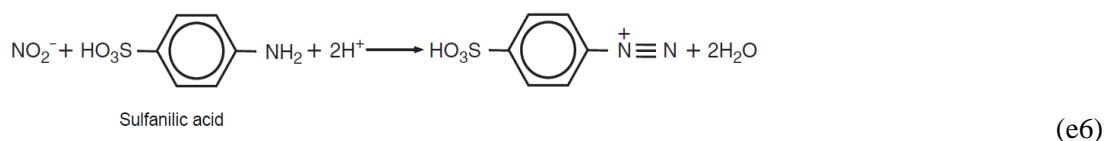
Določanje nitrita

Določevanje nitrita po diazotizacijski metodi (nizko merilno območje: 0,002–0,3 mg/l NO₂-N):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 371N Nitrit LR.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.
3. Nato dodamo v 1. kiveto prašek NitraVer3 (iz zavojčka) in zavrtimo, da se raztopi (roza barva potrди prisotnost nitritov).
4. Odštevalnik nastavimo na 20 min in pustimo stati, da reakcija poteče.
5. V 2. kiveto napolnimo 10 ml vzorca vode.
6. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 400 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in nitrite v 1. kiveti.

Proizvajalec reagentov in merilne opreme Hach Lange (1997) uvršča metodo z redukcijo kadmija v kolorimetrično metodo, kjer nitriti v vzorcu vode reagirajo s primarnimi aromatskimi amini v kisli raztopini in tvorijo diazonijeve soli (enačba e6). Te reagirajo z kromotropsko kislino in posledično nastane rdeče obarvanje (enačba e7, Slika E1.3). Intenzivnost barve spojine je odvisna od koncentracije nitritov v vzorcu vode. Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 515 nm valovne dolžine.

Kemijske reakcije (Hach, 1997):



Slika E1.3: Določanje nitrita

Določanje ortofosfata

Določanje (reaktivnega) ortofosfata po PhosVer 3 (z Askorbinsko kislino) metodi (merilno območje: 0,02–2,5 mg/l PO_4^{3-}):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 490 P react. PV.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.
3. Nato dodamo v 1. kiveto prašek PhosVer 3 (iz zavojčka) in pokrijemo kiveto.
4. Odštevalnik nastavimo na 30 sekund in mešamo (modra barva pomeni prisotnost ortofosfata).
5. Odštevalnik nastavimo na 2 min in pustimo kiveto stati, da reakcija poteče.
6. V 2. kiveto napolnimo 10 ml vzorca vode.
7. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 880 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in ortofosfat v 1. kiveti.

Metoda za določevanje reaktivnega ortofosfata v vodi je kolorimetrična metoda. Ortofosfati reagirajo z molibdenom v kislem okolju in tvorijo mešani fosfat/molibdatni kompleks. Askorbinska kislina reducira kompleks in povzroča modro obarvanje (Slika E1.4) molibdena (Hach, 1997). Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 880 nm valovne dolžine.



Slika E1.4: Določanje ortofosfata

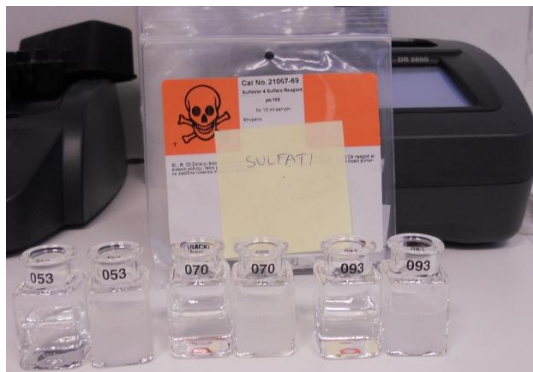
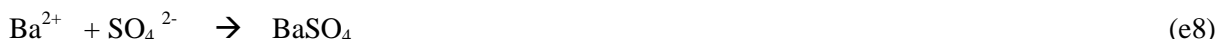
Določanje sulfata

Določanje sulfata po SulfaVer 4 metodi (merilno območje: 2–70 mg/l SO_4^{2-}):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 680 Sulfati.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.
3. Nato dodamo v 1. kiveto prašek SulfaVer4 (iz zavojčka) in zavrtimo, da se ta raztopi (motnost pomeni prisotnost sulfata).
4. Odštevalnik nastavimo na 5 min in pustimo kiveto stati, da reakcija poteče.
5. V 2. kiveto napolnimo 10 ml vzorca vode
6. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 450 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in sulfat v 1. kiveti

Metoda za določevanje sulfatov v vzorcu vode s praškom reagenta Sulfa Ver 4 je metoda, pri kateri Sulfa Ver 4 vsebuje barij. Ta reagira z sulfatnimi ioni v vzorcu vode (enačba e8). Pri tem nastane oborina barijevega sulfata (Hach, 1997). Glede na intenziteto nastale motnosti (Slika E1.5) lahko fotometrično določimo (sorazmerno odvisno) količino sulfata v vzorcu vode. Le to merimo v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Spektrofotometer meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 450 nanometrih valovne dolžine.

Kemijska reakcija (Hach, 1997):



Slika E1.5: Določevanje sulfata

Določanje klorida

Določanje klorida po metodi z železovim triocianatom (merilno območje: 0,1–25,0 mg/l Cl⁻):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 70N Kloridi.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.
3. Nato napolnimo v 2. kiveto 10 ml demineralizirane vode.
4. V obe kiveti pipetiramo po 0,8 ml raztopine živosrebrovega tiocionata ter kiveti zavrtimo, da premešamo (spojino).
5. V obe kiveti pipetiramo še 0,4 ml raztopine z železovimi ioni ter obe zavrtimo, da premešamo (oranžna barva pokazatelj prisotnosti kloridov).
6. Odštevalnik nastavimo na 2 min in pustimo kiveti, da reakcija poteče.
7. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 455 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in klorid v 1. kiveti.

Proizvajalec reagentov in merilne opreme Hach Lange (1997) uvršča metodo za določevanje kloridov z živosrebrovim tiocianatom v kolorimetrično metodo, pri kateri kloridi v vzorcu vode reagirajo z živosrebrovim tiocianatom. Pri kemični reakciji nastanejo živosrebrov klorid in prosti tiocianatni ioni (enačba e9). Tiocianatni ioni reagirajo z železovimi ioni (Fe³⁺) in povzročijo oranžno obarvanje železovega tiocianata (enačba e10, Slika E1.6).

Kemijske reakcije (Hach, 1997):



Intenzivnost barve spojine je neposredno odvisna od koncentracije kloridov v vzorcu vode. Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 455 nm valovne dolžine.



Slika E1.6: Določevanje klorida

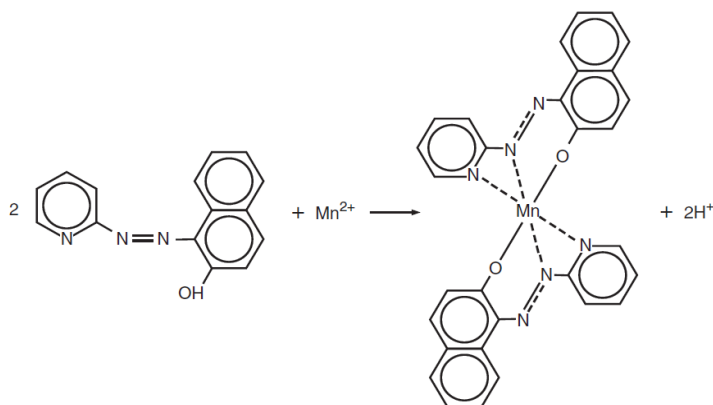
Določanje mangana

Določanje mangana s PAN metodo (nizko merilno območje: 0,006–0,7 mg/l Mn):

1. Na spektrofotometru nastavimo program 290 Mangan, LR PAN.
2. 1. kiveto napolnimo z 10 ml demineralizirane vode.
3. 2. kiveto napolnimo z 10 ml vzorca vode.
4. V obe kiveti dodamo prašek askorbinske kisline. Kiveti zapremo in obrnemo, da se prašek raztopi.
5. V obe kiveti dodamo 12 kapljic reagenta alkalnega cianida ter kiveti zavrtimo, da premešamo.
6. V obe kiveti dodamo še 12 kapljic PAN indikatorja ter kiveti zavrtimo, da premešamo.
7. Odštevalnik nastavimo na 2 min in pustimo kiveti, da poteče reakcija.
8. S spektrofotometrom pri valovni dolžini 560 nm izmerimo ničelni vzorec z 2. kiveto in mangan v 1. kiveti.

Proizvajalec reagentov Hach (1997) opisuje metodo PAN kot zelo občutljiv in hiter postopek za določanje nizke koncentracije mangana. Reagent askorbinske kisline se doda za zmanjšanje oziroma reduciranje vseh oksidiranih oblik mangana v Mn^{2+} . Z dodanim reagentom alkalnega cianida odstranimo morebitne motnje v vzorcu vode. Dodan PAN indikator se poveže z ioni mangana (Mn^{2+}) in tvori oranžno obarvan kompleks (enačba e11, Slika E1.7).

Kemijska reakcija (Hach, 1997):



(e11)

Intenzivnost barve spojine je neposredno odvisna od koncentracije mangana v vzorcu vode. Intenziteto barve merimo v vzorcu vode v primerjavi z ničelnim vzorcem s spektrofotometrom DR2800. Ta meri količino svetlobe, ki jo obsevani vzorec absorbira pri 560 nm dolžine.



Slika E1.7: Določevanje mangana

Določanje TOC

Določanje TOC s hitrim testom LCK 380 (Slika E1.8), po razločevalni metodi (merilno območje: 2-65 TOC mg/l), je povzeto v preglednici E.

Preglednica E: Določanje TOC

Postopek TOC LCK 380	
<u>TC oz. celotni ogljik</u> (merilno območje: 10-73 mgC/l)	<u>TIC oz. celotni anorganski ogljik</u> (merilno območje: 10-37 mgC/l)
<ul style="list-style-type: none"> • A reagent doziram z distenzorjem v TC kiveto. • 2 ml vzorca vode pipetiramo v TC kiveto. • TC kiveto zapremo z originalnim pokrovčkom in jo pretresemo. • Indikator zapremo tesno z membranskim dvojnimi pokrovčkoma tako, da je črna koda na spodnji polovici. • Odpremo TC kiveto in nanjo tesno privijemo pripravljen indikator. Kiveto držimo pokončno in je ne obračamo. 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 ml vzorca vode pipetiramo v TIC kiveto. • TIC kiveto zapremo z originalnim pokrovčkom in jo pretresemo. • Indikator zapremo tesno z membranskim dvojnimi pokrovčkoma tako, da je črna koda na spodnji polovici. • Odpremo TIC kiveto in nanjo tesno privijemo pripravljen indikator. Kiveto držimo pokončno in je ne obračamo.
<ul style="list-style-type: none"> • Kombinirano TC kiveto skupaj z pripravljeno TIC kombinirano kiveto segrevamo 120 min na 100 °C v termoreaktorju. • Po segrevanju pustimo kiveti stati na stojalu, da se ohladita do sobne temperature. • Kombinirani TC in TIC kiveti obrnemo in obrišemo zunanji strani indikatorja, ter vstavimo vsako posebej v spektrofotometer za izmero koncentracij TC in TIC. Na podlagi meritev izračunamo celotni organski ogljik po enačbi $TOC [mg C/l] = TC - TIC$ (e12) 	

Pri metodi s hitrim testom LCK 380 skupni ogljik (TC) in skupni anorganski ogljik (TIC) pretvorimo v ogljikov dioksid (CO₂), tako da ti najprej oksidirajo in nato zakisajo. CO₂ potuje iz razklopne kivete

skozi membrano v kiveto z indikatorjem. Posledično se spremeni barva indikatorja, katero fotometrično izmerimo.



Slika E1.8: Določanje TOC

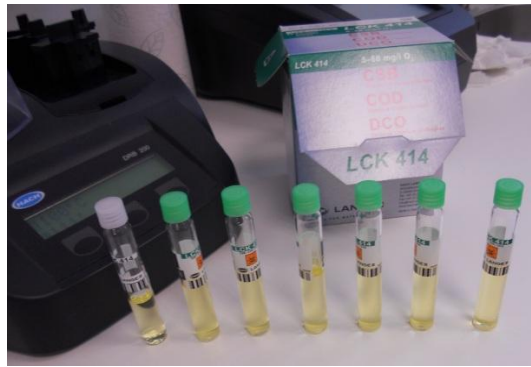
Določanje KPK

Določanje KPK z hitrim testom LCK 414 po razločevalni metodi (merilno območje: 5–60 mgO₂/l):

1. Termoreaktor nastavimo na program KPK, da se segreje na 148 °C.
2. Zaprto kiveto z reagentom nekajkrat pretresemo, da se usedlina spremeni v suspenzijo.
3. V kiveto s suspenzijo pipetiramo 2 ml vzorca vode.
4. Kiveto zapremo in njeno zunanost očistimo.
5. Kiveto ponovno pretresemo.
6. Nato jo damo v termoreaktor za 120 min.
7. Po 2 urah segrevanja na 148 °C odstranimo vročo kiveto in jo 2 krat pretresemo.
8. Kiveto damo v stojalo, da se ohladi do sobne temperature.
9. V spektrofotometer vstavimo ničelni vzorec testa LCK 414.
10. Nato vstavimo v spektrofotometer še ohlajeno in očiščeno kiveto.
11. Odčitamo vrednost KPK izmerjeno v mg/l O₂ pri valovni dolžini 348 nm.

Pri metodi LCK 414 oksidirajoče snovi reagirajo z žvepleno kislino-kalijevega dikromata ob prisotnosti srebrovega sulfata kot katalizatorja (spodbujevalca) v termoreaktorju pri 148°C. Večina organske snovi oksidira v kisli raztopini z žveplovo kislino s kalijevim dikromatom. Kalijev dikromat oksidira poleg organskih snovi tudi nekatere anorganske ione, npr. kloridni ion. Kloride prekrije živo srebrov sulfat. Oksidirane organske snovi pa reducirajo dikromatne ione (Cr₂O₇²⁻) v zelene kromove ione. Glede na količino kromovih ionov in zmanjšanja rumenega obarvanja v kivetnem testu, le-tega primerjamo z obarvanjem standardnega ničelnega vzorca (Slika E1.9) s spektrofotometrom.

KPK reagent v hitrem testu vsebuje srebrove in živo srebrove ione. Srebro deluje kot katalizator, kot smo že omenili, živo srebro pa se uporablja za nadzor klorida, ki je prisoten v vzorcu vode in povzroča motnje.



Slika E1.9: Določevanje KPK

Določanje skupne trdote

Določevanje skupne trdote s tabletno metodo (merilno območje: 0–30 °dH):

1. V merilno čašo vlijemo 100 ml vzorca vode.
2. Postopoma v čašo dodajamo reagent v obliki tabletk MINKIT AF 424 in jo za vsako pretresemo.
3. Pri preskoku barve iz vijolične v modro zapišemo število tabletk.
4. Izračun celokupne trdote za 100 ml vzorca ($(\text{št. tablet} \times 2) - 1$) $\times 0,56$.

Metoda določevanja je v obliki titrimetrične metode, samo da se dodaja reagent za merjenje skupne trdote v obliki tablet do preskoka barve.

Na sliki E1.10 je prikaz spremembe barve z dodajanjem tablet MINKIT AF 424 pri določanju skupne trdote v 100 ml vzorcu vode.



Slika E1.10: Določanje skupne trdote

Določanje prisotnosti skupnih koliformnih bakterij in E. coli

Določevanje bakterij z mikrobiološkim testom P/A skupnih koliformnih bakterij in E. coli:

1. V stekleničko s pripravljenim medijem vlijemo (iz sterilne vrečke/sterilne vzorčne pipice) vzorec vode do oznake (linije) na steklenički.
2. Mikrobiološki test damo za 24–48 ur v inkubator na temperaturo $35^{\circ}\text{C} \pm 3$.
3. Po času inkubacije glede na obarvanost testa določimo prisotnost/odsotnost skupnih koliformnih bakterij in E. coli.
4. Dodatno v temi osvetlimo test z UV lučko določimo prisotnost bakterij E. coli.

Z metodo ne moremo izmeriti število teh bakterij, lahko pa določimo, ali so prisotne.

Mikrobiološki test zagotavlja koliformnim bakterijam in *E. coli* ustrezne pogoje za rast in razvoj. V pripravljenem mediju je potrebna hranila za bakterije. Z inkubacijo na ustrezni temperaturi rast bakterij pospešimo. V primeru, če se bakterije ne razvijejo (ni sprememb v testu) po 24 urah, pustimo test še dodatnih 24 ur v inkubatorju, da potrdimo odsotnost skupne koliformne bakterije in *E. coli*. Dodani reagenti v pripravljenem mediju vplivajo na spremembo barve iz vijolične v rumeno, če so prisotne skupne koliformne bakterije in na obarvanje *E. coli* bakterij fluorescentno.

Pogoj za prisotnost skupnih koliformnih bakterij je rumeno obarvanje mikrobiološkega testa. Za prisotnost *E. coli* mora biti test rumene barve in v temi pod UV lučko fluorescentno obarvan. Če mikrobiološki test po 48 urah ostane vijolične barve (Slika E1.11), v vzorčni vodi ni omenjenih bakterij.



Slika E1.11: Določitev prisotnosti skupnih koliformnih bakterij in *E. coli*

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA F: UREJENE MERITVE IN ODČITKI ULTRAFILTRACIJE IN REVERZNE OSMOZE ZA 3 TESTIRANJA (ŠOŠTANJSKO JEZERO, ŠKALSKO JEZERO IN REKA PAKA)

PRILOGA F.1: Urejene meritve in odčitki UF - Šoštanjsko jezero, ponedeljek 22.7.2013

št.	t _{obr.} [min]	Q _{dotoka} [l/h]	Q _{permeata} [l/h]	F [l/m ² .h]	TMP [bar]	T [°C]	Prevodnost [μS/cm]	pH [-]	Motnost [NTU]
1	10	2560	2534	63,4	0,00	24,6	373	8,2	0,08
2	20	2541	2516	62,9	0,00	24,6	378	8,06	0,08
3	30	2536	2520	63,0	0,02	24,6	378	8,06	0,08
4	40	2511	2502	62,6	0,02	24,5	379	8,06	0,04
5	50	2509	2496	62,4	0,05	24,7	379	8,06	0,03
6	60	2532	2506	62,7	0,08	25,2	379	7,84	0,03
7	70	2516	2487	62,2	0,12	25,3	378	8,03	0,03
8	80	2503	2506	62,6	0,05	25,6	379	7,91	0,03
9	90	2531	2487	62,2	0,02	26,3	379	8,05	0,01
10	100	2517	2467	61,7	0,00	26,6	379	8,06	0,03
11	110	2517	2507	62,7	0,10	27,4	377	7,9	0,02
12	120	2529	2503	62,6	0,10	27,9	376	8,08	0,01
13	130	2517	2487	62,2	0,10	28,1	376	8,12	0,01
14	140	2494	2476	61,9	0,10	28,1	377	8,15	0,02
15	150	2489	2467	61,7	0,10	28,2	376	8,12	0,02
16	160	2518	2501	62,5	0,10	28,4	376	8,03	0,02
17	170	2509	2500	62,5	0,05	28,8	375	8,07	0,01
18	180	2505	2497	62,4	0,10	28,5	376	7,89	0,01
19	190	2498	2481	62,0	0,07	28,8	376	8,2	0,02
20	200	2475	2451	61,3	0,07	28,8	375	8,02	0,01
Povprečne vrednosti:		2515	2495	62,4	0,06	26,8	377	8,05	0,03

PRILOGA F.2: Urejene meritve in odčitki UF - Škalsko jezero, sreda 24.7.2013

št.	$t_{obr.}$ [min]	Q_{dotoka} [l/h]	$Q_{permeata}$ [l/h]	F [l/m ² .h]	TMP [bar]	T [°C]	Prevodnost [μS/cm]	pH [-]	Motnost [NTU]
1	10	2541	2525	63,1	0,00	25,5	452	8,28	0,09
2	20	2538	2526	63,1	0,00	25,7	452	8,12	0,01
3	30	2530	2498	62,4	0,05	25,8	451	8,03	0,01
4	40	2498	2476	61,9	0,05	25,8	451	8,04	0,01
5	50	2510	2471	61,8	0,07	26,0	451	8,06	0,01
6	60	2525	2479	62,0	0,02	26,0	452	8,02	0,01
7	70	2506	2481	62,0	0,05	26,2	451	7,8	0,01
8	80	2489	2449	61,2	0,03	26,2	451	7,96	0,01
9	90	2489	2451	61,3	0,08	26,5	451	8,06	0,01
10	100	2472	2452	61,3	0,08	26,6	451	8,1	0,01
11	110	2513	2479	62,0	0,03	27,4	452	8,06	0,03
12	120	2506	2471	61,8	0,00	27,5	449	8,13	0,03
13	130	2487	2440	61,0	0,00	27,1	452	8,12	0,02
14	140	2480	2433	60,8	0,01	27,1	452	8,14	0,01
15	150	2475	2418	60,5	0,01	27,4	451	8,14	0,01
16	160	2490	2427	60,7	0,09	27,2	449	8,09	0,01
17	170	2460	2432	60,8	0,05	27,1	451	7,98	0,01
18	180	2447	2419	60,5	0,07	27,0	451	8,15	0,01
19	190	2424	2397	59,9	0,13	27,0	451	8,19	0,01
20	200	2420	2389	59,7	0,16	27,0	451	8,14	0,01
Povprečne vrednosti:		2490	2456	61,4	0,05	26,6	451	8,08	0,02

PRILOGA F.3: Urejene meritve in odčitki UF - Reka Paka, petek 26.7.2013

št.	t _{obr.} [min]	Q _{dotoka} [l/h]	Q _{permeata} [l/h]	F [l/m ² .h]	TMP [bar]	T [°C]	Prevodnost [μS/cm]	pH [-]	Motnost [NTU]
1	10	2559	2547	63,7	0,00	25,3	609	8,46	0,02
2	20	2520	2512	62,8	0,00	25,3	638	8,42	0,01
3	30	2503	2496	62,4	0,00	25,6	636	8,45	0,01
4	40	2495	2480	62,0	0,02	25,6	635	8,46	0,01
5	50	2471	2446	61,1	0,07	25,6	633	8,46	0,01
6	60	2516	2479	62,0	0,00	25,9	634	8,45	0,01
7	70	2482	2481	62,0	0,00	26,1	644	8,47	0,01
8	80	2467	2449	61,2	0,00	26,2	648	8,5	0,01
9	90	2469	2451	61,3	0,05	26,4	652	8,5	0,01
10	100	2451	2452	61,3	0,08	26,4	645	8,5	0,01
11	110	2494	2481	62,0	0,05	26,0	643	8,5	0,01
12	120	2480	2442	61,1	0,10	26,0	645	8,5	0,01
13	130	2461	2426	60,6	0,15	26,0	649	8,56	0,01
14	140	2441	2407	60,2	0,15	25,9	646	8,51	0,01
15	150	2429	2398	59,9	0,17	26,0	648	8,47	0,01
16	160	2438	2419	60,5	0,10	26,0	649	8,47	0,01
17	170	2430	2398	59,9	0,10	26,0	649	8,46	0,01
18	180	2418	2388	59,7	0,15	25,9	652	8,49	0,01
19	190	2413	2384	59,6	0,20	25,8	651	8,48	0,01
20	200	2386	2349	58,7	0,20	25,7	649	8,47	0,01
Povprečne vrednosti:		2466	2444	61,1	0,08	25,9	643	8,48	0,01

Priloga F.4: Odčitki in meritve RO - Šoštanjsko jezero, ponedeljek 22.7.2013

Št. odčitka	Čas obratovanja	Pretok permeata	Pretok konc.	Tlak konc.	Tlak na vstopu RO	Tlak permeat	FQ _f	Pretok na RO	Temperatura	Prevodnost	pH	Motnost
Oznaka	tobr.	Q _p	Q _r	PI9	PI7	PI8		Q _f	T	x		
E nota	min	lh	lh	bar	bar	bar	l	lh	°C	μS/cm	/	NTU
1	10	1100	250	6,5	10,45	0,25	/	1350	25,3	48,4	7,92	0,06
2	20	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,4	48,9	7,9	0,04
3	30	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,4	48,8	8,03	0,02
4	40	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,4	48,3	8,02	0,02
5	50	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,4	48,1	8,07	0,01
6	60	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,6	47,6	7,41	0,02
7	70	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	25,6	47,4	7,44	0,03
8	80	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	26	47,4	7,21	0,03
9	90	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	26	47,7	8,13	0,02
10	100	1100	250	6,48	10,45	0,25	/	1350	26,1	47,6	7,86	0,02
11	110	1100	250	6,48	10,45	0,25	389540	1350	26,2	47,3	7,87	0,02
12	120	1100	240	6,48	10,45	0,25	/	1340	26,6	47,2	7,84	0,01
13	130	1100	240	6,48	10,45	0,25	/	1340	26,8	47,4	7,95	0,01
14	140	1100	240	6,48	10,45	0,25	/	1340	26,8	47	7,48	0,02
15	150	1100	240	6,48	10,45	0,25	/	1340	26,9	46,7	7,35	0,01
16	160	1100	240	6,48	10,25	0,25	/	1340	27	46,3	7,23	0,02
17	170	1140	235	6,48	10,25	0,25	/	1375	28,2	48	7,8	0,06
18	180	1150	230	6,48	10,25	0,25	/	1380	28,3	48,1	7,58	0,04
19	190	1150	230	6,48	10,25	0,25	/	1380	28,7	48,3	7,31	0,04
20	200	1160	230	6,48	10,25	0,25	/	1390	28,7	48,2	7,66	0,03
21	210	1160	230	6,48	10,25	0,25	/	1390	28,9	48,2	7,51	0,02
22	220	1170	230	6,48	10,25	0,25	392253	1400	28,7	48,2	7,65	0,02
23	230	1170	230	6,48	10,25	0,25	/	1400	28,7	47,9	7,19	0,01
24	240	1170	230	6,48	10,25	0,25	/	1400	28,7	47,5	7,18	0,02
25	250	1170	230	6,48	10,25	0,25	/	1400	28,9	47,3	7,05	0,01
26	260	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,1	50,2	6,9	0,02
27	270	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,2	49,7	7,38	0,02
28	280	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,3	49,2	7,38	0,02
29	290	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,3	48,7	7,5	0,01
30	300	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,5	48,4	7,51	0,02
31	310	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,5	48,4	7,94	0,01
32	320	1170	230	6,3	10,25	0,25	/	1400	29,5	47,6	7,22	0,01
33	330	1170	230	6,3	10,25	0,25	394964	1400	29,5	47,5	7,12	0,01
Povprečje meritev RO:		1133	238	6,4	10,34	0,25	/	1372	27,6	48,0	7,56	0,02

Priloga F.5: Odčitki in meritve RO - Škalsko jezero, sreda 24.7.2013

Št. odčitka	Cas obratovanja	Pretokpermeata	Pretok konc.	Tlakkonc.	Tlak navstopu RO	Tlakpermeat	FQI	Pretokna RO	Temperatura	Prevodnost	pH	Motnost
Oznaka	t obr.	Qp	Qr	PI9	PI7	PI8		Qf	T	x		
Enota	min	lh	lh	bar	bar	bar	l	lh	°C	µS/cm	/	NTU
1	10	1100	250	6,65	10,6	0,25	/	1350	26,2	62,9	7,8	0,04
2	20	1100	250	6,6	10,5	0,25	/	1350	26,3	61,5	7,55	0,01
3	30	1100	250	6,6	10,5	0,25	/	1350	26,4	60,3	7,41	0,01
4	40	1100	250	6,6	10,5	0,25	/	1350	26,4	59,9	7,42	0,01
5	50	1100	250	6,55	10,5	0,25	/	1350	26,5	59,3	7,21	0,01
6	60	1100	250	6,55	10,5	0,25	/	1350	26,7	58,5	7,16	0,02
7	70	1100	250	6,55	10,5	0,25	/	1350	26,7	58,2	7,08	0,01
8	80	1090	250	6,55	10,5	0,25	/	1340	26,8	57,9	6,85	0,01
9	90	1090	250	6,55	10,5	0,25	/	1340	26,7	58,1	7,12	0,01
10	100	1090	250	6,55	10,5	0,25	/	1340	26,9	57,7	7,44	0,01
11	110	1090	250	6,55	10,5	0,25	397610	1340	26,9	57,5	7,24	0,01
12	120	1090	255	6,55	10,55	0,25	/	1345	27	57	7,08	0,03
13	130	1090	255	6,55	10,55	0,25	/	1345	27,4	56,9	7,18	0,02
14	140	1090	255	6,55	10,55	0,25	/	1345	27,5	56,5	7,09	0,02
15	150	1090	257	6,55	10,55	0,25	/	1347	27,5	56,5	6,95	0,02
16	160	1090	257	6,55	10,55	0,25	/	1347	27,5	56,2	6,84	0,02
17	170	1090	257	6,55	10,55	0,25	/	1347	27,8	56,6	6,91	0,02
18	180	1090	253	6,55	10,55	0,25	/	1343	28,1	56,8	7,18	0,02
19	190	1095	253	6,55	10,55	0,25	/	1348	28	57	7,15	0,03
20	200	1095	255	6,55	10,55	0,25	/	1350	28	57,1	7,2	0,03
21	210	1095	255	6,55	10,55	0,25	/	1350	28,2	56,8	7,24	0,02
22	220	1095	255	6,55	10,55	0,25	400208	1350	28,2	56,6	7,41	0,01
23	230	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,5	56,4	7,03	0,02
24	240	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,5	56	6,91	0,02
25	250	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,6	55,4	6,9	0,02
26	260	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,7	55,9	6,84	0,01
27	270	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,4	56,1	7,05	0,01
28	280	1095	255	6,55	10,6	0,2	/	1350	28,1	56	7,02	0,01
29	290	1095	255	6,6	10,6	0,2	/	1350	28,1	55,6	7,2	0,01
30	300	1095	258	6,6	10,6	0,2	/	1353	27,9	55,4	7,24	0,01
31	310	1095	260	6,6	10,6	0,2	/	1355	27,9	55,3	7,27	0,01
32	320	1095	260	6,7	10,7	0,2	/	1355	27,7	55,1	7,19	0,01
33	330	1080	260	6,7	10,7	0,2	402792	1340	27,8	54,9	7,07	0,01
Povprečje meritev RO :		1094	254	6,6	10,56	0,23	/	1348	27,5	55,4	7,16	0,02

Priloga F.6: Odčitki in meritve RO - reka Paka, petek 26.7.2013

Št. odčrta	Čas obratovanja	Pretokdobitka	Pretok konc.	Tlak konc.	Tlak na vstopu RO	Tlakdobitek	FQd	Pretok na RO	Temperatura	Prevodnost	pH	Motnost
Oznaka	tobr.	Qp	Qk	PI9	PI7	PI8		Qd	T	x		
Enota	min	lh	lh	bar	bar	bar	l	lh	°C	µS/cm	/	NTU
1	10	1100	250	7,4	11,1	0,2	/	1350	26,4	91,8	7,84	0,01
2	20	1100	250	8	11,5	0,2	/	1350	26,3	95,7	7,84	0,01
3	30	1100	250	8	11,5	0,2	/	1350	26,3	94,1	7,86	0,01
4	40	1090	255	8	11,5	0,2	/	1345	26,6	92,2	7,84	0,01
5	50	1090	258	8	11,5	0,2	/	1348	26,7	91,2	7,86	0,01
6	60	1080	259	8	11,5	0,2	/	1339	27,3	90,1	7,73	0,01
7	70	1075	260	8	11,5	0,2	/	1335	27,7	87,5	7,56	0,01
8	80	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	27,1	90,8	7,88	0,01
9	90	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	26,6	91,9	7,79	0,01
10	100	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	26,6	92	7,88	0,01
11	110	1080	258	8	11,5	0,2	405393	1338	26,8	91,8	7,94	0,01
12	120	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	26,8	91,6	7,92	0,01
13	130	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	26,8	91,4	7,88	0,01
14	140	1080	258	8	11,5	0,2	/	1338	27,7	88,8	7,68	0,01
15	150	1080	260	8	11,5	0,2	/	1340	26,8	90,3	7,66	0,01
16	160	1080	255	8	11,5	0,2	/	1335	27,2	94,2	7,6	0,01
17	170	1080	252	8	11,5	0,2	/	1332	27,4	94,2	7,63	0,01
18	180	1090	252	8	11,5	0,2	/	1342	27	93,3	7,81	0,01
19	190	1090	255	8	11,6	0,2	/	1345	26,8	93	7,86	0,01
20	200	1090	258	8	11,6	0,2	/	1348	26,7	92,3	7,76	0,01
21	210	1090	258	8	11,6	0,2	/	1348	26,7	91,4	7,81	0,01
22	220	1090	258	8	11,6	0,2	408051	1348	26,7	92	7,71	0,01
23	230	1090	258	8	11,6	0,2	/	1348	26,7	91,3	7,73	0,01
24	240	1090	258	8	11,6	0,2	/	1348	26,8	90,5	7,66	0,01
25	250	1090	258	8	11,6	0,2	/	1348	26,7	90	7,62	0,01
26	260	1080	258	8,1	11,6	0,22	/	1338	26,9	90,5	7,57	0,01
27	270	1080	258	8,1	11,6	0,22	/	1338	26,6	90,5	7,84	0,01
28	280	1080	258	8,1	11,6	0,2	/	1338	26,6	90,1	7,91	0,01
29	290	1080	258	8,1	11,6	0,2	/	1338	26,7	90	7,9	0,01
30	300	1080	258	8,1	11,6	0,2	/	1338	26,7	89,7	7,89	0,01
31	310	1080	258	8,1	11,6	0,2	/	1338	26,4	89,7	7,87	0,01
32	320	1075	258	8,1	11,6	0,2	/	1333	26,6	89,3	7,72	0,01
33	330	1075	258	8,1	11,6	0,2	410564	1333	26,9	88,9	7,62	0,01
Povprečje meritev RO:		1084	257	8,0	11,53	0,20	/	1341	26,8	91,3	7,78	0,01

PRILOGA G: IZRAČUNI UČINKA ČIŠČENJA ULTRAFILTRACIJE (R_1) IN REVERZNE OSMOZE (R_2) TER CELOTNE MEMBRANSKE PILOTNE NAPRAVE (R), GLEDE NA 3 POVRŠINSKE VIRE VSTOPNE VODE

V prilogi G so v Preglednicah podane meritve kakovosti vstopne vode površinskega vira in te primerjane z (1-5) povprečnimi vrednostmi UF filtrata ter RO permeata med obratovanjem. Prav tako smo kakovost vstopne vode primerjali z povprečnimi izmerjenimi vrednostmi parametrov (6-17) pri analitiki vode v vzorcih UF filtrata in RO permeata. Za bakterije (18-19) izmerjene vrednosti niso podane, ker smo določevali samo prisotnost/odsotnost koliformnih bakterij in E. coli. Po enačbi izračuna zadržka membrane smo izračunali glede na vstopno in izstopno vodo naslednje učinke čiščenja za površinski vir Šoštanjsko jezero (Priloga G.1), Škalsko jezero (Priloga G.2) in reko Pako (Priloga G.3).

Priloga G.1: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R₁) in reverzne osmoze (R₂) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz Šoštanjskega jezera

Št.	Parameter	Izražen kot	MDK	Enota	Šoštanjsko jezero	Filtrat UF	R ₁ [%]	Dobitek RO	R ₂ [%]	R [%]
1	Prevodnost		2500	μS/cm	370	377	-1,9	48,0	87,3	87,0
3	pH		6,5-9,5	/	7,98	8,05	-0,9	7,56	6,1	5,3
4	Motnost		1	NTU	3,98	0,03	99,2	0,02	33,3	99,5
5	Temperatura		/	°C	23,7	26,8	/	27,6	/	/
6	Skupna trdota		/	°dH	10,6	10,6	0,0	0,6	94,3	94,3
7	TOC	C	4	mg/l	8,47	6,43	24,1	<2	68,9	76,4
8	Barva		0,5	m ⁻¹	0,585	0,031	94,7	0,02	34,4	96,5
9	Amonij	NH ₄ ⁺	0,5	mg/l	0,13	0,10	23,1	0,01	90,0	92,3
10	Nitrat	NO ₃ ⁻	50	mg/l	1,8	1,8	0,0	1,03	42,6	42,6
11	Nitrit	NO ₂ ⁻	0,5	mg/l	0,023	0,022	2,9	0,01	46,3	47,8
12	Klorid	Cl	250	mg/l	7,2	7,1	1,4	1,5	79,3	79,6
13	Sulfat	SO ₄ ²⁻	250	mg/l	62	64,0	-3,2	2	96,9	96,8
14	TSS		/	mg/l	9	0	100,0	0,0	/	100
15	Mangan	Mn	50	mg/l	0,039	0,036	8,5	0,002	94,4	94,9
16	KPK	O ₂	/	mg/l	12,6	8,9	29,4	<5	43,8	60,3
17	Fosfati	PO ₄ ³⁻	0,3	mg/l	0,13	0,09	33,3	0,047	46,2	64,1
18	Koliformne bakterije		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0
19	E. coli		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0

Priloga G.2: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R_1) in reverzne osmoze (R_2) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz Škalskega jezera

Št.	Parameter	Izražen kot	MDK	Enota	Reka Paka	Filtrat UF	R_1 [%]	Dobitek RO	R_2 [%]	R [%]
1	Prevodnost		2500	$\mu\text{S/cm}$	449	451	-0,4	55,4	87,7	87,7
3	pH		6,5-9,5	/	8,02	8,08	-0,7	7,16	11,4	10,7
4	Motnost		1	NTU	5,02	0,02	99,6	0,02	0,0	99,6
5	Temperatura		/	$^{\circ}\text{C}$	25	26,6	/	27,5	/	/
6	Skupna trdota		/	$^{\circ}\text{dH}$	12,9	12,9	0	0,6	95,3	95,3
7	TOC	C	4	mg/l	10,4	8,54	17,9	<2	76,6	80,8
8	Barva		0,5	m^{-1}	0,718	0,029	96,0	0,008	70,8	98,8
9	Amonij	NH_4^+	0,5	mg/l	0,16	0,10	39,6	0,01	86,2	91,7
10	Nitrat	NO_3^-	50	mg/l	1,8	1,6	9,3	0,9	46,9	51,9
11	Nitrit	NO_2^-	0,5	mg/l	0,041	0,040	2,4	0,019	52,5	53,7
12	Klorid	Cl	250	mg/l	10,8	10,4	3,4	1,9	81,8	82,4
13	Sulfat	SO_4^{2-}	250	mg/l	49	48,7	0,7	1,0	97,9	98,0
14	TSS		/	mg/l	14	0	100	0	/	100
15	Mangan	Mn	50	mg/l	0,054	0,046	14,2	0,030	35,3	44,4
16	KPK	O_2	/	mg/l	11,3	7,5	34,0	<5	33,0	55,8
17	Fosfati	PO_4^{3-}	0,3	mg/l	0,07	0,04	47,6	0,02	54,5	76,2
18	Koliformne bakterije		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0
19	E. coli		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0

Priloga G.3: Izračuni učinka čiščenja ultrafiltracije (R_1) in reverzne osmoze (R_2) ter celotne membranske pilotne naprave (R) za vodo iz reke Pake

Št.	Parameter	Izražen kot	MDK	Enota	Šoštanjsko j.	Filtrat UF	R_1 [%]	Dobitek RO	R_2 [%]	R [%]
1	Prevodnost		2500	$\mu\text{S/cm}$	611	643	-5,2	91,3	85,8	85,1
3	pH		6,5-9,5	/	8,37	8,48	-1,3	7,78	8,3	7,0
4	Motnost		1	NTU	11,9	0,01	99,9	0,01	0,0	99,9
5	Temperatura		/	$^{\circ}\text{C}$	24,9	25,9	/	26,8	/	/
6	Skupna trdota		/	$^{\circ}\text{dH}$	16,24	16,24	0,0	0,6	96,3	96,3
7	TOC	C	4	mg/l	6,78	6,59	2,8	<2	69,7	70,5
8	Barva		0,5	m^{-1}	0,685	0,172	75,0	0,017	89,9	97,5
9	Amonij	NH_4^+	0,5	mg/l	0,43	0,39	8,5	0,16	58,5	62,0
10	Nitrat	NO_3^-	50	mg/l	7,6	8,4	-11,0	3,6	57,3	52,6
11	Nitrit	NO_2^-	0,5	mg/l	0,257	0,263	-2,2	0,075	71,4	70,8
12	Klorid	Cl	250	mg/l	24,6	24,0	2,3	4,1	83,1	83,5
13	Sulfat	SO_4^{2-}	250	mg/l	88	87,3	0,8	4,0	95,4	95,5
14	TSS		/	mg/l	9	0	100	0	/	100
15	Mangan	Mn	50	mg/l	0,045	0,047	-3,7	0,007	84,3	83,7
16	KPK	O_2	/	mg/l	8,98	7,4	17,5	<5	32,5	44,3
17	Fosfati	PO_4^{3-}	0,3	mg/l	0,85	0,84	1,6	0,08	90,0	90,2
18	Koliformne bakterije		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0
19	E. coli		0	št./100ml	prisotne	odsotne	100,0	odsotne	100	0