

# Smanjenje sadržaja nitrata u bunarskoj vodi reverznom osmozom

---

**Nemanić, Robert**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:966420>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Robert Nemanić

*Zagreb, 2020.*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić

Student:

Robert Nemanić

0035210594

*Zagreb, 2020.*

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija te služeći se navedenom literaturom.*

*Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Hrvoju Juretiću i mag. ing. Goranu Smoljaniću na pruženoj pomoći prilikom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom mog cjelokupnog obrazovanja.*

Robert Nemanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Nemanić**

Mat. br.: 0035210594

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Smanjenje sadržaja nitrata u bunarskoj vodi reverznom osmozom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Nitrate reduction in well water by reverse osmosis**

Opis zadatka:

Potrebno je dimenzionirati postrojenje za smanjenje sadržaja nitrata u pitkoj vodi kapaciteta 200 m<sup>3</sup>/h postupkom reverzne osmoze. Na raspolaganju je bunarska voda sljedećeg sastava:

Pokazatelj	Vrijednost	Jedinice
Temperatura	13,6	°C
pH vrijednost	6,75	-
Ukupne suspenzije	0,6	mg/L
Električna provodnost	560	µS/cm
Mutnoća	0,27	NTU
Otopljeni organski ugljik	0,67	mg/L
Kalcij	64,79	mg/L Ca <sup>2+</sup>
Kalij	0,60	mg/L K <sup>+</sup>
Natrij	1,70	mg/L Na <sup>+</sup>
Magnezij	27,05	mg/L Mg <sup>2+</sup>
Hidrogenkarbonat	224,10	mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Klorid	25,75	mg/L Cl <sup>-</sup>
Nitrat	39,92	mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Sulfat	24,18	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Ukupni koliformi	0	br/100 mL
<i>Escherichia coli</i>	0	br/100 mL

Rad treba sadržavati:

1. Osnovni proračun postrojenja;
2. Tehnološku shemu postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad;
3. Prikaz utroška energije i kemikalija;
4. Prikaz smještaja postrojenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.


Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

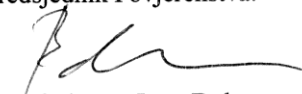
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

  
izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## **SAŽETAK**

U ovom završnom zadatku bilo je potrebno napraviti proračun postrojenja za obradu vode reverznom osmozom, u svrhu smanjenja koncentracije nitrata iz bunarske vode. Kemijski sastav bunarske vode trenutno zadovoljava standarde pitke vode, no zabilježen je stalni porast koncentracije nitrata te se ovim postrojenjem želi osigurati zahtijevana kvaliteta vode i u budućnosti.

U prvom dijelu rada teorijski je razrađena tema, odnosno pojašnjene su potrebne teorijske osnove o vodi, nitratima i membranskim tehnologijama. Time se utvrdio uzrok problema ovog završnog rada te pojasnio proces kojim će se rješavati.

U drugom dijelu rada prikazan je računalni program pomoću kojeg je proveden osnovni proračun postrojenja te su prikazani rezultati dobivenog proračuna. Prikazani rezultati pokazuju učinkovitost postrojenja te utrošak energije i kemikalija potrebnih za rad postrojenja. Također su, u sklopu završnog zadatka, priložene odgovarajuće sheme postrojenja.

## **SUMMARY**

In my thesis it was necessary to make design calculations for reverse osmosis (RO) system plant, in order to decrease nitrate concentration in well water. Chemical composition of well water currently meets drinking water quality standards, but there has been a steady increase in nitrate concentration, and this plant seeks to ensure the required water quality.

In the first part of the paper, a theoretical topic was elaborated, ie the necessary theoretical basics on water, nitrates and membrane technologies were clarified. This identified the cause of the problem in this final paper and clarified the process by which it would be addressed.

The second part of the paper presents a computer program that was used to design the basic plant and present the results of the obtained design. The presented results show the efficiency of the plant and the consumption of energy and chemicals required for the operation of the plant. Appropriate plant schemes are also attached as part of the paper.

# SADRŽAJ

---

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA .....	III
1. UVOD .....	1
2. DUŠIKOVI SPOJEVI .....	6
2.1. Nitrati .....	7
3. MEMBRANSKE TEHNOLOGIJE .....	9
3.1. Membrane .....	10
3.2. Reverzna osmoza .....	13
4. OSNOVNI PRORAČUN POSTROJENJA .....	19
4.1. Rezultati proračuna .....	21
4.2. Prikaz utroška energije i kemikalija .....	25
5. ZAKLJUČAK .....	28
6. LITERATURA.....	29
POPIS PRILOGA.....	30



## POPIS SLIKA

---

Slika 1. Hidrološki ciklus [1] .....	2
Slika 2. Struktura molekule vode .....	3
Slika 3. Kruženje dušika u prirodi [6].....	7
Slika 4. Pregled najzastupljenijih membranskih postupaka obrade voda [2] .....	9
Slika 5. Shematski prikaz tangencijalnog toka (gore) i izravne filtracije (dolje) [2] .....	12
Slika 6. Promjena kvalitete vode duž membrane [2] .....	12
Slika 7. Osmotski tok fluida do stacionarnog stanja [2].....	14
Slika 8. Proces reverzne osmoze [2] .....	15
Slika 9. Shematski prikaz tokova na membrani [2].....	16
Slika 10. Shematski prikaz presjeka tankoslojne sastavljene (kompozitne) membrane [8]	17
Slika 11. Modul reverzne osmoze sa spiralnim namotajem.....	18
Slika 12. Računalni program Wave .....	19
Slika 13. Sastav ulazne bunarske vode u računalnom programu Wave .....	20
Slika 14. Konfiguracija RO postrojenja u računalnom programu Wave.....	21
Slika 15. Pojednostavljeni shematski prikaz stupnjeva RO postrojenja .....	23
Slika 16. Osnovni shematski prikaz cjelokupnog postrojenja .....	24
Slika 17. Dimenzije odabrane pumpe [11].....	26
Slika 18. Radna karakteristika pumpe [11].....	26

---

## POPIS TABLICA

---

Tablica 1. Prikaz tokova po stupnjevima .....	21
Tablica 2. Prikaz kemijskog sastava vode na određenim dijelovima .....	22
Tablica 3. Prikaz utroška energije .....	25
Tablica 4. Ukupni gubici cjevovoda .....	25
Tablica 5. Prikaz utroška kemikalija .....	27

## POPIS OZNAKA

---

Oznaka	Jedinica	Opis
B	m/s	permeabilnost soli
C	mol/m <sup>3</sup>	molarna koncentracija otopine
C <sub>k</sub>	mol/m <sup>3</sup>	koncentracija tvari u koncentratu
C <sub>m</sub>	mol/m <sup>3</sup>	koncentracija tvari na membrani
C <sub>p</sub>	mol/m <sup>3</sup>	koncentracija tvari u permeatu
C <sub>u</sub>	mol/m <sup>3</sup>	koncentracija tvari u ulaznoj vodi
J <sub>v</sub>	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> s)	volumetrijski fluks permeata
J <sub>s</sub>	mol/(m <sup>2</sup> s)	fluks soli
L <sub>p</sub>	m/(Pa s)	permeabilnost permeata
P	bar	pogonski tlak
P <sub>ef</sub>	bar	efektivni tlak
R	%	faktor zadržavanja (separacije)
R <sub>p</sub>	J/(mol K)	opća plinska konstanta
T	K	temperatura
V	m <sup>3</sup>	volumen posude za antiskalant

---

$V_k$	$m^3$	volumen koncentrata
$V_p$	$m^3$	volumen permeata
$V_{pr}$	$m^3$	volumen vode za pranje
$V_u$	$m^3$	volumen ulazne vode
$Q_k$	$m^3/h$	protok koncentrata
$Q_p$	$m^3/h$	protok permeata
$Q_u$	$m^3/h$	protok ulazne zahvaćene vode
$Y_s$	%	faktor konverzije (iskorištenja) sirove vode
$Y_z$	%	faktor konverzije (iskorištenja) zahvaćene vode
$\Delta h$	bar	hidrostatski tlak
$\Delta p$	Pa	pad tlaka na membrani
$\Delta \Pi$	Pa	razlika osmotskog tlaka na membrani
$\Pi$	bar	osmotski tlak

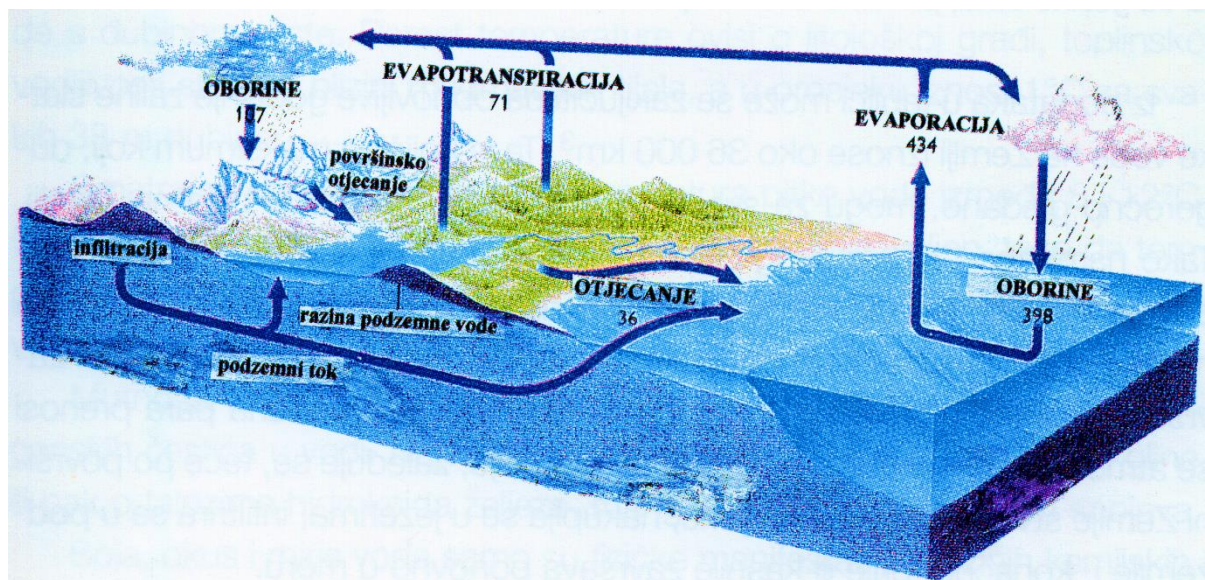
# 1. UVOD

---

Voda je najrasprostranjenija tvar na Zemlji i najzastupljenija tvar u građi živih bića pa se može reći kako bez vode nema života. Ona čini oko 71% Zemljine površine te je procijenjeno da se na Zemlji nalazi ukupno  $1386 \times 10^6 \text{ km}^3$  vode, što je zapravo samo 1/800 volumena Zemlje [1].

Voda je jedini kemijski spoj koji se u prirodi nalazi u sva tri agregatna stanja odnosno u čvrstom, kapljevitom i plinovitom stanju. Od ukupne vode na Zemlji gotovo 97,5% je slano, a samo oko 2,5% je slatka voda. Kada se od ukupne slatke vode oduzme oko 69,9% vode koja se nalazi u obliku leda i snijega, u atmosferi, vezana u organizmima ili čini vlagu u tlu ostaje oko 30,1% tekuće slatke vode. Od tih 30,1% gotovo 99% nalazi se u obliku podzemnih voda, a samo oko 1% nalazi se u rijekama, slatkim jezerima i močvarama [1].

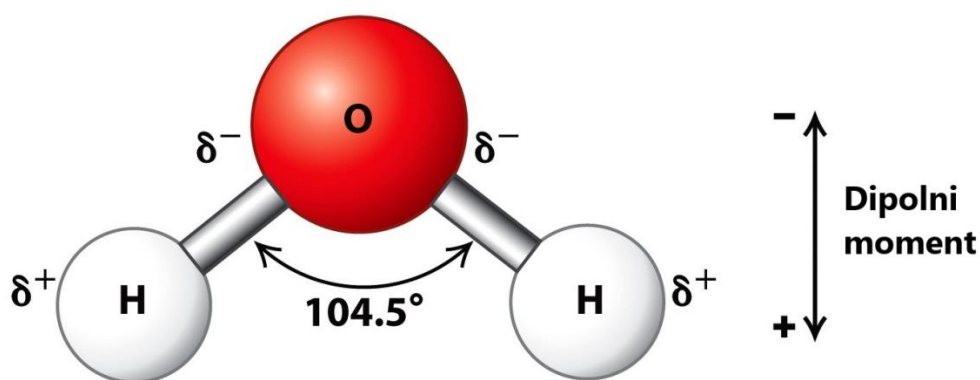
Ukupna količina vode na Zemlji je konstantna, ali se raspodjela te količine s vremenom mijenja. Tako je bilo razdoblja u prošlosti gdje su količine leda i snijega bile znatno veće pa se to doba simbolično naziva ledeno doba. S druge strane danas se često spominje pojam globalnog zatopljenja zbog povećanja udjela stakleničkih plinova u Zemljinoj atmosferi te svjedočimo smanjenju količine ledenjaka te povećanju razine mora. Nadalje, vrlo je bitno da se dio vode neprestano kružno kreće kako bi se zalihe slatke vode stalno obnavljale. Taj proces kruženja vode u prirodi naziva se hidrološki ciklus. Hidrološki ciklus je stalni proces kruženja, obnavljanja i prividnog gubljenja vode na Zemlji te se sastoji od procesa isparavanja iz zemlje, mora ili podzemnih voda, pa zatim kondenzacije i stvaranja oblaka, oborina, akumulacije vode na tlu, vodenim tokovima, jezerima i morima te ponovnog isparavanja.



**Slika 1. Hidrološki ciklus [1]**

Na slici 1. prikazan je hidrološki ciklus s procijenjenim prosječnim godišnjim količinama vode pri pojedinim procesima u ciklusu. Zbog Sunčeve topline 434 000 km<sup>3</sup> ispari s površine oceana i mora te se nakuplja u obliku oblaka. Od toga 398 000 km<sup>3</sup> se kondenzira iznad morske površine dok se ostatak od 36 000 km<sup>3</sup> zračnim strujama prenosi nad kontinente. Također, zbog Sunčeve energije i s površine kontinenata voda isparava u količini od 71 000 km<sup>3</sup>. U obliku različitih oborina na površinu kontinenata padne oko 107 000 km<sup>3</sup> vode, što znači da se godišnje pojavljuje višak od 36 000 km<sup>3</sup> koji predstavlja procijenjenu prosječnu obnovljivu godišnju zalihu slatke vode na Zemlji. Razlog zašto je ta voda obnovljiva zaloha slatke vode je to što se prilikom hidrološkog ciklusa odvija i proces prirodne destilacije. To je dakle najveća vrijednost koju sva živa bića mogu koristiti za svoj opstanak. Ta voda se može pronaći u obliku potoka, rijeka, jezera, podzemnih voda te se zbog utjecaja gravitacije površinski ili podzemno otječe natrag u mora i oceane. Stoga možemo zaključiti kako je hidrološki ciklus rezultat više procesa koji se zbivaju simultano, a rezultira prijenosom dijela vode iz oceana na kontinente. Međutim, važno je naglasiti kako potpuno čiste vode u prirodi gotovo i nema. Već prilikom prolaska kišnih kapi kroz atmosferu u vodi se otapaju plinovi i prikupljaju raznorazne čestice prašine i dima. Nadalje, na površini tla voda teče i prikuplja čestice minerala i stijena te ih djelomično otapa, a različiti mikroorganizmi također mogu ući u tu vodu. Dio vode se onda infiltrira te se tako nastavlja proces otapanja minerala i stijena, a sve to mijenja svojstva vode i utječe na njenu kvalitetu [1]. Osim toga, veliki utjecaj na kvalitetu vode danas imaju i otpadne vode koje su rezultat urbanizacije i industrijalizacije.

Vodu u osnovi poznajemo kao tekućinu bez boje, okusa i mirisa te je većina ljudi smatra običnom tvari. No ipak, jednostavna mala molekula vode ( $H_2O$ ) samo je naizgled trivijalna molekula jer sadrži mnoga neobična svojstva koja proizlaze iz njezine strukture. Struktura vode ovisi o faznom stanju u kojem se nalazi. Molekula vode sastoji se od dva atoma vodika (H) i jednog atoma kisika (O). Radi jednostavnosti, zamišlja se kao da ima četiri približno tetraedarski razmještena elektronska para od kojih su dva pridružena vodikovim atomima, dok su druga dva nesparena te teorijski kut između njih iznosi  $109,5^\circ$  [2]. Vodikovi atomi vezani su kovalentnom vezom. Nevezane elektronske parove elektronegativniji atom kisika privlači snažnije zbog čega kut između vodikovih atoma iznosi  $104,5^\circ$  [3]. Također, zbog toga atom kisika dobiva blagi višak negativnog naboja dok atomi vodika postaju blago pozitivni [2]. Takva nejednolika raspodjela naboja molekulu vode čini polarnom molekulom. Polarnost molekule vode najvažnije je svojstvo vode. Kada se dvije molekule vode nađu u blizini, zbog izrazitog dipolnog karaktera molekule vode, u kapljevitom i čvrstom agregatnom stanju dolazi do međusobnog spajanja molekula vodikovim vezama tako da se vodik veže na atom kisik. Svaka molekula vode vodikovim vezama veže se za četiri ostale molekule vode. Vodikove veze su većim dijelom ionskog karaktera (90%), a manjim dijelom kovalentnog (10%) [2]. Vodikove veze slabije su od kovalentnih veza unutar molekule vode, ali su jače od elektrostatičkih Van der Walsovih kohezijskih sila koje postoje između molekula vode u čvrstom i kapljevitom stanju [3]. U plinovitom stanju molekule vode se slobodno kreću, a sloboda kretanja ovisi o tlaku i temperaturi vode.



Slika 2. Struktura molekule vode

(<https://alevelbiology.co.uk/notes/water-structure-properties/>)

Onečišćenje vode nitratima posljedica je kemijskog svojstva vode da izvrsno otapa mnoge spojeve. Zahvaljujući izraženom dipolnom karakteru, voda je izvrsno otapala za mnoge spojeve, čime je omogućen transport minerala, hranjivih tvari, ali i onečišćenja. Topivost neke tvari u vodi ovisi o polarnim svojstvima te tvari i o mogućnosti stvaranja vodikovih veza između molekula. Tvari koje imaju izražene adhezijske sile sa molekulama vode nazivaju se hidrofilne tvari, dok one koje nemaju izražene adhezijske sile sa vodom nazivamo hidrofobnim tvarima. Otapanje plinova u vodi ovisi o tlaku plina u dodiru s vodom, temperaturi vode, polarnosti molekule plina te količini otopljenih soli u vodi. U vodi se slabo otapaju plinovi s nepolarnim molekulama kao što su dušik, vodik, kisik, metan itd. Sa povišenjem temperature topivost plina u vodi se smanjuje, dok se povećanjem tlaka plina u dodiru s vodom topivost povećava. Za tehnološke potrebe topivost se često izražava koeficijentom apsorpcije plina. Nadalje, topivost plinova u čistoj vodi veća je od topivosti plinova u vodi koja sadrži soli. Kapljevine s nepolarnim molekulama (npr. ulja i masti) također se slabo otapaju u vodi, dok se neke kapljevine djelomično miješaju sa vodom, ali samo iznad određene kritične temperature. Topivost čvrstih tvari ovisi o temperaturi vode i strukturi molekula otapala te se povećava ukoliko je voda sadrži otopljene plinove, soli, kiseline ili lužine [4].

U prirodnim vodama nalaze se raspršene i otopljene tvari. Pojam kakvoće vode govori o upotrebljivosti tih voda za pojedine namjene ovisno o sastavu, svojstvima i koncentraciji pojedinih tvari u vodi. Sva otopljena i raspršena tvar može biti organskog ili anorganskog porijekla. U ovisnosti o dimenzijama, razlikujemo otopljene tvari od koloidnih čestica u vodi. Otopljene tvari nalaze se u vodi u obliku iona ili molekula čije su dimenzije istog ili manje reda veličine od molekula vode odnosno manje od  $10^{-6}$  mm. S druge strane, koloidi su sitne čestice u vodi koje po svojim svojstvima čine prijelaz između otopljenih i raspršenih tvari te su njihove dimenzije u granicama od  $10^{-6}$  do  $10^{-3}$  mm [4].

Kakvoća vode ocjenjuje se prema fizikalnim, kemijskim i biološkim pokazateljima. Fizikalni pokazatelji odnose se na raspršene tvari, mutnoću, boju, okus, miris i temperaturu, no važno je naglasiti kako oni ne određuju u potpunosti kakvoću i mogućnost upotrebe vode. Kemijski pokazatelji uvelike određuju upotrebljivost vode. U njoj se mogu nalaziti otopljene tvari koje bitno utječu na povećanje biološke proizvodnje u ekosustavu, dok druge mogu imati štetna djelovanja. Kemijske primjese u vodi mogu se podijeliti na tvari koje se nalaze u



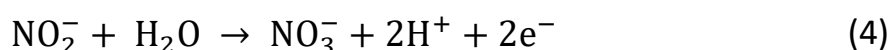
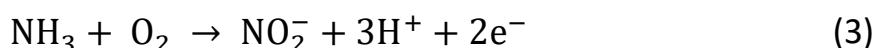
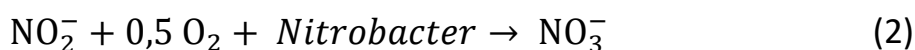
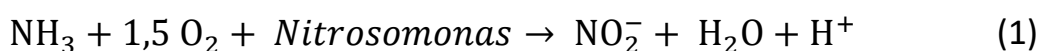
prirodnim vodama, tvari koje bitno ne pogoršavaju mogućnost uporabe vode, ali nisu poželjne u većim koncentracijama i tvari koje po svom sastavu čine vodu neupotrebljivom za određene namjene. Pokazatelji koji se najčešće utvrđuju su:

- ukupno otopljene tvari
- koncentracija vodikovih iona
- alkalitet
- tvrdoća
- otopljeni plinovi
- organske tvari
- hranjive tvari
- kovine.

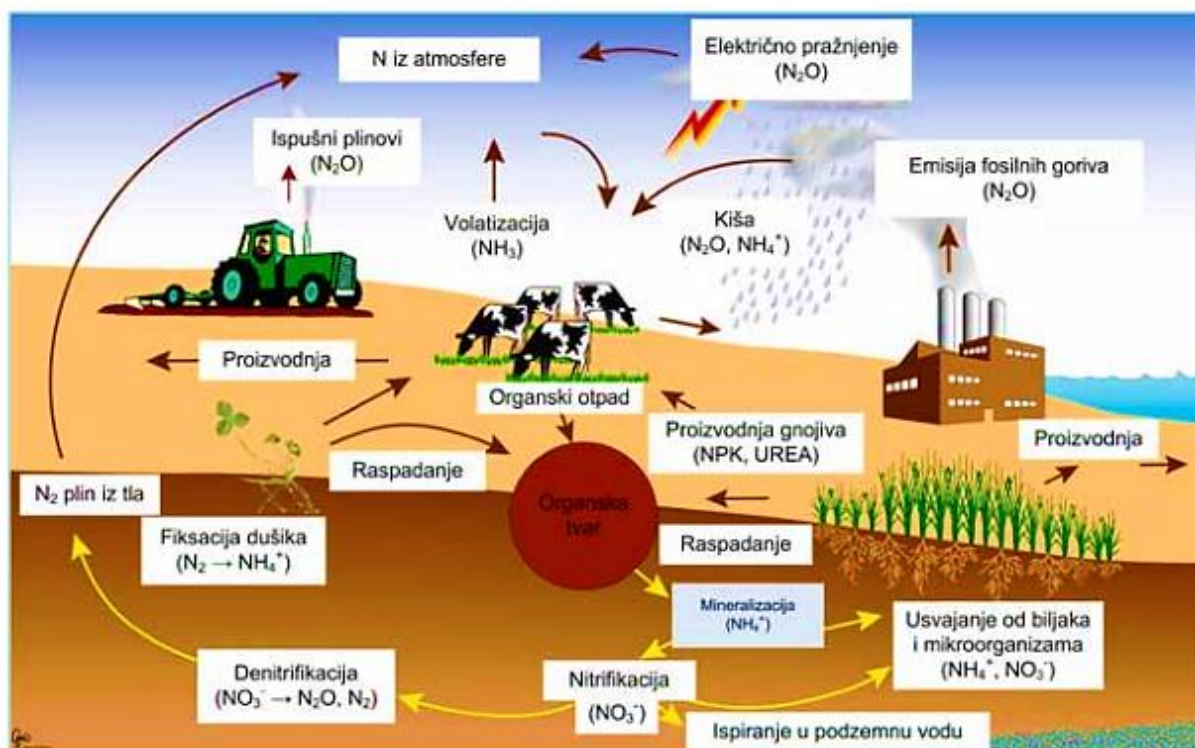
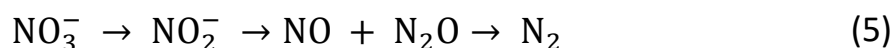
## 2. DUŠIKOVI SPOJEVI

---

Dušik je najzastupljeniji plin u Zemljinj atmosferi te je neophodan za život na Zemlji jer je sastavni dio složenih organskih molekula, poput aminokiselina, nukleinskih kiselina i proteina. U okolišu, dušik pronalazimo u raznim kemijskim oblicima poput organskog dušika, amonijevih iona ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrita ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrata ( $\text{NO}_3^-$ ) te u obliku molekularnog dušika ( $\text{N}_2$ ). Kruženja dušika u prirodi proces je pretvorbe dušika iz jednog kemijskog oblika u drugi procesima fiksiranja, mineralizacije, nitrifikacijom i denitrifikacijom. Fiksiranje je prirodan proces pretvorbe molekularnog dušika ( $\text{N}_2$ ) u amonijak ( $\text{NH}_3$ ) te je važan za život zbog činjenice da dušik sudjeluje u biosintezi osnovnih jedinica života. Također, fiksiranje se može ostvariti i procesima koji nisu biološki poput industrijskih procesa proizvodnje amonijaka te procesima izgaranja. Nadalje, mineralizacija je proces pretvorbe organskog dušika u amonijak biološkom razgradnjom biljnih i životinjskih ostataka [5]. Zatim, posebno važan proces, u kontekstu onečišćenja podzemnih voda, je nitrifikacija. Nitrifikacija je proces biološke oksidacije amonijevih iona koji se u odvija u dva stupnja. U prvom stupnju, uz pomoć djelovanja bakterija *Nitrosomonas*, nastaju nitriti, a zatim u drugom stupnju djelovanjem bakterija *Nitrobacter* nastaju nitrati [5]. Proces nitrifikacije može se opisati sljedećim jednadžbama:



Denitrifikacija je mikrobiološki proces redukcije nitrata i nastajanja molekularnog dušika, pri čemu mogu nastati i plinovi poput NO i  $\text{N}_2\text{O}$ . Proces denitrifikacije uglavnom se odvija u anaerobnim uvjetima, iako se može odvijati i u aerobnim uvjetima te ga pospješuju heterotrofne bakterije [5]. Proces se odvija u nekoliko stupnjeva te ga se može opisati sljedećom jednadžbom:



Slika 3. Kruženje dušika u prirodi [6]

## 2.1. Nitrati

U posljednjih nekoliko godina zabilježen je porast koncentracije nitrata u podzemnim vodama te se sve više pažnje posvećuje tom problemu onečišćenja voda. Najveća zagađenja podzemnih voda prisutna su na poljoprivrednim područjima što je posljedica prekomjerne upotrebe agrokemikalija (anorganska i organska gnojiva i pesticidi) u svrhu održavanja plodnosti tla i zaštite biljaka. Dušik je jedan od esencijalnih i najčešće korišten element za ishranu biljaka, stoga ne čudi činjenica da je upravo na područjima intenzivne poljoprivrede i koncentracija nitrata najveća. Razlog ispiranja nitrata u dublje slojeve tla i podzemne vode je to što nitrati ioni (anioni) nemaju sposobnost vezanja na adsorpcijski kompleks tla, drugim riječima lako su topljivi. Međutim, izravna primjena dušičnih gnojiva na poljoprivrednim površinama nije jedini izvor onečišćenja podzemnih vodama nitratima. Doprinos onečišćenju

nitratima imaju i istjecanja iz septičkih jama, nepravilno izgrađeni kanalizacijski sustavi te atmosferska depozicija [6].

Posljedice povećane koncentracija nitrata u vodi za piće kod djece i odraslih mogu uzrokovati razne bolesti poput methemoglobinemije ili čak raka. Razlog zbog kojeg povećana koncentracija nitrata izaziva methemoglobinemiju je to što se nitrati lako reduciraju u nitrite koji sudjeluju u oksidaciji hemoglobina u methemoglobin. Osim utjecaja na ljudsko zdravlje, povećane koncentracije nitrata imaju negativan utjecaj i na okoliš poput eutrofikacije površinskih voda [6]. Eutrofikacija je povećanje primarne proizvodnje organskih tvari u vodenim ekosustavima zbog stalnoga vanjskog unosa hranjivih soli (posebice nitrata i fosfata). Može biti prirodna ili nastati djelovanjem čovjeka zbog prekomjernog ispuštanja hranjivih tvari u otpadnim vodama te ispiranja poljoprivrednih površina uz masovnu upotrebu umjetnih gnojiva. Dok je prirodna eutrofikacija uglavnom pozitivna za ekosustav (povećava biološke resurse), utjecaj čovjeka može narušiti ekološku ravnotežu, što dovodi do vrlo štetnih posljedica [7]. Europska unija i Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) postavile su graničnu vrijednost koncentracije od 11,3 mg dušika po litri, što je jednako koncentraciji od 50 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$  (Drinking Water Directive 98/83/EC; WHO, 2004.), koja je također jednaka i u Republici Hrvatskoj. Potrebu za integriranom zaštitom i upravljanjem voda prepoznala je i Europska Unija. *Nitratna direktiva* (91/676/EEC) postavlja granicu od 50 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$  za sve prirodne slatkovodne izvore podzemnih voda bez obzira na njihovu upotrebu, iako je poznato da znatno niže koncentracije, u iznosu već od 4,4 do 8,8 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$  mogu uzrokovati početak procesa eutrofikacije površinskih voda [6].

Uklanjanje nitrata iz voda teško se može ostvariti konvencionalnim tehnologijama pročišćavanja voda. Razlog tome je to što su nitrati stabilni i visoko topivi ioni s niskim potencijalom za taloženje i adsorpciju. Stoga se nitrati iz vode uklanjaju sljedećim tehnologijama:

- ionskom izmjenom
- membranskim postupcima
- elektrodijalizom
- fitoremedijacijom
- biološkom denitrifikacijom.

### 3. MEMBRANSKE TEHNOLOGIJE

Membranski postupci najučinkovitiji su separacijski procesi obrade voda. Membranske tehnologije prepoznate su i ugrađene u Europske direktive vezane za zaštitu i upravljanje vodama, s ciljem učinkovite i ekološki održive obrade voda. Organske i anorganske tvari ne mogu se ukloniti standardnim metodama pročišćavanja voda, stoga se radi na uvođenju, razvijanju i primjeni membranskih i drugih modernih postupaka obrade voda koji učinkovito uklanjaju te tvari. Tim se postupcima dobiva pitka voda vrlo visoke kvalitete. Također, uz primjenu membranskih tehnologija, otpadne vode mogu se ponovno vratiti u proces, iskorištavati za neke druge svrhe poput navodnjavanja ili se ispuštati u kanalizaciju bez negativnih posljedica. Membranski procesi i tehnologije udovoljavaju praktički neograničenoj separacijskoj selektivnosti što je esencijalno za ekološki prihvatljivo i održivo upravljanje vodama. Prednosti membranskih postupaka su i to što zahtijevaju malo prostora za ugradnju te su pogodni za automatiziranje i daljinski nadzor. S druge strane, nedostaci ovih tehnologija su to što se na membranama pojavljuju određeni nepovoljni fenomeni i što im je ograničen vijek trajanja, a specifični utrošak energije srednji ili visok [8]. Danas u svijetu postoje različiti membranski postupci poput mikrofiltracije, ultrafiltracije, nanofiltracije, reverzne osmoze, pervaporacije, membranske destilacije, dijalize, elektrodijalize i drugih.

	Mikrofiltracija	Ultrafiltracija	Nanofiltracija	Reverzna osmoza
Veličina pora	> 50 nm	2 nm – 50 nm	< 2 nm	< 1 nm
Primjena	Separacija bakterija, flokuliranih tvari, suspendiranih tvari	Separacija suspendiranih tvari, koloida, proteina, virusa i bakterija, većih organskih molekula	Separacija soli, stupanj separacije R: Monovalentne (NaCl) – 20-80% Polivalentne (CaSO <sub>4</sub> ) – 90-98% Smanjenje sadržaja organskih tvari	Desalinizacija, uklanjanje svih tvari iz vode (osim plinova)
Permeabilnosti, L/(m <sup>2</sup> h bar)	> 500	10-600	1,4-20	0,05-1,4
Transmembranski tlakovi, bar	0,1 – 2	0,2 – 5	3,5 – 20	10 – 100

**Slika 4. Pregled najzastupljenijih membranskih postupaka obrade voda [2]**

### 3.1. Membrane

Membrana je fizička barijera koja uz određenu selektivnost separira odnosno sprječava prolaz česticama i otopljenim tvarima. To se ostvaruje različitim mehanizmima, odnosno prosijevanjem uslijed razlike između dimenzija pora i veličine čestica, separacijom uslijed razlike u afinitetu i difuzivnosti te zadržavanjem uslijed razlike u naboju molekula odnosno čestica [2]. Prema morfologiji membrane se mogu podijeliti na anizotropne i izotropne. Anizotropne membrane imaju različitu poroznost duž poprečnog presjeka, dok izotropne imaju jednaku poroznost duž poprečnog presjeka. Najčešći materijali koji se danas koriste za izradu membrana su polimeri. No, kada nije moguće koristiti polimerne membrane za separaciju organskih otapala jer bi došlo do otapanja membrane, tada se koriste anorganske membrane koje su najčešće keramičke [8].

Načina rada membrane dijeli se na izravnu filtraciju i tangencijalni tok. Izravna filtracija predstavlja primjenu membrana bez formiranja toka koncentrata, dok tangencijalni tok predstavlja primjenu membrana uz formiranje toka koncentrata (retentata), čime se može postići odgoda potrebe za regeneracijom membrane. Najvažniji parametri membranskih procesa su:

- fluks (specifični protok) permeata kroz membranu, izražen u [ $L\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]
- permeabilnost ili specifična produktivnost membrane, izražena u [ $L\ m^{-2}\ s^{-1}\ bar^{-1}$ ]
- transmembranski tlak membrane (TMP) koji predstavlja pad tlaka utrošen za transport filtrata/permeata kroz membranu, izražava se u [bar]. [2]

Faktor konverzije (iskorištenja) sirove vode  $Y_s$ , računa se kao omjer prerađene i zahvaćene vode:

$$Y_s = \frac{Q_P}{Q_U} \quad (6)$$

gdje je

$$\begin{aligned} Q_P & - \text{protok permeata, } m^3/h \\ Q_U & - \text{protok ulazne zahvaćene vode, } m^3/h \end{aligned}$$

Faktor konverzije (iskorištenja) zahvaćene vode  $Y_z$ , računa se kao omjer prerađene i zahvaćene vode, ali uzima u obzir i gubitke od pranja membrane te se računa pomoću volumena nastalih tijekom jednog ciklusa koji obuhvaća sve standardne operacije rada:

$$Y_z = \frac{V_P - (V_k + V_{pr})}{V_U} \quad (7)$$

gdje je

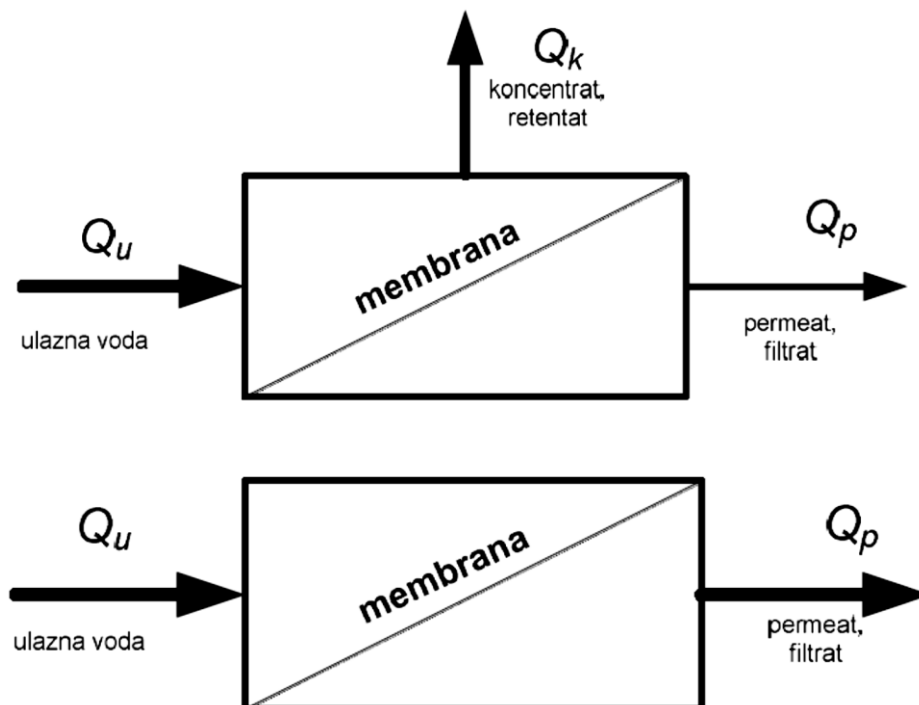
$$\begin{aligned} V_p & - \text{volumen permeata, m}^3 \\ V_U & - \text{volumen ulazne vode, m}^3 \\ V_k & - \text{volumen koncentrata, m}^3 \\ V_{pr} & - \text{volumen vode za pranje, m}^3 \end{aligned}$$

Faktor zadržavanja (separacije)  $R$ , računa se kao omjer zadržanih tvari na membrani i tvari u sirovoj vodi:

$$R [\%] = \frac{c_u - c_p}{c_u} \times 100 \quad (8)$$

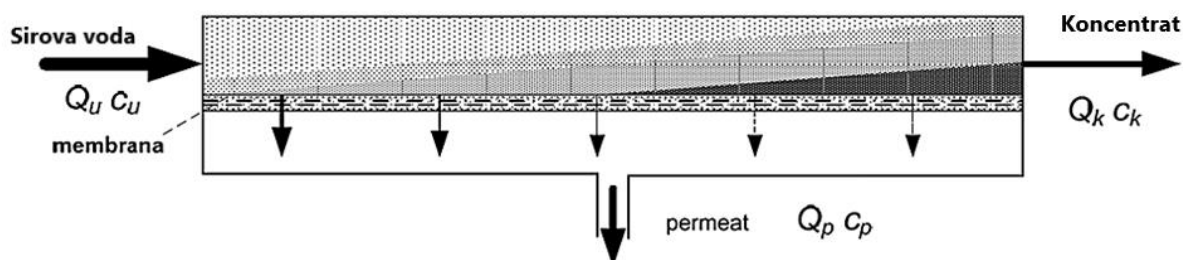
gdje je

$$\begin{aligned} c_u & - \text{koncentracija tvari u ulaznoj vodi, mol m}^{-3} \\ c_p & - \text{koncentracija tvari u permeatu, mol m}^{-3} \end{aligned}$$



**Slika 5. Shematski prikaz tangencijalnog toka (gore) i izravne filtracije (dolje) [2]**

Kod tangencijalnog toka dolazi do pojave promjene kvalitete vode duž membrane. Ta pojava događa se zbog povećanja koncentracije soli u vodi ( $c_k > c_u$ ) jer se dio vode kroz membranu izdvaja u permeat, a sirova voda postupno prelazi u koncentrat. Stoga, završni stupanj separacije postaje sve veći, što znači da je produkcija permeata pri kraju membranskog uređaja sve manja, a proboj soli sve veći [2].



**Slika 6. Promjena kvalitete vode duž membrane [2]**

Najveći nedostatak membranskih postupaka je fenomen blokiranja membrana. Taj fenomen uzrokuje smanjenje količine i pogoršanje kvalitete obrađene vode te rezultira većim troškovima obrade, odnosno dovodi do smanjenja efikasnosti cijelog procesa. Blokiranje membrana može se podijeliti na vanjsko blokiranje površina i blokiranje pora [8].



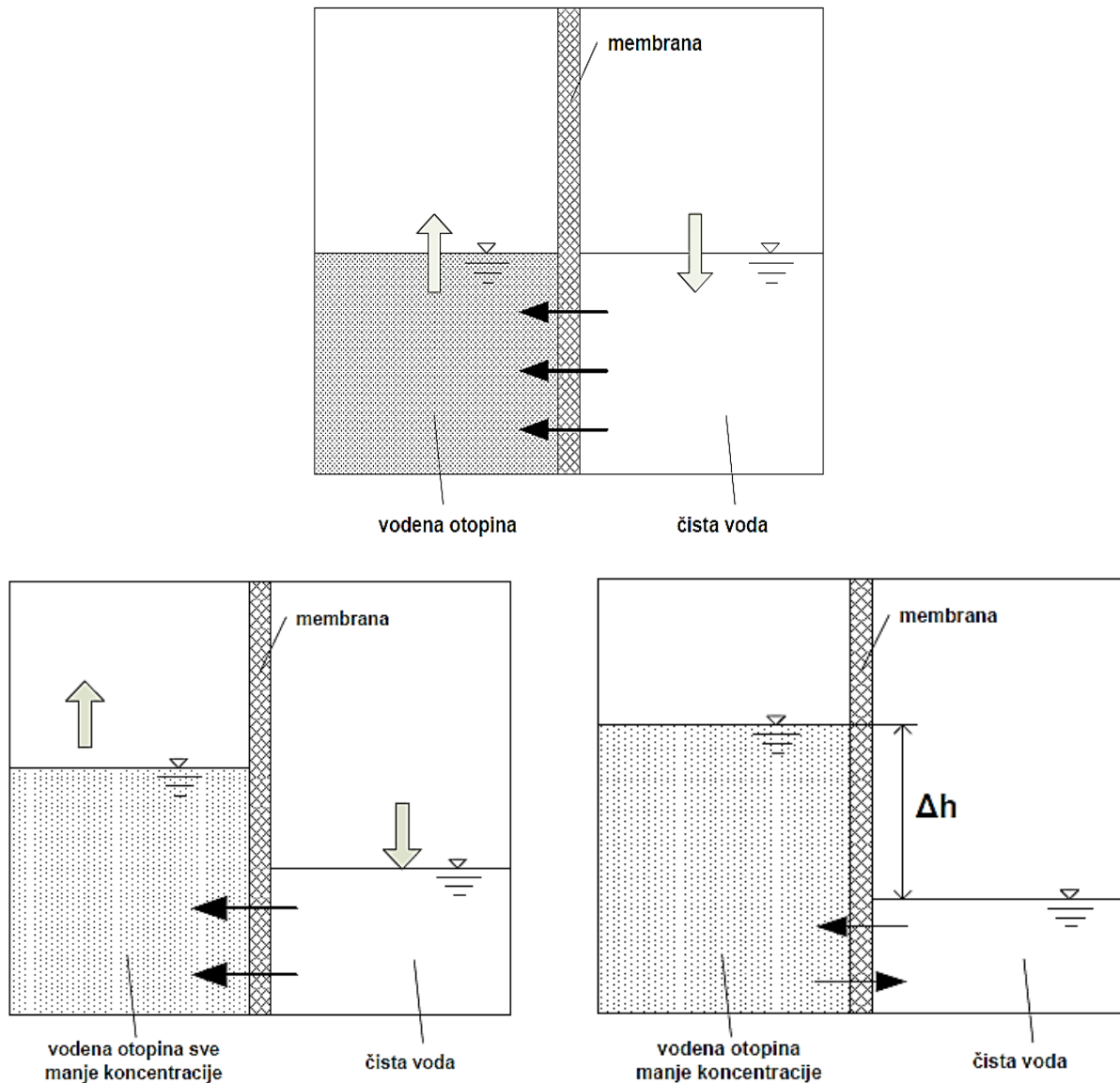
Drugi fenomen koji se javlja kod membranskih procesa je fenomen koncentracijske polarizacije. To je vrlo nepovoljan, ali i neizbježan proces koji se događa naročito kod tlačnih membranskih procesa pri čemu dolazi do nakupljanja otopljenih tvari neposredno uz membranu te samim time dolazi do povećanja osmotskog tlaka. Drugim riječima, koncentracija otopljenih soli u permeatu je manja od koncentracije u sirovoj vodi, što znači da će se stvoriti difuzijski povratni tok natrag u masu otopine, ali će se nakon nekog vremena uspostaviti stacionarni uvjeti. Iz tog razloga dolazi do smanjenja raspoložive pogonske sile, smanjenja fluksa permeata kroz membranu, povećanja fluksa soli kroz membranu te do povećanja mogućnosti stvaranja precipitata na membranskoj površini [8].

Kako bi smanjili utjecaj negativnih fenomena membranskih procesa, membrane je potrebno regenerirati. Regeneracija membrana provodi se na sljedeće načine: ispiranjem tlačne strane ulaznom vodom, protustrujnim pranjem filtratom, kemijski potpomognutim pranjem te intenzivnim kemijskim pranjem. Kemijski potpomognuto čišćenje (engl. *chemically enhanced backwash – CEB*) provodi se nakon mehaničkog pranja filtratom kako bi se postigla željena pH vrijednost na način da se kemijsko sredstvo uvede u membranu pomoću crpke za protupranje. Nakon toga sredstvo je potrebno ostaviti neko vrijeme (10-30 minuta) kako bi se odvale željene reakcije te se nakon toga ponovno obavlja protupranje filtratom i modul je spreman za rad. Kemijska sredstva koja se koriste za pranje mogu biti kiseline, lužine ili hipoklorit. Kiseline služe kako bi se uklonio kamenac i druge mineralne nakupine, lužine za uklanjanje organskih nakupina, a hipoklorit za uklanjanje mikrobioloških onečišćenja. CEB postupak provodi se svakih 10-500 mehaničkih pranja. Intenzivno kemijsko pranje membrana (engl. *cleaning in place – CIP*) u pravilu se koristi samo kod nemarnog upravljanja uređaja ili u slučaju da se propustilo napraviti pravodobni CEB postupak. Također, do potrebe za CIP postupkom regeneracije može dovesti i iznenadna promjena kvalitete ulazne vode [2].

### 3.2. Reverzna osmoza

Reverzna osmoza je tehnološki postupak koji se zasniva na fizikalnoj separaciji otopljenih tvari u vodi pomoću membrane. Naziv reverzna osmoza potječe od procesa osmoze, koji predstavlja prirodnu pojavu protoka vode kroz polupropusnu membranu s

težnjom izjednačavanja koncentracije tvari s obje strane membrane. Proces osmoze odnosno osmotskog toka fluida odvija se sve do trenutka kada hidrostatski tlak ne postane jednak osmotskom tlaku vodene otopine, što znači da se koncentracija otopina izjednačila [2].



**Slika 7. Osmotski tok fluida do stacionarnog stanja [2]**

Kada sustav postigne ravnotežu hidrostatski tlak  $\Delta h$  jednak je osmotskom tlaku  $\Pi$  koji se računa prema van't Hoffovom zakonu:

$$\Pi = c \times R_p \times T \quad (9)$$

gdje je

$c$  – molarna koncentracija otopine, mol/m<sup>3</sup>  
 $R_p$  – opća plinska konstanta, J/(mol K)  
 $T$  – temperatura, K

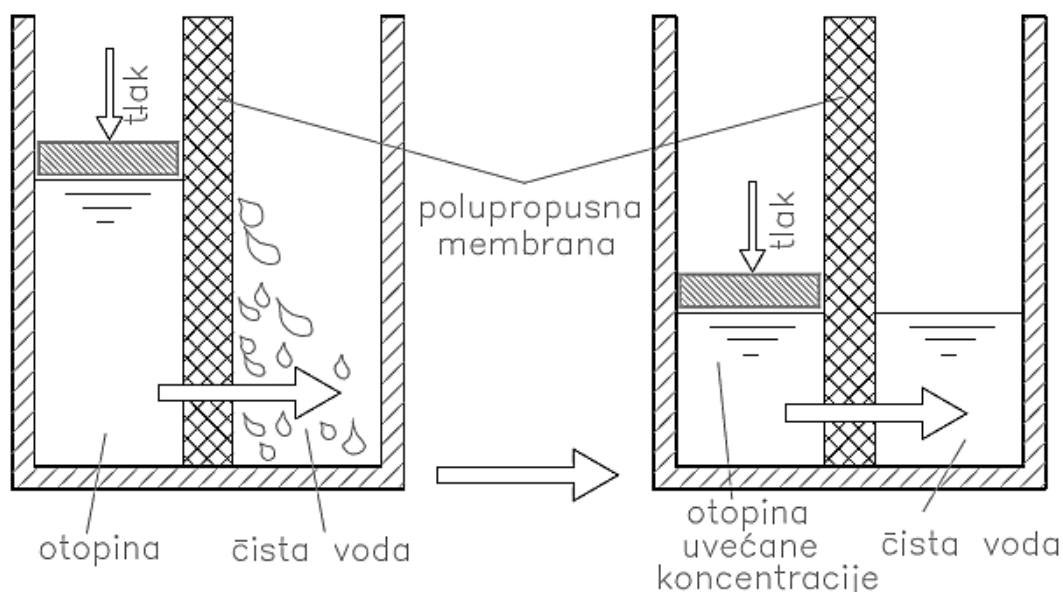
Dakle, riječima se ovaj zakon može definirati na sljedeći način: osmotski tlak otopine jednak je tlaku kojeg bi otopljeni tvar imala kada bi se u plinovitom stanju nalazila u volumenu jednakom volumenu otopine i na zadanoj temperaturi [2].

Reverzna osmoza je fizikalni postupak pri kojem se vodena otopina pod tlakom protiskuje kroz polupropusnu membranu, prisiljavajući molekule vode da iz otopine prolaze kroz sitne pore membrane, čija veličina ne dozvoljava prolazak otopljenim tvarima. Dakle, proces reverzne osmoze odvija se kada je primijenjeni hidrostatski tlak veći od osmotskog tlaka. Ovim postupkom moguće je ukloniti preko 99% otopljenih tvari iz morske ili bočate vode, što znači da permeat ima vrlo mali sadržaj soli [2]. Efektivni tlak  $P_{ef}$  [bar], koji predstavlja stvarnu pogonsku silu procesa, je razlika između pogonskog i osmotskog tlaka odnosno:

$$P_{ef} = P - \Pi \quad (10)$$

gdje je

$P$  – pogonski tlak, bar  
 $\Pi$  – osmotski tlak, bar



**Slika 8. Proces reverzne osmoze [2]**

Kada govorimo o tokovima na membrani, možemo ih podijeliti na volumetrijski fluks permeata i fluks soli. Volumetrijski fluks permeata  $J_v$  [ $\text{m}^3\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] izražava se sljedećom jednačinom:

$$J_v = L_p(\Delta p - \Delta \Pi) \quad (11)$$

gdje je

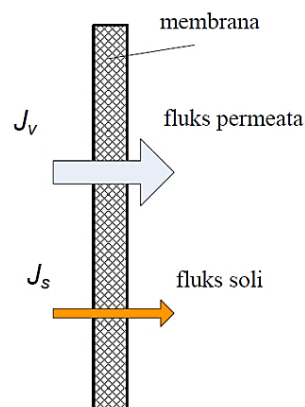
$L_p$  – permeabilnost permeata,  $\text{m Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$   
 $\Delta p$  – pad tlaka na membrani, Pa  
 $\Delta \Pi$  – razlika osmotskog tlaka na membrani, Pa

Fluks soli  $J_s$  [ $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] posljedica je male propusnosti membrane i za niskomolekulne tvari te se računa prema izrazu:

$$J_s = B (c_m - c_p) \quad (12)$$

gdje je

$B$  – permeabilnost soli,  $\text{m s}^{-1}$   
 $c_m$  – koncentracija tvari na membrani,  $\text{mol m}^{-3}$   
 $c_p$  – koncentracija tvari u permeatu,  $\text{mol m}^{-3}$

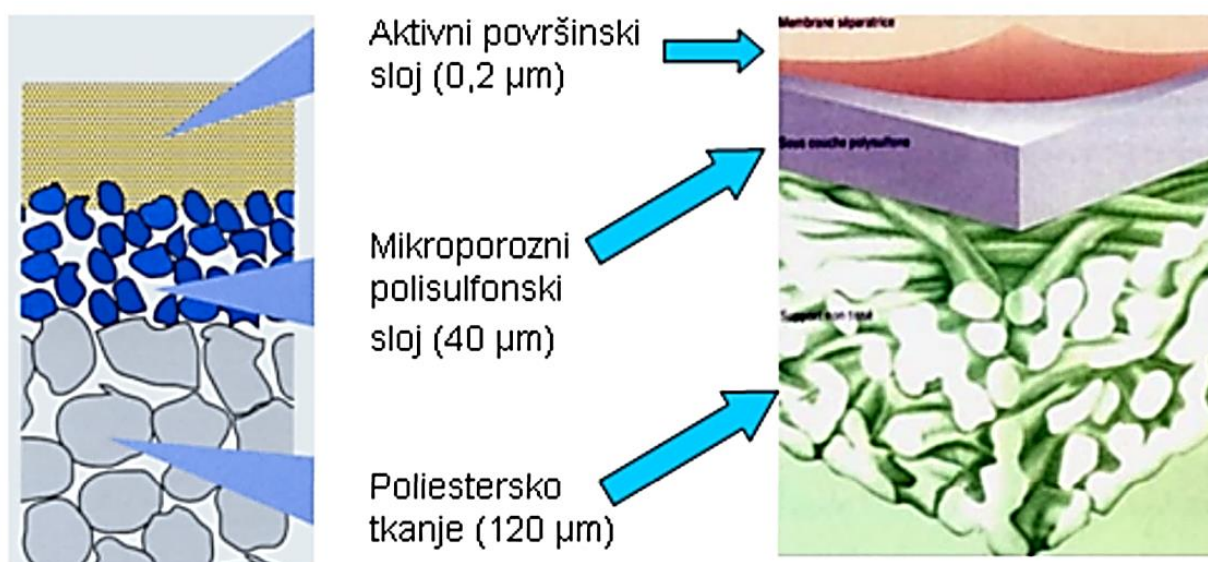


**Slika 9. Shematski prikaz tokova na membrani [2]**

Na membrani se pojavljuju različite vrste otpora koje možemo podijeliti na:

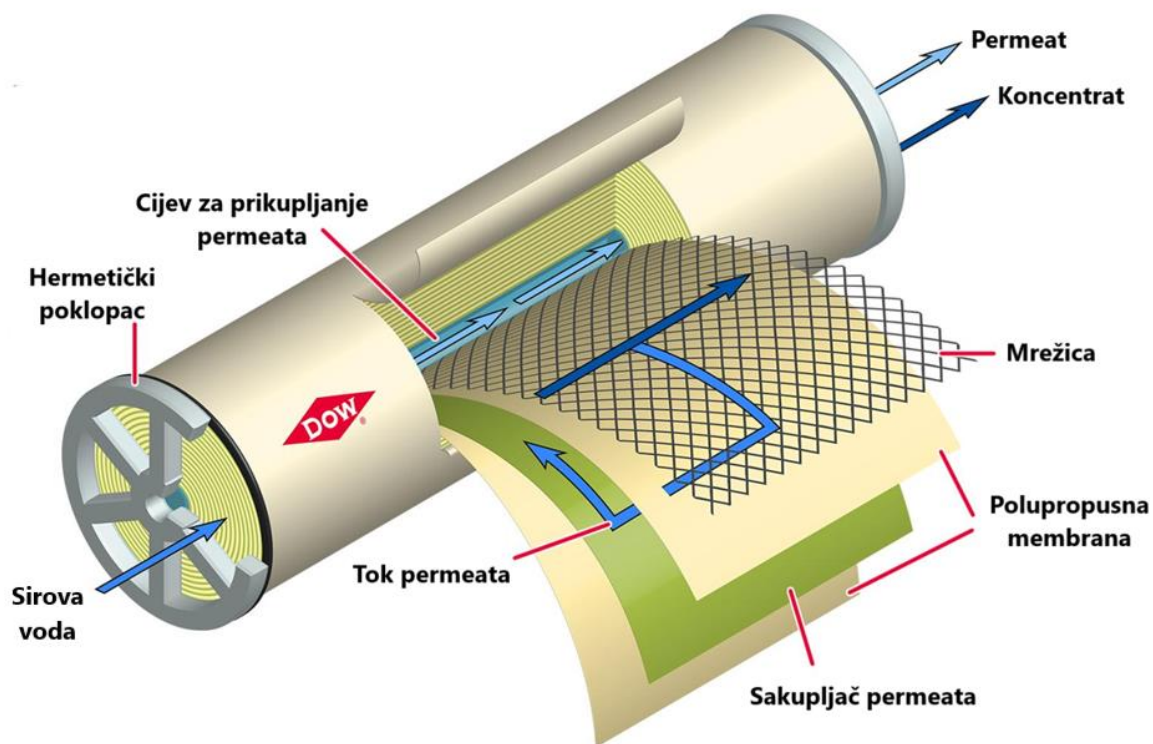
- hidraulički otpor uzrokovan koncentracijskom polarizacijom
- hidraulički otpor uzrokovan adsorpcijom na stjenke pora
- hidraulički otpor uzrokovan blokiranjem pora
- hidraulički otpor uzrokovan stvaranjem kolača.

Membrane za reverznu osmozu mogu biti asimetrične (tzv. Loeb-Sourirajanove) membrane, sastavljene membrane, dinamički formirane membrane, i membrane u obliku šupljih vlakana. Najčešće membrane za reverznu osmozu izrađuju su od celuloze acetata (CA), celuloze triacetata (CTA) i tankoslojnih poliamidnih (PA) kompozita. Nedostatak membrana izrađenih od celuloze acetata je njihova podložnost hidrolizi u uvjetima visokih i niskih pH-vrijednosti. S druge strane, sulfonirane polisulfonske (SPS) membrane otporne su na klor i mogu izdržati više pH-vrijednosti te su zbog toga najprikladnije za meke otpadne vode, u uvjetima visokog pH i u uvjetima kada su u vodi prisutni nitrati [8].



**Slika 10. Shematski prikaz presjeka tankoslojne sastavljene (kompozitne) membrane [8]**

Najčešće korištena geometrija modula za reverznu osmozu je modul sa spiralnim namotajem. Modul sa spiralnim namotajem sastoji se od namotaja ravnih membrane i sakupljača permeata oko središnje cijevi koja služi za prikupljanje permeata. Membrane su međusobno odvojene poroznim nestlačivim potpornim materijalom. Sirova voda struji aksijalno preko membrana i izlazi na kraju modula kroz cijev za odvod koncentrata, dok se permeat nakon prolaza kroz membrane i porozni materijal spiralno odvodi u cijev za odvod permeata. Između membrana nalazi se mrežica koja stvara vrtloge koji smanjuju efekt koncentracijske polarizacije te intenzivira miješanje struje kroz membranu, što rezultira smanjenjem blokiranja pora membrana. [8]



**Slika 11. Modul reverzne osmoze sa spiralnim namotajem**

(<https://www.evoqua.com/en/brands/IPS/Pages/what-is-reverse-osmosis.aspx>)

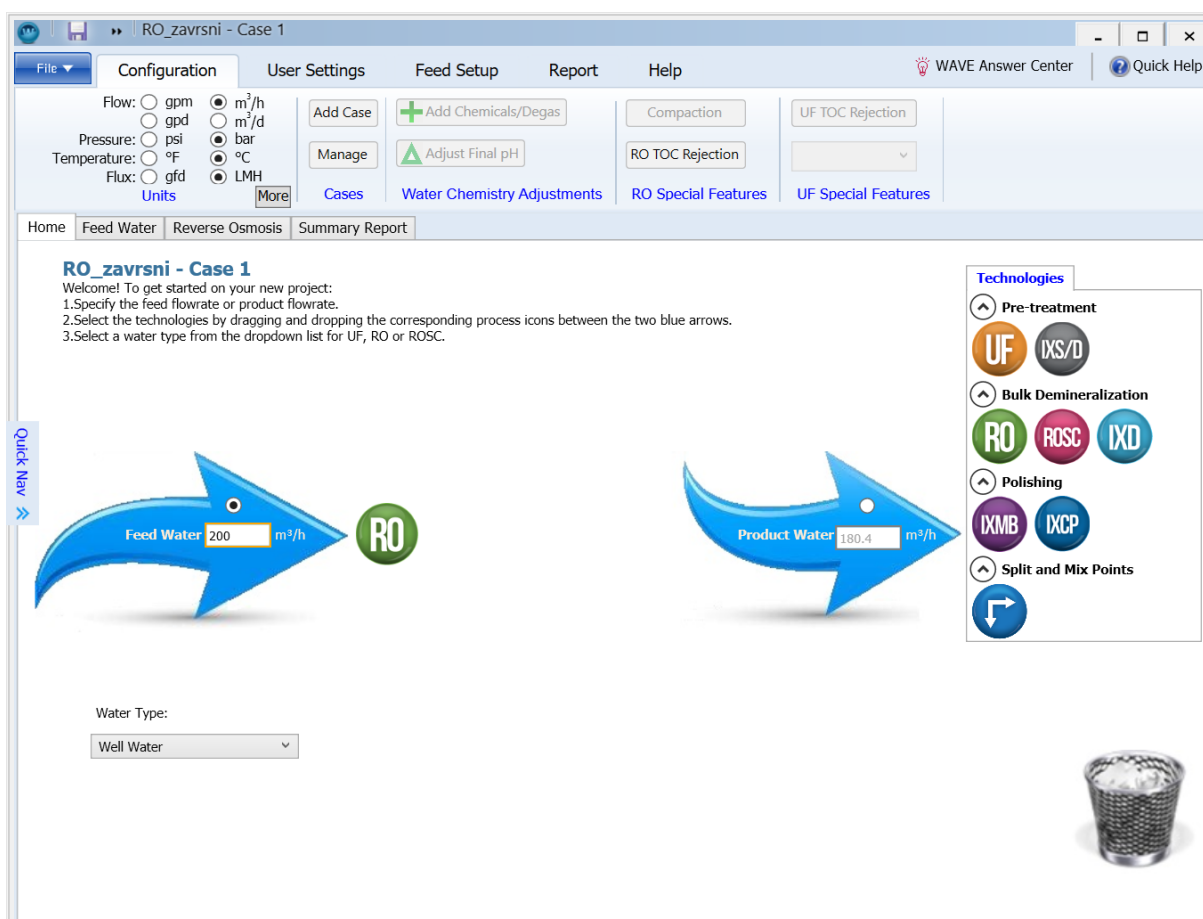
Za postupak reverzne osmoze nužna je predobrada vode s ciljem uklanjanja suspendiranih nečistoća, reziduala klora te smanjenja tendencije stvaranja kamenca. Elementi predobrade vode su filtracija preko pješčanog filtra, filtracija preko vrećastog filtra, doziranje Na bisulfata te doziranje antiskalanta ili umekšavanje. Također, potrebno je napraviti i naknadnu obradu vode kako bi se podigla pH vrijednost, povećala tvrdoća vode (samo za pitke vode) te smanjila agresivnost vode. To se može postići filtracijom preko mrvljenog kalcita ili dolomita ili doziranjem otopine za neutralizaciju i korekciju mineralnog sadržaja, pa čak i miješanjem sa sirovom vodom [2].

Reverzna osmoza može se primijeniti za razne potrebe:

- desalinaciju slane (morske i bočate) vode
- demineralizaciju vode
- uklanjanje organski tvari
- uklanjanje specifičnih onečišćenja iz otpadnih voda
- za sustave recikliranja i ponovne upotrebe otpadnih voda
- za sustave rekuperacije korisnih tvari iz otpadnih voda.

## 4. OSNOVNI PRORAČUN POSTROJENJA

Glavni cilj postrojenja za obradu bunarske vode reverznom osmozom u sklopu ovog zadatka je smanjenje koncentracije nitrata. Iako je koncentracija nitrata u bunarskoj vodi niža od dopuštene vrijednosti prema Nitratnoj direktivi, njezina vrijednost je u stalnom porastu te je stoga potrebno napraviti postrojenje koje će riješiti taj problem. Osnovni proračun postrojenja proveden je pomoću računalnog programa *Wave*, čije je sučelje prikazano na slici 12.



**Slika 12. Računalni program Wave**

Na početnoj strani zadan je, prema zadatku, ulazni protok vode od 200 m<sup>3</sup>/h, tehnologija obrade vode te vrsta vode. Nakon toga, potrebno je zadati sastav vode koji je u zadatku zadan tablicom. Prikaz zadanog sastava vode vidljiv je na slici 13.



The screenshot shows the 'Feed Water - Stream 1' configuration screen in the Wave software. The interface is divided into several sections:

- Stream Definition:** Stream 1 is set to 100.00%.
- Feed Parameters:** Water Type is 'Well Water', Water Sub-type is 'SDI < 3'.
- Solid Content:** Turbidity: 0.27 NTU, Total Suspended Solids (TSS): 0.60 mg/L, SDI<sub>15</sub>: 0.00.
- Organic Content:** Organics (TOC): 0.67 mg/L.
- Temperature:** Minimum: 10.0 °C, Design: 13.6 °C, Maximum: 15.0 °C. pH @ 13.6°C: 6.75, pH @ 25.0°C: 6.67.
- Additional Feed Water Information:** (Empty field)
- Cations Table:**

Symbol	mg/L	ppm CaCO <sub>3</sub>	meq/L
NH <sub>4</sub>	0.000	0.000	0.000
K	0.600	0.768	0.015
Na	1.700	3.701	0.074
Mg	27.050	111.391	2.226
Ca	64.790	161.801	3.233
Sr	0.000	0.000	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000
<b>Total Cations:</b>	<b>94.140</b>		<b>5.548</b>
- Anions Table:**

Symbol	mg/L	ppm CaCO <sub>3</sub>	meq/L
CO <sub>3</sub>	0.084	0.140	0.003
HCO <sub>3</sub>	224.100	183.797	3.673
NO <sub>3</sub>	39.920	32.219	0.644
Cl	25.750	36.348	0.726
F	0.000	0.000	0.000
SO <sub>4</sub>	24.180	25.193	0.503
<b>Total Anions:</b>	<b>314.034</b>		<b>5.549</b>
- Neutrals Table:**

Symbol	mg/L
SiO <sub>2</sub>	0.000
B	0.000
CO <sub>2</sub>	63.056
<b>Total Neutrals:</b>	<b>63.056</b>
- Summary:** Total Dissolved Solids : 408.174 mg/L, Charge Balance: -0.000569 meq/L, Estimated Conductivity: 560.56 µS/cm.

**Slika 13. Sastav ulazne bunarske vode u računalnom programu Wave**

Nakon unosa ulaznih podataka o vodi, potrebno je postrojenje reverzne osmoze. Postrojenje je dimenzionirano tako da se voda filtrira u dva stupnja, odnosno nakon prolaska vode kroz prvi stupanj reverzne osmoze, koncentrat se odvodi na još jednu filtraciju. Za prvi stupanj filtracije odabran je modul *BW30HR-440i*, dok je za drugi stupanj odabran modul *BW30-440/34*. Prvi stupanj sastoji se od 8 paralelnih komponenata koje su sastavljene od 8 serijski spojenih modula, dok se drugi stupanj sastoji od 4 paralelne komponente koje su također sastavljene od 8 serijski spojenih modula, čiji je shematski prikaz prikazan na slici 15. Ukupni faktor iskoristivosti ulazne vode, gdje termin ulazna voda predstavlja vodu koja se filtrira, za ova dva stupnja postavljen je na 85%, što znači da će kao ukupni permeat iz ova dva stupnja reverzne osmoze izaći 85% ulazne vode. Kako je dobiveni permeat vrlo visoke kvalitete, predviđeno je miješanje sirove vode s ukupnim permeatom u iznosu od 35%, čime se postiže manja potrošnja energije i kemikalija te veći faktor iskoristivosti vode. U svrhu sprječavanja nastanka kamenca, u ulaznu vodu koja se filtrira dodaje se antiskalant.



**Reverse Osmosis Pass Configuration**

Configuration for Pass 1

Number of Stages:  1  2  3  4  5

Flow Factor:

Temperature: Design  °C

Pass Permeate Back Pressure:  bar

Flows:

Feed Flow:  m<sup>3</sup>/h

Recovery:  %

Permeate Flow:  m<sup>3</sup>/h

Flux:  LMH

Conc. Recycle Flow:  m<sup>3</sup>/h

Bypass Flow:  m<sup>3</sup>/h

	Stage 1	Stage 2
# PV per stage	8	4
# Els per PV	8	8
Element Type	BW30HR-440i	BW30-400/34
Total Els per Stage	64	32
Pre-stage ΔP (bar)	0.30	0.18
Stage Back Press (bar)	0.00	0.00
Boost Press (bar)	N/A	0
Feed Press (bar)	0	N/A
% Conc to Feed	0.00	0.00

System Configuration Diagram:

Feed → Bypass → Permeate

Feed → Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Antiscalant) → Concentrate

Slika 14. Konfiguracija RO postrojenja u računalnom programu Wave

## 4.1. Rezultati proračuna

Rezultati dobiveni za gore navedenu konfiguraciju prikazani su sljedećim tablicama:

Tablica 1. Prikaz tokova po stupnjevima

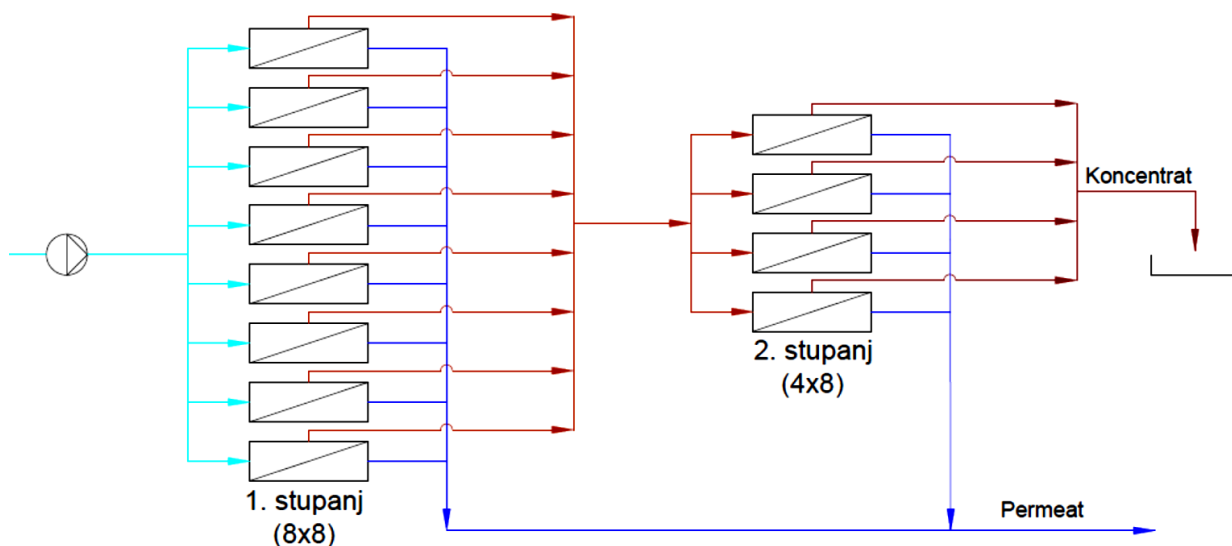
Stupanj	Ulazna voda		Koncentrat			Permeat			
	Protok (m <sup>3</sup> /h)	Tlak (bar)	Protok (m <sup>3</sup> /h)	Tlak (bar)	Pad tlaka (bar)	Protok (m <sup>3</sup> /h)	Prosj. fluks (LMH)	Tlak (bar)	TDS (mg/L)
1.	130	16,5	46,5	13,1	3,4	83,5	31,9	0,0	2,31
2.	46,5	12,9	19,5	11,5	1,4	27,0	22,6	0,0	5,77

Tablica 2. Prikaz kemijskog sastava vode na određenim dijelovima

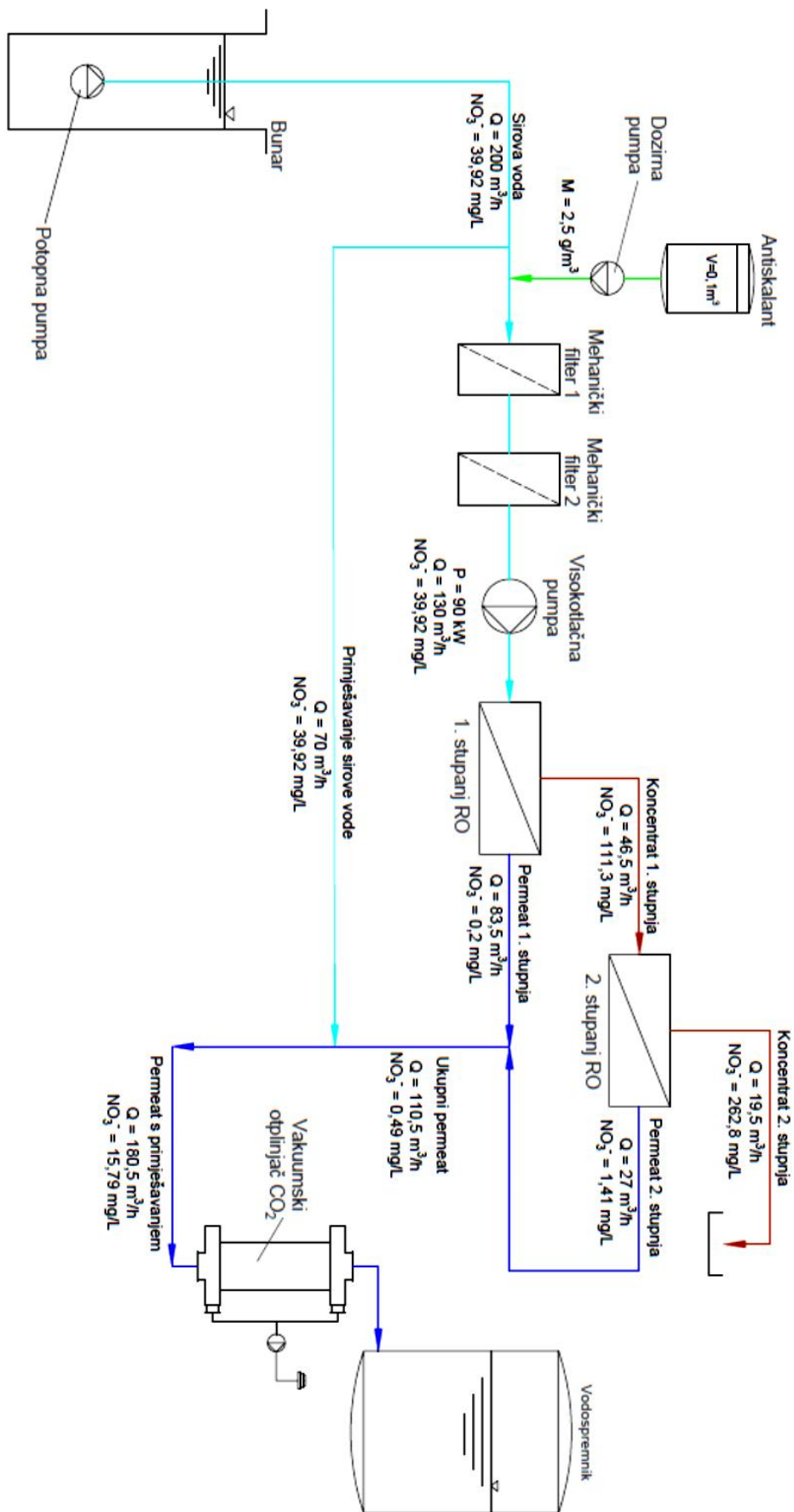
	Sirova voda	Koncentrat		Permeat			
		1. stupanj	2. stupanj	1. stupanj	2. stupanj	Ukupno	Ukupni permeat pomiješan sa sirovom vodom
K <sup>+</sup>	0,60	1,67	3,95	0,00	0,01	0,01	0,24
Na <sup>+</sup>	1,70	4,74	11,21	0,01	0,04	0,02	0,67
Mg <sup>2+</sup>	27,05	75,54	179,2	0,08	0,33	0,14	10,58
Ca <sup>2+</sup>	64,79	181,0	429,2	0,18	0,76	0,32	25,33
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,08	0,76	4,96	0,00	0,00	0,00	0,01
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	224,1	624,6	1,476	1,75	2,84	1,99	87,61
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	39,92	111,3	262,8	0,20	1,41	0,49	15,79
Cl <sup>-</sup>	25,75	71,96	170,8	0,05	0,23	0,09	10,05
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	24,18	67,61	160,5	0,03	0,14	0,05	9,41
CO <sub>2</sub>	63,08	63,38	65,13	62,37	63,27	62,61	63,18
TDS	408,1	1,139	2,698	2,31	5,77	3,13	159,7
pH	6,8	7,1	7,5	4,8	5,0	4,8	6,4

Iz tablice 2. vidljivo je kako se reverznom osmozom koncentracija svih iona svela gotovo na nulu. Time se postigao željeni cilj smanjenja koncentracije nitrata te se naknadnim primješavanjem dobila voda sa željenom koncentracijom nitrata koja se zatim odvodi u vakuumski otplinjivač kako bi se uklonio ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) iz vode. Faktor iskorištenja sirove vode iznosi 90,2%, što znači da  $180,5 \text{ m}^3/\text{h}$  vode crpljene iz bunara odlazi u vodospremu, a preostalih  $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$  završava kao koncentrat. Prema tablici 2., završni koncentrat ima povećanu koncentraciju nitrata, kao i ostalih iona te s tom otpadnom vodom treba pravilno gospodariti. Prema pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, ovaj koncentrat zadovoljava standarde za ispuštanje u sustav javne odvodnje

Cjelokupno postrojenje sastoji se od potopne pumpe koja crpi vodu iz bunara, dva mehanička filtra kojima su veličine pora  $< 100 \mu\text{m}$  odnosno  $< 5 \mu\text{m}$ , spremnika antiskalanta, dozirne pumpe, visokotlačne pumpe, RO sistema te vakuumskog otplinjivača. Osnovni shematski prikaz cjelokupnog postrojenja s naznačenim protocima i koncentracijom nitrata na određenim dijelovima postrojenja prikazan je na slici 16.



**Slika 15. Pojednostavljeni shematski prikaz stupnjeva RO postrojenja**



Slika 16. Osnovni shematski prikaz cjelokupnog postrojenja

## 4.2. Prikaz utroška energije i kemikalija

Glavni potrošač energije u sistemu obrade vode reverznom osmozom je visokotlačna pumpa. Tablica 3. prikazuje snagu pumpe, količinu električne energije i specifičnu energiju. Prikazana snaga pumpe uzima u obzir stupanj iskoristivosti pumpe, čija vrijednost iznosi 80%, i njenog motora, čija iskoristivost iznosi 95%.

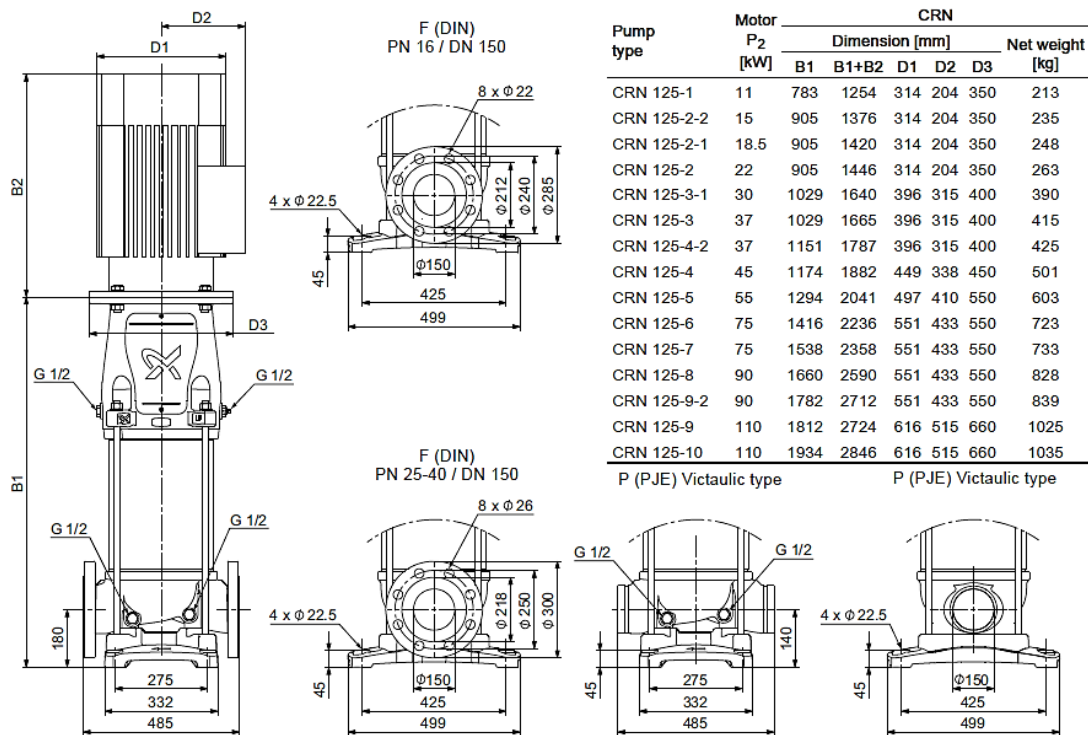
**Tablica 3. Prikaz utroška energije**

<b>Snaga pumpe (kW)</b>	79,96
<b>Energija (kWh/d)</b>	1919,04
<b>Energija (kWh/mj)</b>	57571,2
<b>Energija (kWh/god)</b>	700449,6
<b>Specifična energija (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	0,44

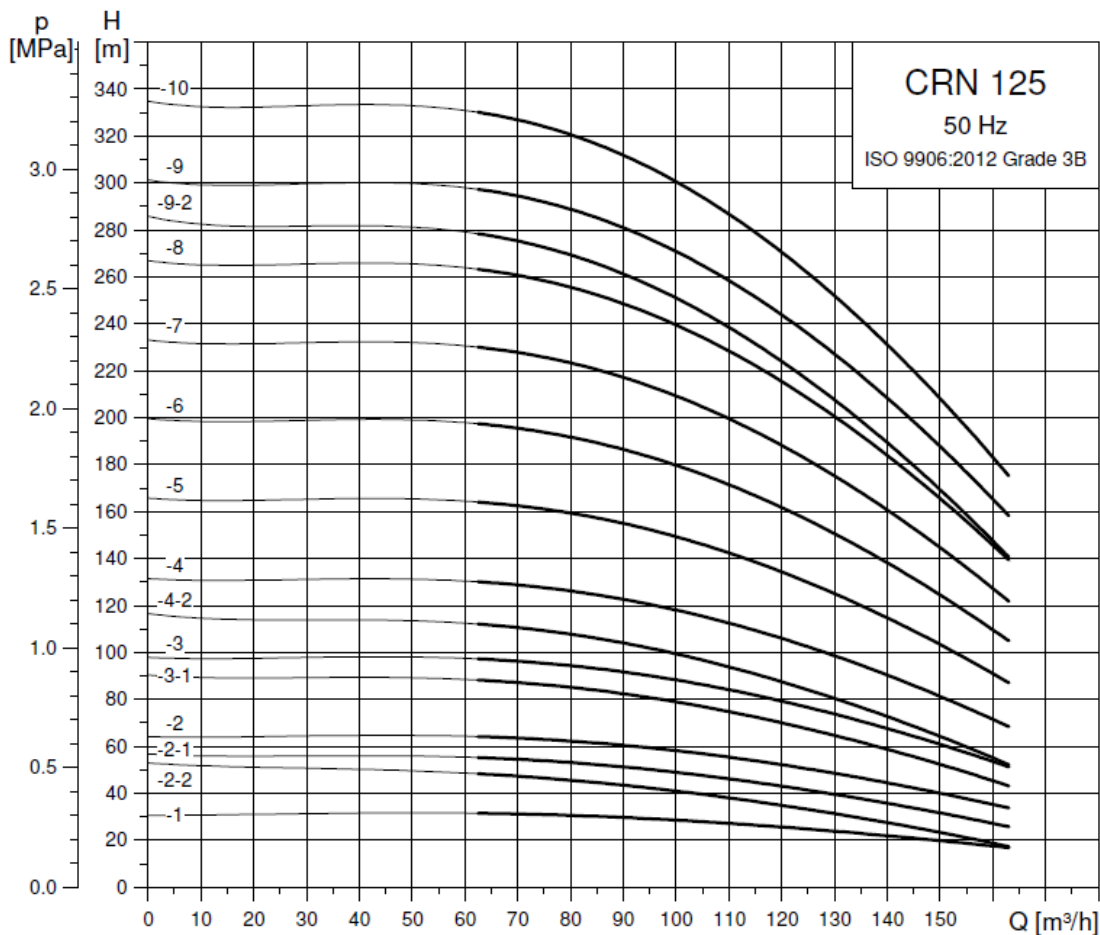
U tablici 4., prikazani su ukupni gubici cjevovoda za ovo postrojenje. Na temelju tih podataka, izabrana je vertikalna višetupanjska pumpa *CRN 125-8* čije su dimenzije prikazane na slici 17., a radna karakteristika na slici 18.

**Tablica 4. Ukupni gubici cjevovoda**

<b>Pad tlaka kroz membrane</b>	16,8 bar
<b>Procijenjeni linijski gubici</b>	0,48 bar
<b>Visina dobave VTP</b>	≈176m



Slika 17. Dimenzije odabrane pumpe [11]



Slika 18. Radna karakteristika pumpe [11]

Prikaz utroška kemikalija odnosno antiskalanta dan je sljedećom tablicom:

**Tablica 5. Prikaz utroška kemikalija**

Kemikalija	Doza (mg/L)	Satna potrošnja (g/h)	Dnevna potrošnja (g/d)	Mjesečna potrošnja (g/mj)	Godišnja potrošnja (g/god)
Antiskalant (Na <sub>6</sub> P <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )	2,5	325	7800	234000	2847000

Posuda za antiskalant dimenzionirana je za mjesečnu potrebu.

$$V = \frac{\text{Mjesečna potrošnja}}{\text{gustoća antiskalanta} \times 1000} = \frac{234000}{2484 \times 1000} = 0,0942 \text{ m}^3 \quad (13)$$

Iz toga, volumen odabrane posuda za antiskalant iznosi  $V = 0,1 \text{ m}^3$ .

## 5. ZAKLJUČAK

---

Voda je tvar bez koje nema života te naglim razvojem industrije i gradova problem onečišćenja voda sve je izraženiji. Jedan od sve većih problema u vidu onečišćenja voda je porast koncentracije nitrata u podzemnim vodama, što je posebno izraženo na područjima intenzivne poljoprivrede. Kako bi se riješio problem općeg onečišćenja, pa tako i nitrata, razvijene su brojne tehnologije kojima se voda može pročistiti i iskoristiti za raznorazne potrebe.

Membranske tehnologije danas su najčešće korištene tehnologije za obradu pitkih, industrijskih i otpadnih voda, koje svojom konkurentnošću potiskuju klasične metode obrade voda. One su najučinkovitiji separacijski procesi te se i dalje snažno razvijaju i implementiraju u razne direktive s ciljem učinkovite i ekološki održive obrade voda.

Reverzna osmoza je posljedica razvitka nanotehnologije, čime je omogućena proizvodnja membrana izrazito malih pora koje zadržavaju sve tvari osim plinova. To je čini pogodnom metodom za smanjenje koncentracije svih iona u vodi, pa tako i nitrata. Nakon obrade vode reverznom osmozom koncentracija nitrata, ali i ostalih iona smanjila se gotovo na nulu te se može reći kako se reverznom osmozom dobiva gotovo ultračista voda. Ipak, takva voda nije najpogodnija za piće jer poprima loš okus zbog nedostatka kalcijevih iona. Stoga je ovako obrađenu vodu moguće miješati s neobrađenom vodom, kako bi se postigla voda zadovoljavajuće kvalitete, a samim time i smanjila količina potrebne vode za obradu.

Reverzna osmoza pokazala se kao vrlo učinkovita metoda za smanjenje koncentracije nitrata uz relativno povoljnu specifičnu potrošnju energije te sa relativno malim dimenzijama postrojenja. Također, ova metoda predstavlja dugoročno rješenje za problem povećane koncentracije nitrata zbog dugogodišnjeg vijeka trajanja opreme u odgovarajućim uvjetima eksploatacije.



## 6. LITERATURA

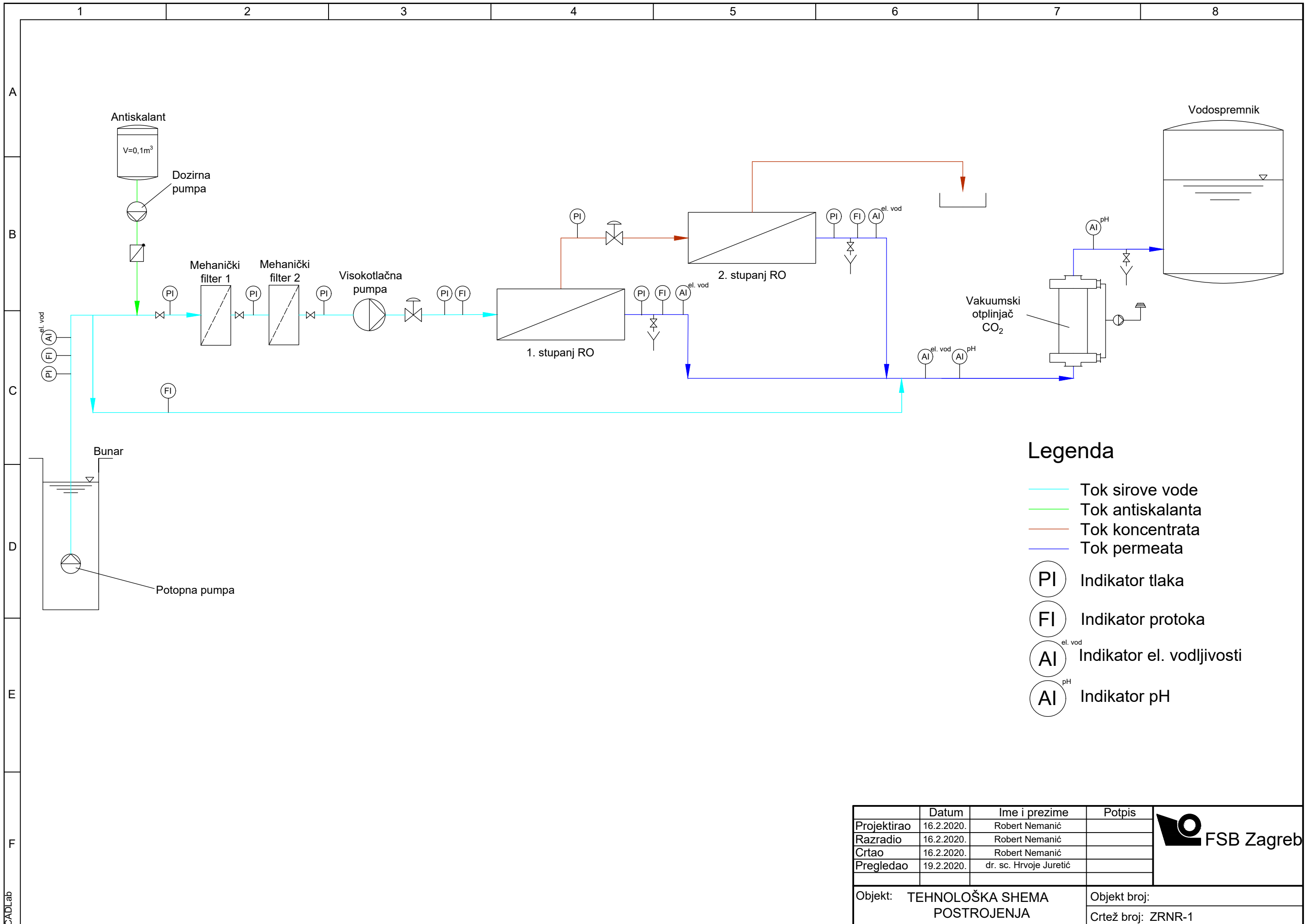
---

- [1] Mayer D., Voda od nastanka do upotrebe, Prosvjeta d.o.o, Zagreb, 2004.
- [2] Skripta iz kolegija Voda, gorivo i mazivo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [3] [https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/Voda\\_kao\\_tvar.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/Voda_kao_tvar.pdf), pristupljeno: 5.2.2020
- [4] Tedeschi S., Zaštita voda, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 1997.
- [5] [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/Zrak.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Zrak.pdf), pristupljeno: 10.2.2020.
- [6] Filipović V. et al., Prisutnost nitrata u podzemnim vodama; izvori i procesi, Hrvatske vode, 2013., 21(84), 119-128,  
[https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf\\_clanka/hv\\_84\\_2013\\_119-128\\_filipovic-et-al.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf_clanka/hv_84_2013_119-128_filipovic-et-al.pdf), pristupljeno: 10.2.2020.
- [7] <https://www.istrapedia.hr/hr/natuknice/3370/eutrofikacija>, pristupljeno: 10.2.2020.
- [8]  
[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/MEMBRANSKE\\_TEHNOLOGIJE\\_OBRADU\\_VODA\\_nastavni\\_tekstovi%5B2%5D.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/MEMBRANSKE_TEHNOLOGIJE_OBRADU_VODA_nastavni_tekstovi%5B2%5D.pdf), pristupljeno: 10.2.2020.
- [9] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2016\\_01\\_3\\_22.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2016_01_3_22.html), pristupljeno: 16.2.2020.
- [10] <http://www.zzjzpgz.hr/vode/obvezni-parametri.pdf>, pristupljeno: 16.2.2020.
- [11] <http://net.grundfos.com/qr/i/99301179>, pristupljeno: 16.2.2020.

## **POPIS PRILOGA**

---


- 1. Tehnološka shema postrojenja**
- 2. Tlocrt postrojenja**
- 3. CD**



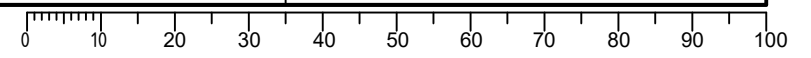
### Legenda

- Tok sirove vode
- Tok antiskalanta
- Tok koncentrata
- Tok permeata
- PI** Indikator tlaka
- FI** Indikator protoka
- AI<sup>el. vod</sup>** Indikator el. vodljivosti
- AI<sup>pH</sup>** Indikator pH

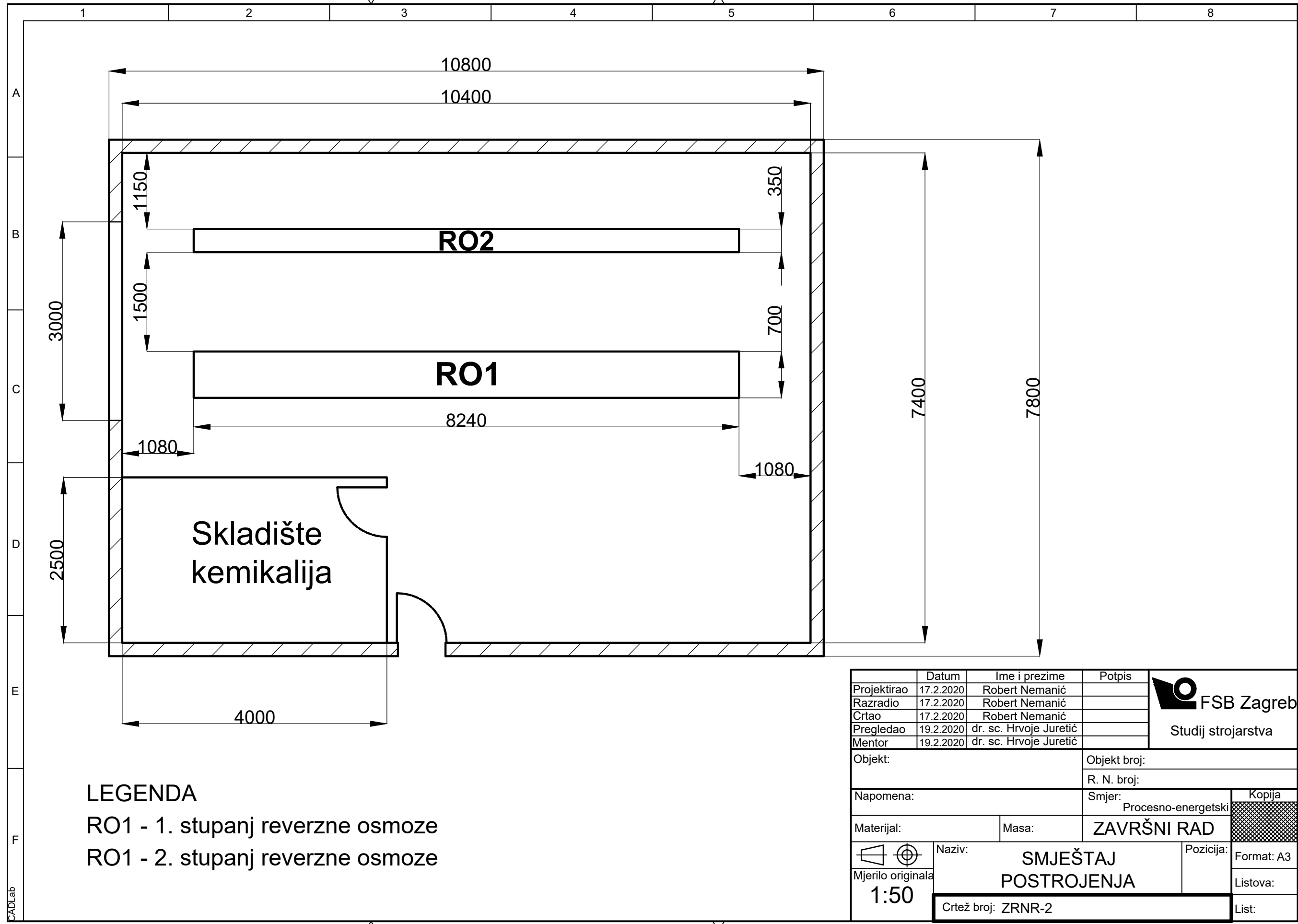
	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	16.2.2020.	Robert Nemanić	
Razradio	16.2.2020.	Robert Nemanić	
Crtao	16.2.2020.	Robert Nemanić	
Pregledao	19.2.2020.	dr. sc. Hrvoje Juretić	




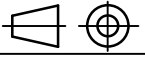
Objekt: <b>TEHNOLOŠKA SHEMA POSTROJENJA</b>	Objekt broj:
	Crtež broj: ZRNR-1



CADLab



**LEGENDA**  
 RO1 - 1. stupanj reverzne osmoze  
 RO1 - 2. stupanj reverzne osmoze

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b> Studij strojarstva
Projektirao	17.2.2020	Robert Nemanić		
Razradio	17.2.2020	Robert Nemanić		
Crtao	17.2.2020	Robert Nemanić		
Pregledao	19.2.2020	dr. sc. Hrvoje Juretić		
Mentor	19.2.2020	dr. sc. Hrvoje Juretić		
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:		Smjer:	Kopija	
		Procesno-energetski		
Materijal:		Masa:	<b>ZAVRŠNI RAD</b>	
 Naziv:		<b>SMJEŠTAJ POSTROJENJA</b>		Pozicija:
Mjerilo originala <b>1:50</b>				Format: A3
		Crtež broj: ZRNR-2		Listova:
				List:

