

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Hidrotehniška smer

Kandidat:

**Matjaž Horvat**

# **Idejna študija sanacije čistilne naprave za pitno vodo Mrzlek**

**Diplomska naloga št.: 2949**

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

**Somentor:**  
Bogoslav Brezigar

Ljubljana, 24. 4. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisan **MATJAŽ HORVAT** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»IDEJNA ŠTUDIJA SANACIJE ČISTILNE NAPRAVE ZA PITNO VODO MRZLEK«**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske  
separatoteke FGG.

Ljubljana, 17. 4. 07

Podpis: \_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>628.1.033:628.32(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Matjaž Horvat</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Boris Kompare</b>
<b>Somentor:</b>	<b>Bogoslav Brezigar, u.d.i.g.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Idejna študija sanacije čistilne naprave za pitno vodo Mrzlek</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>84 str., 10 pregl., 35 sl., 12 prilog</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>čistilna naprava, pitna voda, vodooskrba</b>

### **Izveček:**

Diplomsko delo obravnava idejno sanacijo obstoječe čistilne naprave za pitno vodo Mrzlek. Diplomsko delo je bilo narejeno na podlagi idejnega projekta. Na začetku naloge so predstavljeni obstoječa čistilna naprava, vodni vir in analiza kvalitete surove in obdelane vode. Nato je podrobneje predstavljeno teoretično ozadje delovanja posameznih tehnologij čiščenja vode in dimenzioniranje objektov teh tehnologij. Obravnaval sem sedimentacijo, koagulacijo in flokulacijo, oksidacija z ozonom, filtracija z zrnastimi filtri, adsorpcija z aktivnim ogljem, ultrafiltracija in dezinfekcija s klorom in UV svetlobo. Pri vsaki tehnologiji sem obdelal načine čiščenja vode in navedel njihove dobre in slabe lastnosti. Na koncu sem posamezne tehnologije združil v več tehnoloških linij čiščenja in jih med seboj iz več inženirskih vidikov primerjal ter finančno ocenil. Tako sem izbral tehnološko linijo, ki je dobila najboljše rezultate in jo predlagal investitorju.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 628.1.033:628.32(043.2)  
**Author:** Matjaž Horvat  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Boris Kompare, Ph. D.C.E.  
**Co-supervisor:** Bogoslav Brezigar, u.d.i.g.  
**Title:** Study of Mrzlek drinking water treatment plant reconstruction  
**Notes:** 84 p., 10 tab., 35 fig., 12 eq.  
**Key words:** water treatment plant, drinking water, drinking water supply

### **Abstract:**

The thesis is an outline study for reconstruction of Mrzlek, the existent drinking water treatment plant. It is based on the outline scheme. The thesis begins with the presentation of the existent water treatment plant, the water source, and the analysis of the quality of raw and treated water. In continuation, I present a theoretical background to individual water treatment technologies, as well as the designing of the works of these technologies. I discuss sedimentation, coagulation and flocculation, oxidation with ozone, filtration through rapid granular filters, adsorption with active carbon, ultrafiltration, disinfection with chlorine and UV radiation. Each technology is looked at in terms of water treatment method and in terms of its advantages and disadvantages. Finally, the individual technologies are put together into several technological lines of water treatment. These lines are then compared from different technical aspects and evaluated financially. In this way the technological line with the best results has been chosen and proposed to the investor.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se, za strokovno pomoč in svetovanje, iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. B. Komparetu in somentorju g. B. Brezigarju. Za lep sprejem, strokovno pomoč in svetovanje ter dano priložnost bi se zahvalil sodelavcem v podjetju Vodnar d.o.o., kjer sem izdelal to diplomsko nalogo.

Posebej bi se rad zahvalil staršem in vsem, ki so mi v času študija stali ob strani in lepšali moje življenje.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	IZHODIŠČA .....	1
1.2	OPIS IN OGROŽENOST VODNEGA VIRA .....	2
<b>2</b>	<b>OPIS OBSTOJEČEGA STANJA</b>	<b>4</b>
2.1	ČRPALIŠČE .....	5
2.2	STARA ČISTILNA NAPRAVA.....	5
2.3	NOVEJŠA ČISTILNA NAPRAVA .....	6
2.4	ANALIZE VZORCEV SUROVE VODE IN TRETIRANE VODE.....	7
2.4.1	Mrzlek .....	8
2.4.2	Soča.....	9
2.5	MOŽNI VZROKI ONESNAŽENOSTI IN NJENO ODSTRANJEVANJE.....	9
<b>3</b>	<b>TEORIJA</b>	<b>11</b>
3.1	KOAGULACIJA IN FLOKULACIJA .....	11
3.1.1	Teoretične osnove .....	11
3.1.2	Dimenzioniranje.....	16
3.2	SEDIMENTACIJA .....	19
3.2.1	Dimenzioniranje lamelnega usedalnika .....	25
3.3	OZON .....	27
3.3.1	Železo in mangan.....	29
3.3.2	Vpliv na koagulacijo in odstranjevanje motnosti.....	29
3.3.3	Napredna oksidacija.....	31
3.3.4	Stranski produkti ozonacije.....	32
3.3.5	Oprema.....	32
3.4	FILTRACIJA SUSPENDIRANIH SNOVI Z ZRNAVIMI FILTRI .....	34
3.4.1	Hitri peščeni filtri.....	39
3.4.2	Dvo- in troslojni filtri.....	41
3.4.3	Pranje filtrov .....	43

3.4.4	Dimenzioniranje.....	46
3.5	AKTIVNO OGLJE .....	46
3.5.1	Pranje in regeneracija.....	51
3.6	ULTRAFILTRACIJA (UF).....	52
3.6.1	Predčiščenje .....	53
3.6.1.1	Predfiltracija.....	54
3.6.1.2	Adsorbpcija.....	54
3.6.1.3	Koagulacija .....	55
3.6.1.4	Pranje UF .....	55
3.6.2	Primerjava UF s klasičnim postopkom čiščenja.....	57
3.6.3	Dimenzioniranje.....	58
3.7	DEZINFEKCIJA.....	59
3.7.1	Klor .....	61
3.7.1.1	Stranski produkti dezinfekcije s klorom .....	63
3.7.2	UV.....	64
<b>4</b>	<b>PRIMERJALNA ANALIZA RAZLIČNIH NAČINOV ČIŠČENJA SUROVE VODE</b>	<b>67</b>
4.1	OSNOVE .....	67
4.2	OPISI POSAMEZNIH TEHNOLOGIJ .....	68
4.2.1	Varianta ČN 1 – Predelana obstoječa ČN (trije dvoslojni peščeni filtri in dva GAC filtra) .....	68
4.2.2	Varianta ČN 2 – Predelana obstoječa ČN (šest dvoslojnih peščenih filtrov in dva GAC filtra) .....	71
4.2.3	Varianta ČN 3 – Predelana obstoječa ČN (šest enoslojnih peščenih filtrov brez uporabe GAC filtrov).....	73
4.2.4	Varianta ČN 4 – Predelana obstoječa ČN (trije enoslojni peščeni filtri in dva GAC filtra) .....	74
4.2.5	Varianta ČN 5 – Nadtlačna ultrafiltracija (UF) .....	75
<b>5</b>	<b>TABELARIČNI PRIKAZ VREDNOTENJA RAZLIČNIH TEHNOLOGIJ ČN</b>	<b>77</b>

<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK S PREDLOGI</b>	<b>83</b>
	<b>VIRI</b>	<b>85</b>
	<b>PRILOGE</b>	



## KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Tabelirana vrednost koeficienta K v odvisnosti od temperature [*Monod, 1991*].
- Preglednica 2: Tipične vrednosti za najpogosteje uporabljene filtrne materiale [*Cleasby in Longsdon, 1999*].
- Preglednica 3: Adsorpcijske karakteristične vrednosti za posamezne vrste materialov [*Drev, 1999*].
- Preglednica 4: Aktivne površine za posamezne vrste aktivnega oglja [*Drev, 1999*].
- Preglednica 5: Potrebno predčiščenje za različne onasnaževalce [*Speth in Reiss, 2005*].
- Preglednica 6: Stranski produkti dezinfekcije in njihovo učinkovanje na človeka [*Ravnikar, 2004*].
- Preglednica 7: Ocena današnje investicije primerjanih tehnologij za ČN Mrzlek – neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let.
- Preglednica 8: Prednosti in pomanjkljivosti posameznih tehnologij za ČN Mrzlek.
- Preglednica 9: Kriteriji in ocene.
- Preglednica 10: Ponderiranje.

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Pregledna situacija črpališča ter objektov novejših in starih ČN  
*[<http://kremen.arso.gov.si/NVatlas>]*
- Slika 2: Reakcijski bazen za koagulacijo *[Monod, 1991]*.
- Slika 3: Kationski polimeri.
- Slika 4: Anionski polimeri.
- Slika 5: Neionski polimeri.
- Slika 6: Različni tipi mešal v reakcijskem bazenu za koagulacijo *[Droste, 1997]*.
- Slika 7: Situacija predlagane rešitve postavitve in dimenzij reakcijskih bazenov in lamelnega usedalnika variante ČN 1.
- Slika 8: Prečni prerez tipičnega skozitočnega lamelnega usedalnika.
- Slika 9: Protitočni usedalnik *[Letterman, 1999]*.
- Slika 10: Sotočni usedalnik *[Letterman, 1999]*.
- Slika 11: Skozitočni usedalnik *[Letterman, 1999]*.
- Slika 12: Različni tipi prefabriciranih lamelnih modulov *[Letterman, 1999]*.
- Slika 13: Lamelni skozitočni usedalnik *[Droste, 1997]*.
- Slika 14: Vpliv ozona na učinkovitost koagulacije pri odstranjevanju motnosti. Lepo je vidno zmanjšanje motnosti v času ozoniziranja vode *[Rakness, 2005]*.
- Slika 15: Oprema pri ozonizacijskem procesu *[Rakness, 2005]*.
- Slika 16: Notranjost kontaktnih komor *[Rakness, 2005]*.
- Slika 17: Prerez tipičnega peščenega filtra z označenimi sestavnimi deli *[Letterman, 1999]*.
- Slika 18: Slika bazena peščenega filtra. Na sliki se lepo vidi oprema v filtru: dovodni in odvodni kanali ter drenažni sistem na dnu *[Monod, 1991]*.
- Slika 19: Vpliv koagulacije na učinek filtracije *[Letterman, 1999]*.
- Slika 20: Penetracija mikroorganizmov v peščenih filtrih *[Letterman, 1999]*.
- Slika 21: Tipična sejalna analiza za silikatni pesek in antracit *[Letterman, 1999]*.
- Slika 22: Pot vode pri filtraciji v peščenem filtru *[Monod, 1991]*.
- Slika 23: Shematski prikaz filtrov z različnim številom slojev *[Letterman, 1999]*.
- Slika 24: Pranje zrnavega filtra s povratnim tokom vode *[Monod, 1991]*.
- Slika 25: Pranje peščenega filtra z vodo in zrakom *[Monod, 1991]*.

Slika 26: Prikaz skoka motnosti v filtrirani vodi po ustavitvi in zagonu filtra  
*[Letterman, 1999].*

Slika 27: Prikaz vezanja nečistoč na aktivno oglje *[Drev, 1999].*

Slika 28: Shematski prikaz postavitve membranskih modulov *[Dimitriou, 2005].*

Slika 29: Ultrafiltracijski moduli.

Slika 30: Hidravlični upor v membrani pri učinkovitem in neučinkovitem pranju membran  
*[Vickers, 2005].*

Slika 31: Hidravlični upor v membrani pri učinkovitem in neučinkovitem pranju membran po  
večih ciklih *[Freeman in Vernon, 2005].*

Slika 32: Prikaz območja čiščenja posamezne tehnologije in velikosti delcev, ki jih  
odstranjujemo *[Vickers, 2005].*

Slika 33: Detajlni diagram poteka koncentracije rezidualnega klora v odvisnosti od prisotnega  
dušika *[Letterman, 1999].*

Slika 34: Diagram poteka dezinfekcije s klorom *[Letterman, 1999].*

Slika 35: Elektromagnetni spekter z razširjeno lestvico ultravijoličnega sevanja *[Ravnikar,  
2004].*

## KAZALO PRILOG

Priloga 1: Pregledna situacija, ČN Mrzlek	M 1:5000
Priloga 2: Situacija 1, Obstoječe stanje	M 1:500
Priloga 3: Situacija 2, Varianta ČN 1	M 1:500
Priloga 4: Situacija 3, Varianta ČN 2	M 1:500
Priloga 5: Situacija 4, Varianta ČN 3	M 1:500
Priloga 6: Situacija 5, Varianta ČN 4	M 1:500
Priloga 7: Situacija 6, Varianta ČN 5	M 1:500
Priloga 8: Tehnološka shema, Varianta ČN 1	M 1:X
Priloga 9: Tehnološka shema, Varianta ČN 2	M 1:X
Priloga 10: Tehnološka shema, Varianta ČN 3	M 1:X
Priloga 11: Tehnološka shema, Varianta ČN 4	M 1:X
Priloga 12: Tehnološka shema, Varianta ČN 5	M 1:X

## POMEN KRATIC IN ZNAKOV

AC	Active carbon; aktivno oglje
AOX	Adsorbljivi organski halogeni
AWWA	American Water Works Association; Ameriško združenje, ki se ukvarja z vodo
CHX	Halogen substituirane monoogljikove spojine
Č	Črpališče
ČN	Čistilna naprava
GAC	Granular active carbon; aktivno oglje v zrnu
M	Merilo grafičnih prilog
NOM	Natural organic material; naravna organska materija
PAC	Powdered active carbon; aktivno oglje v prahu
Q	Pretok
THM	Trihalometani
TOC	Total organic carbon; celoten organski ogljik
UF	Ultrafiltracija
UV	Dezinfekcija z UV svetlobo, ki je ultravijolična svetloba
VH	Vodohran

## **1 UVOD**

Voda je osnovna življenska potrebščina. Pitna voda mora biti zdravstveno neoporečna, imeti mora dobre fizikalne in kemijske ter organoleptične lastnosti. Naloga zdravstvene hidrotehnike je potrošniku zagotoviti oskrbo s kvalitetno pitno vodo. Voda, ki bi jo lahko direktno distribuirali v vodovodno omrežje, je v naravi redka, zato je v veliko primerih potrebno črpamo vodo ustrezno obdelati in šele nato dostavljati potrošnikom.

V tem diplomskem delu sem obdelal možne tehnologije čiščenja surove vode v čistilni napravi Mrzlek. Primarna naloga je bila obdelati načine čiščenja iz tehničnega stališča, dodatno pa sem predlagane tehnologije tudi finančno ovrednotil.

### **1.1 IZHODIŠČA**

Vodni vir Mrzlek je glavni vir centralnega vodooskrbnega sistema mesta Nova Gorica, dela spodnje Vipavske doline in dopolnilni vir Gorice. Ostali vodni viri - Jerebica in Spodnji, Srednji in Zgornji Perivnik - imajo v primerjavi z njim zelo majhno izdatnost. Izvir Lijak je aktiven le ob visokih vodah, medtem ko je ob nizkih vodah skoraj celoten podzemni tok usmerjen proti Mrzleku.

Na centralni vodovodni sistem Nove Gorice bo v bližnji prihodnosti priključeno tudi območje Goriških Brd in Grgarja z okoliškimi naselji. Obstoječa čistilna naprava (ČN) bo zaradi tega dodatno obremenjena z nadaljnimi 50 l/s. Že danes je večino časa oteženo vzdrževanje obstoječe naprave, občasno pa se pojavijo tudi nezadovoljivi rezultati obratovanja. Zaradi navedenih težav in zaradi neizvedenih objektov za obdelavo odpadne

vode iz ČN, je potrebno izdelati sanacijo obstoječe naprave. Po izkušnjah upravljalca obstoječa ČN ne deluje optimalno. Namen diplomske naloge je optimiziranje neugodnega stanja, pri čemer smo vezani na obstoječ prostor, delno na objekte in tehnologijo. V nalogi sem obdelal več različnih variant linij čiščenja, ki so sestavljene iz različnih tehnoloških postopkov. Variante so ocenjene z različnimi ponderiranimi kriteriji. Zaradi neizrabljenosti celotne prostornine obstoječega 2000 m<sup>3</sup> vodohrana (VH), so predlagani ukrepi za njegovo boljše izkoriščanje.

Pri izdelavi naloge sem uporabljal delno ohranjeno projektno dokumentacijo, hidrogeološka poročila, analize vzorcev neobdelane in očiščene vode in strokovno literaturo, ki so navedeni na koncu poročila. Poleg tega sem upošteval tudi upravljalčeve izkušnje in sugestije. Manjkajoče podatke sem pridobil z meritvami na terenu in izmerami situacije v merilu M 1:500.

## 1.2 OPIS IN OGROŽENOST VODNEGA VIRA

Zaledje vodonosnika Mrzlek predstavljata Trnovski gozd in Banjška planota z obsežnim kraškim zaledjem. V vznožju Svete gore in Sabotina priteka podzemna kraška voda iz številnih razpok na obeh straneh Soče. V glavnem izvira na 18 mestih na razdalji 400 m. Dva pomembnejša izvira sta na desnem in dva na levem bregu Soče. Stalna sta predvsem na levem bregu, kjer je tudi postavljeno črpališče. Vodnih količin, ki se izlivajo naravnost v Sočo oz. akumulacijsko jezero HE Solkan, ni mogoče izmeriti. Ocenjeno je, da znaša sušni pretok 500 do 600 l/s, visokovodni pa 40 m<sup>3</sup>/s [Habič 1981]. Vode Mrzleka se v podzemlju počasi pretakajo in dolgo zadržujejo. Povprečni zadrževalni čas je nekaj mesecev do enega leta.

Z meritvami koncentracij tritija, izotopske sestave kisika v vodi ter ogljika v raztopljenem karbonatu je bilo ugotovljeno, da ima voda iz reke Soče občasno vpliv na zajeti izvir Mrzlek. Med enoletno analizo je prišlo do delnega vdora Soče v dveh primerih. V tem času je bilo razmeroma sušno obdobje z nizkimi pretoki Soče in izvirov. V ostalih primerih ni bilo vpliva Soče. Pri zmanjševanju izdatnosti črpaja od 320 l/s do 120 l/s je prišlo do

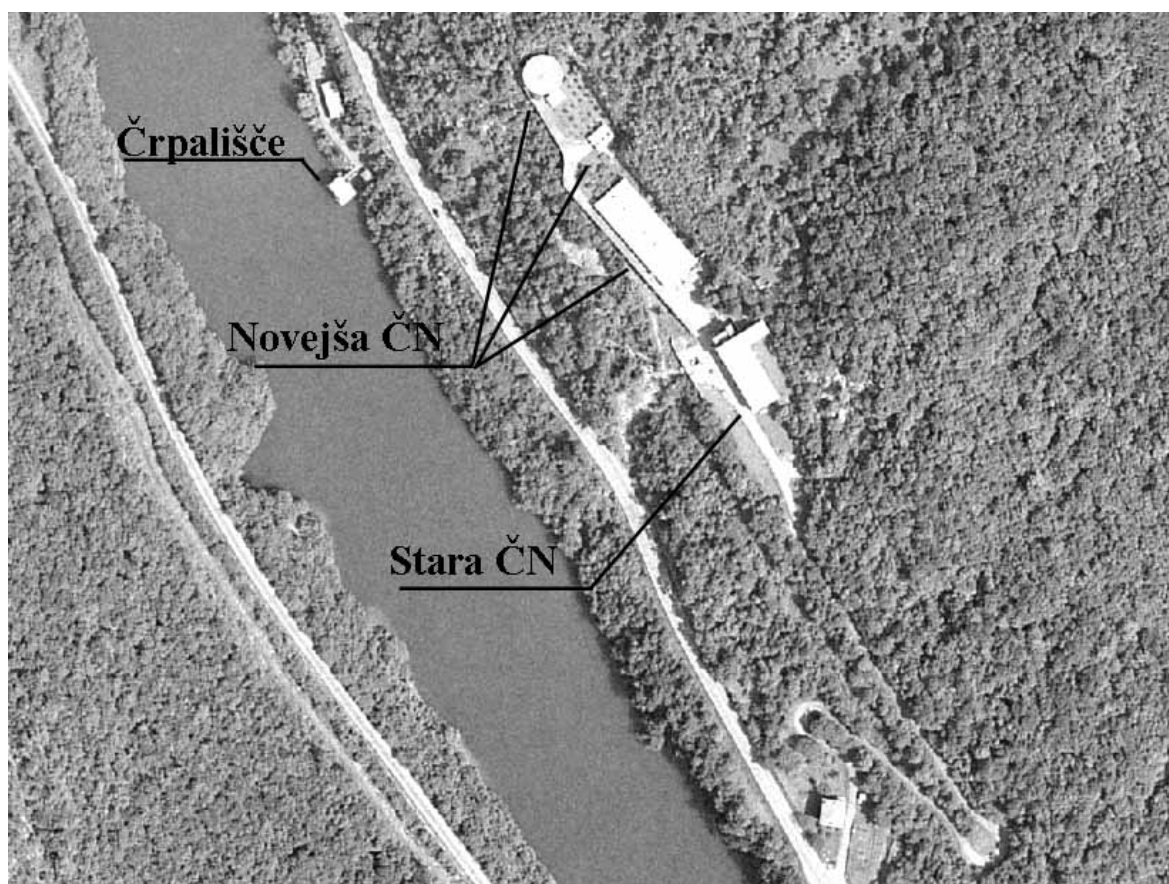
večanja vpliva površinske vode na zajetju (od 40 % do 90 %) [Pezdič, et al. 1987]. Kako dolgo ta vpliv traja, iz analiz ni razvidno. Po besedah upravljalca občutnejšega vpliva Soče na vodnem viru ni zaznati.

Kraško zaledje je relativno redko poseljeno. Zakonsko so urejena vodovarstvena območja. Večja naselja v zaledju so Ravnice, Grgar, Čepovan in Loka. Naselje Grgar se v celoti nahaja znotraj 2. vodovarstvenega območja Mrzleka. Izdelana sta projekta za kanalizacijo naselij Grgar in Ravnica. Prav tako je narejena študija kompletne rešitve kanalizacije na Banjaški planoti. Z izgradnjo kanalizacije v zaledju se bo zaščita vodnega vira pred onesnaženjem občutno izboljšala. V neposrednem vplivnem zaledju ni prisotne industrije. Potencialno nevarnost za njegovo onesnaženje predstavlja tudi glavna cestna povezava Posočja (zlasti odsek Solkan–Čepovan–Most na Soči z odcepi). Okoli črpališča je potrebno na kopnem urediti varstveni pas in prometno ureditev. Na vodni strani je potrebno urediti zaščito vira s potopnimi stenami, ki bi potencialno onesnaženje na gladini Soče odrinile stran od vira. Pred leti se je gorvodno od črpališča v Sočo brez hujših posledic že prevrnila cisterna z bencinom, iz česar lahko sklepamo, da je vodni vir s strani ceste močno ogrožen, vendar je tveganje za onesnaženje majhno.



## 2 OPIS OBSTOJEČEGA STANJA

Obstoječo napravo za tretiranje vode iz zajetja Mrzlek sestavljajo črpališče, objekti stare ČN in objekti novejše ČN. Črpališče se nahaja na levem bregu Soče. Sestavljajo ga štiri črpalke, ki črpajo vodo do čistilne naprave. Tehnološko linijo stare naprave, ki je bila zgrajena leta 1935, sestavljajo naslednji tehnološki deli: umirjevalni bazen, dodajanje koagulantov, dva pravokotna klasična usedalnika in trije okrogli gravitacijski peščeni filtri.



Slika 1: Pregledna situacija črpališča ter objektov novejše in stare ČN [<http://kremen.arso.gov.si/NVatlas>]

Tehnološko linijo novejših naprav, ki je bila zgrajena pred dvajsetimi leti, pa sestavljajo naslednji postopki: dodajanje koagulanta, okrogel dinamični usedalnik, oblikovan kot akcelerator, ozonizatorji s štirimi kontaktnimi komorami, trije gravitacijski peščeni filtri in dva gravitacijska filtra z aktivnim ogljem (AC -angl. active carbon). Voda nato iz obeh ČN odteka v 2000 m<sup>3</sup> VH. Pred izpustom v vodovodno omrežje je izvedena še dezinfekcija z ultravijoličnimi (UV) žarnicami in dodajanje plinskega klora za rezidual. Objekti za obdelavo blatne linije obeh ČN niso izvedeni.

## 2.1 ČRPALIŠČE

V črpališču so trije vodnjaki, v katerih so montirane štiri vodnjaške večstopenjske črpalke. Talna plošča je na koti 79,38 m n. m. Črpalke so razporejene tako, da sta v srednji vodnjak vgrajeni dve črpalčki (Č III in Č IV), v oba stranska vodnjaka pa po ena črpalčka (Č I in Č II). Črpalke so naslednjih karakteristik:

- Č I  $Q = 175$  l/s,  $h = 92$  m z 250 kW motorjem
- Č II  $Q = 175$  l/s,  $h = 92$  m z 250 kW motorjem
- Č III  $Q = 120$  l/s,  $h = 92$  m z 200 kW motorjem
- Č IV  $Q = 80$  l/s,  $h = 92$  m s 132 kW motorjem

Maksimalna zmogljivost črpališča je približno  $Q_{\max} = 550$  l/s. Črpalke črpajo vodo na koto 145 m n. m. Vse črpalke so priključene na skupni tlačni cevovod  $\varnothing 700$  mm, ki je vgrajen od črpalnice do ČN. Pri črpanju 250 l/s je v njem hitrost 0,65 m/s. Črpalna depresija zaradi črpanja znaša do 60 cm.

## 2.2 STARA ČN

Stara ČN obsega glavni objekt s tlorisom približno 810 m<sup>2</sup> (37,55 m x 21,55 m,  $h = 10,05$  m) in VH za pralno vodo, ki je zgrajen v bližini. V glavnem objektu se nahaja tudi VH kapacitete 2.000 m<sup>3</sup>, ter dezinfekcijska linija. Stara čistilna naprava obratuje s pretokom  $Q = 90$  l/s. Tehnološko linijo stare naprave sestavljajo naslednji tehnološki deli: dodajanje koagulanta – aluminijev sulfat ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ); ki se dozira pred usedalnik;

pravokotni klasični usedalnik (dimenzij  $l = 25$  m,  $\check{s} = 5$  m,  $h = 4$  m) s površinsko obremenitvijo  $v_0 = 1,62$  m/h; trije okrogli gravitacijski, hitri, peščeni filtri (dimenzij  $r = 3,2$  m,  $h = 2,5$  m). Skupna površina filtrov je  $S = 97,2$  m<sup>2</sup>, hidravlična obremenitev je  $v_0 = 3,3$  m/h in zadrževalni čas približno  $t = 18,2$  min. Debelina sloja kremenčevega peska je 1,2 m in je različnih granulacij:

- 81 cm ... 0,2–1,5 mm,
- 11 cm ... 5,0–8,0 mm.

Podporni sloj ima naslednje karakteristike:

- 11 cm ... 8,0–15,0 mm,
- 17 cm ... 25,0–100 mm.

Prečiščena voda odteka v obstoječ 2.000 m<sup>3</sup> VH (dimenzij  $l = 51$  m,  $\check{s} = 10$  m,  $h = 4$  m), ki se nahaja v kleti objekta stare ČN. Od tu odteka preko dezinfekcije (UV in plinski klor za rezidual) v vodovodno omrežje.

### 2.3 NOVEJŠA ČN

Novejša ČN je bila dimenzionirana leta 1984 in zgrajena leta 1986. Sestavljajo jo trije ločeni objekti: okrogel dinamični usedalnik ( $r = 9,25$  m,  $h = 7,5$  m), objekt s kontaktnimi komorami za ozon ( $d = 8,5$  m,  $\check{s} = 3$  m) in glavni objekt s tlorisom približno 1.180 m<sup>2</sup> (64,63 m x 18,3 m), kjer so poleg filtrov tudi komandni prostor, pisarna, skladišče za koagulant, posode za mešanje koagulanta, prostor za črpalke in ozonizatorji. Po projektu predvideni drugi usedalnik ni bil izveden, ker ni bil zaznan močnejši vpliv Soče.

Novejša ČN je dimenzionirana na pretok 255 l/s, obratuje pa s 160 l/s. Vodi se pred vstopom v usedalnik po potrebi dodaja koagulant – aluminjijev sulfat ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ). Koagulant se meša v posebnih posodah, ki se nahajajo v novejši ČN. Koagulant dozirajo ročno. Koncentracija raztopine je odvisna od motnosti surove vode. Usedalnik je oblikovan kot okrogel dinamični usedalnik, sestavljen iz reakcijskega dela ( $r = 3,15$  m,  $h = 4$  m), ki ga obdaja prostor za lebdnje kosmičev ( $r_{not} = 4,05$  m,  $r_{zun} = 9$  m,  $h = 4$  m). Površinska obremenitev usedalnika je  $v_0 = 2,84$  m/h.

Iz usedalnika odteka voda gravitacijsko v bazen s petimi kontaktnimi komorami. V prvo in tretjo se vpihuje  $O_3$ . Velikost treh komor je 2 x 3,5 m, ostalih dveh pa 1 x 3,5 m. Globina vode v komorah je 4,5 m. Nad kontaktnimi komorami je pred izpustom v okoliški zrak montiran uničevalec  $O_3$ , katerega učinkovitost že dalj časa ni bila kontrolirana. Ozonirana voda potem odteka na tri gravitacijske, hitre, peščene filtre. Dimenzija enega filtra je 6,7 m x 7,7 m s tlorisno površino peska 45 m<sup>2</sup>. Skupna površina peščenih filtrov je  $S = 135 \text{ m}^2$ . Povprečna hidravlična obremenitev filtra je  $v_0 = 4,2 \text{ m/h}$ . Debelina kremenčevega peska je 1,3 m in je različnih granulacij:

- 15 cm ... 0,1 – 0,7 mm,
- 65 cm ... 0,7 – 1,3 mm,
- 30 cm ... 3,0 – 5,0 mm.

Podporni sloj ima naslednje karakteristike:

- 20 cm ... 5,0 – 8,0 mm.

Dva gravitacijska filtra z AC ne obratujeta. Iz uporabe ju je izločil operater brez tehničnih razlogov. Tlorisna dimenzija enega filtra je 6,7 m x 7,7 m in površina  $S = 45 \text{ m}^2$ . Skupna površina filtrov z AC je  $S = 90 \text{ m}^2$  s hidravlično obremenitvijo  $v_0 = 6,3 \text{ m/h}$ . Debelina sloja je 1 m. Zadrževalni čas je približno 9,5 min.

Tudi od tu odteka prečiščena voda v 2000 m<sup>3</sup> VH in iz njega preko dezinfekcije v omrežje.

## **2.4 ANALIZE VZORCEV SUROVE IN OBDELANE VODE**

Študiji so priložene reprezentativne (biološke, fizikalne, kemične, organoleptične) analize surove in obdelane vode.

Surova voda je iz črpališča po posebni cevi odvedena v objekt novejši ČN, kjer je urejeno mesto za odvzem vzorcev za analizo vode. Obdelano vodo se za analizo odvzema v stari ČN za UV napravami. Redno se meri temperatura, pH in redoks potencial. Ostale analize

se opravljajo v laboratoriju. Vzorce se jemlje tudi na omrežju, kjer se poleg naštetega meri tudi prisotnost trihalometanov.

#### **2.4.1 Mrzlek**

Temperatura vode v izvirih Mrzleka je razmeroma stalna in se giblje med 8 in 10 °C s srednjo vrednostjo 9,2 °C, pH je 7,3–8,1. Voda je neobarvana, brez vonja in je dobro nasičena s kisikom. Obremenitev s snovmi organskega izvora je rahlo povišana, kar kaže kemijska poraba kisika (KPK) in vsebnost raztopljenega organskega ogljika (TOC). Snov organskega izvora je v vodi verjetno prisotna kot ostanek humniskih kislin in drugih organskih nečistoč, ki lahko dajo vodi tudi vonj in okus. Te snovi je možno delno odstraniti s koagulacijo (delno se adsorbirajo na površino flokul) ali pa v celoti z aktivnim ogljem. Z vnašanjem kisika v vodo se z oksidacijo prav tako delno odstranijo, kar lahko vpliva na zmanjšanje vonja in okusa. Voda je malo obremenjena z dušikovimi spojinami (nizke vsebnosti amonija, nitrita in nitrata) in je dobrega kemijskega stanja. Voda vsebuje nizko vsebnost tris(klorpropil)fosfata, tributifosfata in absorbiranih organskih halogenov – AOX. Prisotne so tudi nizke vsebnosti bakra, kroma in živega srebra. Vendar so vsi naštetih parametri pod predpisanimi vrednostmi.

Vsebnost železa v surovi vodi variira in dosega tudi vrednosti 0,170 mg/l (24. 11. 1998), kar je blizu mejnim vrednostim (0,2 mg/l).

Motnost vode je večinoma znotraj predpisanih vrednosti. Občasno, ob močnejših deževjih, pa motnost preseže mejne vrednosti in doseže vrednosti tudi do 10 NTU (15.9.1998). Po besedah upravljalca občasno preseže 30 NTU. Pri motnosti je potrebno ugotoviti, ali je posledica organskih koloidnih delcev ali anorganskih. Verjetno gre za mešanico obeh. Motnost organskega izvora je bolj problematična kot motnost anorganskega izvora. Pri organskih in anorganskih delcih je možna uporaba koagulantov, vendar praviloma ne gre za enake koagulate. Okvirno sestavo je možno ugotoviti z žarino, saj organski delci skoraj v celoti razpadejo, anorganski delci (koloidni delci gline itd.) pa v glavnem ostanejo.

Vsebnost aluminija variira in je večinoma znotraj mejnih vrednosti. Na izlivki novejše ČN je bilo izmerjeno 235 µgAl/l (10. 10. 2001), kar pa je lahko posledica nepopolne koagulacije. Vrednost aluminija istega dne na izlivki v stari ČN pred UV je bila v mejah. Normativ za prisotnost aluminija v vodi je 0,2 mg Al/l.

Surova voda je mikrobiološko vedno neprimerna. V vodi so prisotne koliformne bakterije, koliformne bakterije fekalnega izvora, streptokoki fekalnega izvora, Escherichija coli, Enterokoki, Clost. perfringens s sporami MF [ZZV 1998–20005]. Meritve parazitov so pokazale, da je bila Giardia lamblia vedno prisotna v surovi vodi, v očiščeni pa enkrat. Na Cryptosporidium voda ni bila testirana. Voda je mikrobiološko vedno neprimerna, kar kaže na prisotnost fekalnega onesnaženja.

Obdelana voda večinoma zadostuje predpisom, občasno pa je mikrobiološko neprimerna tudi po dezinfekciji.

#### **2.4.2 Soča**

Rezultati analiz kažejo, da Soča ni izraziteje kontaminirana s kovinami oz. organskimi polutanti. V sedimentih pa se počasi akumulirajo kovine – arzen, kadmij, krom, svinec in cink ter mineralna olja in organske snovi. Količine nihajo iz leta v leto [Šaver in Hojak 1989]. Voda je bakteriološko onesnažena. Kemijsko stanje vodotoka je opredeljeno kot dobro [ARSO 2003].

Koncentracije kovin in mineralnih olj v peščenih filtrih vodarne Mrzlek so nižje kot v rečnih sedimentih. Koncentracije kovin (kadmij in cink) in mineralnih olj so v pesku po uporabi peščenih filtrov višje kot v pesku v novo položenih peščenih filtrih, oziroma še neuporabljenih filtrih. Koncentracije ostalih kovin so pod mejo določljivosti [Šaver in Hojak 1989].

## 2.5 MOŽNI VZROKI ONESNAŽENOSTI IN NJENO ODSTRANJEVANJE

- Mikrobiološka onesnaženost

V surovi vodi je prisotnost mikrobiološke onesnaženosti posledica zajemanja kraškega vodnega vira. Prisotnost v obdelani vodi je lahko posledica nerednega ali nezadovoljivega pranja ali celo posledica same konstrukcije filtrov.

Za odstranjevanje mikrobiološkega onesnaženja je najprimernejša dezinfekcija. Samo dezinfekcija s klorom ne zadostuje, ker praviloma slabo odstranjuje parazite. Zato je priporočljiva kombinirana dezinfekcija.

- Motnost

Motnost na splošno povzročajo lebdeči drobni vidni delci, ki ovirajo prehajanje svetlobe skozi tekočino (fini peseki, glina ...). Povečana koncentracija neraztopljivih snovi (koloidni in lebdeči delci) v vodi motnost še povečuje.

- Aluminij

Aluminij je najbolj pogosta kovina v zemeljski skorji. V vodi je prisoten zaradi geološke sestave okoliških kamnin, večje koncentracije pa se verjetno pojavljajo zaradi nepopolne koagulacije oziroma neustreznega doziranja koagulanta ter zaradi neustreznega usedanja in filtracije.

## **3 TEORIJA**

V tem poglavju bom teoretično opisal postopke čiščenja pitne vode, ki jih predlagam pri sanaciji ČN Mrzlek. Na koncu podpoglavja so opisani tudi postopeki dimenzioniranja prve izmed predlaganih variant – ČN 1 (glej poglavje 4.1).

### **3.1 KOAGULACIJA IN FLOKULACIJA**

#### **3.1.1 Teoretične osnove**

Koagulacija je proces nevtralizacije oz. spremembe elektro-kemijskih lastnosti fino disperzirane oz. raztopljene snovi, predvsem z nevtraliziranjem ali reduciranjem površinskega električnega naboja ali z obarjanjem. Tako se molekulam spremeni topnost. Vodi se pri koagulaciji doda kemikalijo (t. j. koagulant) z namenom, da se mali suspendirani delci dotaknejo in združijo skupaj v večje delce (flokulacija), ki nato potonejo na dno (sedimentacija) ali se odstranijo na filtrih. Kaoagulacija je eden ključnih procesov v klasični liniji čiščenja vode, saj je od učinkovitosti koagulacije odvisna tako sedimentacija kot filtracija na peščenih filtrih. Kot predčiščenje se koagulacijo uporablja tako pri konvencionalnem čiščenju kot tudi v nekaterih primerih pri membranski filtraciji (glej poglavje 3.6). Flokulacija je proces združevanja ali zlepljanja koaguliranih delcev v kosme in rast kosmov. Proces flokulacije sledi koagulaciji.

Proces koagulacije je odvisen od vrste onesnaženja. Lahko se izvede z:

- oksidacijo,
- biokemijsko oksidacijo,

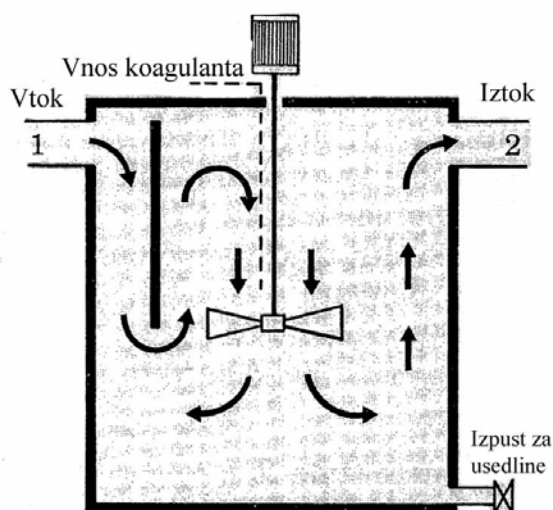


- elektrolitsko nevtralizacijo koloidnih delcev.

Na proces koagulacije in flokulacije vplivajo:

- električna nabitost koloidnih delcev, ki je odvisna od pH vrednosti in količine ionov v vodi,
- vrste in velikosti suspendiranih koloidnih snovi,
- pH vode,
- temperatura vode,
- tip, koncentracija in natančnost priprave koagulanta in flokulanta,
- kontaktni čas,
- gradient hitrosti vode pri doziranju in mešanju koagulanta.

Ti parametri vplivajo na hitrost formiranja flokul in na njihovo velikost. V splošnem velja, da potrebna količina koagulanta narašča s količino suspendirane koloidne snovi. Če nastanejo zelo majhne flokule, je bolje, da flokulanta sploh ne dodajamo, ker ne bo sedimentiral in se pri filtraciji s peščenimi filtri težko zadrži. Z dodajanjem specialnih organskih polimernih koagulantov se v primeru nastanka zelo majhnih flokul le-te povežejo v večje delce, ki lažje sedimentirajo in z njimi po nepotrebnem ne obremenjujemo filtrov.



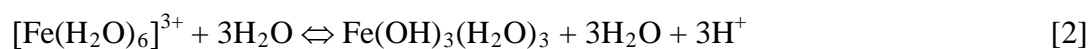
Slika 2: Reakcijski bazen za koagulacijo [Monod, 1991].

S koagulacijo in flokulacijo se odstranjuje:

- suspendirane in raztopljene snovi v širokem obsegu frakcij (motnost): ilovica, delci organskega izvora, itd.;
- obarvanost; uspešnost je odvisna od snovi, ki je povzročitelj obarvanosti; obarvanost zaradi koloidnih snovi se lahko odstrani do 100%, medtem ko je uspeh pri barvi, ki je posledica raztopljenih snovi, manjši;
- železo in mangan;
- fosfate;
- delno mikroorganizme;
- nekatere vrste radioaktivnih snovi [Rismal, 1995].

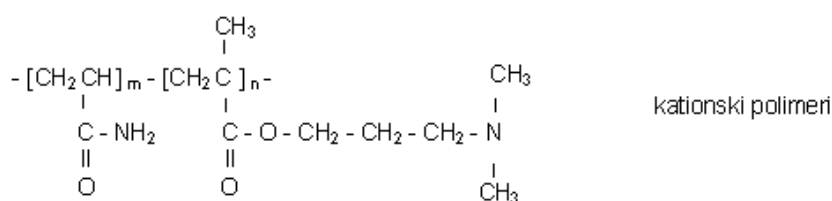
Kot koagulant je možno uporabljati spojine na bazi kovinskih ionov ali polielektrolite. Najbolj pogosto uporabljen je aluminijev hidroksid  $[(Al_2(SO_4))_3 \times 18H_2O]$  in za njim železov klorid  $[FeCl_3]$ . Polielektroliti se ne uporabljajo kot primarni koagulanti, temveč se jih v malih količinah uporablja predvsem kot pospeševalce flokulacije. Prednost železovega klorida je manjša strupenost železa v primerjavi z aluminijem. Poleg tega je z okoljevarstvenega vidika boljše, če se uporablja klorid namesto sulfata. Pri odpadnih vodah, ki se pojavijo pri čiščenju filtrov, lahko predstavlja  $SO_4^{-2}$  problem, ker zanj veljajo omejitve pri izpustu, za klorid pa ni omejitev. Zaradi sivkaste barve aluminijevih flokul se prisotnost slednjih lažje prikrije kot železovih rjavih flokul, ki so bolj vidne. Prav indikacija rjavih delcev je lahko ena izmed indentifikacij za premalo učinkovito odstranjevanje delcev, kar je zelo koristna pomoč pri zagotavljanju zahtev standarda HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points). Med koagulacijo se lahko dodaja tudi aktivno oglje v prahu, ki adsorbira organske spojine in nekatere pesticide. Iz vode se nato odstrani s pomočjo flokulacije pri sedimentaciji in/ali na filterjih.

Železovi ( $Fe^{3+}$ ) in aluminijevi ( $Al^{3+}$ ) ioni tvorijo z vodo komplekse tipa  $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$  ali  $[Al_2(H_2O)_6]^{3+}$ .



Z dodajanjem železovega ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ali aluminijevega ( $\text{Al}^{3+}$ ) iona v vodo potekata reakciji [1] in [2] v desno. Vrednost pH vode z dodajanjem  $\text{Fe}^{3+}$  ali  $\text{Al}^{3+}$  pada. Kot končni produkt koagulacije dobimo praktično netopen železov (III) ali aluminijev (III) hidroksid.

Razni tipi polimernih flokulacijskih sredstev, ki lahko izboljšajo koagulacijo koloidnih delcev iz vode so prikazani v spodnjih slikah:



Slika 3: Kationski polimeri.



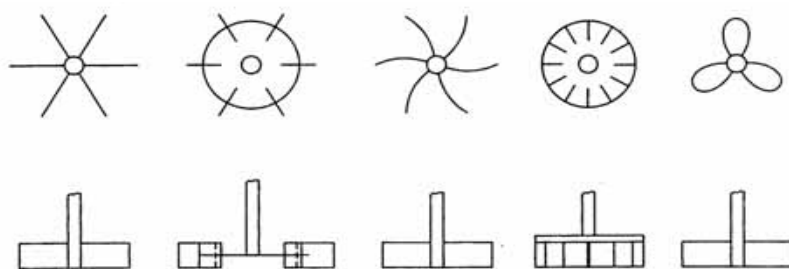
Slika 4: Anionski polimeri.



Slika 5: Neionski polimeri.

Pri stiku suspendiranih in koloidnih delcev z nabitimi kovinskimi kationi ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) pride do nevtralizacije naboja in nastanka flokul. Skupaj z nastalimi flokulami Fe (III) ali Al (III) hidroksida izpadejo iz odpadne vode tudi suspendirani in koloidni delci. Nastale flokule odstranimo iz odpadne vode s pomočjo sedimentacije, flotacije ali filtracije.

Zelo pomembno je natanko določiti proces doziranja in mešanja. Potrebno je opravljati neprekinjene meritve suspendirane snovi v surovi vodi, predvsem naravno organsko materijo (NOM –angl.: natural organic material) in na podlagi meritev določati potrebno dozo koagulanta [Letterman 1999]. Odstranjevanju NOM je potrebno posvetiti posebno pozornost saj predstavlja hrano mikroorganizmom, poleg tega pri dezinfekciji s klorom reagira in tvori trihalometane (glej poglavje 3.7.1). Vodo je potrebno po dodanem koagulantu dobro premešati, s čimer se kemikalija dobro razporedi v vodi. To dosežemo z zelo intenzivnim, a kratkotrajnim mešanjem. Nato pa je potrebno v bazenu, kjer poteka flokulacija, poskrbeti za počasno gibanje vode, s čimer ustvarimo zadostno število kontaktov med koaguliranimi in že flokuliranimi delci, poleg tega je z mešanjem potrebno preprečiti usedanje flokul. To mešanje ne sme biti prehitro, saj se lahko v drugačnem primeru flokule trgajo.



Slika 6: Različni tipi mešal v reakcijskem bazenu za koagulacijo [Droste 1997].

Koagulaciji s flokulacijo običajno sledi sedimentacija in/ali filtracija na peščenih filtrih ali membranska filtracija, kjer se odstranijo koagulirani delci. Tudi v očiščeni vodi je potrebno spremljati koncentracije snovi, ki se jih odstranjuje iz vode. S temi podatki se nato spremlja uspešnost samega postopka in kontrolira količino potrebnega koagulanta. Dozo koagulanta je potrebno neprestano optimizirati, saj se s časom spreminja tako kvaliteta surove vode kot tudi njene fizikalne lastnosti (temperatura, pH ...) in s tem tudi optimalna koncentracija koagulanta [Letterman 1999]. Za uspešen potek koagulacije je potreben usposobljen in izkušen upravljalec z ustrezno opremo.

Optimalna koncentracija koagulanta je najpomembnejši faktor za zagotavljanje dobrega odstranjevanja bakterij, spor, virusov in praživali s sedimentacijo in filtracijo. Nepopolna

koagulacija in/ali flokulacija sta bili vzrok za nekatere izbruhe hidričnih bolezni, kot na primer izbruh kriptosporidioze leta 1987 v ameriškem Carrolltonu [Ravnikar, 2004]. Pri upravljanju se lahko na več načinov vpliva na učinkovitost čiščenja. Slaba učinkovitost čiščenja je lahko posledica:

- spreminjanja pretoka skozi ČN,
- neprimerne doze,
- slabe kontrole postopka z nezadostnim monitoringom,
- razpadanja že formiranih flokul,
- nepravilnega in nezadostnega mešanje koagulanta,
- nepravilnega odstranjevanja biološkega blata [Ravnikar, 2004].

### 3.1.2 Dimenzioniranje

Pri dimenzioniranju novih reakcijskih bazenov sem bil omejen s prostorom, kajti uporabiti sem želel že obstoječe objekte. Zato sem predvidel predelavo obstoječega klasičnega usedalnika dolžine  $l = 25$  m, širine  $\check{s} = 5$  m in globine  $h = 4$  m. Na prostoru sedanjega usedalnika bosta zgrajena lamelni usedalnik, ki bo manjših dimenzij kot obstoječ klasični, in reakcijski bazeni za koagulacijo in flokulacijo. Najprej sem zdimentzioniral lamelni usedalnik (glej poglavje 3.2.1) in nato v del bazena, ki je ostal na razpolago, postavil reakcijske bazene. S tem sem bil že na začetku prostorsko omejen. V vsakem usedalniku bo zgrajena ena linija s tremi bazeni, dva manjša kvadratna bazena enake tlorisne površine in eden večji bazen. Prvi bazen bo služil za dodajanje koagulanta, drugi bazen bo služil za dodajanje pomožnega koagulanta ali popravljanje pH in tretji, umirjevalni bazen v katerem se bodo tvorile flokule.

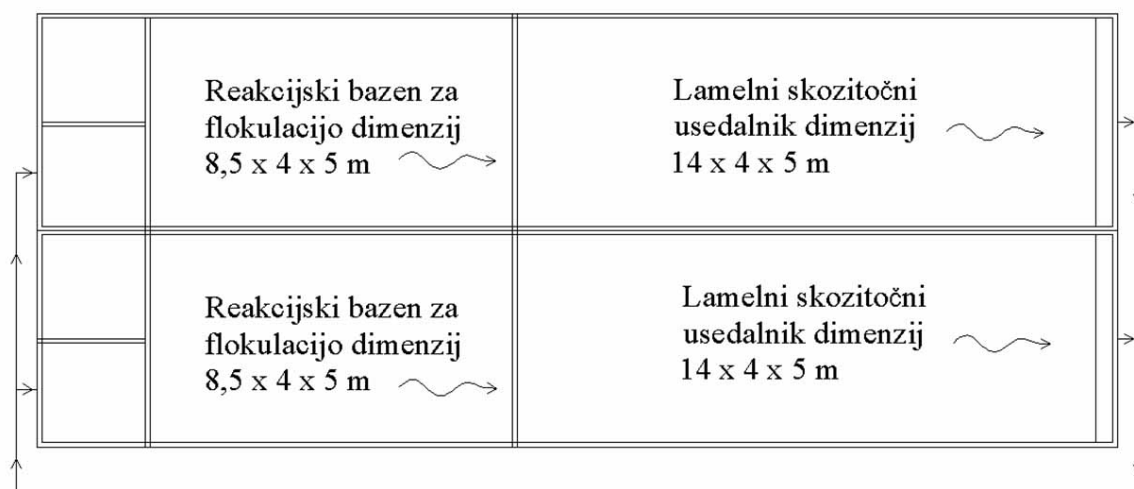
V prvem delu usedalnika bosta vzporedno zgrajena dva kvadratna bazena dimenzij  $2,4 \times 2,4$  m (glej sliko 7). Potrebno globino sem izračunal s pomočjo zadrževalnega časa  $t$ , ki je potreben, da se koagulant razporedi po celotnem volumnu. Zadrževalni čas za hitro mešanje se giblje med 10 do 30 s. Po nekaterih študijah pa je zadrževalni čas daljši, tudi do nekaj minut [Dar Lin, 2001]. Privzel sem zadrževalni čas  $t = 90$  s pri pretoku  $Q = 150$  l/s (polovični pretok). Iz tega sledi:

$$t = \frac{V}{Q} \Rightarrow V = t \cdot Q = 90s \cdot 150l / s = 13500l = 13,5m^3 \quad [3]$$

$$h = \frac{V}{S} = \frac{13,5m^3}{5,76m^2} = 2,34m \quad [4]$$

kjer je V volumen reakcijskega bazena (m<sup>3</sup>) in S površin bazena (m<sup>2</sup>). Iz izračunanega privzamem h = 2,5 m. Končne dimenzije prvih dveh bazenov so š = l = 2,4 m, h = 2,5 m in V = 14,4 m<sup>3</sup>.

Dva reakcijska bazena za koagulacijo  
 dimenzij 2,4 x 4 x 5 m



Slika 7: Situacija predlagane rešitve postavitve in dimenzij reakcijskih bazenov in lamelnega usedalnika variante ČN 1.

S pomočjo hitrostnega gradienta G, ki sta ga predlagala Camp in Stein (1943), se izračuna potrebna moč motorja v bazenu. Vrednost hitrostnega gradienta za hitro mešanje se v literaturi razlikuje in se giblje med 400 in 1000 s<sup>-1</sup> [Monod, 1991] ter med 3000 in 5000 s<sup>-1</sup> [Lin, 2001].

$$G = K \cdot \sqrt{\frac{P}{V}} \Rightarrow P = \frac{G^2 \cdot V}{K^2} = \frac{600^2 / s \cdot 14,4m^3}{27,6^2} = 6805W = 6,8kW \quad [5]$$

kjer je  $G$  hitrostni gradient ( $s^{-1}$ ),  $P$  je moč mešala ( $W$ ),  $K$  je koeficient podan v odvisnosti od temperature [Monod, 1991].

Preglednica 1: Tabelirana vrednost koeficienta  $K$  v odvisnosti od temperature [Monod, 1991].

Temperatura ( $^{\circ}C$ )	$K$
0	23,6
5	25,6
10	27,6
15	29,6
20	31,5
30	35,4
40	38,9

V bazenu za flokulacijo se izvaja počasno mešanje, ki mora zagotoviti dovolj kontaktov med delci in preprečiti usedanje delcev. Velikost hitrostnega gradienta se pri flokulaciji giblje med 20 do 70  $s^{-1}$ , lahko celo do 100  $s^{-1}$  [Monod, 1991]. Zadrževalni čas se giblje med 20 do 30 min.

Za reakcijski bazen za flokulacijo je, poleg bazenov za koagulacijo in lamelnega usedalnika, ostalo še 8,5 m dolžine bazena. Volumen bazena znaša:

$$V = l \cdot š \cdot h = 8,5m \cdot 5m \cdot 4m = 170m^3 \quad [6]$$

Zadrževalni čas v bazenu je:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{170m^3}{0,15m^3/s} = 1133s = 18,9min \quad [7]$$

Zadrževalni čas naj bi se gibal med 20 do 30 min. Izračunani zadrževalni čas  $t = 18,9$  min je dovolj blizu, da privzamem dimenzije bazena. Hitrostni gradient sem izbral  $G = 30 s^{-1}$ .

Moč mešala izračunamo po isti formuli kot pri hitrem mešanju z upoštevanjem karakteristik za flokulacijo:

$$G = K \cdot \sqrt{\frac{P}{V}} \Rightarrow P = \frac{G^2 \cdot V}{K^2} = \frac{30^2 / s \cdot 170m^3}{27,6^2} = 200W \quad [8]$$

### 3.2 SEDIMENTACIJA

Sedimentacija je postopek čiščenja vode, pri katerem se iz vode odstranjuje trdne usedljive snovi. Delci, težji od vode, tonejo proti dnu usedalnika, kjer se usedejo na dno, od koder se jih nato odstrani (posesa, postrga itd.) in odpelje na deponijo. Postopek poteka naravno za vse delce, ki so težji od vode. Različno težki delci različno hitro tonejo proti dnu, zato se pri snoveh, ki se z naravnim procesom zelo počasi usedajo, s koagulacijo in flokulacijo ter s kemijskim obarjanjem pospeši usedanje. Sama sedimentacija ni zadostna za pripravo pitne vode in je namenjena predvsem razbremenjevanju naslednjih faz čiščenja [Rismal, 1995].

Hitrost usedanja je odvisna od:

- vrste toka vode,
- viskoznosti vode (ta pa od temperature),
- gostote delcev in premera delcev [Gregory, R., et al., 1999],
- koncentracije delcev.

Sedimentacija se izvaja v posebnih za sedimentacijo prirejenih bazenih. Zelo pomembno je zagotoviti enakomeren in laminaren tok vode pri majhnih hitrostih. Predčiščenje s koagulacijo ima zelo velik vpliv na hitrost usedanja. Koagulirana suspenzija se bolje useda, saj so koagulirani delci večji in težji. Poleg tega se hitrost tonjenja flokul z globino večja, saj hitrejša (težje) flokule dohitevajo počasnejše, se sprijemajo in združujejo, tako postajajo masivnejše ter še hitreje tonejo zaradi manjšega upora, ki je odvisen od oblike in površine.



Najpomembnejši parameter pri projektiranju horizontalnih usedalnikov je površinska obremenitev usedalnika ( $v_o$ ), ki jo računamo:

$$v_o = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{B \cdot L} \quad [9]$$

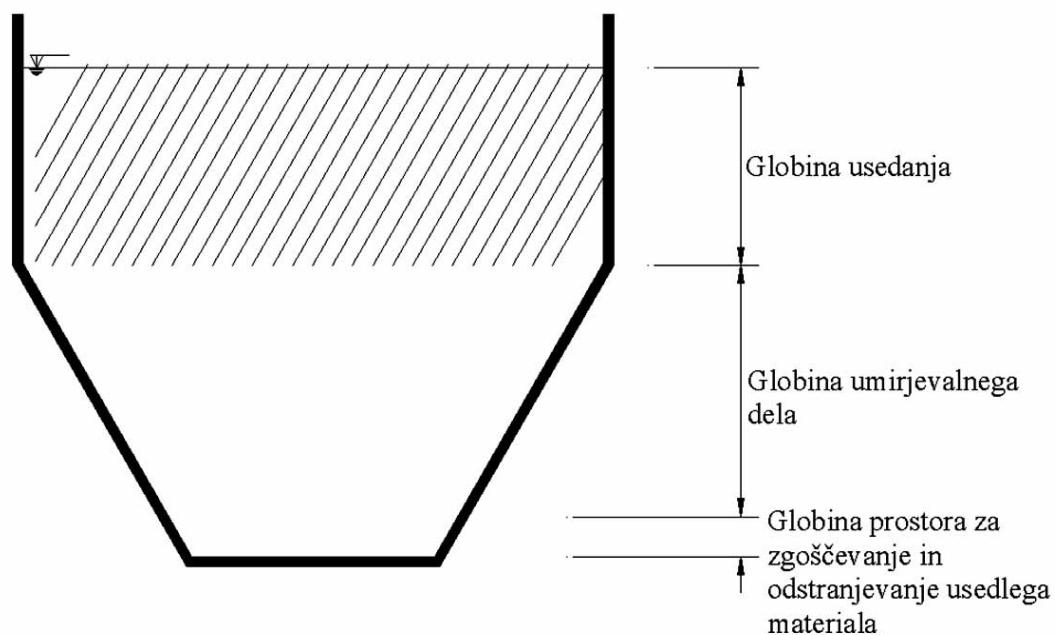
Prav tako je potrebno upoštevati razmerji:

$$L/H = 20-40 \quad [10]$$

$$L/B = 2-4 \quad [11]$$

Kjer je  $Q$  pretok skozi usedalnik,  $S$  tlorisna površina usedalnika, ki je produkt širine  $B$  in dolžine  $L$ , in  $H$  je globina usedalnika [Rismal, 1995]. Globine usedalnikov se običajno gibljejo med 2 in 5 m. Pri globini usedalnika je potrebno upoštevati globino usedanja, globino umirjevalnega dela in globino kosinusno nagnjenega dna, kjer se zgoščuje usedli material in od koder se ga odstranjuje (glej sliko št. 8). Samo odstranjevanje usedlega materiala iz dna ne sme motiti usedanja delcev. V starih ČN se je usedalnike čistilo ročno, danes pa je čiščenje avtomatizirano in kontinuirano. Sam strojni del zavzame določeno višino, odvisno od izvedbe, kar je potrebno upoštevati pri dimenzioniranju.

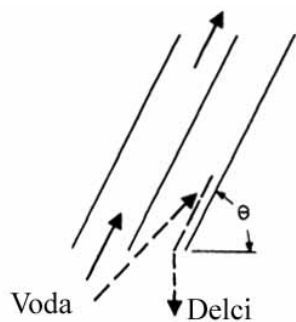
Z razvojem smo dobili bolj učinkovite usedalnike v različnih izvedbah, kot na primer lamelni ali horizontalni krožni usedalniki. Takšni usedalniki so učinkovitejši kot klasični usedalniki.



Slika 8: Prečni prerez tipičnega skozitočnega lamelnega usedalnika.

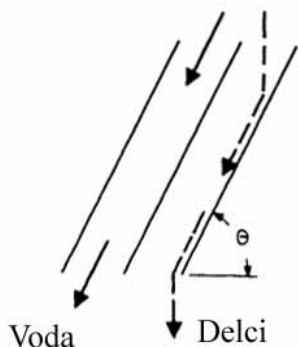
Pri lamelnih usedalnikih zmanjšamo pot usedanja delca do dna. S tem se zmanjša tudi čas usedanja in potrebna dolžina usedalnika. Lamelni usedalniki se ločijo po smeri toka skozi lamele. Poznamo tri vrste lamelnih usedalnikov:

- protitočni,



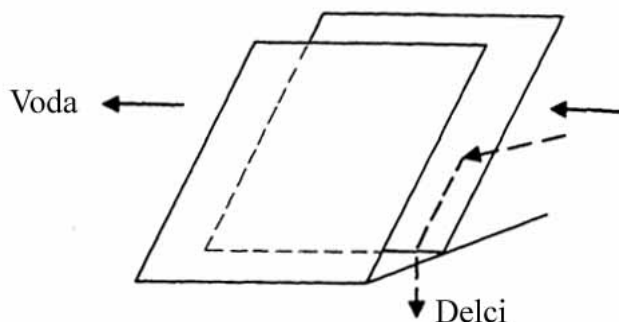
Slika 9: Protitočni usedalnik [Letterman 1999].

- sotočni,



Slika 10: Sotočni usedalnik [Letterman 1999].

- skozitočni.



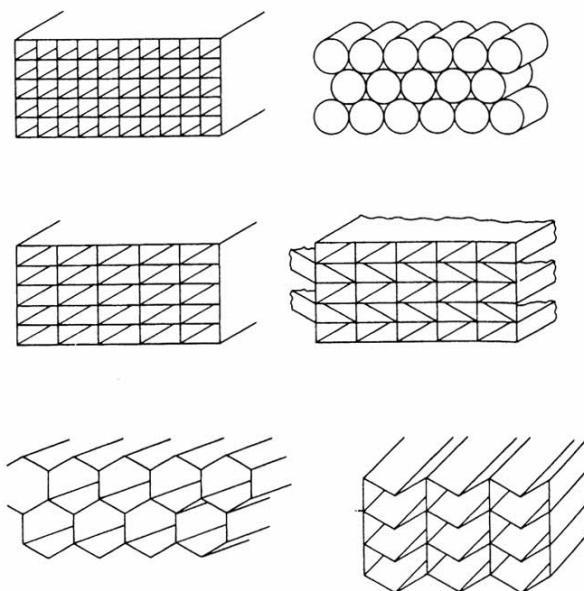
Slika 11: Skozitočni usedalnik [Letterman 1999].

Pri protitočnih usedalnikih se surovo vodo dovaja pod lamelnimi moduli. Tok vode je tako usmerjen navzgor skozi kanale v modulih. Očiščena voda odteka iz usedalnika na vrhu. Delci se, v vsakem kanalu, odlagajo na površje spodnje plošče. Če so plošče nagnjene za dovolj velik kot, delci zdrsijo po površju plošče proti dnu usedalnika. V nasprotnem primeru je potrebno pranje modulov.

Pri sotočnih usedalnikih surova voda doteka na vrhu usedalnika in teče navzdol skozi kanale v modulih. Tako se delcem doda vertikalna komponenta hitrosti in se hitreje usedajo na površino spodnje plošče v kanalu. Problematičen je del usedalnika pod lamelnimi moduli, saj se lahko, če je hitrost vode prevelika, že usedeni delci ponovno dvignejo in zmešajo z vodo.

Pri skozitočnih lamelnih usedalnikih voda teče horizontalno skozi lamelne module in nima vpliva na hitrost usedanja delcev. Prav tako ima tok vode manjši vpliv na že usedene delce kot pri zgoraj omenjenih. Vodo se dovaja na vrhu usedalnika, nato teče skozi usedalnik in se očiščeno odvzema na drugem koncu usedalnika na vrhu [Gregory, R., et al., 1999].

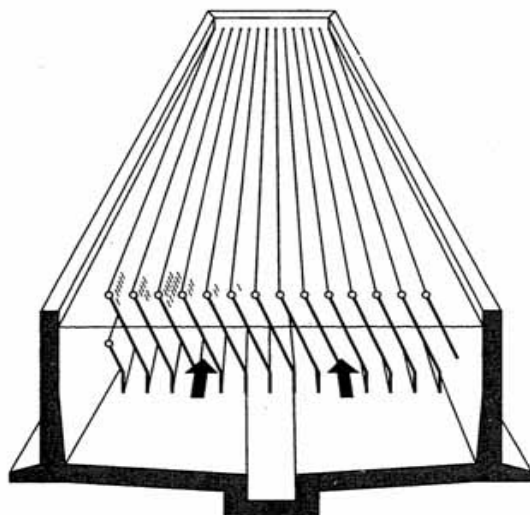
V lamelne usedalnike se vgrajuje različne oblike prefabriciranih lamelnih modulov (okrogle, prevokotne, šestkotne itd.) (glej sliko 12), ali pa lamele sestavimo iz navadnih plošč.



Slika 12: Različni tipi prefabriciranih lamelnih modulov [Letterman 1999].

V nadaljevanju se bom osredotočil le na skozitočni lamelni usedalnik, ki je predlagan pri sanaciji ČN Mrzlek.

Za samo usedanje bi bilo najbolj optimalno, če bi bile plošče horizontalno položene v usedalnik. Pri taki postavitvi nastane problem čiščenja plošč, zato se v praksi redko izvajajo, saj jih je potrebno prati, običajno s povratnim tokom. Z nagnjenostjo plošč v lamelnih usedalnikih za  $50^\circ$  do  $60^\circ$  glede na horizontalno ploskev se zagotovi samočistilna sposobnost plošč.



Slika 13: Lamelni skozitočni usedalnik [Droste 1997].

Čas, v katerem delec prepotuje vertikalno razdaljo med dvema ploščama, računamo po:

$$t = \frac{d}{v_v \cdot \cos \theta} \quad [12]$$

kjer je  $d$  pravokotna razdalja med dvema ploščama,  $v_v$  je vertikalna komponenta hitrosti usedanja delca in  $\theta$  je kot nagnjenosti plošč glede na horizontalo (glej sliko 11). Tok vode skozi področje lamel je horizontalen, zato nima vpliva na hitrost usedanja delcev  $v$ . Dolžino  $L_p$ , potrebno za zagotavljanje časa usedanja  $t$ , računamo po:

$$L_p = \frac{d \cdot v_h}{v_v \cdot \cos \theta} \quad [13]$$

kjer je  $v_h$  hitrost vode (horizontalna) skozi območje lamel. Iz enačbe [5] sledi:

$$v_v \geq \frac{d \cdot v_h}{L_p \cdot \cos \theta} \quad [14]$$

Torej se odstranijo vsi delci, ki imajo večjo vertikalno komponento hitrosti usedanja  $v_v$  kot je izračunano zgoraj [Gregory, R., et al., 1999].

### 3.2.1 Dimenzioniranje lamelnega usedalnika

Najpomembnejša kriterija pri dimenzioniranju usedalnika sta zadrževalni čas  $t$  in površinska obremenitev usedalnika  $v_0$ , ki ju izračunamo:

$$t = \frac{V}{Q} \Rightarrow \text{za obstoječ usedalnik: } t = \frac{25 \cdot 5 \cdot 4}{0,15} = \frac{500m^3}{0,15m^3/s} = 3333s = 0,93h \quad [15]$$

$$v_0 = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{l \cdot \check{s}} \Rightarrow \text{za obstoječ klasični usedalnik:} \quad [16]$$

$$v_k = \frac{Q}{S_k} = \frac{0,15m^3/s}{25m \cdot 5m} = 0,0012m/s = 4,32m/h \quad [17]$$

Lamelni usedalnik bo zgrajen v bazenu obstoječega horizontalnega usedalnika dolžine  $l = 25$  m, širine  $\check{s} = 5$  m in globine  $h = 4$  m. Lamelni usedalniki so bolj učinkoviti kot navadni, zato potrebujejo manj prostora. Odločil sem se za skozitočni lamelni usedalnik. Po Hazenovi teoriji se v skozitočnem usedalniku izloči vsak delec, ki ima vertikalno hitrost večjo ali enako kot [Monod, 1991]:

$$v_l = \frac{Q}{n \cdot l \cdot L \cdot \cos \theta} \quad [18]$$

Manjši ko je naklon lamel v usedalniku, bolj učinkovit je usedalnik, vendar pa mora biti naklon lamel dovolj velik, da je omogočeno samočiščenje lamel (delci zdrsnejo proti dnu). Naklon lamel se giblje od  $7^\circ$  do  $60^\circ$ . Privzel sem naklon lamel  $\theta = 55^\circ$  glede na horizontalo. Razdaljo med lamelami sem izbral  $d = 5$  cm.

Potrebno površino lamelnega usedalnika se izračuna z razmerjem vertikalnih hitrosti v klasičnem usedalniku in lamelnem usedalniku. Razmerje  $v_l/v_k$  je odvisno od oblike lamel in razdalje med lamelami [Monod, 1991].

$$\frac{v_l}{v_k} = \frac{1}{8,1} \quad [19]$$

Izbral sem željeno površinsko obremenitev novega usedalnika  $v_0 = 1$  m/h. Iz tega sem izračunal potrebno površino klasičnega usedalnika  $S_k'$  za izbrano hitrost:

$$v_0 = \frac{Q}{S_k'} \Rightarrow S_k' = \frac{Q}{v_0} = \frac{0,15m^3/s}{0,000278m/s} = 540m^2 \quad [20]$$

Iz razmerja potrebne površine klasičnega in lamelnega usedalnika ter razmerja hitrosti, ki je podano zgoraj, sem izračunal potrebno površino lamelnega usedalnika  $S_l$ .

$$\frac{S_k'}{S_l} = \frac{v_k}{v_l} = \frac{1}{8,1} \Rightarrow S_l = \frac{S_k'}{8,1} = \frac{540m^2}{8,1} = 66,7m^2 \quad [21]$$

Izbral sem  $S_l = 70$  m<sup>2</sup> in iz tega sem, ob dani širini bazena  $\check{s} = 5$  m, izračunal potrebno dolžino lamelnega usedalnika:

$$l = \frac{S_l}{\check{s}} = \frac{70m^2}{5m} = 14m \quad [22]$$

Dimenzije novega lamelnega usedalnika so:  $l = 14$  m,  $\check{s} = 5$  m in  $h = 4$  m.

### 3.3 OZON

Kemična oksidacija ima pomembno vlogo pri obdelavi vode za pitno vodo. Najpogosteje uporabljeni kemični oksidantje so klor  $Cl_2$ , ozon  $O_3$ , klorov dioksid  $ClO_2$  in permanganat  $MnO_4$ . Uporablja se jih za oksidacijo neorganskih snovi, kot so železo, mangan in sulfid in nevarnih sintetičnih spojin, kot sta trikloroetilen in atrazin [Singer in Reckhow, 1999]. Zaradi prisotnosti organske snovi v surovi vodi se plinski klor ne sme uporabljati. Klor namreč reagira z organsko snovjo in tvori trihalometane, ki so rakotvorni. Zato se pri

obdelavi surove vode, kjer je prisotna organska snov kot oksidant uporablja ozon. Ozon se pri obdelavi pitne vode uporablja od 1893, kot dezinfekcijsko sredstvo pa od 1910 [Kompare, 2001].

“Ozon O<sub>3</sub> je alotropska modifikacija kisika, katere molekula sestoji iz treh kisikovih atomov. Je močan oksidant. V naravi nastaja v zraku iz kisika pod vplivom ultravijoličnih žarkov in razelektritev (blisk). Ima oster, dražljiv vonj in okus” [Krušič, et al., 1976]. V tekoči obliki je modrovijoličen, v trdnem stanju je črn. Ozon je nestabilen in popolnoma razpade na O<sub>2</sub> v manj kot eni uri, vendar lahko v praksi, po besedah upravljalcev ostane prisoten v zraku tudi do tri ure. V vodi je slabo topljiv, približno 12-krat manj kot klor. Ozon običajno nastaja v kombinaciji kisikovega atoma in kisikove molekule O<sub>2</sub>. Reakcija poteka v naslednji obliki:



Reakcija je endotermna, torej zahteva vnos energije. Ozon pridobivamo na različne načine. Prevladuje metoda razelektritve v visokonapetostnem polju, nastaja pa tudi z UV obsevanjem plinov, ki vsebujejo kisik, z elektrolitsko reakcijo in drugimi tehnologijami. Stroški pridobivanja ozona so zelo veliki.

Pri projektiranju se moramo zavedati, da je v visokih koncentracijah škodljiv za zdravje ter da je zelo koroziven. Zaradi omenjenih razlogov moramo poskrbeti, da v vodovodnem sistemu ni rezidualnega ozona. Človek zazna ozon že v koncentracijah 0,02 ppm. Ta koncentracija lahko že po petih minutah izpostavljenosti blokira živčni sistem. Izpostavljenost koncentracijam nad 10 ppm je lahko smrtno nevarna [Ravnikar, 2004]. Iz navedenih razlogov je potrebno ozon odstraniti iz vode pred nadaljno obdelavo. Zelo učinkovito odstranimo ozon z aktivnim ogljem. Tudi zrak iz kontaktnih komor je potrebno



pred izpustom speljati skozi uničevalce ozona t. j. Skozi katalizatorski razgrajevalec (npr.: manganov dioksid ( $MnO_2$ )).

Ozon se pri čiščenju vode uporablja kot oksidant in kot dezinfekcijsko sredstvo. Z njim oksidiramo železo [Fe(II)], mangan [Mn(II)], sulfid [S(II)], cianid, vodikov sulfid  $H_2S$ , fenole, detergente, hlapne organske snovi in delno pesticide ter topila. Prav tako ozonacija izboljšuje organoleptične lastnosti vode (okus, vonj in barva) z oksidacijo organske snovi. Ozonirana voda je prijetno svežega vonja in okusa. Ozonacija preprečuje nastajanje trihalometanov, saj delno razgrajuje njihove prekurzorje. Kot dezinfekcijsko sredstvo je ozon bolj učinkovit kot klor pri vseh patogenih organizmih. Na viruse in bakterije deluje zelo hitro in učinkovito. Bakterije ubija celo 3000-krat hitreje kot klor [Rakness, 2005].

Poleg naštetega lahko ozonacija:

- izboljšuje odstranjevanje delcev pri filtraciji,
- izboljšuje učinkovitost koagulacije, kar vodi k zmanjšanju doz koagulanta ob predhodnem ozoniranju,
- zmanjšuje ali celo odpravi porabo aktivnega oglja v prahu,
- ubija in/ali razkroji veliko vrst alg [Rakness, 2005].

Pri računu potrebne količine ozona za dezinfekcijo se je potrebno zavedati, da je najprej potrebno zadostiti potrebam po oksidaciji. Večina neorganske materije reagira z ozonom zelo hitro, razen broma. Reakcije z organsko materijo so lahko počasne ali hitre, kar je odvisno predvsem od vrste organskih molekul, temperature in pH vode. Vse organske in neorganske spojine bodo oksidirale še pred pričetkom dezinfekcije. Vsebnost velike količine hidrogenkarbonata in karbonatnega iona (trda voda) v vodi povečuje porabo ozona. Potrebna količina ozona je odvisna od karakteristik surove vode (temperatura in zgoraj naštetih snovi) in od kontaktnega časa ter predhodne obdelave vode. Zato je potrebno zagotoviti dovolj veliko kontaktno površino plina/tekočine za zadovoljiv učinek. Višja temperatura vode zmanjšuje topljenje ozona v vodi, medtem ko pH nima vpliva na ozonizacijo [Ravnikar, 2004].

### 3.3.1 Železo in mangan

Železo in mangan nista škodljiva zdravju, sta pa povezana z organoleptičnimi lastnostmi vode (barva) in s tem nesprejemljiva. Vodo je potrebno čistiti v primeru, če vsebuje več kot 0,1 mg/l Fe in več kot 0,05 mg/l Mn v topni obliki. Pri večjih koncentracijah železa in mangana pride ob stiku vode z zrakom do oksidacije železa iz dvovalentne v trovalentno obliko, ki ni topna v vodi, in se izloča iz nje v obliki rje, ki obarva vodo [Rakness, 2005]. Ta proces pospešimo z oksidacijo v ČN in tako dosežemo, da se izločeno železo v filterjih nabira v porah filtra in se lepi na površino zrn. Železo se lažje odstrani kot mangan. Preproste železove spojine je možno odstraniti že z aeracijo, kjer je oksidant kisik. Kompleksnejše železove spojine pa je z aeracijo težje odstraniti in je potrebna oksidacija z ozonom. Mangana se le z aeracijo ne da odstraniti. Pri oksidaciji z ozonom najprej oksidira železo in šele kasneje mangan. Topljiv Fe(II) se oksidira v Fe(III), ki počasi hidrolizira v Fe(OH)<sub>3</sub>. V reakciji se porabi 0,43 mg O<sub>3</sub> na 1 mg Fe(II). Oksidacija mangana je bolj komplicirana in presega okvirje te diplomske naloge. Pri oksidaciji mangana se porabi 0,88 mg O<sub>3</sub> na 1 mg Mn(II) [Rakness, 2005]. Prisotnost organske snovi v vodi zavira oksidacijo železa in mangana, saj ozon reagira tudi z organsko snovjo.

### **3.3.2 Vpliv na koagulacijo in odstranjevanje motnosti**

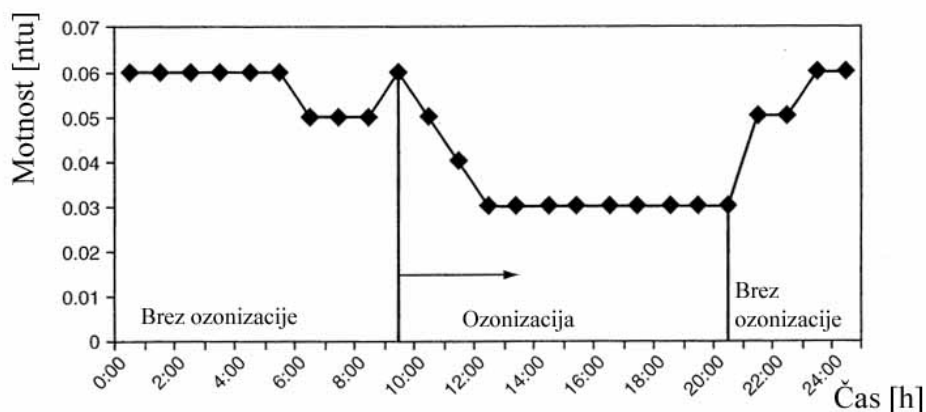
Ozonacija ima lahko na koagulacijo pozitiven vpliv. Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da je zaradi ozonizacije potrebna manjša koncentracija koagulantov, poleg tega je izboljšano odstranjevanje delcev in podaljšan obratovalni čas filtrov. Ni znanega primera negativnega vpliva na omenjene procese. Vpliv ozona na koagulacijo je odvisen tudi od tipa koagulantov. Če želimo doseči pozitivne učinke ozonizacije na koagulacijo, mora biti voda ozonizirana pred procesom koagulacije. Odstranjevanje delcev se zmanjša ne glede na to, ali se ozonacija opravlja pred ali za sedimentacijo. Pomembno je, da se vodo ozonira pred filtracijo.

Ozon lahko vpliva na koagulacijo na več načinov:

- izboljšuje združevanje aluminija z organsko materijo;
- izboljšuje tvorbo kalcijevih spojin z organsko materijo;
- zmanjšuje količino organske snovi v vodi in na površini glinastih delčkov, kar lahko izboljša kontakte med delci; pri velikih koncentracijah ozona 1mg O<sub>3</sub>/mg C

se izgubi do 25 % ogljika, kar je verjetno posledica oksidacije organske snovi v  $\text{CO}_2$ ;

- polimerizira organsko snov; ozonacija naravne organske snovi lahko vodi do tvorbe metastabilnih spojin, kot so ozonidi, organski peroksid ali prosti radikali, ki reagirajo še dolgo potem, ko ozon razpade;
- povzroči razpad huminskih spojin;
- opaženo je bilo povečanje velikosti molekul z večjo molekularno maso [Rakness, 2005].



Slika 14: Vpliv ozona na učinkovitost koagulacije pri odstranjevanju motnosti. Lepo je vidno zmanjšanje motnosti v času ozoniziranja vode [Rakness, 2005].

Koncentracija železa, organske snovi, alg in kalcija so pomembni parametri vpliva ozona na koagulacijo. Večje ko so koncentracije zgoraj naštetih, večje doze ozona in koagulantov potrebujemo.

Vpliv ozona na odstranjevanje delčkov je najboljši pri delčkih velikosti 2 do 5  $\mu\text{m}$  in od 5 do 10  $\mu\text{m}$ , kar je velikostni razred nekaterih patogenih organizmov. *Cryptosporidium* je velikosti 3 do 5  $\mu\text{m}$ , ciste *Giardie* so eliptične oblike in so 8 do 14  $\mu\text{m}$  dolge ter 7 do 10  $\mu\text{m}$  široke [Rakness, 2005].

V nekaterih primerih se pri ozonizaciji razvije mikroflokulacija. Mikroflokulacija je termin, ki opisuje več procesov, ki se odvijajo med ozonizacijo surove vode in pri kasnejših procesih:

- spontano kopičenje (aglomeracija) delcev brez koagulacije,
- formacija novih delcev,
- izboljšano odstranjevanje delcev, pri dani dozi koagulanta,
- zmanjšanje optimalne doze koagulanta,
- zmanjšane hidravlične izgube (daljši obratovalni cikli filtrov) pri direktni filtraciji.

Pri nekaterih tipih koagulantov se mikroflokulacija ne bo razvila. Pri kationskih polimerih se mikroflokulacija v večini primerov uspešno razvije [Rakness, 2005].

Zaradi zmanjšanja porabe koagulanta in/ali aktivnega oglja v prahu zaradi uvedbe ozonizacije se v ugodnih primerih stroški čiščenja znižajo, vendar pa to ni pravilo.

### 3.3.3 Napredna oksidacija

Poleg običajne oksidacije z ozonom poteka tudi napredna oksidacija s hidroksidnim ionom [HO<sup>•</sup>], ki je sekundarni oksidant. Hidroksidni ion je eden od produktov razgradnje ozona in je eden od najmočnejših poznanih oksidantov. V nasprotju z ozonom je neselektiven oksidant, zato se uporablja pri oksidaciji snovi, ki so inertne z ozonom. Hidroksidni ion uporabljamo pri odstranjevanju:

- organskih spojin, kot so topila;
- pesticidov in herbicidov;
- farmacevtskih produktov in produktov za osebno nego (kozmetična sredstva);
- nekaterih sintetičnih in naravnih spojin, ki motijo delovanje žlez v telesu (angl.: endocrine – disrupting compounds); te spojine lahko posnemajo naravne hormone v človeškem in živalskem telesu,
- spojine, ki povzročajo okus in vonj in niso reagirale z ozonom.

Hidroksidni ion se vedno tvori pri ozonizaciji, vendar ni nujno da v potrebnih količinah. Nastajanje se pospešuje z dodajanjem vodikovega peroksida H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ali osvetljevanjem ozonirane vode z UV svetlobo ali zviševanjem pH (>8) in/ali zviševanjem doze ozona. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se razgradi v vodo in kisik brez strupenih ostankov. Doze H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se gibljejo od 0,2 do 0,5 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na mg O<sub>3</sub>, odvisno od potrebne količine in ostalih zgoraj naštetih vplivov.

Nastajanje hidroksidnih ionov zavira prisotnost velike količine ogljikovih ionov. Koncentracije hidroksidnega iona ne moremo meriti direktno.

### 3.3.4 Stranski produkti ozonacije

Glavni stranski produkti ozonacije so:

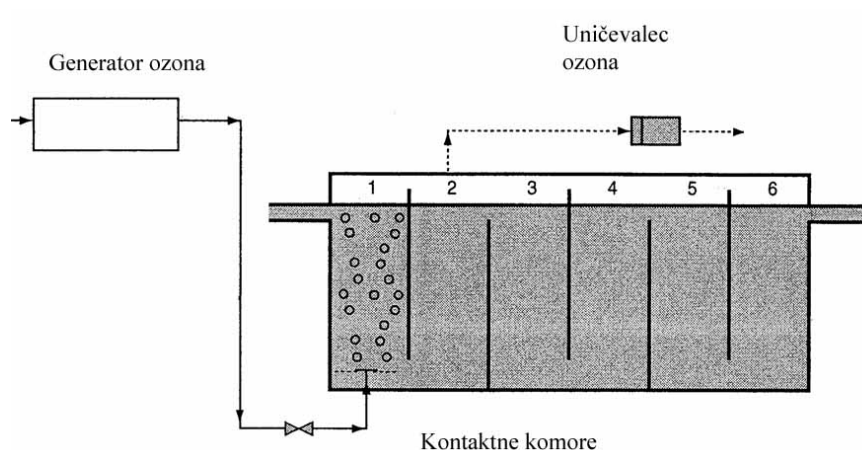
- bromat  $[\text{BrO}_3]$ ,
- bromirane organske spojine,
- peroksidi, nenasičeni aldehidi (formaldehidi, acetaldehidi) in epoksidi,
- enostavne organske molekule, ki nastanejo pri oksidaciji naravne organske materije.

Za bromat je bilo ugotovljeno, da je karcenogen. Bromirane organske spojine se obravnavajo kot trihalometani. Zato je potrebno zelo pazljivo doziranje ozona, če je v vodi prisoten brom ( $>50 \text{ mg/l}$ ) in merjenje omenjenih spojin na iztoku iz ČN. Peroksidi, nenasičeni aldehidi in epoksidi so človeku strupene snovi. Enostavne organske molekule niso škodljive, a niso zaželjene zaradi možne biološke razrasti v vodovodnem sistemu ali tvorbe trihalometanov pri dezinfekciji vode s klorom. Zato jih je potrebno odstraniti s filtracijo še pred dezinfekcijo.

### 3.3.5 Oprema

Ozonizacijski proces sestavljajo štiri glavne komponente:

- Generator ozona. Ti se razlikujejo pri vsakem proizvajalcu. Zrak, s katerim oskrbujemo ozonator, mora biti suh, saj vlažen zrak povzroča prebijanje električnega toka in zmanjšano proizvodnjo ozona na enoto energije.
- Zaloga plina. Ozon lahko proizvajamo iz kisika iz atmosfere, kjer je prisotnega približno 21 %  $\text{O}_2$  ali iz zaloge kisika v rezervoarjih, kjer je približno 90 do 100 %  $\text{O}_2$ .
- Kontaktne komore.
- Uničevalec ozona.



Slika 15: Oprema pri ozonizacijskem procesu [Rakness, 2005].

Iz varnostnih razlogov in merjenja učinkovitosti je potrebno redno spremljanje koncentracije ozona:

- v vodi, takoj za generatorjem,
- v vodi, za kontaktnimi komorami,
- v zraku, pred uničevanjem in za uničevanjem ozona,
- v zraku v prostoru, kjer se nahajajo generator in transportne inštalacije.



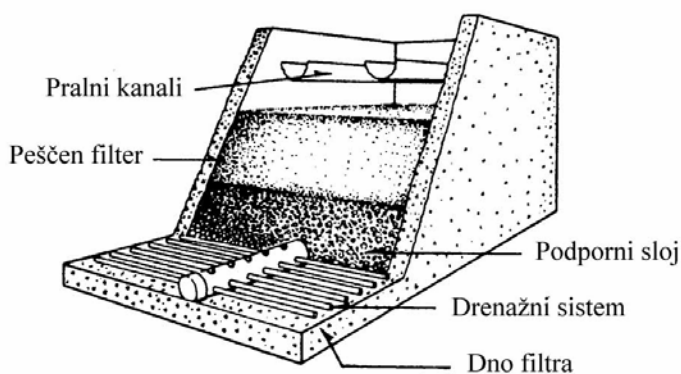
Slika 16: Notranjost kontaktnih komor [Rakness, 2005].

Ozon je škodljiv za zdravje in zelo koroziven, zato je pred črpanjem vode v omrežje potrebno izvesti nevtralizacijo (odstranitev) ozona iz vode preko aktivnega oglja.

### 3.4 FILTRACIJA SUSPENDIRANIH SNOVI Z ZRNAVIMI FILTRI

Filtracija je eden od procesov v liniji klasične priprave vode. Je fizični in kemični proces odstranjevanja suspendiranih in koloidnih primesi iz vode s pronicanjem skozi porozen filtrni medij. Uporablja se za odstranjevanje motnosti, organskega ogljika, oksidirane železa in mangana in za zmanjševanje števila bakterij in virusov [Rismal, 1995]. Filter, običajno zgrajen v bazenu (pravokotnem ali okroglem), je sestavljen iz dovodnega sistema, filtrnega medija, podpornega sloja in drenažnega sistema za odvod vode. Voda priteka v filter po dovodnem sistemu, nato teče skozi filtrni sloj, kjer se očisti. Pod filtrnim slojem je položen podporni sloj, ki nosi filtrni sloj. V njem so položene drenažne cevi, ki zbirajo filtrirano vodo in jo odvajajo (glej sliko 17). Mehanizmi, ki sodelujejo pri odstranjevanju delcev pri filtraciji, so zelo kompleksni. Delci so lahko odstranjeni s:

- fizično odstranitvijo, če so delci večji kot največja odprtina v filtru;
- privlačnostnimi silami, če tok vode prinese majhen delec v bližino površine zrn filtra [Cleasby in Longsdon, 1999].



Slika 17: Prerez tipičnega peščenega filtra z označenimi sestavnimi deli [Letterman 1999].

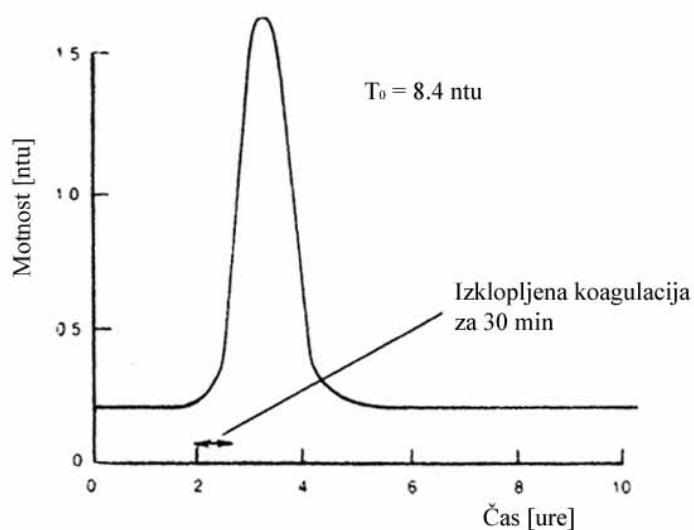
Obstaja več različnih tipov filtrov, ki jih klasificiramo po:

- vrsti pretoka vode skozi filter (gravitacijski, tlačni ali filtri s tokom vode od spodaj navzgor),
- hitrosti filtracije (hitri ali počasni),
- številu filtrnih plasti (eno-, dvo- ali troslojni).



Slika 18: Slika bazena peščenega filtra. Na sliki se lepo vidi oprema v filtru: dovodni in odvodni kanali ter drenažni sistem na dnu [Monod 1991].

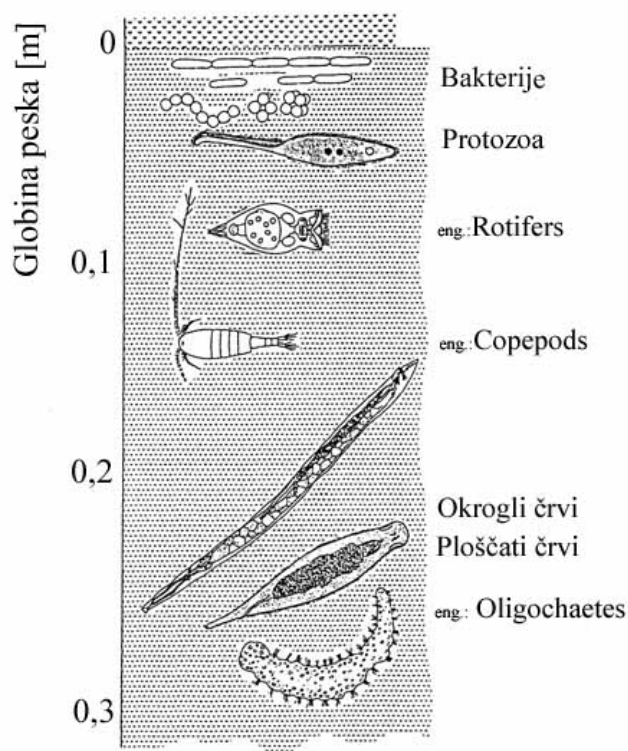
Učinek čiščenja je odvisen od kvalitete surove vode, maksimalne in povprečne filtracijske hitrosti in sestave in debeline filtrnega sloja in dolžine filtrnega cikla. Čas delovanja filtra med dvema pranjem imenujemo filtrni cikel. Na učinek filtracije ima velik vpliv koagulacija. Ob prekinitvi koagulacije lahko motnost v filtrirani vodi skokoma naraste, kar je lepo vidno na sliki 19. Surova voda ima motnost 8,4 ntu.



Slika 19: Vpliv koagulacije na učinek filtracije [Letterman 1999].



Debelina filtrnega sloja mora biti dovolj velika, da se prepreči penetracija onesnaženih snovi skozi filter, vendar se z debelejšim filtrnim slojem večja hidravlični upor in s tem zmogljivost filtra. Prav tako se z večanjem debeline filtrne plasti ne doseže linearnega izboljšanja kvalitete očiščene vode. Učinkovitost filtrov je zelo odvisna tudi od predčiščenja (koagulacija, flokulacija in sedimentacija) in pravočasnega ter rednega pranja filtrov (časovni interval med pranju, dolžina pranja in menjava filtrnega materiala, ko je to potrebno). Predvsem stalno in kvalitetno predčiščenje je esencialnega pomena za kvaliteto filtracije, saj se lahko vsaka motnja v predčiščenju takoj pozna v kvaliteti filtrirane vode.



Slika 20: Globina penetracije mikroorganizmov v peščenih filtrih [Letterman 1999].

Najpogosteje uporabljeni materiali v zrnavih filtrih so:

- kremenčev pesek, ki je mešanica materialov, ki so silikati železa, aluminija in kalcija,
- antracit,
- granat (angl. garnet),
- zrna vulkanskih mineralov (npr. granit).

Pri izbiri filtrnega materiala moramo biti pozorni na:

- karakteristike materiala: velikost, obliko (okroglost), trdoto in specifično težo zrn,
- enotnost zrnivosti (koeficient enakomernosti  $C_u$ ),
- poroznost filtrne plasti.

*Velikost delcev* (zrnavostna krivulja) vpliva na učinek in hitrost filtracije, poroznost filtrne plasti, hidravlične izgube in na učinkovitost pranja filtra. Pri dimenzioniranju je potrebno upoštevati razmerje med  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  in  $d_{90}$ , efektivno velikost zrna ES ali  $d_e$  in koeficient enakomernosti  $C_u$ :

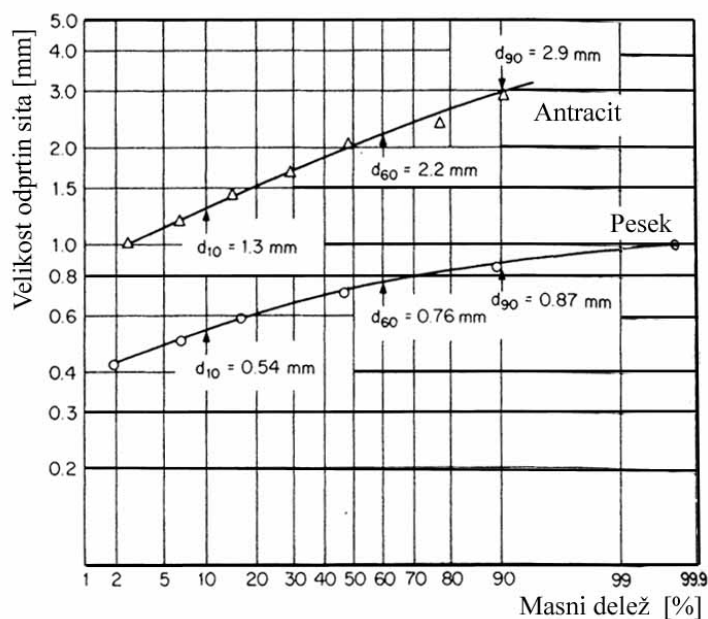
$$ES = P_{10} \quad [26]$$

$$C_u = \frac{P_{60}}{P_{10}} \quad [27]$$

kjer P predstavlja procent teže delca, ki pade skozi sito. Vrednosti  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  in  $d_{90}$  predstavljajo premer zrna, ki je večji ali enak premeru 10 % (60 ali 90 %) vseh zrn v vzorcu. Vrednosti  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  in  $d_{90}$  se določajo s sejalno analizo, katere rezultat je zrnavostna krivulja (glej sliko 21). Efektivna velikost ima velik vpliv na učinek peščenih filtrov. Ugotovili so, da so hidravlične lastnosti relativno neobčutljive na variacije velikosti delcev ob predpostavki, da efektivna velikost ostaja nespremenjena. Koeficient enakomernosti mora biti v mejah med 1,2 in 1,3. Zrnavostna krivulja večine filtrnih materialov izgleda na logaritemski skali približno kot premica. Razmerje je odvisno od hitrosti filtriranja, števila slojev in globine filtrnega sloja.

*Oblika delcev (okroglost)* ima velik vpliv na potreben tok vode pri pranju filtrov, poroznost filtra, hidravlične izgube in učinek filtracije.

*Gostota (specifična teža)* ima vpliv na potreben pretok pri povratnem pranju. Zrna z večjo gostoto in enakomernim premerom zahtevajo višje hitrosti pranja, da se doseže utekočinjenje filtrnega medija.



Slika 21: Tipična sejalna analiza za silikatni pesek in antracit [Letterman 1999].

Trdota zrn vpliva na življensko dobo filtrnega medija. Zrna se pri pranju zaradi medsebojnih trkov obrabijo in obrusijo, zaradi česar pride do spremembe v razmerju velikosti delcev in s tem do hidravličnih in filtracijskih sprememb [Cleasby in Longsdon, 1999].

Preglednica 2: Tipične vrednosti za najpogosteje uporabljene filtrne materiale [Cleasby in Longsdon, 1999].

	Silikatni pesek	Antracit	Aktivno oglje v zrnju	Granat
Specifična teža [ $\text{kg/m}^3$ ]	2650	1450–1730	1300–1500*	3600–4200
Poroznost $\epsilon_0$	0,42–0,47	0,56–0,60	0,5	0,45–0,55
Okroglost $\psi$	0,7–0,8	0,46–0,6	0,75	0,6

\* za neuporabljeno oglje, ki ima pore zapolnjene z vodo; z uporabo se specifična teža povečuje zaradi absorbiranih organskih snovi.

V nadaljevanju se bom omejil le na gravitacijske hitre peščene filtre.

### 3.4.1 Hitri peščeni filtri

Hitri peščeni filtri temeljijo na mehanskem odstranjevanju delcev pri precejanju vode skozi peščeni filtrni medij. Tipični so filtri z gravitacijskim tokom vode skozi filter, obstajajo tudi filtri s tokom vode navzgor in tlačni filtri.

Pri projektiranju filtrov sta najpomembnejša naslednja parametra:

- hidravlična (površinska) obremenitev  $v_0$ :

$$v_0 = \frac{Q}{S} \quad [28]$$

kjer je  $Q$  pretok skozi filter in  $S$  tlorisna površina filtra,

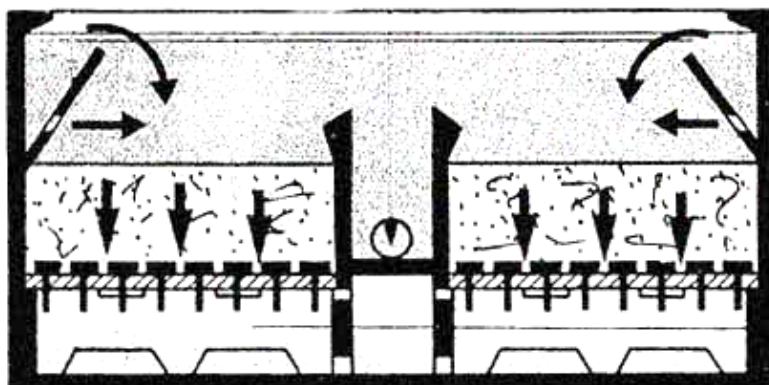
- zadrževalni čas  $t$ :

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{h}{v_0} \quad [29]$$

kjer je  $h$  globina filtrnega medija.

Od obeh parametrov je odvisna stopnja in učinek filtracije. Hidravlična (površinska) obremenitev nam pove, kakšna je hitrost vode skozi filter. Manjša ko je hitrost, bolje se delci izločajo iz vode. Običajna hidravlična obremenitev je okoli 5 m/h. Pri določanju hidravlične obremenitve gre običajno za obratno sorazmerni odnos med kvaliteto in kvantiteto filtrirane vode, vendar to ni pravilo. S pilotnimi testi so namreč ugotovili, da je lahko ob učinkovitem predčiščenju uspešnost filtrov pri odstranjevanju motnosti, koliformnih bakterij in virusov ter organskega ogljika enaka tudi pri večjih hitrostih 10–15 m/h. Pri nekaterih testih so ugotovili, da pri pogoju optimiziranega kemičnega predčiščenja tako, da dosega očiščena voda motnost pod 0,1 NTU, ni razlike pri odstranjevanju *Giardije* in *Cryptosporidiuma* pri hitrostih od 7 do 15 m/h in celo od 12 do 20 m/h. [Cleasby in Longsdon, 1999]. Zadrževalni čas nam pove, koliko časa se voda nahaja v filtrnem mediju.

Daljši kontaktni čas torej pomeni večjo možnost kontakta med delci v vodi in filtrnim medijem. Kontaktni čas podaljšujemo s povečevanjem debeline filtrnega sloja, kar pa pomeni tudi večji hidravlični upor in daljše pranje filtra.



Slika 22: Pot vode pri filtraciji v peščenem filtru [Monod 1991].

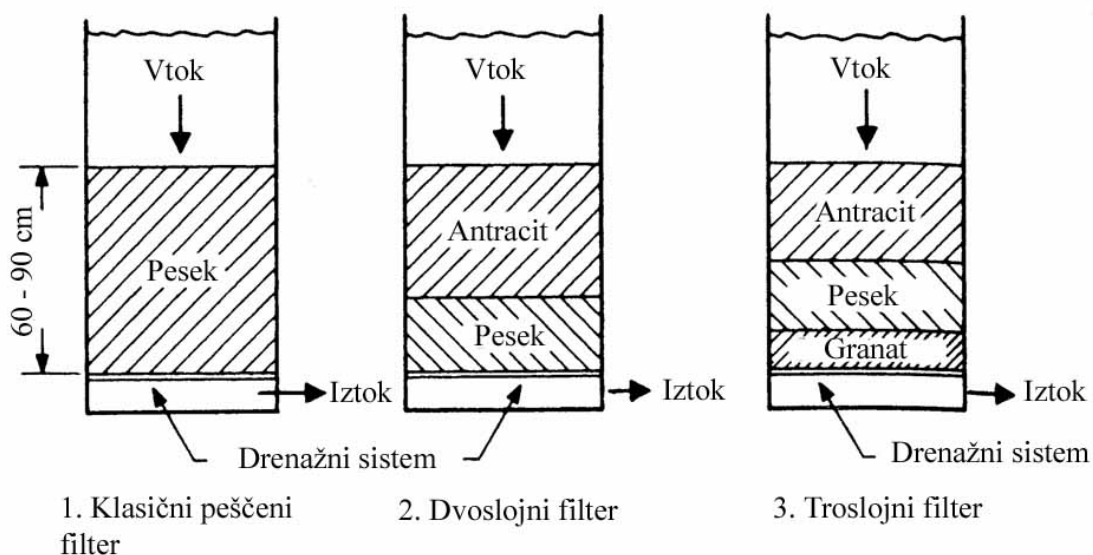
Filtracijo lahko izvajamo takoj za koagulacijo in flokulacijo (brez usedanja), a so taki sistemi bolj občutljivi na spremembe kvalitete surove vode, kar je problematično s stališča varnosti in enostavnosti upravljanja. Poleg tega taki sistemi niso primerni za vodo z visoko motnostjo, saj bi imeli filtri zelo kratke filtrne cikle in veliko izgubo vode. Pozitivna stran so manjši stroški gradnje in vzdrževanja.

### 3.4.2 Dvo- in troslojni filtri

Enoslojnemu filtru so z namenom izboljšanja učinka čiščenja in podaljšanja filtrnega cikla dodali najprej en in nato dva sloja (glej sliko 23).

Dvoslojni filter je sestavljen iz dveh različnih filtrnih slojev in podpornega sloja. Spodnji sloj ima podobne karakteristike kot material pri enoslojnem filtru, le da je sam sloj tanjši. Zgornji sloj je sestavljen iz materiala z manjšo specifično težo in večjo velikostjo zrn (npr. antracit) kot spodnji. Pri dvoslojnih filtrih sodeluje pri čiščenju večja globina filtra, saj delci potujejo globlje v filter kot pri enoslojnih, kjer se delci odstranjujejo na površini in v zgornjih nekaj centimetrih filtra. Zaradi tega je učinek čiščenja dvoslojnih filtrov boljši,

filtrni cikel daljši, hidravlične izgube filtra pa so manjše. Zaradi manjše specifične teže in večje granulacije zgornji sloj po pranju počasneje potone in se ne meša s spodnjim slojem.



Slika 23: Shematski prikaz filtrov z različnim številom slojev [Letterman 1999].

Pri troslojnih filtrih je tretji, spodnji sloj, iz materiala s še večjo specifično težo (npr. granat) in majhno (fino) granulacijo. Pri troslojnih filtrih gre za nadgradnjo ideje dvoslojnega filtra, saj sodeluje pri čiščenju vode še en sloj. Zaradi dodatnega tretjega sloja, ki ima najmanjši premer zrna, je lahko učinek filtracije troslojnih filtrov boljši kot pri eno- ali dvoslojnih. Namen tretjega sloja je predvsem izboljšati učinek čiščenja. Vendar nekateri pilotni testi kažejo, da se kvaliteta očiščene vode v določenih primerih pri trislojnih filterih v primerjavi z dvoslojnimi ne razlikuje [Cleasby in Longsdon, 1999]. Pri troslojnih filtrih so hidravlične izgube filtra večje zaradi tretjega, najbolj finega sloja. Pri troslojnih filtrih je lahko problematično pranje filtrov, saj lahko pride do mešanja materiala različnih slojev med seboj [Cleasby in Longsdon, 1999]. Našteti problemi zmanjšujejo prednosti troslojnih filtrov, saj napake pri upravljanju s filtrom namreč lahko vodijo do slabše kvalitete vode. Zato je pri dimenzioniranju potrebno ugotoviti, ali je za zagotovitev čiste vode potreben trislojni filter ali je dovolj dvoslojni.

Pri dimenzioniranju filtrov se uporablja razmerje:

$H/d_e$

[30]

kjer je  $H$  globina filtrnega sloja in  $d_e$  efektivna velikost zrna. Za različne filtre naj bi veljalo razmerje:

$H/d_e \geq 1000$  za običajne peščene in dvoslojne filtre (pesek in antracit),

$\geq 1250$  za troslojne filtre (pesek, antracit in granat),

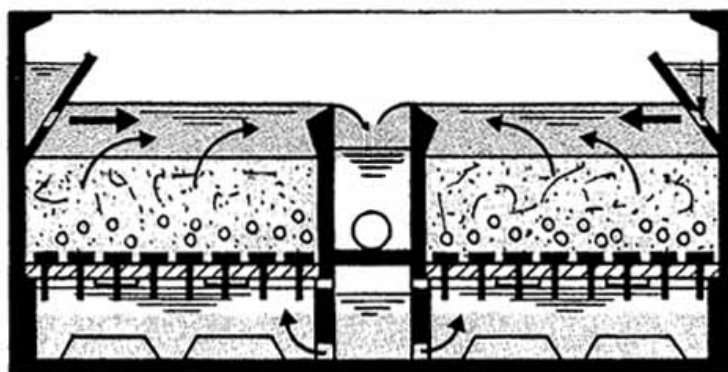
$\geq 1250$  za globoke enoslojne filtre ( $1,0 < d < 1,5$  mm),

$= 1250-1500$  za globoke enoslojne filtre ( $1,5 < d < 2,0$  mm)

[Cleasby in Longsdon, 1999].

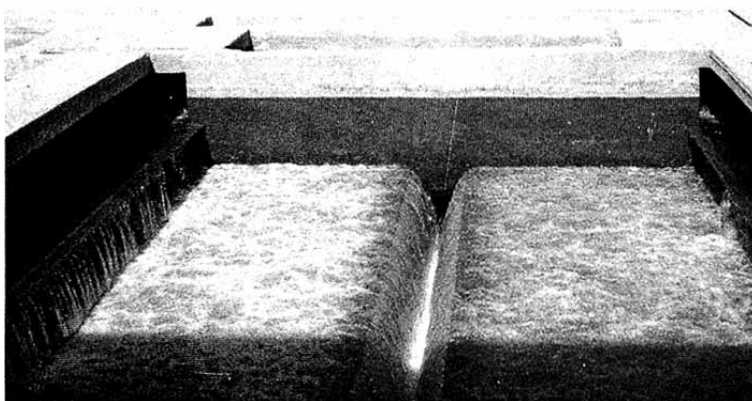
### 3.4.3 Pranje filtrov

Suspendirani delci se odstranjujejo iz vode na površju in v prazne prostore v filtrnem mediju. Zaradi odlaganja materiala se začnejo odprtine v filtrnem mediju zapolnjevati in mašiti, poroznost filtrnega sloja se manjša, kar povzroča postopno dviganje tlačnih izgub. To se pozna na dviganju gladine vode nad filtrom. Gladina vode nad filtersko plastjo mora omogočati zadosten tlak za premagovanje hidravličnih uporov samega filtra in spremembe uporov zaradi mašenja por v filtru. Ko pridejo tlačne izgube do vnaprej določene vrednosti, t. j. ko se gladina vode nad filtrom dvigne nad določen nivo, je potrebno filter oprati. Dostikrat, posebej pri dolgih filtrnih ciklih, je priporočljivo pranje izvajati v določenih časovnih intervalih, kljub temu da tlačne izgube ne dosežejo določene vrednosti. Z rednim pranjem se preprečuje razrast mikrobiologije v filtrnem mediju in zgoščevanje ter sprijemanje odstranjenih delcev s peščenimi zrnji. Sprijeti delci se pri pranju težko odstranijo. Pranje filtrov se izvaja s povratnim tokom vode, ki izpira odložen material iz filtra. Tok vode mora biti dovolj močan, da utekočini filtrni sloj in zagotovi zadostno medsebojno trenje filtrnih zrn. Zaradi ekonomičnosti je bolje filtre prati z mešanico vode in zraka. Za pranje filtrov samo z vodo se lahko porabi okoli 20 % očiščene vode, medtem ko se je pri pranju z mešanico vode in zraka porabi tipično 5 % očiščene vode [Rismal, 1995].



Slika 24: Pranje zrnavega filtra s povratnim tokom vode [Monod 1991].

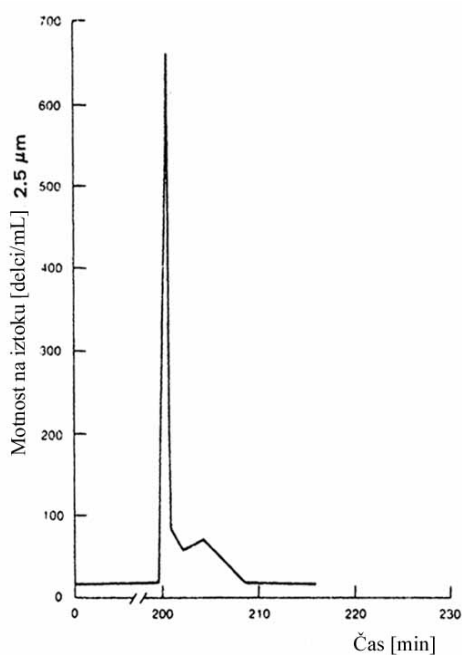
Učinek filtracije je po pranju filtra slabši kot pred pranjem. Če filtrni cikel ni optimiran in je predolg, lahko na koncu cikla pade učinek filtracije. Zaradi odstranjenih delcev se pore v filtru mašijo, kar privede do povečevanja hitrosti vode v porah filtra. Povečana hitrost vode lahko povzroči spiranje že odstranjenih delcev iz por filtra.



Slika 25: Pranje peščenega filtra z vodo in zrakom [Monod 1991].

Spreminjanje hitrosti vode (predvsem povečevanje hitrosti) skozi filter med filtrnim ciklom lahko poruši ravnovesje med hidravličnimi silami, s katerimi voda deluje na delce in silami, ki držijo delce pripete v filtrnem telesu. Rezultat je kratkotrajno (začasno) izpiranje delčkov globje v filter ali celo skozi filter. Trenutnim spremembam hitrosti se je potrebno izogibati, saj imajo večji negativni učinek kot postopno zviševanje [Cleasby in Longsdon, 1999]. Zelo pomembno je, da je flokulacija dobro izvedena in so flokule močno sprijete. Tako je učinek filtracije manj odvisen od hitrosti filtracije.





Slika 26: Prikaz skoka motnosti v filtrirani vodi po ustavitvi in zagonu filtra [Letterman, 1999].

V primeru ustavitve delovanja filtra in začasnim počivanjem je zelo pomembno, da se umazani filter pred ponovnim zagonom najprej opere in šele nato spravi v delovanje. V nasprotnem primeru se zgodi enak efekt kot pri trenutnem povečevanju hitrosti vode.

Monitoring surove in očiščene vode, šolan in izkušen operator, ustrezna oprema so osnovni pogoji za učinkovito delovanje filtrov. Operator mora spremljati, ovrednotiti, obdelati in arhivirati podatke, ki jih dobiva med delovanjem ČN. Ob morebitnih spremembah kvalitete surove vode (temperatura, pH, motnost) mora biti operator sposoben prilagoditi delovanje ČN novim razmeram. Posebno pozornost je potrebno posvetiti optimalni dozi koagulanta, ki se spreminja s kvaliteto surove vode. Pilotni testi so pokazali, da lahko pride pri poslabšanju kvalitete surove vode do nezadostne koagulacije in zaradi tega do drastičnega poslabšanja kvalitete očiščene vode.

### 3.4.4 Dimenzioniranje

Pri varianti ČN 1 sem se odločil, da bo filtracija v peščenih filtrih potekala le v treh peščenih filtrih v novejši ČN, medtem ko bodo trije filtri v stari ČN opuščeni. V želji, da bi

ohranil čim več obstoječih objektov, sem se odločil, da bo filtracija na peščenih filtrih izvajana v treh obstoječih bazenih v novejši ČN. Bazeni bodo predelani, saj sem se odločil za dvoslojne filtre in je zato potrebna večja globina bazenov. To bo doseženo z dvigom stranic filtra, medtem ko situacijsko ne bodo spremenjeni. Obstoječi trije bazeni so dolgi 7 m, široki 6.5 m in globoki 2.7 m. Površina enega filtra je  $S = 45 \text{ m}^2$  in vseh treh skupaj  $S_p = 135 \text{ m}^2$ . Površinska obremenitev  $v_p$  ob pretoku  $Q = 300 \text{ l/s}$  izračunamo:

$$v_p = \frac{Q}{S_p} = \frac{0,3 \text{ m}^3 / \text{s}}{135 \text{ m}^2} = 0,0022 \text{ m} / \text{s} = 8 \text{ m} / \text{h} \quad [31]$$

Vrednost površinske obremenitve je sprejemljiva. Potrebno globino peščenega filtra sem izračunal po določitvi potrebne debeline filtrnih plasti. Debelina posamezne filtrne plasti je določena na podlagi priporočil iz literature. Nad nivojem filtrnega medija bo 1,5 m vode. Prvi zgornji sloj bo iz antracita debeline 0,6 m. Drugi spodnji sloj bo iz belega kremenčevega peska debeline 0,9 m. Pod obema slojema bo položen še podporni sloj debeline 0,2 m. Skupna debelina filtrnega medija  $h_p$  je:

$$h_p = 0,6 \text{ m} + 0,9 \text{ m} + 0,2 \text{ m} = 1,7 \text{ m} \quad [32]$$

Volumen filtrnega medija v enem filtru bo  $V_p = 76,5 \text{ m}^3$ . Potrebna globina bazena do dotočnih kanalov  $h_b = 3,2 \text{ m}$ . Obstoječe bazene bi bilo potrebno poglobiti minimalno za 0,5 m.

### 3.5 AKTIVNO OGLJE

Adsorbicija je proces ali sposobnost nekaterih snovi, da privlačijo na svojo površino posamezne ione ali molekule, ki so razpršene v tekočini. Snov, ki se koncentrira na drugo snov, se adsorbira. To snov imenujemo adsorbat, adsorpcijski material imenujemo adsorbent. Z uporabo površinsko aktivnih snovi je možno odstraniti veliko manjše delce kot z običajnimi filtrnimi mediji. Pri filtraciji z adsorpcijskim materialom se nečistoče

vežejo na površino filtrnega medija na podlagi molekularnih privlačnostnih sil in le delno na podlagi sejalnega efekta.

Pozitivne učinke mnogih poroznih materialov, ki lahko adsorbirajo snovi v velikih količinah, so se zavedali že v 18. stoletju, vendar je šele napredek v znanosti in s tem raziskovalnih študijah o osnovah adsorpcije in adsorpcijo predstavil kot učinkovit proces za čiščenje vode [Drev, 1999]. Vendar pa zaradi raznolikosti procesa ostaja še veliko neraziskanega okoli delovanja različnih adsorbentov in njihovega učinka pri čiščenju.

O adsorpciji govorimo, ko pri filtrnem mediju, pri katerem so prisotne močne medmolekularne privlačnostne sile, prihaja do zadržanja veliko manjših delcev od velikosti por. Med površinsko aktivnimi filtrnimi mediji in nečistočami ne prihaja do kemijskih reakcij. Zadrževanje delcev in organskih raztopljenih nečistoč se vrši izključno zaradi medmolekularnih privlačnostnih sil. Površinsko aktivni materiali so primerni predvsem za odstranjevanje organskih nečistoč, ki so v obliki zelo majhnih delcev ali pa celo raztopljene. Privlačnostne sile, ki omogočajo fizikalno vezavo delcev nečistoč na površino, sestavljajo naslednje medmolekularne sile:

- disperzijske sile,
- sile med dipoli,
- indukcijske sile,
- vodikove vezi,
- kapilarne kondenzacija [Drev, 1999].

Disperzijske sile, ki jih pogosto imenujemo Van der Waalove sile, so neusmerjene in delujejo na kratke razdalje. Niso odvisne od temperature. Van der Waalove sile so dominantne pri aktivnem oglju.

Sile, ki delujejo med dipoli, so usmerjene. Pojavljajo se poleg disperzijskih sil, kadar imajo molekule polarne atomske skupine. Delujejo na večje razdalje in so močno odvisne od temperature.

Indukcijske sile se pojavljajo pri deformaciji elektronskega oblaka z električnim poljem atomske skupine, posebno zaradi delovanja dipola. Niso temperaturno odvisne.

Vodikove vezi so močno usmerjene privlačnostne sile med molekuli. Pojavijo se poleg disperzijskih in dipolnih sil, kadar imajo molekule atomske skupine z rahlo vezanim aktivnim vodikom. Vodikova vez nastane, kadar pride H atom med dva močno elektro negativna atoma [Drev, 1999].

Najbolj poznani površinsko aktivni materiali so:

- aktivno oglje,
- diatomejska zemlja,
- azbest,
- razni tipi polisilicijevih kislin.

Aktivno oglje se pridobiva iz šote, lignita, bitumna, lesa, lupin kokosovega oreha itd. Proizvaja se s fizičnim ali kemičnim postopkom, ki vsebuje karbonizacijo in aktivacijo materiala [Snoeyink in Summers, 1999].

Z adsorbcijo lahko odstranjujemo:

- snovi, ki povzročajo vonj in okus,
- trihalometane,
- pesticide,
- mineralna olja,
- fluor,
- fenole,
- detergente,
- sintetične organske kemikalije,
- delno mikroorganizme,
- naravno organsko snov (angl. NOM) in s tem preprečujemo kasnejše nastajanje dezinfekcijskih stranskih produktov,
- ozon [Snoeyink, Summers, 1999].

Čistilna sposobnost površinsko aktivnega materiala je odvisna od:

- vrste površinsko aktivnega materiala,
- aktivne površine materiala (od 100 do 1800 m<sup>2</sup>/g),
- vrste nečistoč, ki jih čistimo (molekularna velikost in teža),
- konstrukcijskih lastnosti filtra,
- hitrosti pretoka [*Drev, 1999*],
- velikosti zrn adsorbenta, ki določa potreben čas transporta delcev v pore,
- zrnastostne krivulje adsorbenta,
- oblike zrn adsorbenta, ki vpliva na lastnost filtracije in pranja filtra,
- trdote zrn adsorbenta, ki vpliva na obrabo materiala pri pranju: aktivno oglje v zrnu je mehkejše kot antracit, kljub temu pa v praksi ni opažena pretirana obraba; značilna je 1–6 % izguba materiala [*Snoeyink, Summers, 1999*].

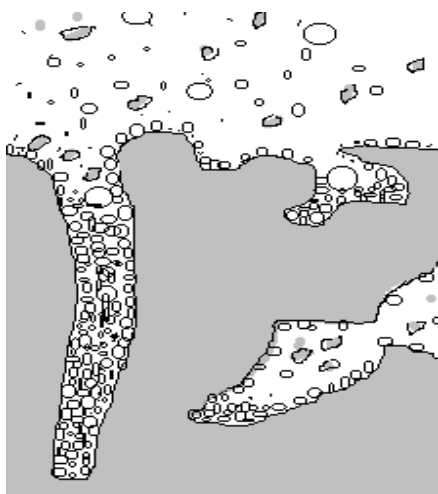
Aktivno oglje se lahko uporablja kot filter, kjer se uporablja aktivno oglje v zrnu ali pa se ga meša v vodo pred filtracijo kot aktivno oglje v prahu. Pri filtrih se uporablja delčke velikosti od 0,48 do 1,68 mm. Pri aktivnem oglju mora biti vsaj 1000 m<sup>2</sup>/g aktivne površine.

V kapilarnih sistemih adsorbenta prihaja do interakcije med dvema slojema adsorbiranega materiala na nasprotnih straneh in do kapilarne kondenzacije. V kapilarah in notranjih vogalih aktivne površine se zato adsorbira veliko večja količina materiala kot na odprtih površinah (glej sliko 27).

Različni substrati imajo različne sposobnosti vezanja nečistoč. Po Freundlicu se lahko izračuna količina adsorbirane substance po sledeči formuli:

$$A = A_0 \cdot C^{1/n} \quad [33]$$

kjer je A adsorbirana količina substance (mg/g), A<sub>0</sub> in 1/n sta karakteristični vrednosti za posamezne materiale (glej tabelo 3) in C je ravnotežna koncentracija (mg/l) [*Drev, 1999*].



Slika 27: Prikaz vezanja nečistoč na aktivno oglje [Drev, 1999].

Preglednica št. 3: Adsorpcijske karakteristične vrednosti za posamezne vrste materialov [Drev, 1999].

adsorbent	pH	<sup>0</sup> C	A <sub>o</sub>	1/n
aktivno oglje	7,0	10	78,60	0,27
diatomejska zemlja	7,0	10	0,33	0,62
glina	7,0	10	0,18	0,61
aluminijev hidroksid	7,0	10	0,27	0,73
Bacillus subtilis	7,0	25	8,92	0,68
bakterijska združba iz ČN	7,0	25	0,89	0,96
E. coli	7,0	25	1,28	0,80

Preglednica št. 4: Aktivne površine za posamezne vrste aktivnega oglja [Drev, 1999].

Tip aktivnega oglja	Material za izdelavo	Akt. površina (m <sup>2</sup> /g)
Chemviron SGL	bitumen	1000–1200
Filtrisorb 200	bitumen	1000–1200
Chemviron BPL	bitumen	1200–1400
Chemviron PAC RB	bitumen	800–1000
Chemviron SC II	lupine kokosovega oreha	1150–1250
Chemviron SC XII	lupine kokosovega oreha	900–1100
Darco S 51	lignit	500–550

Darco G 60	lignit	750–800
Darco KB	les	950–1000
Hydro Darco	lignit	550–600
Norit (variuus)	les	700–1400

### 3.5.1 Pranje in regeneracija

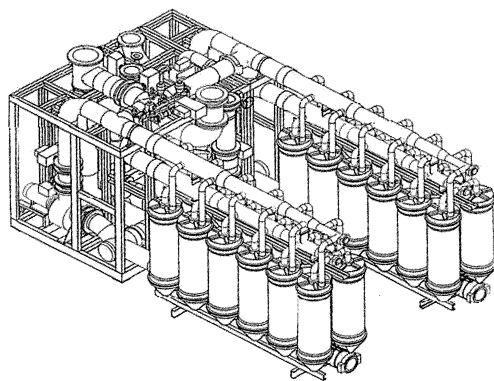
Ko se adsorbent zasiti z odstranjenim materialom, izgubi adsorpcijske sposobnosti. Zaradi velike aktivne površine lahko postane po nasičenju tudi onesnaževalec vode. Posebno pomembno je to pri tistih filtrih, ki so občasno v uporabi in imajo majhne pretoke, saj lahko postanejo gojišče bakterij. Zato je redno pranje filtrov ključnega pomena. Pranje se izvaja na isti način kot pri peščenih filtrih, s povratnim tokom vode, kateri se lahko doda tudi zrak. Uporaba klora pri pranju ni priporočljiva, saj lahko povzroča probleme [Snoeyink, Summers, 1999]. S povratnim pranjem se izpere le del odstranjenega materiala. Del pa se nalaga v pore adsorbenta in se ga le s povratnim pranjem ne da odstraniti. Po daljši uporabi se pore zapolnijo in adsorpcijski material je potrebno zamenjati z novim. Uporabljen material se da do določene mere regenerirati, kar je zahteven in drag postopek. Kljub temu, da gre za fizikalno vezanje nečistoč na površinsko aktivne materiale, je regeneracija le-teh težko izvedljiva. Od molekularnih privlačnostnih sil so najpomembnejše disperzijske sile (Van der Waalove), ki so temperaturno neodvisne. Zato ni možna enostavna desorpcija nečistoč s segrevanjem. V nasprotnem primeru je potrebno iztrošen adsorpcijski material odpeljati na posebno deponijo.

V nekaterih ČN je AC dodano kot drugi ali tretji sloj pri večslojnih zrnatih filtrih. Vendar je pri taki uporabi problematično odstranjevanje in regeneracija aktivnega oglja, saj ga je težko ločiti od peska. Prisotnost peska povzroča probleme pri regeneraciji in je zato pri procesu nezaželen.

### 3.6 ULTRAFILTRACIJA (UF)

Membranska UF v pripravi pitne vode je postopek bistrenja in dezinfekcije. UF odstranjuje delce z mehanskim precejanjem vode. Vsaka membrana ima natanko določeno velikost por, ki definira pričakovano stopnjo čiščenja. UF zadrži viruse, bakterije in največje molekule. Mejna molekularna teža za UF je med 1000 in 100000. Membrane izdelujejo iz organske snovi (acetatna celuloza, polisulfon, poliamid, polietilen, polipropilen itd.) ali anorganske snovi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). Membrane morajo biti narejene iz kemijsko obstojnega materiala. Membrana predstavlja fizično oviro za vse delce večje kot največja odprtina v membrani. V primerjavi s klasično metodo čiščenja (koagulacija s flokulacijo, sedimentacija in filtracija na zrnavih filtrih) ima naslednje prednosti:

- ne potrebuje dodajanja kemikalij pri predčiščenju kot na primer pri koagulaciji, saj temelji na fizičnem odstranjevanju delcev (izjema so postopki, ki so omenjeni v poglavju 3.6.1.);
- velikost por je zelo enakomerna, zato so membrane sposobne popolnega odstranjevanja delcev in mikroorganizmov (večjih od velikosti por v membrani);
- kvaliteta očiščene vode ni odvisna od kvalitete surove vode;
- pranje membran ne vpliva na nadaljno kakovost obdelane vode [Vickers, 2005].



Slika 28: Shematski prikaz postavitve membranskih modulov [Dimitriou 2005].

Razlogi za uveljavljanje UF:

- čedalje strožji predpisi,
- širok spekter čiščenja,



- fleksibilnost in enostavnost vodenja ČN ter velika stopnja avtomatizacije,
- dostopnost – cena z leti pada.



Slika 29: Ultrafiltracijski moduli.

### 3.6.1 Predčiščenje

Samo z UF se ne da odstraniti raztopljene materije, uspešnost odstranjevanja nekaterh kasneje omenjenih spojin pa je pod 20 %. Pri visoki motnosti se čas med pranju neekonomično skrajša. Za izboljšanje produktivnosti ČN se pred membranami pogosto uporablja predčiščenje. V tabeli št. 5 je predstavljeno potrebno predčiščenje za različne snovi. Spodaj pa so posebej naštet in podrobneje razloženi najbolj pogosti procesi.

Preglednica 5: Potrebno predčiščenje za različne onesnaževalce. [Speth, Reiss 2005]

Onesnaženje		Potrebno predčiščenje
Mikrobiologija/delčki:	motnost	brez
	praživali	brez
	bakterije	brez
	virusi	brez
Organska snov:	totalni organski ogljik	koagulacija/PAC*

	stranski produkti dezinfekcije	koagulacija/PAC*
	barva	koagulacija/PAC*
	vonj in okus	koagulacija/PAC*
	Pesticidi	PAC*
Neorganska snov:	Železo in mangan	Oksidacija
	Arzenik	Koagulacija
	Žveplovodik H <sub>2</sub> S	Oksidacija

\*PAC = aktivno oglje v prahu

### 3.6.1.1 Prefiltracija

Pred UF se običajno postavijo predfiltri, ki ščitijo membrane pred večjimi delci. S predfiltracijo se podaljša obratovalni čas UF membran in se jih zaščiti pred poškodbami. Običajne velikosti por predfiltrov se gibljejo med 50 in 500 µm [Jacangelo, Noack 2005].

### 3.6.1.2 Adsorbpcija

Kot adsorbente uporabljamo aktivno oglje v prahu ali železov oksid (angl. iron oxides). Z dodajanjem adsorbenta v vodo pred UF izboljšamo odstranjevanje raztopljene organske snovi, stranskih produktov dezinfekcije, barve, vonja, okusa, sintetičnih spojin in pesticidov. Uspešnost odstranjevanja omenjenih spojin z adsorbpcijo + UF je funkcija koncentracije in tipa adsorbenta, koncentracije in adsorbpcivnosti raztopljene organske snovi, pH, temperature in kontaktnega časa [Jacangelo, Noack 2005].

### 3.6.1.3 Koagulacija

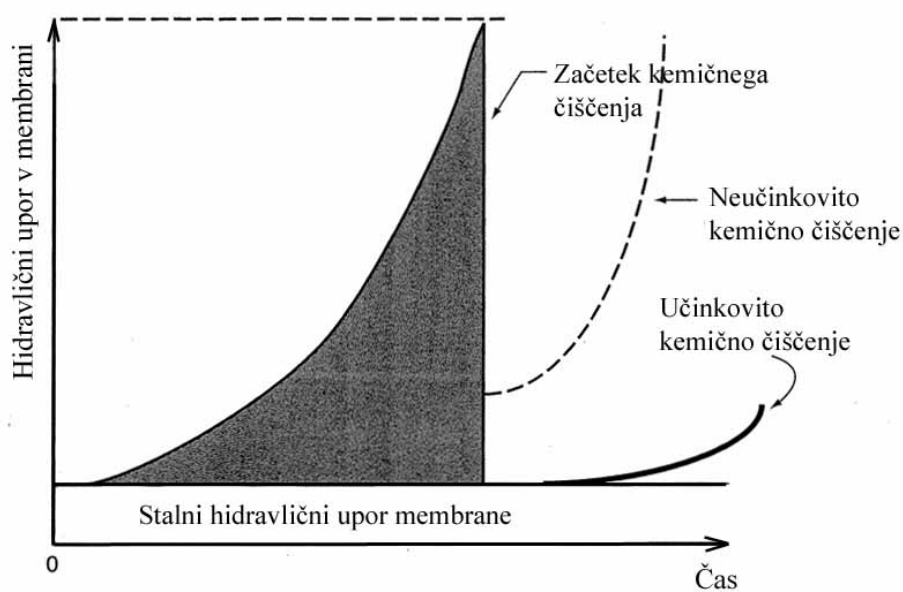
S predhodno koagulacijo izboljšamo odstranjevanje raztopljene organske snovi, trihalometanov, haloocetne kisline, stranskih produktov dezinfekcije, barve, okusa, vonja, arzena in delno totalne organske halogene (TOX). Brez koagulacije je uspešnost odstranjevanja omenjenih spojin samo z UF pod 20 %. Uspešnost odstranjevanja omenjenih spojin z koagulacijo + UF je funkcija koncentracije in tipa koagulant, pH,

temperature, mešalnega časa in mešalne hitrosti. Mehanizem čiščenja je enak kot pri klasičnem čiščenju, le da je tu uspešnost širša in večja [Jacangelo, Noack 2005].

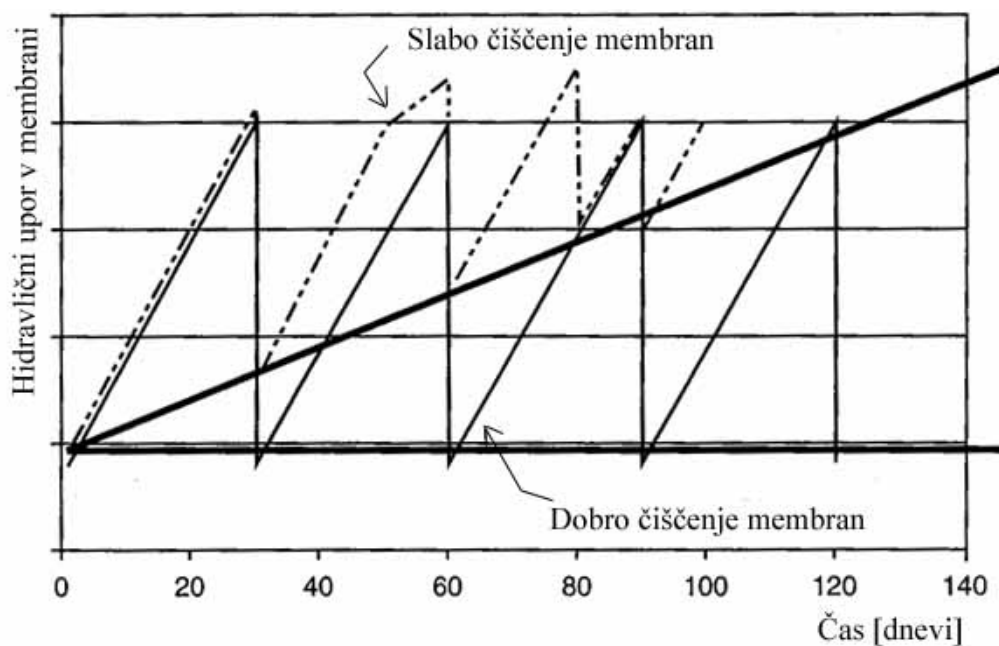
#### **3.6.1.4 Pranje UF**

Večina sistemov ima popolnoma avtomatizirano pranje. Začne se, ko tlak pred membrano, zaradi zmanjšane prepustnosti, doseže določeno vrednost ali ko je pranje določeno s predprogramom, ki natanko določa čas med dvema pranjema. Slednje je priporočljivo le v primeru, ko ima surova voda konstantno kvaliteto. UF membrane se pere s povratnim tokom vode, kateri se lahko dodaja zrak, zaradi česar se zmanjša poraba vode za pranje. Povratno čiščenje se vrši na 15 do 60 minut in traja 1 do 3 minute. Izgube vode znašajo 5 do 10 %. Nekatere ČN dodajajo v pralno vodo tudi plinski klor, kar izboljša učinkovitost pranja [Jacangelo, Noack 2005].

Membrane potrebujejo tudi dodatno kemično čiščenje, s katerim preprečimo biološko razrast in odstranimo delce, ki jih z običajnom pranjem nismo uspeli. Dodatno kemično čiščenje se izvaja na 1 do 6 mesecev za 2 do 24 ur, ko prepustnost membran pade pod kritično mejo, in sicer s povratnim tokom čistilnega sredstva. Kot čistilno sredstvo se najpogosteje uporablja klor, lahko pa tudi različne kisline ali baze, detergenti za pranje, encimi, oksidacijske snovi itd. S segrevanjem snovi za čiščenje na 35–40 °C se izboljša sam učinek pranja ter skrajša čas pranja. O načinu čiščenja se je nujno dogovoriti s samim proizvajalcem membran (o čistilnem sredstvu, trajanju pranja in vrednosti tlaka, ko je potrebno čiščenje), saj lahko napačno čiščenje membrane poškoduje. Tako se obdrži dobra prepustnost membran. Nekatere ČN izvajajo kemično pranje na določen cikel (če ni potrebno prej), npr. 90 dni. S tem zaposleni ohranjajo prakso in po zagotovilih nekaterih proizvajalcev podaljšujejo življensko dobo membrane [Jacangelo, Noack 2005]. Zelo pomembno je, da se membrano kemično temeljito očisti. V nasprotnem primeru je začetni upor v membrani, zaradi ostankov nečistoč, na začetku filtrnega cikla večji od stalnega upora membrane, kar skrajšuje filtrni cikel membrane (glej sliko 30 in 31).



Slika 30: Hidravlični upor v membrani pri učinkovitem in neučinkovitem pranju membran [Vickers 2005].

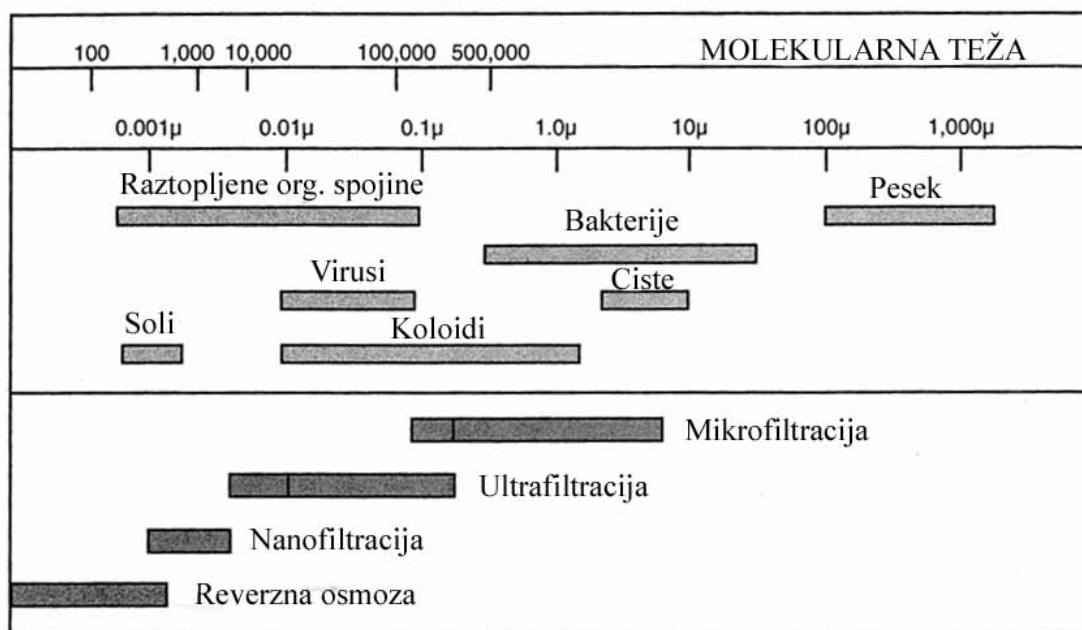


Slika 31: Hidravlični upor v membrani pri učinkovitem in neučinkovitem pranju membran po večih ciklih [Freeman in Vernon 2005].

Kvaliteta surove vode ima največji vpliv na čas cikla med pranju. Zato se je pri projektiranju potrebno zavedati vplivov kvalitete surove vode in razmisliti o potrebnosti predčiščenja.

### 3.6.2 Primerjava UF s klasičnim postopkom čiščenja

Za uspešno odstranjevanje motnosti in dečkov je pri klasičnem postopku potrebno kemično predčiščenje (koagulacija in flokulacija). Te procese je potrebno optimizirati (izbira tipa in koncentracije koagulanta, pH, kontaktni časi in mešalni pogoji). Sama optimizacija je odvisna tudi od kvalitete surove vode, ki se lahko relativno hitro spreminja. Če ti procesi niso optimizirani, lahko majhni delčki prehajajo skozi filtrni material ali pa ostaja v vodi presežek koagulanta. Pri UF so velikosti por približno enakega velikostnega reda in s tem predstavljajo fizično bariero za delce. Čiščenje z UF ni odvisno od nihanj kvalitete surove vode in pri odstranjevanju motnosti in delcev dobimo zadovoljive rezultate tudi brez predčiščenja.



Slika 32: Prikaz območja čiščenja posamezne tehnologije in velikosti delcev, ki jih odstranjujemo [Vickers 2005].

Pri UF je kvaliteta očiščene vode dobra in enakomerna, ne glede na nihanje kvalitete surove vode. Prav tako se kvaliteta očiščene vode ne spreminja zaradi pranja kot pri pranju peščenih filtrov. Vendar pa se je potrebno zavedati, da ima kvaliteta pranja (navadnega in kemičnega) večji vpliv na UF kot pranje pri peščenih filtrih. Pranje UF membran je pogostejše kot pri peščenih filtrih, zaradi česar je dodatna oprema (zasuni, črpalke, merilne

naprave, kontrolni sistem itd.) bolj obremenjena in ji je potrebno posvetiti večjo pozornost pri dimenzioniranju in vzdrževanju.

### **3.6.3 Dimenzioniranje**

Dele UF tehnologije se izdelava v tovarni in se jih nato običajno dostavi v ČN s tovornjaki. Dimenzije sklopov so omejene glede na dimenzije tovornega sredstva, zato sem si pri dimenzioniranju pomagal z prospektom podjetja Aquasource. En modul ima pretok od 1,1 do 1,4 l/s. Izbral sem največji sklop z 12 moduli. Za pretok  $Q = 300 \text{ l/s} = 1080 \text{ m}^3/\text{h}$  je potrebnih 18 do 22 sklopov. Izbral sem 20 sklopov, zato da moduli niso obremenjeni z maksimalnim pretokom in da investicija ni največja.

En sklop ima dimenzije 5,5 x 2,5 x 2,6 m in tehta 2,6 ton. Sklope sem postavil v dve vzporedni vrsti in med sklopi pustil 2 m prostora. Celoten potreben prostor za postavitev 20 sklopov je 17 x 47 m.

Vsak sklop potrebuje  $13 \text{ m}^3$  velik rezervoar vode za pranje. Celoten rezervoar mora imeti volumen  $234 \text{ m}^3$ .

## **3.7 DEZINFEKCIJA**

Najpomembnejša naloga dezinfekcije je preprečevanje pojave bolezni, za katere je vzrok pitna voda oz. patogeni mikroorganizmi v vodi. Te bolezni imenujemo hidrične bolezni. Dezinfekcija odstranjuje ali onesposobi patogene mikroorganizme pred nadaljno distribucijo pitne vode v omrežje do take stopnje, da njihova vsebnost ne predstavlja možne nevarnosti za infekcijo. V zgodovini je imela voda velik vpliv pri prenosu in širitvi mnogih bolezni, kot so npr. tifus, kolera, amebne griže, bacilne okužbe itd. Zato je eden najpomembnejših parametrov pri čiščenju vode preprečevati nastanek in širitev omenjenih bolezni z odstranjevanjem patogenih organizmov iz vode.

Ločimo kemijsko in fizikalno dezinfekcijo. Pri kemijski se lahko uporablja:

- klor,
- kloramini,
- klorov dioksid,
- ozon.

Pri fizikalni dezinfekciji se lahko uporablja:

- UV žarke,
- prekuhavanje (se uporablja le v primeru naravnih nesreč ali okvar),
- UF ali nanofiltracija.

Pri dezinfekciji se je potrebno zavedati možnosti nastajanja novih, mnogokrat toksičnih spojin, ki so posledica reakcij dezinfekcijskega sredstva z organskimi in/ali anorganskimi snovmi v vodi, kar je nesprejemljivo.

Preglednica 6: Stranski produkti dezinfekcije in njihovo učinkovanje na človeka  
[Ravnikar, 2004].

Spojina	Možni zdravstveni problemi	Viri onesnaženja pitne vode
bromat	rak	stranski produkt ozonizacije
bromodiklormetan	rak, jetra, ledvice in reprodukcijski problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode
bromoform	rak, živčni sistem, problemi z jetri in ledvicami	stranski produkt ozonizacije, klorinacije in kloraminacije pitne vode
klorit	slabokrvnost	stranski produkt dezinfekcije s klorovim dioksidom
kloroform	rak, jetra, ledvice in reprodukcijski problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode
dibromoklormetan	živčni sistem, jetra, ledvice in reprodukcijski problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode
dikloroacetilna kislina	rak in drugi problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode

haloacetilna kislina	rak in drugi problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode
trikloroacetilna kislina	možnost raka in reprodukcijskih problemov	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode
trihalometani	rak in drugi problemi	stranski produkt klorinacije in kloraminacije pitne vode

Na tehnologijo in proces dezinfekcije vpliva:

- vrsta mikroorganizmov,
- vrsta, razporeditev in produkti reakcije dezinfektanta v vodi,
- pH vrednost in temperatura vode,
- kvaliteta surove vode,
- kontaktni čas [Rismal, 1995].

V svetu se vedno več uporablja večstopenjska dezinfekcija vode z uporabo različnih tehnologij. Ločimo primarno in sekundarno dezinfekcijo. Primarna dezinfekcija se uporablja za mikrobiološko inaktivacijo. Sekundarna dezinfekcija mora zagotoviti rezidualno delovanje dezinfekcije v vodovodnem sistemu. Sekundarno dezinfekcijsko sredstvo mora imeti zmožnost obstoja v vodovodnem sistemu, zato da zagotovimo neoporečnost vode do zadnjega uporabnika v vodovodnem sistemu. S sekundarno dezinfekcijo moramo preprečiti naknadno onesnaženje v vodovodnem sistemu, do katerega lahko pride zaradi vdora okoliške vode v sistem, srkov na iztočnih mestih ali naknadne zarasti. Izbira dezinfekcijskega sredstva je odvisna od kakovosti vode. V našem primeru bomo ohranili obstoječo dezinfekcijo z UV svetlobo in plinskim klorom za rezidual. Plinski klor je najprimernejši zaradi ugodne cene in široke uporabnosti, poleg tega pa ima možnost kontrole. Zato ostalih kemijskih dezinfektantov ne bom posebej obravnaval.

Pri dezinfekciji je potrebno zagotoviti dovolj velik  $C \cdot t$  faktor, kar imenujemo doza.  $C \cdot t$  faktor predstavlja zmnožek med koncentracijo dezinfekcijskega sredstva in kontaktnim časom [Ravnikar, 2004]:



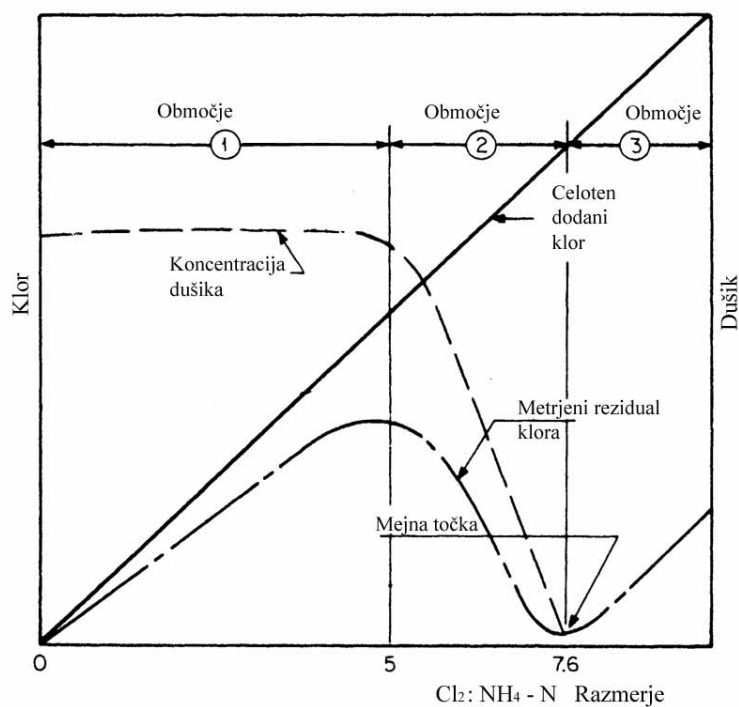
$$C \cdot t = \text{rezidualna koncentracija (mg/l)} \cdot \text{kontaktni čas (min)} \quad [34]$$

Vendar je pomembno, da se skupni  $C \cdot t$  faktor ne dosega le na račun enega izmed obeh: koncentracije ali kontaktnega časa. Potrebno je zagotoviti potrebno koncentracijo dezinfekcijskega sredstva, da je le-ta prisoten do zadnjega odjemalca v sistemu in potreben kontaktni čas, v katerem potečejo vsi procesi in/ali reakcije, s čimer dezinfekcijsko sredstvo doseže učinek.

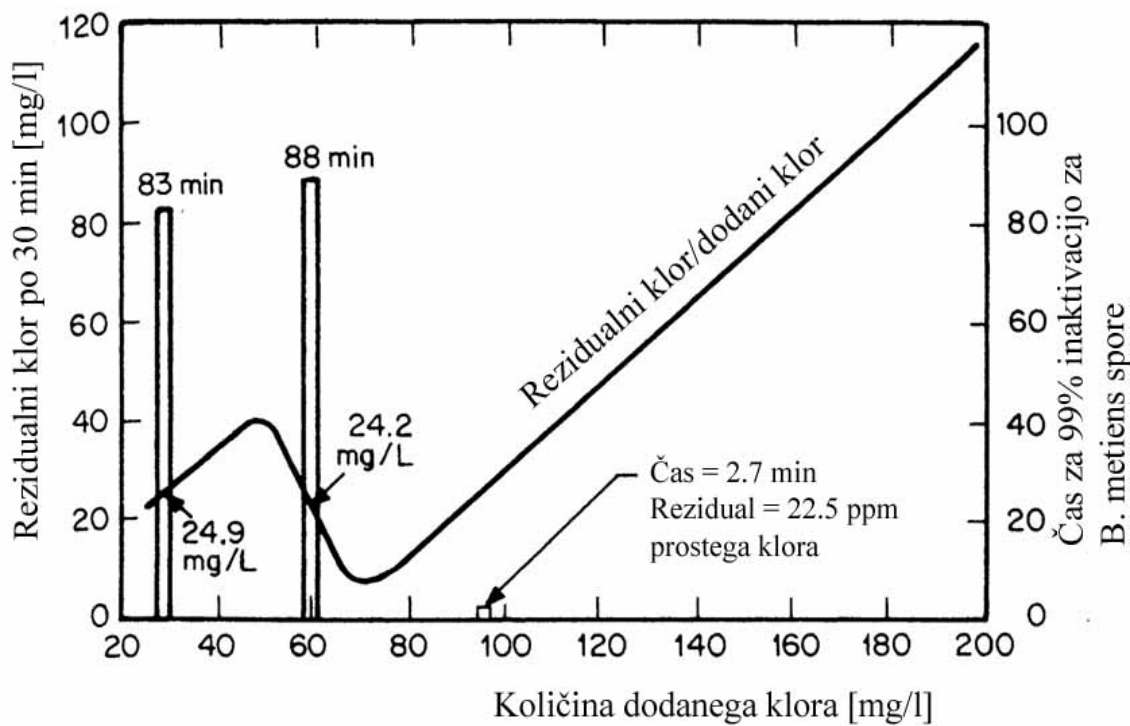
### 3.7.1 Klor

Klor  $\text{Cl}_2$  je rumenkasto zelen plin z dušljivim vonjem, ki se v vodi dobro raztaplja, pri čemer del raztopljenega klora reagira z vodo. Hitrost reakcije s temperaturo pada. Proces dezinfekcije s klorom poteka v dveh stopnjah. V prvem koraku se klor absorbira v notranjost celice in v drugem koraku reagira z encimi, jih tako inaktivira ter s tem povzroči propad celice. Pri reakciji hidrolize nastane klorova (I) kislina  $[\text{HOCl}]$ , ki je med klorovimi kisljinami najmanj obstojna in je prav zato najmočnejši oksidant. Je elektro nevtralna molekula, ki prodira v notranjost mikroorganizma in ga s tem uniči. Obstojnost klorove (I) kisline je odvisna od temperature in predvsem od pH vrednosti. Klor je bolj učinkovit pri nižjih vrednostih pH. Dezinfekcija je učinkovitejša pri višji temperaturi in nižjem pH. Pod vrednostmi pH 5 in nad pH 10 klorova (I) kislina popolnoma razpade na kloratni (I) ion  $\text{OCl}^-$ , ki je mnogo slabše dezinfekcijsko sredstvo [Bregar, 2005]. Poskrbeti je potrebno, da je v vodi 0,1 mg/l prostega rezidualnega klora v obliki klorove (I) kisline.

Klor ima veliko sposobnost oksidacije, ki povzroča razgradnjo organskih snovi. Klor se v vodi najprej veže s hitro oksidirajočimi in organskimi snovmi. Šele ko je dosežena mejna točka, to je ko se izvršijo vse reakcije, pri nadaljnjem dodajanju klora ostaja prosti (rezidualni) klor. To je potrebno upoštevati pri izračunu potrebne količine klora. Zelo pomembno je natančno določiti količino klora, ki je potrebna za dezinfekcijo, saj se s prevelikimi dozami poslabšajo organoleptične lastnosti vode, premajhne doze pa ne zagotavljajo zadostne dezinfekcije.



Slika 33: Detajlni diagram poteka koncentracije rezidualnega klora v odvisnosti od prisotnega dušika [Letterman, 1999].



Slika 34: Diagram poteka dezinfekcije s klorom [Letterman, 1999].

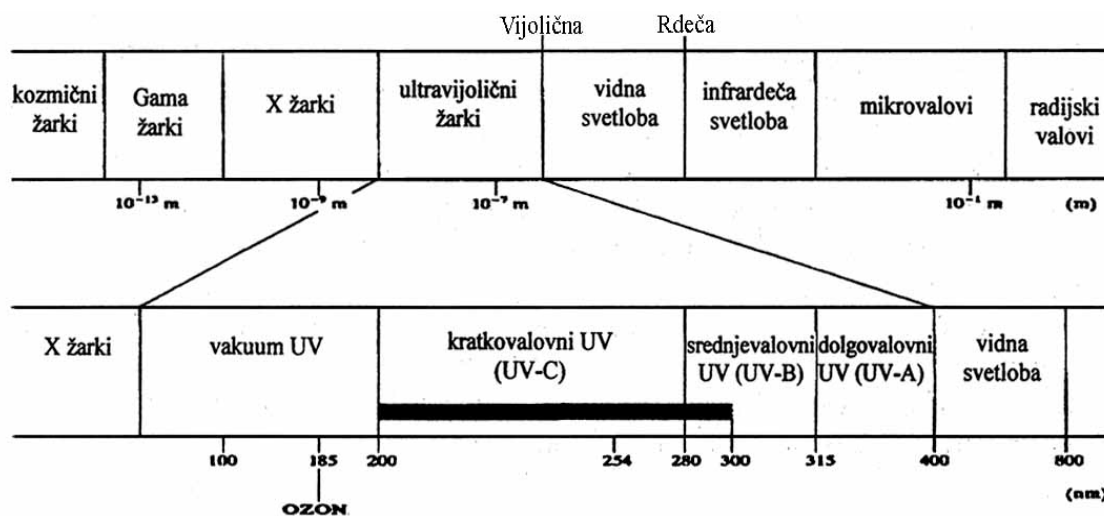
Učinkovitost dezinfekcije s klorom se poveča s podaljševanjem kontaktnega časa. Z dodajanjem amoniaka se zagotovi večja obstojnost klora. Klor tvori z amoniakom kloramine, ki so slabše dezinfekcijsko sredstvo, saj delujejo počasneje in so manj baktericidni, a so v vodi dlje obstojni.

### **3.7.1.1 Stranski produkti dezinfekcije s klorom**

Molekule klora ne reagirajo samo z mikroorganizmi, temveč tudi z organskimi snovmi. Klor tvori z organskimi snovmi trihalometane (THM), ki so halogen substituirane monoogljikove spojine s splošno formulo CHX, kjer je X = fluor, klor, jod, brom ali kombinacija le-teh [Bregar, 2006]. Organske halogenirane snovi spadajo v skupino nevarnih snovi, ki jih s skupnim imenom imenujemo adsorbiljivi organski halogeni (AOX). THM nastanejo pri dezinfekciji vode, pri reakciji klora z organskimi snovmi ali pa so posledica onesnaženja surove vode. THM se uporabljajo kot laboratorijske kemikalije ali kot topila v industriji. Končna koncentracija THM, ki nastanejo pri dezinfekciji, je odvisna od koncentracije organskih snovi v vodi ter od zadrževalnega časa vode v vodooskrbnem sistemu. Koncentracija je običajno na vodnem zajetju nizka, z razdaljo od vodnega zajetja pa se povečuje in na končnih mestih distribucijskega omrežja dosega visoke vrednosti. Uspešno odstranjevanje motnosti organskega izvora je zato pred kloriranjem še toliko bolj pomembno.

### **3.7.2 UV**

UV sevanje spada med kratkovalovna elektromagnetna valovanja z valovno dolžino od 100 do 400 nm (glej sliko 35). Mikroorganizme onesposobi z absorpcijo svetlobe, ki povzroči fotokemično reakcijo, ki spremeni molekularne sestavine, bistvene za življenje celic. UV žarki prodrejo skozi steno celice mikroorganizma. Njihova energija reagira z nukleinskimi kislinami in drugimi sestavinami celice in jih tako onesposobi.



Slika 35: Elektromagnetni spekter z razširjeno lestvico ultravijoličnega sevanja [Ravnikar, 2004].

UV sevanje nastane zaradi poti elektronov skozi ionizirano paro Hg, ki tako proizvajajo sevalno energijo. UV sevanje je razdeljeno na UV-A (valovna dolžina od 315–400 nm), UV-B (od 280–315 nm), UV-C (od 200–280 nm) in vakumska UV (od 100–200 nm). V tehnologiji priprave pitne vode se uporablja UV-C, ker so mikroorganizmi, ki so prisotni v vodi, najbolj občutljivi na valovne dolžine od 240–290 nm. Sevanje UV svetlobe se meri v  $\text{mWs}/\text{cm}^2$ .

Za tretiranje pitne vode se uporabljajo tri vrste UV-C naprav:

- nizekizdatne z nizko izdatnostjo (NT-N),
- nizekizdatne z visoko izdatnostjo (NT-V),
- srednjizdatne (ST).

V zadnjem času se pojavljajo tudi novi sistemi UV naprav kot sta mikrosito-UV naprave in pulzirajoče UV naprave.

UV doza, potrebna za inaktivacijo večjih parazitov (kot *Cryptosporidium* in *Giardia*), je večkrat večja kot za viruse in bakterije. Bakterije in velika večina virusov se inaktivirajo že pri 30-krat manjši dozi. V več primerih se inaktivirajo celo bolje kot s  $\text{Cl}_2$ . Izjema je

Adenovirus, ki potrebuje večjo dozo. Prisotnost Fe (več kot 0,65 mg/l) v vodi negativno vpliva na učinkovitost UV dezinfekcije.

Pri ugotavljanju primerne doze sevanja UV za inaktivacijo parazitov sta pomembna predvsem dva faktorja t. j. izvor parazita ter stopnja rasti mikroorganizma. Ker je vpliv UV sevanja na mikroorganizme v vodi še vedno predmet intenzivnega raziskovanja, se tudi ugotovitve z leti spreminjajo.

Nizkotlačne (NT) in srednjetačne (ST) žarnice se ločijo po spektru emisije. NT so monokromatske in oddajajo UV svetlobo s specifično valovno dolžino 254 nm. ST so polikromatske in oddajajo UV svetlobo v različnih špicah UV spektra (od 200 do 400 nm).

Kritične komponente različnih UV naprav se od ponudnika do ponudnika občutno razlikujejo. Kljub temu vse UV naprave vsebujejo 6 osnovnih elementov, ki jih je potrebno upoštevati pri projektiranju in vodenju ČN:

- UV žarnice,
- transformatorji žarnic,
- oblika reaktorja,
- način čiščenja,
- kontrola naprave,
- vrsta protokola za vrednotenje, ki se ga uporablja za potrditev naprave.

Na UV dezinfekcijo imajo vpliv sledeči elementi iz okolice:

- kemični in biološki filmi, ki nastanejo na površini UV žarnic,
- raztopljene organske in anorganske snovi v vodi,
- združevanje mikroorganizmov v grozde,
- motnost,
- barva,
- nepravilen tok vode skozi UV reaktor.

## **4 PRIMERJALNA ANALIZA RAZLIČNIH NAČINOV ČIŠČENJA SUROVE VODE**

### **4.1 OSNOVE**

Na osnovi rezultatov organoleptičnih, fizikalnih, kemijskih in bioloških analiz sem med seboj primerjal več različnih možnosti čiščenja surove vode. Med seboj so primerjane različne možne tehnologije čiščenja, ki v liniji čiste vode vsebujejo sledeče tehnološke postopke:

1. koagulacija in flokulacija, lamelni usedalnik, trije dvoslojni peščeni filtri, ozonacija, zrnavi ogljeni filtri (GAC), dezinfekcija z UV in  $\text{Cl}_2$  za rezidual;
2. koagulacija in flokulacija, lamelni usedalnik, šest dvoslojnih peščenih filtrov, ozonacija, GAC, dezinfekcija z UV in  $\text{Cl}_2$  za rezidual;
3. koagulacija in flokulacija, lamelni usedalnik, ozonacija, šest enoslojnih peščenih filtrov, dezinfekcija z UV in  $\text{Cl}_2$  za rezidual;
4. koagulacija in flokulacija, lamelni usedalnik, ozonacija, trije enoslojni peščeni filtri, GAC, dezinfekcija z UV in  $\text{Cl}_2$  za rezidual;
5. dodajanje oglja v prahu, 100  $\mu\text{m}$  sito, nadtlačna ultrafiltracija, dezinfekcija z UV in  $\text{Cl}_2$  za rezidual.

Vse omenjene tehnologije so med seboj primerjane s sledečimi kriteriji:

- investicija,
- kvaliteta očiščene vode,
- obratovanje (električna priključna moč, poraba elektrike, poraba kemikalij),
- vzdrževanje,
- ekološki vplivi (hrup, mrčes, vizualno onesnaženje),

- prostorske omejitve,
- neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let (to je povprečna vrednost, saj je strojna oprema računana za 15 let in gradbeni del za 30 let).

Vsi kriteriji so ovrednoteni z ocenami od 1 do 10 in potem ponderirani glede na njihovo pomembnost. Poleg tega so opisno v preglednicah prikazane tudi prednosti in pomanjkljivosti posamezne tehnologije.

## **4.2 OPISI POSAMEZNIH TEHNOLOGIJ**

### **4.2.1 Varianta ČN 1 – Predelana obstoječa ČN (trije dvoslojni peščeni filtri in dva GAC filtra)**

Obstoječi usedalnik – akcelerator bo uporabljen le kot vtočni VH. Celotna notranjost bo porušena in pregrajena v dva polkrožna dela ( $2 \times 500 \text{ m}^3$ ), ki bosta služila kot groba peskolova in predvsem za hidravlično razbremenjevanje načrpane vode. Usedalnik v stari ČN bo predelan v dve liniji treh reakcijskih bazenov z dvema lamelnima usedalnikoma. Ostali deli tehnologij bodo opuščeni. V novejši ČN bo posodobljena tehnološka linija ozonizacije, na novo bodo zgrajene kontaktne ozonizacijske komore, rekonstruirani bodo peščeni in ogljeni filtri in izboljšano bo pranje filtrov. VH v stari ČN bo prenovljen. Njegova notranjost bo predelana v dve vodni celici. Zgrajen bo nov objekt za obdelavo blata, v katerega bo prestavljena dezinfekcija z UV in klorom.

Surova voda bo črpana v vtočni VH, od koder bo gravitacijsko odtekala v reakcijske bazene. Surovi vodi bo v reakcijskih bazenih dodajan koagulant – aluminijev sulfat ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) – pripravljen kot raztopina. Koagulant bo dodajan avtomatsko, količina bo odvisna od motnosti vode. Potrebno je preurediti skladišče kemikalij in vmešavanje koagulanta v novejši ČN. Obstoječa usedalnika v stari ČN bosta rekonstruirana v dve liniji s tremi reakcijskimi bazeni, v katerih bo potekala koagulacija in flokulacija. Reakcijski bazeni bodo postavljeni v prvi del obstoječih usedalnikov. Prvi bazen, ki bo služil za dodajanje koagulanta, bo kvadratne oblike površine  $S = 5,76 \text{ m}^2$  z

vgrajenim mešalom za hitro mešanje. Inštalirana moč mešala bo  $P = 6,8$  kW, zadrževalni čas bo  $t = 90$  s in hitrostni gradient  $G = 600$ . Drugi bazen, ki bo služil za dodajanje pomožnega koagulanta ali popravljanje pH, bo kvadratne oblike površine  $S = 5,76$  m<sup>2</sup> in z vgrajenim mešalom za hitro mešanje. Inštalirana moč mešala bo  $P = 6,8$  kW, zadrževalni čas  $t = 90$  s in hitrostni gradient  $G = 600$ . Tretji, umirjevalni bazen, kjer bodo tvorjene flokule, bo z vgrajenim mešalom za počasno mešanje. Inštalirana moč mešala bo  $P = 200$  W, zadrževalni čas  $t = 18,9$  min in hitrostni gradient  $G = 30$ . Njegova površina bo  $S = 42,5$  m<sup>2</sup> in globina  $h = 4$  m. Voda se bo iz umirjevalnega bazena prelivala v usedalnik. Obstoječa klasična usedalnika bosta predelana v lamelna usedalnika. Lamelle, izdelane iz plošč, bodo postavljene vzporedno s tokom vode, nagnjene za  $55^\circ$  in v medsebojni razdalji  $0,05$  m. Pri površinski obremenitvi  $v_0 = 0,95$  m/h bodo lamelle vgrajene v dolžino  $l = 14$  m in globino  $1,5$  m. Površina ene linije plošč bo  $S = 1,5$  m x  $14$  m =  $21$  m<sup>2</sup>. Potrebni bodo 200 lamelnih vrst (v vsakem bazenu po 100). Na dnu lamelnih usedalnikov bo prostor za nabiro in zgoščevanje ter naprava za odstranjevanje flokul. Ostali prostor obstoječih usedalnikov bo opuščen. Iz lamelnih usedalnikov bo voda odtekala po odprtem žlebu in potem gravitacijsko po ceveh do peščenih filtrov. Uporabili se bodo le peščeni filtri v novejši ČN.

Skupna površina filtrov bo  $135$  m<sup>2</sup> in hitrost filtriranja  $8$  m/h. Gladina vode bo  $1,5$  m nad nivojem filtrov. Filtri bodo dvoslojni. Prvi sloj debeline  $60$  cm bo iz antracita granulacije  $d = 0,8$ – $1,6$  mm. Drugi sloj debeline  $90$  cm bo iz belega kremenčevega peska granulacije  $d = 0,59$ – $0,84$  mm. Nosilni sloj bo debeline  $0,2$  m in granulacije  $3$ – $5$  mm. Sejalne krivulje filtrskega materiala morajo ležati tesno ob predpisanih sejalnih krivuljah. Zaradi debelejšega filtrnega sloja je potrebno dotočne in odtočne kanale dvigniti.

Voda bo iz peščenih filtrov črpana v kontaktne ozonizacijske komore. Dozirano bo  $0,1$ – $1,5$  mg O<sub>3</sub>/l. Potrebno je zamenjati že dotrajane ozonizatorje z novimi. Potrebna sta dva ozonizatorja, vsak z inštalirano močjo  $0,84$  kW, dimenzij  $2,8$  x  $1,2$  x  $2,0$  m. Ozonizatorja bosta proizvedla maksimalno  $1,6$  kg O<sub>3</sub>/h. Kontaktne ozonizacijske komore je potrebno prestaviti v objekt novejši ČN poleg prostora, kjer bodo postavljeni ozonizatorji. Potrebni so 6 komor. Globina vode v komorah bo  $5$  m. Ozon se bo vpihoval le v prvo komoro. Odzračevanje z uničevalci ozona bo urejeno na strehi s katalizatorskim razgrajevalcem. Kot katalizator bo uporabljal manganov dioksid (MnO<sub>2</sub>).



Voda bo gravitacijsko odtekala na obstoječa filtra GAC. Njuna skupna površina bo  $90 \text{ m}^2$  in hidravlična obremenitev  $12 \text{ m/h}$ . Debelina sloja GAC bo  $1,8 \text{ m}$  in granulacije  $1\text{--}1,8 \text{ mm}$ . Zadrževalni čas bo  $9 \text{ min}$ . S tem je doseženo odstranjevanje vonja in okusa, ter odstranjevanje organske snovi. Nosilno ploščo GAC bo potrebno spustiti za  $0,6 \text{ m}$ , hkrati pa dvigniti ter preurediti dotočne in odtočne kanale.

Iz ogljenih filtrov bo voda odvedena v  $2.000 \text{ m}^3$  VH prečiščene vode, ki bo obnovljen v obstoječem objektu stare ČN. VH bo pregrajen v dve celici, ki bosta še dodatno pregrajeni s predelno steno za boljše kroženje in izmenjavo vode. S preureditvijo cevja v armaturni celici VH bo izboljšana izraba njegove prostornine.

Pred iztokom v omrežje bo izvedena še dezinfekcija z UV in dodan plinski klor za rezidual. Obstoječe dezinfekcijske naprave bodo predstavljene v nov objekt za obdelavo blata.

V objektu novejši ČN bo potrebno na novo urediti pranje filtrov. Potrebno je urediti dotočne žlebove, sapnice in kompresor. Filtrsko dno bo dvojno s sapnicami. Pranje bo izvajano s kombinacijo vode in zraka. Hitrost vode pri pranju bo  $50 \text{ m/h}$ , hitrost zraka  $60\text{--}80 \text{ m/h}$ . Na črpalke za pranje je potrebno montirati mehki zagon in frekvenčne regulatorje. Ekspanzija sloja antracita bo pri pranju s hitrostjo  $50 \text{ m/h}$  približno  $30 \%$  in ekspanzija kremenčevega peska  $15 \%$ . Žlebovi za odvod pralne vode bodo nad površino filtra nameščeni tako, da bo izgubljanje filtrskega materiala čim manjše. V posebnem objektu bo izvedena obdelava umazane vode iz ČN. Onesnažena voda od pranja bo odvedena v poseben kompenzacijski bazen umazane vode, ki bo služil tudi kot reakcijski bazen za dodajanje polielektrolita. Nato bo voda odtekala v lamelni usedalnik z zgoševalcem na dnu (glej sistem Densadeg) in od tu na avtomatsko filtrno stiskalnico. Pred filtrno stiskalnico bo blatu dodano še apneno mleko (ali polielektrolit). Potrebno bo urediti začasno odlaganje blata. Dehidrirano blato se bo odvažalo na komunalno urejeno deponijo.

Predvidena so naslednja merilna mesta:

- v črpališču: pretok, temperatura, pH, motnost, električna prevodnost in celoten organski ogljik (TOC);
- pred peščenimi filtri: pH;
- pred dezinfekcijo: pretok in motnost.

Potrebna bo rekonstrukcija dovozne ceste na območju bodočega platoja pred objektom za obdelavo blata.

ČN bo delovala avtomatsko. Potrebna bo le občasna kontrola delovanja. Vendar bo potrebna dnevna kontrola dehidracije blata pralne vode. Ta postopek potrebuje tudi ročno delo.

Opombe (veljajo tudi za druge variante):

- Če prestavitev ozonizacijskih komor zaradi kasnejših ugotovitev ne bo mogoča, je potrebno obnoviti in predelati obstoječe kontaktne komore. Srednjo komoro se bo pregradilo v dve komori. Ozon se bo vpihoval le v prvo komoro.
- Pranje vsakega filtrnega polja priporočamo vsaj enkrat na pet dni, če je potrebno, tudi večkrat.
- Sejalne krivulje filtrskega materiala morajo ležati tesno ob predpisanih sejalnih krivuljah.

#### **4.2.2 Varianta ČN 2 – Predelana obstoječa ČN (šest dvoslojnih peščenih filtrov in dva GAC filtra)**

Obstoječi okrogli usedalnik in usedalnik v stari ČN bosta preurejena na enak način kot pri prvi varianti. Na mestu vseh obstoječih filtrov, v novejši ČN in stari ČN, bodo zgrajeni preurejeni peščeni filtri in filtra iz GAC. Enako kot pri prvi varianti bodo adaptirani ali zgrajeni še sledeči objekti: ozonizator, kontaktne komore za ozon, skladiščenje kemikalij, 2.000 m<sup>3</sup> VH v stari ČN in njegova armaturna celica, pranje filtrov, objekt za obdelavo blata (vanj prestavljena dezinfekcija) in rekonstrukcija ceste.

Tok vode je do peščenih filtrov popolnoma enak kot pri prvi varianti. Tu se tok vode, za razliko od prve variante, razdeli in voda odteka na 6 peščenih filtrov (trije v stari in trije v novejši ČN).

Filtracija bo potekala skozi tri obstoječe pravokotne filtre v novejši ČN s površino 135 m<sup>2</sup> in skozi tri nove pravokotne filtre v stari ČN dimenzij 6 x 6,3 m in s površino 113,4 m<sup>2</sup>. Skupna površina filtrov bo 248,4 m<sup>2</sup>. Pretok bo deljen v razmerju glede na površino. Hitrost filtriranja bo 4,4 m/h. Gladina vode bo 1,5 m nad nivojem filtra. Filtri bodo dvoslojni, sestavljeni iz 0,6 m debelega sloja antracita z granulacijo  $d = 0,8-1,6$  mm ter 0,9 m debelega sloja iz belega kremenčevega peska z granulacijo  $d = 0,59-0,84$  mm. Nosilni sloj bo debeline 0,2 m in granulacije 3–5 mm. Potrebno je preurediti dotočne in odtočne kanale v filtrih. Zaradi debelejšega filtrnega sloja je potrebno dotočne in odtočne kanale dvigniti. Filtri v stari ČN bodo preurejeni in povečani. Voda bo iz peščenih filtrov v novejši ČN črpana v kontaktne ozonizacijske komore, medtem ko bo iz peščenih filtrov v stari ČN vanje odtekala gravitacijsko.

Ozonacija je enaka kot pri prejšnji varianti.

Iz kontaktnih komor bo voda gravitacijsko odtekala na obstoječa filtra iz GAC. Površina ogljenih filtrov bo 90 m<sup>2</sup>, hitrost bo 12 m/h. Debelina sloja GAC bo 1,8 m in granulacija 1,0–1,8 mm. Zadrževalni čas bo 9 min. S tem je doseženo odstranjevanje vonja in okusa ter odstranjevanje organske snovi. Nosilna plošča bo spuščena za 0,6 m, medtem ko bodo dotočni in odtočni kanali dvignjeni.

Iz GAC bo voda odvedena v 2.000 m<sup>3</sup> VH prečiščene vode.

Predvidena so naslednja merilna mesta:

- v črpališču: pretok, temperatura, pH, motnost, električna prevodnost in celoten organski ogljik (TOC);
- pred peščenimi filtri: pH;
- pred dezinfekcijo: pretok in motnost.

ČN bo delovala avtomatsko. Potrebna bo le občasna kontrola delovanja. Vendar bo potrebna dnevna kontrola dehidracije blata pralne vode. Ta postopek potrebuje tudi ročno delo.

#### **4.2.3 Varianta ČN 3 – Predelana obstoječa ČN (šest enoslojnih peščenih filtrov brez uporabe GAC filtrov)**

Obstoječi okrogli usedalnik in usedalnik v stari ČN bosta preurejena na enak način kot pri prvi varianti. Na mestu vseh obstoječih filtrov bodo zgrajeni preurejeni enoslojni peščeni filtri. Enako kot pri prvi varianti bodo adaptirani ali zgrajeni še sledeči objekti: ozonizator, kontaktne komore za ozon, skladiščenje kemikalij, 2.000 m<sup>3</sup> VH v stari ČN in njegova armaturna celica, pranje filtrov, objekt za obdelavo blata (vanj prestavljena dezinfekcija) in rekonstrukcija ceste.

Tok surove vode skozi lamelne usedalnike je enak kot pri predhodnih variantah. Iz lamelnega usedalnika bo voda gravitacijsko odtekala v kontaktne ozonizacijske komore, ki bodo urejene enako kot pri prejšnji varianti. Iz ozonizacijskih komor se bo voda gravitacijsko pretakala na peščene filtre v novejšo ČN in se črpala na peščene filtre v staro ČN.

Filtracija bo potekala skozi tri obstoječe pravokotne filtre v novejši ČN s površino 135 m<sup>2</sup> in tri nove pravokotne filtre v stari ČN (6 x 6,3 m). Skupna površina filtrov bo 248,4 m<sup>2</sup>. Pretok se deli v razmerju glede na površino. Hitrost filtriranja bo 4,4 m/h. Gladina vode bo 1,5 m nad nivojem filtrov. Filtri bodo sestavljeni iz belega kremenčevega peska z debelino sloja filtra 1,5 m in granulacijo zrn  $d = 0,59-0,84$  mm. Nosilni sloj bo debeline 0,2 m in granulacije 3–5 mm. Zaradi debelejšega filtrnega sloja je potrebno dotočne in odtočne kanale dvigniti.

Ogljena filtra bosta opuščena.

Voda bo iz peščenih filtrov odtekala v 2000 m<sup>3</sup> VH prečiščene vode. Ostalo je enako kot pri prejšnjih dveh variantah.

Predvidena so naslednja merilna mesta:

- v črpališču: pretok, temperatura, pH, motnost, električna prevodnost in celoten organski ogljik (TOC);
- za lamelnima usedalnikoma: pH;
- pred dezinfekcijo: pretok in motnost.

ČN bo delovala avtomatsko. Potrebna bo le občasna kontrola delovanja. Vendar bo potrebna dnevna dehidracija blata pralne vode. Ta postopek potrebuje tudi ročno delo.

#### **4.2.4 Varianta ČN 4 – Predelana obstoječa ČN (trije enoslojni peščeni filtri in dva GAC filtra)**

Obstoječi okrogli usedalnik in usedalnik v stari ČN bosta preurejena na enak način kot pri prvi varianti. Na mestu treh obstoječih filtrov v objektu nove ČN bodo zgrajeni preurejeni enoslojni peščeni filtri. Filtri v stari ČN bodo opuščeni. Rekonstruirana bosta oba filtra iz GAC. Enako kot pri prvi varianti bodo adaptirani ali zgrajeni še sledeči objekti: ozonizator, kontaktne komore za ozon, skladiščenje kemikalij, 2.000 m<sup>3</sup> VH v stari ČN in njegova armaturna celica, pranje filtrov, objekt za obdelavo blata (vanj prestavljena dezinfekcija) in rekonstrukcija ceste.

Surova voda bo skozi lamelna usedalnika odtekala na enak način kot pri predhodnjih variantah. Iz lamelnega usedalnika pa bo gravitacijsko odtekala v kontaktne ozonizacijske komore. Iz njih bo gravitacijsko tekla na peščene filtre v novejši ČN. Skupna površina filtrov bo 135 m<sup>2</sup>, hitrost filtriranja bo 8 m/h. Gladina vode bo 1,5 m nad nivojem filtra. Filtri bodo enoslojni z debelino sloja 1,5 m. Sestavljeni bodo iz belega kremenčevega peska granulacije  $d = 0,59\text{--}0,84$  mm. Pod njimi bo še nosilni sloj debeline 0,2 m in granulacije 3–5 mm. Filtre je potrebno dvigniti toliko, da se bo voda kljub hidravličnim izgubam gravitacijsko pretakala v filtra iz GAC. Dotočne in odtočne kanale bo potrebno dvigniti in posodobiti. Površina filtrov iz GAC bo 90 m<sup>2</sup> in njihova hidravlična obremenitev 12 m/h. Debelina sloja filtra iz GAC bo 1,8 m, granulacija pa 1,0–1,8 mm. Zadrževalni čas bo 9 min. S tem je doseženo odstranjevanje vonja in okusa ter

odstranjevanje organske snovi. Nosilno ploščo bo potrebno spustiti za 0,6 m in hkrati dvigniti ter preurediti dotočne in odtočne kanale.

Voda bo iz ogljenih filtrov odtekala v 2.000 m<sup>3</sup> VH prečiščene vode.

Predvidena so naslednja merilna mesta:

- v črpališču: pretok, temperatura, pH, motnost, električna prevodnost in celoten organski ogljik (TOC);
- za lamelnima usedalnikoma: pH;
- pred dezinfekcijo: pretok in motnost.

ČN bo delovala avtomatsko. Potrebna bo le občasna kontrola delovanja. Vendar bo potrebna dnevna dehidracija blata pralne vode. Ta postopek potrebuje tudi ročno delo.

#### **4.2.5           Varianta ČN 5 – Nadtlačna ultrafiltracija (UF)**

Obstoječi usedalnik – akcelerator bo rekonstruiran v bazen za doziranje aktivnega oglja v prahu (PAC) z mešalom. Na strehi bo postavljen silos za PAC s prostornino 21 m<sup>3</sup>. V objektu novejši ČN bo urejen prostor za UF module in sklope, prostor za skladiščenje kemikalij in pranje membran. Objekt stare ČN se razen VH ne bo uporabljal. Enako kot pri prejšnjih variantah bodo urejeni sledeči objekti: 2.000 m<sup>3</sup> VH v stari ČN z armaturno celico, objekt za obdelavo blata in dovozna cesta.

Surova voda bo najprej črpana do bazena za doziranje PAC (prah zrnastost < 0,1 mm), ki bo dodajan avtomatsko glede na meritve prisotnosti TOC. Poraba je odvisna od vsebnosti organskih snovi v surovi vodi. Iz bazena bo voda odtekala na tlačno 100 µm sito z avtomatskim pranjem. Sito bo postavljeno v preurejeni armaturni celici usedalnika.

Po končani predfiltraciji se bo vodo preko črpalk odvedlo na UF sklope, ki bodo sestavljeni iz modulov. V modulih bodo membrane v obliki cevčic premera 0,8 mm. Cut-off membranskega materiala mora biti vsaj 0,03 µm. Padec tlaka na prehodu skozi

membrane bo od 0,5 do 1 bar. Površina enega modula bo približno 35 m<sup>2</sup> in običajna prepustnost pri 10°C 0,06 m/h.

Na UF prečiščena voda bo nato odtekala v 2.000 m<sup>3</sup> VH prečiščene vode

Pred iztokom v omrežje bo izvedena še dezinfekcija z UV in dodan plinski klor za rezidual. Obstoječe dezinfekcijske naprave bodo predstavljene v nov objekt za obdelavo blata.

Pranje sklopov UF se bo izvajalo z vodo, ki se ji bo občasno dodajalo potrebne kemikalije. Sklopi bodo prani eden za drugim, tako da se črpalke vmes ne bodo ustavljale. Tako dosežemo manjše število vklopov in izklopov črpalk. Črpalke za pranje bodo vgrajene v kletnih prostorih novejše ČN. S kemikalijami onesnažena voda od pranja UF membran bo prelivana v poseben bazen za deklorinacijo, ki bo zgrajen v istem objektu kot UF sklopi. Deklorirana pralna voda bo speljana v odvodne kanale linije blata. S suspendiranimi snovmi bolj onesnažena odpadna voda iz začetka pranja membran pa bo odvajana v poseben bazen za goščo, ki bo zgrajen poleg bazena za deklorinacijo. Obdelava blata je predvidena na enak način kot pri prejšnjih variantah.

Predvidena so naslednja merilna mesta:

- v črpališču: pretok, temperatura, pH, motnost, električna prevodnost in celoten organski ogljik (TOC);
- pred dezinfekcijo: pretok in motnost.

Linija čiste vode nove ČN bo delovala popolnoma avtomatsko. Potrebna bo le občasna kontrola delovanja. Na liniji blatne vode pa bo pri vsakodnevni dehidraciji potrebno tudi ročno delo.

## **5 TABELARIČNI PRIKAZ VREDNOTENJA RAZLIČNIH TEHNOLOGIJ ČN**

Na naslednjih straneh so v obliki tabel prikazane naslednje primerjave:

- ocena današnje investicije posamezne tehnologije ČN,
- letni stroški obratovanja,
- neto sedanja vrednost za 20 let (gradbena dela se ocenijo za naslednjih 30 let in strojna oprema za naslednjih 15 let),
- prednosti in pomanjkljivosti posameznih ČN,
- kriteriji in ocene,
- ponderiranje.



**Preglednica 7: Ocena današnje investicije primerjanih tehnologij za ČN Mrzlek – neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let.**

	ČN 1 [3 d. p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 2 [6 d. p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 3 [O <sub>3</sub> + 6 e. p. f.]	ČN 4 [O <sub>3</sub> + 3 e. p. f. + GAC]	PAC + UF
Potrebna voda za pranje	6–7 %	8–9 %	7–8 %	7–8 %	4–5 %
Motnost po čiščenju	< 0,3 NTU	< 0,3 NTU	< 0,3 NTU	< 0,3 NTU	< 0,1 NTU
Odstranjevanje cist	s koagulacijo odstrani	s koagulacijo odstrani	s koagulacijo odstrani	s koagulacijo odstrani	popolnoma odstrani
<b>Ocena investicije (brez DDV)</b>	<b>3,13 mio € (750 mio SIT)</b>	<b>3,56 mio € (855 mio SIT)</b>	<b>3,40 mio € (815 mio SIT)</b>	<b>3,06 mio € (735 mio SIT)</b>	<b>5,19 mio € (1245 mio SIT)</b>
Električna priključna moč	410 kW	550 kW	550 kW	370 kW	580kW
Letni stroški električne priključne moči	6130 € (1,47 mio SIT)	8210 € (1,97 mio SIT)	8210 € (1,97 mio SIT)	5500 € (1,32 mio SIT)	8750 € (2,1 mio SIT)
Povprečna dnevna poraba elektrike	3375 kWh	3340 kWh	3340 kWh	2690 kWh	2906 kWh
Letni stroški porabe elektrike	128500 € (30,84 mio SIT)	127100 € (30,5 mio SIT)	127100 € (30,5 mio SIT)	102100 € (24,5 mio SIT)	110500 € (26,5 mio SIT)
Letni stroški porabe kemikalij	116700 € (28 mio SIT)	116700 € (28 mio SIT)	116700 € (28 mio SIT)	116700 € (28 mio SIT)	120000 € (12 mio SIT)
Število zaposlenih	6	6	6	6	4
Letni stroški osnovnega vzdrževanja	44600 € + menjava GAC 3x letno (skupaj) 33400 € + dodajanje filtrnega peska 1x mesečno (skupaj) 10500 € + menjava UV žarnic 1x letno (skupaj) 12500 €	44700 € + menjava GAC 3x letno (skupaj) 33400 € + dodajanje filtrnega peska 1x mesečno (skupaj) 16700 € + menjava UV žarnic 1x letno (skupaj) 12500 €	43000 € + dodajanje filtrnega peska 1x mesečno (skupaj) 16700 € + menjava UV žarnic 1x letno (skupaj) 12500 €	44600 € + menjava GAC 3x letno (skupaj) 33400 € + dodajanje filtrnega peska 1x mesečno (skupaj) 10500 € + menjava UV žarnic 1x letno (skupaj) 12500 €	29600 € + letna poraba PAC (skupaj) 16700 € + zamenjava membran po 7,5 letih delovanja: 250 mio SIT
<b>Neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let</b>	<b>5,48 mio € (1315,5 mio SIT)</b>	<b>5,84 mio € (1402,1 mio SIT)</b>	<b>5,45 mio € (1307,1 mio SIT)</b>	<b>5,16 mio € (1239,2 mio SIT)</b>	<b>7,52 mio € (1804 mio SIT)</b>

**Preglednica 8: Prednosti in pomanjkljivosti posameznih tehnologij za ČN Mrzlek.**

	ČN 1 [3 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 2 [6 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 3 [O <sub>3</sub> + 6 p. f.]	ČN 4 [O <sub>3</sub> + 3 p. f. + GAC]	PAC + UF
<b>+</b> prednosti	- kvaliteta čiščenja vode dobra glede motnosti - širši spekter čiščenja	- kvaliteta čiščenja vode dobra glede motnosti - širši spekter čiščenja	- enostavno vzdrževanje - kvaliteta čiščenja vode dobra glede motnosti - manjši stroški vzdrževanja kot pri prejšnjih variantah	- kvaliteta čiščenja vode dobra glede motnosti - voda se po ČN pretaka popolnoma gravitacijsko - manjša poraba električne energije	- kvaliteta vode zelo dobra glede mikroorganizmov in motnosti - idealna za odstranjevanje nizkih motnosti - zaustavitev in ponovni zagon neproblematična za kvaliteto filtrata - velika stopnja avtomatizacije - potreben manjši gradbeni poseg - manjše osnovno vzdrževanje - brez vnosa kemikalij v tretirano vodo - majhni stroški za kemikalije (občasno doziranje) - moderna tehnologija, ki je v razmahu - konstantna kvaliteta filtrata - vse strožji predpisi so v prid njene uporabe

<p>■ pomanj- kljivosti</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- v pitni vodi prisotnost dodanih kemikalij</li> <li>- potreben večji gradbeni poseg</li> <li>- večja poraba električne energije</li> <li>- večje osnovno vzdrževanje</li> <li>- velika poraba stroškov za kemikalije</li> <li>- zaustavitev in ponovni zagon problematična za kvaliteto filtrata</li> <li>- več ročnega dela zaradi dodajanja filtrskega peska in pogostejše menjave GAC filtra</li> <li>- večja prometna frekvenca zaradi dobave materiala (peska, GAC, kemikalij)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- v pitni vodi prisotnost dodanih kemikalij</li> <li>- potreben večji gradbeni poseg</li> <li>- večja poraba električne energije</li> <li>- večje osnovno vzdrževanje</li> <li>- velika poraba stroškov za kemikalije</li> <li>- zaustavitev in ponovni zagon problematična za kvaliteto filtrata</li> <li>- več ročnega dela zaradi dodajanja filtrskega peska in menjave GAC filtra</li> <li>- večja prometna frekvenca zaradi dobave materiala (peska, GAC, kemikalij)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kvaliteta očiščene vode slabša kot pri ostalih variantah</li> <li>- kvaliteta vode ob primeru posebnih onesnaženj nezadovoljiva</li> <li>- kvaliteta čiščenja vode najmanj zadovoljiva glede mikroorganizmov</li> <li>- v pitni vodi prisotnost dodanih kemikalij</li> <li>- potreben večji gradbeni poseg</li> <li>- zaustavitev in ponovni zagon problematična za kvaliteto filtrata</li> <li>- večja poraba električne energije zaradi pogostosti pranja</li> <li>- večje osnovno vzdrževanje</li> <li>- velika poraba stroškov za kemikalije</li> <li>- več ročnega dela zaradi dodajanja filtrskega peska</li> <li>- večja prometna frekvenca zaradi dobave materiala (peska, kemikalij)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- v pitni vodi prisotnost dodanih kemikalij</li> <li>- potreben večji gradbeni poseg</li> <li>- večje osnovno vzdrževanje</li> <li>- velika poraba stroškov za kemikalije</li> <li>- zaustavitev in ponovni zagon problematična za kvaliteto filtrata</li> <li>- več ročnega dela zaradi dodajanja filtrskega peska in pogostejše menjave GAC filtra</li> <li>- večja prometna frekvenca zaradi dobave materiala (peska, GAC, kemikalij)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- po 7,5 letih potrebna večja investicija zaradi zamenjav membran</li> <li>- velika poraba električne energije</li> </ul>
------------------------------------	--	---	---	--	--

### Preglednica 9: Kriteriji in ocene.

V razpredelnici so različne predlagane tehnološke variante ocenjene s sedmimi kriteriji. Ti kriteriji so: investicija, kvaliteta čiščenja vode, obratovanje, vzdrževanje, poraba kemikalij, ekološki vplivi in neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let. Ocenili sem jih z ocenami od 1 do 10, pri čemer 10 predstavlja najboljšo vrednost in 1 najslabšo.

Kriteriji	ČN 1 [3 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 2 [6 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 3 [O <sub>3</sub> + 6 p. f.]	ČN 4 [O <sub>3</sub> + 3 p. f.+ GAC]	PAC + UF
Investicija	9	4	6	10	1
Kvaliteta čiščenja vode	8	9	4	8	10
Obratovanje (električna priključna moč, poraba elektrike, poraba kemikalij)	5	5	5	8	4
Vzdrževanje	5	3	6	4	10
Poraba kemikalij	2	2	2	2	8
Ekološki vplivi (prostorske omejitve, vizualno onesnaženje, hrup)	6	6	6	8	5
Neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let	6	4	7	9	1

### Preglednica 10: Ponderiranje.

V tabeli so ocenjene posamezne tehnologije glede na uspešnost v posameznih kriterijih. Ocena je določena na podlagi kriterijev in ocen iz preglednice 9 in procentualne vrednosti pomembnosti posameznega kriterija.

	ČN 1 [3 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 2 [6 p. f. + O <sub>3</sub> + GAC]	ČN 3 [O <sub>3</sub> + 6 p. f.]	ČN 4 [O <sub>3</sub> + 3 p. f. + GAC]	PAC + UF	Ponderiranje
Investicija	2,7	1,2	1,8	3	0,3	30%
Kvaliteta čiščenja vode	3,2	3,6	1,6	3,2	4	40%
Obratovanje (električna priključna moč, poraba elektrike, poraba kemikalij)	0,25	0,25	0,25	0,4	0,2	5%
Vzdrževanje	0,25	0,15	0,3	0,2	0,5	5%
Poraba kemikalij	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	5%
Ekološki vplivi (prostorske omejitve, vizualno onesnaženje, hrup)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,25	5%
Neto sedanja vrednost za naslednjih 20 let	0,6	0,4	0,7	0,9	0,1	10%
<b>SKUPAJ</b>	<b>7,4</b>	<b>6</b>	<b>5,05</b>	<b>8,2</b>	<b>5,75</b>	<b>100%</b>

## 6 ZAKLJUČEK S PREDLOGI

Izdelane analize odvzetih vzorcev vode iz črpališča Mrzlek so pokazale, da je voda občasno neprimerna za pitje, predvsem je ob močnih deževjih bolj motna, prav tako pa je v vodi prisotna organska snov, ki je škodljiva človeku. Zaradi kraškega značaja vodnega vira so v vodi stalno prekoračeni biološki parametri. Obstoječa ČN Mrzlek po besedah upravljalca ne deluje optimalno.

Iz predhodnih opisov in medsebojnih primerjav lahko ugotovimo, da je z upoštevanjem vseh kriterijev najbolje ocenjena varianta ČN 4. Varianta ima več prednosti. Potrebna je najmanjša začetna investicija, ter ima majhne skupne letne stroške. Voda se po čistilni napravi pretaka popolnoma gravitacijsko. S tem odpadejo stroški črpalk in samega črpanja ter njihovo vzdrževanje. Izognemo se velikim gradbenim posegom potrebnim pri variantah ČN 2 in ČN 3, ob tem pa je kvaliteta obdelane vode zadovoljiva. Najmanj primerna je varianta ČN 3, ki ima ugodno neto sedanjo vrednost, a je kvaliteta obdelane vode najslabša. Varianta ČN 5 predstavlja najnovejšo tehnologijo in njena kvaliteta očiščene vode je nesporna, a ji začetna investicija in potreba menjave membran pokvarita oceno.

Pri variantah ČN 3 in ČN 4 predlagamo enoslojne peščene filtre zaradi postavitve filtrov za kontaktne komore ozonizacije. Antracit je občutljiv na ozon in pri kontaktu z njim hitreje razpada. Zaradi tega smo se odločili za enoslojni peščeni filter in opustili dodatni sloj. Enoslojne filtre je potrebno pogosteje prati, saj čistijo vodo praviloma le z vrhnjim slojem.

Ugotovitve in predlogi:

- Najugodnejšo tehnološko linijo predstavlja varianta ČN 4: rezervoar, koagulacija, usedanje, ozonacija, enoslojni peščeni filtri, ogljeni filtri, vodohran in dezinfekcija.

- Potrebna je boljša zaščita vodnega vira črpališča in boljša prometna ureditev. Zaradi nevarnosti razlitja nevarnih snovi v Sočo in vdora Soče v vrtino predlagamo vzpostavitev merilnega sistema organskega ogljika na Soči nekaj 100 m gorvodno od črpališča. Meritve bi se s signalom prenašale v centralo v ČN. Ob kritični situaciji bi ČN začasno zaustavili in tako preprečili onesnaženje ČN. Ob samem črpališču bi bilo potrebno postaviti potopne stene, dele mehkih jezov ali premične zapornice, ki bi plavajoče onesnaženje odrinile stran od črpališča. Hkrati predlagamo ponovno hidrogeološko preiskavo vodnega vira, ker iz obstoječih ni razviden preiskav natančen vpliv reke Soče na zajeto vodo.
- Potrebni bi bili jar testi za ugotovitev, ali je trenutni koagulant (aluminijev sulfat) najprimernejši za surovo vodo iz Mrzleka.
- Predlagamo tudi prestavitev ozonizacijskih kontaktnih komor, ki so sedaj predaleč od ozonizatorjev. Zaradi oddaljenosti se še pred samim vnosom ozona v vodo del tega že razgradi. Prestavitev ozonizatorjev h kontaktnim komoram predstavlja slabšo rešitev tega problema.
- Pri pranju peščenih filtrov v novejši ČN z mešanico vode in zraka je prihajalo do poškodb nosilnih plošč filtrov. Zaradi tega je bilo opuščeno puhalo za zrak in se perejo filtri samo z vodo, kar pa je neoptimalno. Pri sanaciji je potrebno ugotoviti vzrok dvigovanja in ga odpraviti, ter urediti pranje filtrov z mešanico vode in zraka. Na črpalke za pranje je potrebno montirati mehki zagon in frekvenčne regulatorje.
- Ne svetujemo uporabe več kot dvoslojnih peščenih gravitacijskih filtrov, ker se lahko po pranju zrna različnih slojev preveč premešajo.
- Dezinfekcija z UV se prestavi v nov objekt, s čimer pridobimo 0,8 m višine v VH. VH je potrebno predelati v dve vodni celici, pregrajeni še z dodatno predelno steno, ki služi za pravilno izmenjavo vode (kroženje). Zaradi predelave VH v dve celici je potrebno preurediti in na novo postaviti del cevja. Z optimiziranjem cevja je možno za obratovanje aktivirati še dodaten volumen obstoječega VH.
- Pri vseh variantah je nujno potrebno zgraditi postajo za obdelavo umazane vode (pranje filtrov, usedalnik, nevtralizacija in vzdrževanje) s potrebnim skladiščenjem dehidriranega blata.

## VIRI

ARSO 2003. Monitoring kakovosti površinskih vodotokov v Sloveniji v letu 2003. Ljubljana.

Becker, C. W., O'Melia, R. C. 1995. Optimizing ozonation for turbidity and organics (TOC) removal by coagulation and filtration. Denver, AWWA.

Bell-Ajy, K., Abbaszadegan, M., Ibrahim, E., Verges, D., LeChevallier, M. 2000. Conventional and optimized coagulation for NOM removal. Journal AWWA , vol. 92, Oktober, Denver, AWWA.

Bregar, R. 2005. Dezinfekcija pitne vode – dobre in slabe strani. V: Komac, M. (ur.). Zbornik strokovnega posvetovanja kakovost pitne vode '05. Ljubljana 16.–18. november 2005. Ljubljana, Zavod za tehnično izobraževanje: str. 65.–71.

Bregar, R. 2006. Kakovost pitne vode v Sloveniji s poudarkom na organskih onesnaževalih. V: Komac, M. (ur.). Zbornik strokovnega posvetovanja kakovost pitne vode '06. Ljubljana 9.–10. november 2006. Ljubljana, Zavod za tehnično izobraževanje: str.: 39–45.

Brezigar, B. 1996. Hidravlični račun vodovodnega omrežja mesta Nova Gorica. Vodnar, Ljubljana.

Brezigar, B. 1997. Ultrafiltracija tudi v Sloveniji (Rižanski vodovod). V: Bekvič, B. (ur.). Slovenski vodar 5. Avgust 1997. Celje, Društvo vodarjev Slovenije.

Campos, C., Schimmoller, L., Marinas, B.J., Snoeyink, V.L., Baudin, I., Laine, J. 2000. Adding PAC to Remove DOC. AWWA Journal, vol. 92, avgust, Denver, AWWA.



Chellam, S., Zander, A. 2005. Membrane science and theory V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 35–49.

Cleasby, L. J., Longsdon, S. G. 1999. Granular bed and precoat filtration. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 8.1–8.99.

Daintith, J. 1985. Minidictionary of chemistry. Oxford, Oxford university press.

Droste, R. 1997. Theory and practice of water and wastewater treatment. Hoboken, Wiley.

Duranceau, J. S. 2001. Membrane practices for Water treatment. Denver, AWWA.

Exall, K. N., Vanloon, G. W. 2000. Using coagulants to remove organic matter. Journal AWWA, vol. 92, November, Denver, AWWA.

Freeman, S., Vernon, W. 2005. Operations V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 187–203.

Grad, A., Škerlj, R., Vitorovič, N. 1992. Veliki angleško-slovenski slovar. Ljubljana, Državna založba Slovenije.

Gregory, R., Zabel, F. T., Edzwald, K. J. 1999. Sedimentation and flotation. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 7.1–7.87.

Habič, P. 1981. Kraški izvir Mrzlek, njegovo zaledje in varovalno območje, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Inštitut za varovanje krasa, Postojna.

Hass, N. C. 1999. Disinfection. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 14.1–14.60.

Hojak, M., Taljat, A. 2000. Rezultati kemijske analize vzorca peska filtrov. ZZV Nova Gorica. Nova Gorica.

Jacangelo, G. J., Noack, K. R. 2005. System concepts V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 51–64.

Janež, J., Albreht, A., Eržen, U. 1991. Vpliv višinskih vodotokov na Trnovsko-Banjanski planoti na kvaliteto izvirov Mrzlek, Lijak, Hubelj, Vipava, Podrotejea in Kajža. Rudnik živega srebra Idrija, Idrija.

Kaplan, L. A. 2000. Comparison of three TOC methodologies. AWWA Journal, vol. 92, April, Denver, AWWA.

Koglot, J., Taljat, A. 2004. Poročilo o monitoringu kakovosti površinskih voda, ki se jih odvzema za oskrbo s pitno vodo, za leto 2002 in razvrstitev površinskih voda v kakovostne razrede za obdobje 1998–2002. ARSO, Ljubljana.

Kompare, B. (2001). Odstranjevanje parazitov v pripravi pitne vode. Inštitut za sanitarno inženirstvo, Otočec ob Krki.

Krušič, M., Dolinar, K., Jeraša, C. (1976). Leksikon cankarjeve založbe. Ljubljana, Cakarjeva založba: str. 699.

Letterman, D. R., Amirtarajah, A., O'Meila, R. C. 1999. Coagulation and flocculation. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 6.1– 6.66.

Lin, D. S. 2001. Water and wastewater calculations manual. New York, McGraw-Hill.

Lozier, C. J. 2005. Membrane applications V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 101–145.

Metličar, M. 2001–2002. Poročilo o izvidu analize pitnih vod. ZZV Nova Gorica. Nova Gorica.

Monod, J. 1991. Water treatment handbook, vol 1. Rueil-Malmaison. Degremont.

Monod, J. 1991. Water treatment handbook, vol 2. Rueil-Malmaison. Degremont.

Mutschmann, J., Stimmelmayer, F. 1988. Snabdevanje vodom. Beograd, IRO  
»Građevinska knjiga« .

Najm, I., Marcinko, J., Oppenheimer, J. 2000. Evaluating TOC. AWWA Journal, vol. 92, no. 6, Denver, AWWA.

Patania, L. N., Jacangelo, G. J., Cummings, L., Wilczak, A., Riley, K., Oppenheimer, J. 1995. Optimization of filtration for Cyst removal. Denver, AWWA.

Pezdič J., Urbanc J., Perko S., Kobal I. 1987. Ugotavljanje vpliva Soče na izvir Mrzlek in potencialni vodni vir Prelesje na podlagi izotropskih meritev. Ljubljana, Inštitut Jožef Štefan.

Prevost, M., Laurent, P., Servais, P., Joret, J. C. (2005). Biodegradable organic matter in drinking water treatment and distribution. Denver, AWWA.

Rakness, L. K. 2005. Ozone in drinking water treatment. Denver, AWWA.

Ravnikar, J. 2004. Odstranjevanje parazitov v kraških pitnih vodah. Diplomsko delo. UL, FGG, Ljubljana.

Rismal, M. 1995. Čiščenje pitne vode. Ljubljana.

Schröter, W., Lautenschläger, K.-H., Bibrack, H., Schnabel, A. 1993. Kemija splošni priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije.

Shaw, J. P.; Malley, J. P. Jr., Willoughby, S. 2000. Effects of UV irradiation on organic matter. Journal AWWA , vol. 92, April Denver, AWWA.

Singer, C. P., Reckhow, D. A. 1999. Chemical oxidation. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 12.1–12.51.

Snicer, A. G. 2000. UV inactivation of viruses in natural waters. Denver, AWWA.

Snoeyink, L. V., Summers S. R. 1999. Adsorption of organic compounds. V: Letterman, D. R. (ur.) Water quality & treatment. New York, McGraw-Hill: str.: 13.1–13.83.

Speth, F. T., Reiss, C. R. 2005. Water Quality V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 7 - 34.

Symons, M. J., Bradley, C. L., Cleveland, C. T. 1999. The drinking water dictionary. Denver, AWWA.

Šaver, M., Hojak, M. 1989. Poročilo o kemijskih preiskavah sedimentov in vod reke Soče, vodovoda Mrzlek in vodovoda Brda. Zavod za socialno medicino in higieno Gorica, Nova Gorica.

Ščuka, K., N., Taljat, A. 2001. Poročilo o preskusu zavoda za zdravstveno varstvo Nova Gorica. Nova Gorica.

Vickers, C. J. 2005. Introduction. V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 1–6.

Vickers, C. J. 2005. Membrane system design concepts V: Christensen, M. (ur.) Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water – manual of water supply practices. Denver, AWWA: str.: 165–186.

Vidrih, J. 2003 - 2005. Poročilo o izvidu analize pitnih vod. Zavod za zdravstveno varstvo Nova Gorica. Nova Gorica.

Xie, F. Y., 2004. Disinfection byproducts in drinking water. Boca Raton, Lewis publishers.

ZZV 2004. Monitoring kakovosti podzemnih vod za leto 2003, 9. sklop: vodonosniki z razpoklinsko poroznostjo (izviri). Novo mesto.