

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:
Matej Čehovin

Uporaba UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniko-tehnološki, tehnični in inženirski vidiki

Diplomska naloga št.: 124

Mentor:
prof. dr. Boris Kompare

Ljubljana, 29. 6. 2009

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATEJ ČEHOVIN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**"UPORABA UV SVETLOBE V ZDRAVSTVENI HIDROTEHNIKI – TEHNOLOŠKI,
TEHNIČNI IN INŽENIRSKI VIDIKI"**.

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

Ljubljana, _____ 2009

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN

UDK	621.384:628.16+628.33(043.2)
Avtor	Matej Čehovin
Mentor	Prof. dr. Boris Kompare
Naslov	Uporaba UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniko – tehnološki, tehnični in inženirski vidiki
Obseg in oprema	143 strani, 18 preglednic, 14 grafikonov, 50 slik, 55 enačb
Ključne besede	UV svetloba, UV reaktor, UV svetila, dezinfekcija

Izvleček

Ultravijolična ali UV svetloba je v zadnjih treh desetletjih utrdila svoj položaj med dezinfekcijskimi sredstvi. Čeprav je bila UV svetloba iz tehničnih virov že leta 1910 prvič uporabljena kot dezinfekcijsko sredstvo za pitno vodo (Marseille, Francija), so njeno uporabo v zdravstveni hidrotehniko omejevali visoki stroški, nizka zanesljivost delovanja opreme, zapleteno vzdrževanje sistemov in preprosta, učinkovita ter zanesljiva uporaba sredstev na osnovi klora. Z naraščajočim številom raziskav in zavedanjem nevarnosti za zdravje, ki jih predstavljajo stranski produkti dezinfekcije s kemičnimi oksidanti, je UV svetloba kasneje marsikje postala nadomestna metoda. V 80. letih prejšnjega stoletja se je uporaba te tehnologije razširila. Pravi preboj je dosegla v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja, ko so raziskave pokazale visoko učinkovitost pri onesposobljenju praživali *Cryptosporidium* in *Giardia*. Poleg prednosti v primerjavi s "klasičnimi" dezinfekcijskimi sredstvi, se je potrebno zaradi značilnih dezinfekcijskih mehanizmov zavedati omejitev in pomanjkljivosti, ki iz tega izhajajo. Na tem področju je bilo v zadnjih 30 letih narejenih mnogo raziskav. Nekatere med njimi so zaradi različnih tehnoloških in metodoloških pristopov v medsebojnem nesoglasju. Prav tako je mnogokdaj mogoče zaslediti pomanjkljivo razumevanje in napačne interpretacije s tega področja v strokovni javnosti. Cilji diplomske naloge so bili zajeti najnovejša spoznanja s področja uporabe UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniko, nedvoumno pojasniti pojme in vplive na uporabo te tehnologije, spoznati osnovne tehnične in inženirske vidike ter obravnavati praktične primere. UV svetlobo lahko uporabljamo tudi pri postopkih pospešene oksidacije, o katerih na kratko spregovorimo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	621.384:628.16+628.33(043.2)
Author	Matej Čehovin
Supervisor	Prof. Boris Kompare, Ph.D.
Title	Use of UV light in sanitary engineering – technological, technical and engineering aspects
Notes	143 pages, 18 tables, 14 graphs, 50 figures, 55 equations
Key words	UV light, UV reactor, UV lamps, disinfection

Abstract

UV light as a disinfectant gained popularity throughout last three decades. Although used for the first time for drinking water disinfection already in 1910 (Marseille, France), it was not until 1980s that this technology broke through. High costs, poor equipment reliability, complicated maintenance on one hand, simple, cheap, efficient and reliable use of chlorine on the other, all limited extensive use of UV technology. With awareness of risks disinfection by-products present to health, UV light gradually replaced chemical oxidants in many systems. Since it was confirmed in 1990s that UV light very efficiently inactivates parasites *Cryptosporidium* and *Giardia*, it is used more and more frequently. Besides various advantages this technology has over "classical" disinfectants, limitations and deficiencies must be realized too. Many studies have discussed this issues in the last 30 years. Various technological and methodological approaches were taken over this period of time and from this several discrepancies result. Moreover, insufficient information and misinterpretations can be detected when this technology is debated. Objectives of this work have been to study most up-to-date information related to use of UV technology in sanitary engineering, to provide accurate explanations of influences on this technology, to get basic information in technical and engineering aspects and present relevant case studies. Photochemical action of UV light can be used also in advanced oxidation process. Basic information on this topic is also given in the paper.

ZAHVALA IN POSVETILO

Iskreno zahvalo namenjam:

- mentorju prof. dr. Borisu Komparetu za pomoč, koristne napotke in objektivno kritiko,
- g. Behzadu Čirkinu in sodelavcem iz podjetja ITT Water & Wastewater AB South East Europe za slikovno gradivo ter dostop do tehničnih informacij,
- g. Alojzu Medicu in sodelavcem iz podjetja MAK CMC za gradivo ter nudeno podporo,
- vsem, ki ste mi na kakršenkoli način stali ob strani in
- na koncu, a ne nazadnje, Urši za razumevanje, potrpežljivost in pomoč na tej poti.

Nalogo s hvaležnostjo posvečam dragi mami v spomin.

KAZALO VSEBINE

1.	UVOD	1
2.	UV SVETLOBA	3
2.1	UV SVETLOBA KOT ELEKTROMAGNETNO VALOVANJE	3
2.2	OBNAŠANJE UV SVETLOBE V VODNI RAZTOPINI.....	5
2.2.1	Vpivanje UV svetlobe v vodi.....	5
2.2.2	Vpliv suspendiranih snovi v vodi na UV svetlobo.....	6
2.2.3	Vpliv anorganskih snovi v raztopini na UV svetlobo.....	7
2.2.4	Vpliv organskih snovi v raztopini na UV svetlobo.....	8
2.2.5	Vpivanje svetlobe v raztopini in prepuščanje svetlobe skozi raztopino.....	10
2.2.6	Absorpcijski spekter	12
3.	PATOGENI VODNI MIKROORGANIZMI	12
3.1	PREDSTAVNIKI	12
3.2	HIDRIČNE BOLEZNI	15
3.3	PATOGENOST	15
4.	DEZINFEKCIJA	19
4.1	OSNOVNI POJMI	19
4.2	STOPNJA DEZINFEKCIJE – KINETIKA REAKCIJ:	22
4.3	DOZA DEZINFEKCIJSKEGA SREDSTVA:.....	25
4.4	DOZA UV SVETLOBE	27
4.4.1	Moč sevanja	27
4.4.2	Iradianca	28
4.4.3	Obsevanost.....	29
4.4.4	UV doza	30
4.5	KEMIČNA OKSIDACIJSKA SREDSTVA	31
4.6	DEZINFEKCIJSKI UČINEK UV SVETLOBE	34
4.6.1	Neposredna poškodba dnk – nastanek pirimidinskih dimerov.....	36
4.6.2	Posredna poškodba dnk – biomolekularne reakcije	37
4.7	MEHANIZMI ZA OBNOVO DNK	38
4.8	STRANSKI PRODUKTI DEZINFEKCIJE.....	40
4.9	VPLIVI DEZINFEKCIJE NA STRUPENOST VODE	42
4.10	PRIMERJAVA KEMIČNIH OKSIDACIJSKIH SREDSTEV IN UV SVETLOBE	43
5.	UČINKOVITOST DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO	46
5.1	VREDNOTENJE UČINKOVITOSTI DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO	46
5.2	OBČUTLJIVOST RAZLIČNIH MIKROORGANIZMOV NA UV SVETLOBO	48
5.2.1	Virusi in bakteriofagi	50
5.2.2	Bakterije in bakterijske spore.....	51
5.2.3	Praživali	52
5.2.4	Doze UV svetlobe in stopnja dezinfekcije	53

6.	POSPEŠENA OKSIDACIJA	55
6.1	OKSIDACIJA PRI PRIPRAVI VODE	55
6.1.1	Pospešena oksidacija.....	56
6.2	HIDROKSILNI RADIKAL	56
6.3	REAKCIJE V POSTOPKIH POSPEŠENE OKSIDACIJE	57
6.3.1	Reakcije pospešene oksidacije s ciljnim snovmi	57
6.3.2	Reakcije pospešene oksidacije z ostalimi snovmi v vodni raztopini	58
6.4	PREGLED POSTOPKOV POSPEŠENE OKSIDACIJE.....	59
7.	UV SVETILA	62
8.	UV REAKTORJI.....	67
8.1	OPTIKA UV REAKTORJEV	69
8.1.1	Prostorski kot.....	69
8.1.2	Intenziteta sevanja oz. svetlobe	69
8.1.3	Lom svetlobe	70
8.1.4	Odboj svetlobe	70
8.2	MODELIRANJE OBSEVANOSTI V UV REAKTORJIH	72
8.2.1	Metoda vsote točkovnih virov.....	72
8.2.2	Pristop z obsevanostjo na radialni oddaljenosti od linijskega vira svetlobe.....	77
8.2.3	Spremenljivke v matematičnih modelih	77
8.3	VPLIVI HIDRAVLIČNE OBLIKE REAKTORJEV NA DEZINFEKCIJSKI UČINEK.....	79
8.3.1	Pretok in hitrostni profil	79
8.3.2	Disperzija	79
8.3.3	Turbulenca.....	80
9.	TEHNIČNE LASTNOSTI UV REAKTORJEV	81
9.1	UV REAKTORJI PRI TOKU S PROSTO GLADINO	81
9.2	TLAČNI UV REAKTORJI	84
9.3	POTOPNA UV SVETILA.....	85
9.4	ČIŠČENJE STEKEL UV SVETIL	86
10.	EKONOMIKA UV SISTEMOV IN PRIMERJAVA Z DRUGIMI SREDSTVI	88
10.1	PORABA ENERGIJE	88
10.2	ANALIZA STROŠKOV V ŽIVLJENJSKEM CIKLU UV SISTEMA.....	89
10.2.1	<i>Pitna voda</i>	90
10.2.2	Odpadna voda	93
10.2.3	Opombe pri analizi stroškov.....	95
10.3	PRIMERJAVA Z DRUGIMI TEHNOLOGIJAMI PRIMARNE DEZINFEKCIJE.....	96
10.3.1	Dezinfekcija s sredstvi na osnovi klora	97
10.3.2	Dezinfekcija z ozonom.....	99
10.3.3	Odstranjevanje mikroorganizmov z ultrafiltracijo.....	100
10.3.4	Komentar primerjave različnih metod dezinfekcije	102
11.	OPERATIVNI VIDIKI DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO.....	103
11.1	PRIPOROČILA ZA VGRADNJO IN OBRATOVANJE.....	103
11.2	VAROVANJE ZDRAVJA IN VARNOST PRI DELU	105

12. PREDSTAVITEV PRAKTIČNIH PRIMEROV.....	106
12.1 ČISTILNA NAPRAVA RADOVLJICA.....	106
12.1.1 O čistilni napravi radovljica	106
12.1.2 Zasnova sistema za UV dezinfekcijo na ČN Radovljica	107
12.1.3 Hidravlični profil kinete za dezinfekcijo.....	111
12.1.4 Obratovanje UV naprave na ČN Radovljica	115
12.1.5 Monitoring dezinfekcijskih učinkov na ČN Radovljica	116
12.1.6 Kaj storiti z UV dezinfekcijo na ČN radovljica?	117
12.2 VODARNA VIPAVA	119
12.2.1 O vodarni Vipava	119
12.2.2 Zasnova sistema za dezinfekcijo z UV svetlobo na ČN Vipava	120
12.2.3 Model obsevanosti.....	121
12.2.4 Obratovanje UV naprave na ČN Vipava.....	123
13. RAZPRAVA IN IZSLEDKI.....	125
13.1 O UV SVETILIH	125
13.2 O FOTOREAKTIVACIJI IN OBNOVI V TEMI.....	127
13.3 DEZINFEKCIJA PITNE VODE Z UV SVETLOBO	129
13.3.1 Zakonodajni okvir.....	129
13.3.2 Vpliv predhodne obdelave vode in vrstni red postopkov	130
13.4 DEZINFEKCIJA KOMUNALNE ODPADNE VODE.....	131
13.4.1 Zakonodajni okvir.....	131
13.4.2 Vpliv predhodnih stopenj čiščenja	133
13.4.3 Dezinfekcija odpadne vode – da ali ne?.....	133
13.4.4 Odpadne vode iz drugih virov	135
14. ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO.....	136
VIRI	138

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Spektri elektromagnetnega valovanja.....	4
Preglednica 2:	Delitev UV svetlobe na spektralne podskupine.....	5
Preglednica 3:	Tipični predstavniki patogenih vodnih mikroorganizmov	13
Preglednica 4:	Primerjava lastnosti različnih dezinfekcijskih sredstev.....	44
Preglednica 5:	Primerna dezinfekcijska sredstva za izbrane ciljne mikroorganizme	45
Preglednica 6:	Učinkovitost posameznih sredstev pri onesposabljanju izbranih ciljnih mikroorganizmov.....	45
Preglednica 7:	Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju virusov, določeni s CB aparatom	50
Preglednica 8:	Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju bakteriofagov, določeni s CB aparatom	50
Preglednica 9:	Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju bakterij in bakterijskih spor, določeni s CB aparatom.....	51
Preglednica 10:	Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju praživali <i>Acanthamoeba</i> spp., določeni s CB aparatom	52
Preglednica 11:	Doze UV svetlobe za doseganje različnih stopenj dezinfekcije	53
Preglednica 12:	Pregled izbranih postopkov pospešene oksidacije	60
Preglednica 13:	Pregled lastnosti najpogosteje uporabljenih UV svetil.....	66
Preglednica 14:	Projektne parametri naprave za UV dezinfekcijo na ČN Radovljica	109
Preglednica 15:	Povzetki monitoringa dezinfekcije odpadne vode na ČN Radovljica – geometrijska sredina merjenih vrednosti.....	117
Preglednica 16:	Rezultati vzorčenj pri monitoringu dezinfekcije odpadne vode na ČN Radovljica.....	118
Preglednica 17:	Vodarna Vipava – tehnične lastnosti UV sistema	121
Preglednica 18:	Mejne vrednosti za mikrobiološke parametre pri odvajanju končnih efluentov iz komunalnih čistilnih naprav v občutljiva vodna telesa	131

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Vpijanje UV svetlobe v vodi.....	5
Grafikon 2:	Spektralna krivulja vpijanja UV svetlobe za DNK in beljakovine	12
Grafikon 3:	Emisijski spekter nizkotlačnega UV svetila	65
Grafikon 4:	Emisijski spekter srednjetačnega UV svetila	65
Grafikon 5:	Relativni stroški investicije v UV reaktor za pitno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka	90
Grafikon 6:	Specifična poraba električne energije UV sistema za pitno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka	91
Grafikon 7:	Relativni stroški zamenjave UV svetil in čiščenja stekel pri sistemu za pitno vodo v odvisnosti od pretoka	91
Grafikon 8:	Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m ³ pitne vode pri nazivnih pretokih od 12 m ³ /h do 200 m ³ /h.....	92
Grafikon 9:	Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m ³ pitne vode pri nazivnih pretokih od 200 m ³ /h do 2000 m ³ /h.....	92
Grafikon 10:	Relativni stroški investicije v UV reaktor za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka	93
Grafikon 11:	Specifična poraba električne energije UV sistema za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka	94
Grafikon 12:	Relativni stroški zamenjave UV svetil in čiščenja stekel pri sistemu za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka.....	94
Grafikon 13:	Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m ³ pitne vode pri nazivnih pretokih od 10 m ³ /h do 100 m ³ /h.....	95
Grafikon 14:	Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m ³ pitne vode pri nazivnih pretokih od 100 m ³ /h do 1000 m ³ /h.....	95

KAZALO SLIK

Slika 1:	Spektri elektromagnetnega valovanja.....	3
Slika 2:	Sonce v UV spektru – barvna upodobitev	4
Slika 3:	Ilustracija vpliva suspendiranih delcev na foton UV svetlobe	6
Slika 4:	Ilustracija vpliva suspendiranih delcev na zaščito mikroorganizmov pred UV svetlobo	6
Slika 5:	Ilustracija parametrov Beer-Lambertovega zakona	11
Slika 6:	<i>Escherichia coli</i> pod mikroskopom	13
Slika 7:	Ciste <i>Giardia lamblia</i>	13
Slika 8:	Oociste <i>Cryptosporidium parvum</i>	13
Slika 9:	Srednja infektivna doza za različne patogene mikroorganizme	17
Slika 10:	Smrtnost v primeru okužb s posameznimi patogenimi mikroorganizmi	17
Slika 11:	Doze različnih dezinfekcijskih sredstev za onesposabljanje patogenih mikroorganizmov za 2 log stopnji.....	26
Slika 12:	Irradianca na elementu s površino A_1	28
Slika 13:	Irradianca na elementih s površinama A_1 in A_2	28
Slika 14:	Ilustracija krogelne obsevanosti	29
Slika 15:	Ilustracija RNK in DNK ter strukturne formule nukleotidov.....	35
Slika 16:	Ilustracija neposredne poškodbe DNK.....	36
Slika 17:	CB aparat za izvedbo biodozimetričnih poizkusov	47
Slika 18:	Pregled glavnih dejavnikov na uspešnost dezinfekcije z UV svetlobo	54
Slika 19:	Tipična procesna shema postopka $H_2O_2 / O_3 / UV$	61
Slika 20:	UV svetila z elektrodami	62
Slika 21:	Napajalna enota	63
Slika 22:	UV reaktor pri toku s prosto gladino	67
Slika 23:	UV reaktor pri toku pod tlakom.....	67
Slika 25:	Ilustracija možne razporeditve UV svetil v reaktorjih.....	68
Slika 24:	Notranjost tlačnega UV reaktorja.....	68
Slika 26:	Prostorski kot.....	69
Slika 27:	Lom in odboj svetlobe na prehodu med dvema medijema.....	70
Slika 28:	Lom svetlobe na mejnih ploskvah	71
Slika 29:	Parametri računskega modela obsevanosti	73

Slika 30:	Polje obsevanosti z UV svetlobo v primeru valjastega reaktorja	78
Slika 31:	Računalniška simulacija poti delcev skozi	80
Slika 32:	Primer umirjevalne rešetke – ČN Radovljica	81
Slika 33:	Moduli z UV svetili.....	82
Slika 34:	UV reaktor z delujočimi svetil – ČN Radovljica.....	82
Slika 36:	Tipični vzdolžni profil UV reaktorja v kanalu	83
Slika 35:	Sonda za merjenje nivoja vode in sonda za zaščito pred suhim tekom	83
Slika 37:	Primer usmerjevalnika toka v tlačnem reaktorju	84
Slika 38:	Shema priključitve tlačnega UV reaktorja na cevovodno omrežje.....	85
Slika 39:	Vpliv avtomatskega čiščenja na čistočo stekel UV svetil	86
Slika 40:	Sistem za čiščenje stekel UV svetil s čistilnimi.....	87
Slika 41:	Nevarnost optičnega sevanja	105
Slika 42:	Nevarnost električnega udara	105
Slika 43:	Nevarnost vroče površine	105
Slika 44:	Biološka nevarnost	105
Slika 45:	Shema delovanja SBR reaktorjev na ČN Radovljica.....	107
Slika 46:	ČN Radovljica – pogled na kineto z UV dezinfekcijo pred začetkom del.....	110
Slika 47:	ČN Radovljica – UV reaktor	111
Slika 48:	ČN Radovljica - UV reaktor v obratovanju.....	115
Slika 49:	Vodarna Vipava – tlačni filtri	119
Slika 50:	Vodarna Vipava – UV reaktor.....	123

KAZALO PRILOG

- PRILOGA A: ČN Radovljica – tloris kinete za dezinfekcijo
- PRILOGA B: ČN Radovljica – vzdolžni prerez kinete za dezinfekcijo
- PRILOGA C: ČN Radovljica – prečni prerez kinete za dezinfekcijo
- PRILOGA D: ČN Radovljica – hidravlični profil kinete za dezinfekcijo
- PRILOGA E: ČN Radovljica – model hidravličnega profila kinete za dezinfekcijo
- PRILOGA F: Vodarna Vipava – tehnološka shema filtracije in dezinfekcije
- PRILOGA G: Vodarna Vipava – poenostavljen model obsevanosti reaktorja
- PRILOGA H: Preračun ekonomike UV reaktorjev

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A	...	angl. <i>absorbance</i> – absorpcija oz. vpojnost svetlobe v vodi
α	...	absorpcijski (vpojnostni) koeficient [m^{-1}]
AOP	...	angl. <i>advanced oxidation process</i> – pospešena oksidacija
c_0	...	hitrost svetlobe v vakuumu ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s)
DBP	...	angl. <i>disinfection by-products</i> – stranski produkti dezinfekcije
DOC	...	angl. <i>dissolved organic carbon</i> – množina v vodi raztopljenega organskega ogljika
DNK	...	dezoksiribonukleinska kislina – genetski zapis živih organizmov
$\varepsilon(\lambda)$...	molarna vpojnost svetlobe neke snovi pri valovni dolžini λ
EMV	...	elektromagnetno valovanje
HAA	...	angl. <i>halogenated acetic acids</i> – halogenirane očetne kisline, stranski produkti dezinfekcije
E_0	...	obsevanost z UV svetlobo [mJ/cm^2]
λ	...	valovna dolžina [nm]
NOM	...	angl. <i>natural organic matter</i> – naravne organske snovi
NTU	...	angl. <i>nephelometric turbidity unit</i> – enota za merjenje motnosti vodnega vzorca
ppm	...	angl. <i>part per million</i> – število delcev na milijon delcev neke druge snovi
T	...	angl. <i>transmittance</i> – prepustnost UV svetlobe v vodi
TOC	...	angl. <i>total organic carbon</i> – skupna množina organskega ogljika v vodi
THM	...	trihalometani, stranski produkti dezinfekcije
TSS	...	angl. <i>total suspended solids</i> – skupna vsebnost suspendiranih snovi [mg/L]
UV	...	ultravijoličen, ultravijolična

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

- FOTOLIZA:** proces, pri katerem fotoni svetlobe s svojo energijo sprožijo kemijske reakcije.
- FOTOMETER:** elektronska naprava za merjenje optičnih lastnosti neke snovi.
- FOTO-OKSIDACIJA:** kemijska reakcija oksidacije, ki jo sprožijo fotoni svetlobe.
- HIDROKSILNI RADIKAL:** visoko reaktivna molekula iz vodika in kisika z nevezanim elektronom.
- HUMINSKE, FULVINSKE KISLINE:** organske kisline, ki v vodi povzročajo značilno rjavo obarvanost in v primeru dezinfekcije s klorom tvorijo nevarne stranske produkte.
- KROMOFORI:** kemijske funkcionalne skupine znotraj molekule, ki vpijajo svetlobo.
- POSPEŠENA OKSIDACIJA:** oksidacija neke snovi s hidroksilnimi radikali.
- PREPUSTNOST UV SVETLOBE (T):** merilo za količino UV svetlobe, ki prehaja skozi znano debelino vodne plasti.
- SPEKTER:** množina različnih stvari iste vrste, razvrstitev energije v valovanju glede na valovno dolžino ali delcev glede na kakšno lastnost.
- STRANSKI PRODUKTI DEZINFEKCIJE:** nezaželene ali celo nevarne snovi, ki nastajajo pri uporabi dezinfekcijskih sredstev.
- TRIHALOMETANI:** organske molekule, v katerih tri vodikove atome v molekuli metana (CH_4) zamenjajo halogeni atomi (Cl, Br, F, I).
- ULTRAVIJOLIČNA SVETLOBA:** del spektra elektromagnetnega valovanja z valovno dolžino med 10 nm in 400 nm.
- VPOJNOST UV SVETLOBE (A):** merilo za količino UV svetlobe, ki se vpije znotraj znane debeline vodnega vzorca.

1. UVOD

Z razvojem moderne znanosti so do odkritja UV svetlobe pripeljala opazovanja srebrovih soli, ki potemniijo ob izpostavljenosti sončni svetlobi in posledično delu spektra UV svetlobe. Odkrivanje vzrokov za te pojave je trajalo od 17. stoletja dalje, ko so raziskovalci odkrivali, da je mogoče z energijo svetlobe sprožati kemične oz. fotokemične reakcije. Leta 1614 je Sala opravil začetna sistematična opazovanja na tem področju. Odkril je, da sončna svetloba povzroča počrnitev kristalov srebrovega nitrata. Leta 1777 je Scheele pri izpostavitvi sončni svetlobi opazil potemnitev papirja, prepojenega z raztopino srebrovega klorida. Da je pri tem vijolični del spektra bolj učinkovit kot rdeči je spoznal, ko je sončne žarke na takšen papir usmeril skozi optično prizmo. Za "odkritelja" UV svetlobe oz. za znanstvenika, ki je na tem področju uspel narediti velik korak, velja nemški fizik in kemik Johan Wilhelm Ritter (1776–1810). Ta je leta 1801 opazil, da nevidni žarki blizu vijoličnega dela vidnega spektra svetlobe še posebej intenzivno povzročajo potemnitev papirja, prepojenega s srebromim kloridom. Poimenoval jih je "deoksidirajoči žarki" ter na ta način poudaril njihovo (foto-kemijsko) reaktivnost in jih ločil od "toplotnih žarkov" oz. infrardečih žarkov na drugem koncu vidnega spektra.

Kmalu se je UV svetlobe oprijelo ime "kemični žarki", ki je ostalo v veljavi skozi 19. stoletje. Prve raziskave kemičnih žarkov so se osredotočale na njihovo sposobnost, da sprožajo kemične reakcije. Gay Lussac in Thenard sta leta 1809 pokazala, da ima skoncentrirana sončna svetloba sposobnost pretvarjanja mešanice plinov vodika in klora v klorovodikovo kislino. Leta 1815 je Planche opazil, da kemični žarki povzročajo potemnitev veliko različnih kovinskih soli. Termin "kemični žarki" je v moderni znanosti nato zamenjalo poimenovanje ultravijolična svetloba. Z raziskavami v 19. stoletju in v začetku 20. stoletja je prišlo do odkritij vplivov UV svetlobe na žive organizme.

Z uporabo UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniko sem se avtor srečeval že med študijem, ko sem v okviru študentskega dela sodeloval pri različnih projektih s tega področja. Sčasoma sem se seznanjal z bistvenimi lastnostmi takšnih sistemov, ki so pomembni v fazah projektiranja, izvedbe, obratovanja in vzdrževanja. Ugotavljal sem, da na učinkovitost in zanesljivost delovanja vpliva mnogo drobnih dejavnikov, katerim je potrebno posvetiti pozornost. Ob intenzivnejšem ukvarjanju s temi sistemi in stiku s prakso v zadnjih 6 letih, sem v različnih situacijah ugotovil, da obstajajo s stališča razumevanja osnovnih definicij in mehanizmov dezinfekcije z UV svetlobo nedoslednosti ter napačne in nasprotujoče si interpretacije. Predvsem v želji, da bi imel sam čim bolj čisto sliko, sem pričel s podrobnejšim študijem te teme.

Diplomska naloga je nastala z namenom opredelitve osnovnih pojmov pri uporabi UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniko ter pregleda tehnoloških in tehničnih možnosti z vidika inženirja, ki se v praksi srečuje s to tehnologijo. Poudarek je predvsem na razumevanju temeljnih procesov, ki se ob tem dogajajo. Poleg tega so podani osnovni prijemi matematičnega modeliranja in dimenzioniranja. Namen pisanja je bil tudi umestiti to tehnologijo v trenutno veljavni zakonodajni okvir.

V tehnološkem smislu smo obravnavali predvsem vprašanje, v katerih primerih je uporaba UV svetlobe za dezinfekcijo v zdravstveni hidrotehniko primerna, jo primerjali z alternativnimi postopki, preverili njeno uporabo v kombinaciji z drugimi postopki in poizkusili oceniti v kakšnih tehnoloških procesih in zaporedju teh procesov je njena uporaba smiselna.

Zgradba UV sistemov je tehnično relativno zapletena, saj se morajo za doseganje zelenih ciljev uporabe UV svetlobe sočasno ujemati dejavniki po gradbeniški, strojniški in elektrotehnični plati, ki izhajajo iz tehnološke zasnove takšnega sistema. Vendar različne tehnične rešitve lahko pomenijo spremembe v rezultatih procesa, pri učinkovitosti sistema, upravljanju s sistemom ter pri stroških. V okviru te naloge je zato narejen pregled različnih tehničnih rešitev in njihova primerjava. Podrobneje sta prikazana sta praktična primera dezinfekcije pitne in odpadne vode z UV svetlobo, pri katerih sem avtor sodeloval.

2. UV SVETLOBA

2.1 UV SVETLOBA KOT ELEKTROMAGNETNO VALOVANJE

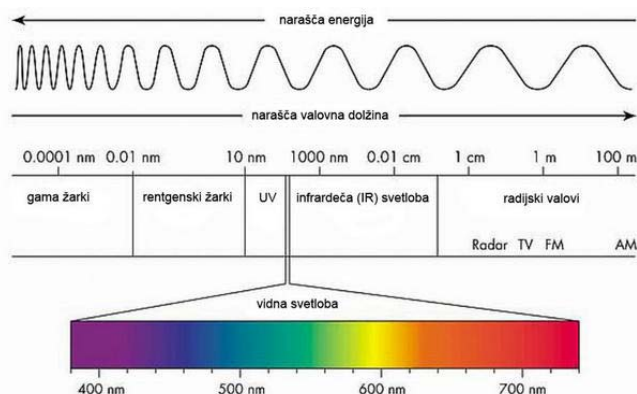
Elektromagnetno valovanje (EMV) je valovanje električnega in magnetnega polja. V prostoru se EMV širi s hitrostjo svetlobe v smeri, pravokotni na smer električnega in magnetnega polja ter prenaša gibalno količino in energijo. Kvant elektromagnetnega valovanja je foton. EMV se obenem obnaša kot valovanje in kot curek fotonov, čemur pravimo valovno-delčni dualizem. Kadar opisujemo EMV kot valovanje, ga opišemo s hitrostjo razširjanja (ki je enaka hitrosti svetlobe) ter valovno dolžino in/ali frekvenco:

$$c_0 = \lambda \cdot \nu, \quad (1)$$

kjer je c_0 hitrost svetlobe v vakuumu (299 792 458 m/s), λ valovna dolžina valovanja [m] in ν frekvenca valovanja [Hz = s⁻¹]. Če EMV razumemo kot tok fotonov, potem znaša energija vsakega fotona (po Einsteinu):

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c_0}{\lambda}, \quad (2)$$

kjer je E energija vsakega fotona [J] in h Planckova konstanta ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Js). Odnosi nam povedo, da imajo valovanja s kratkimi valovnimi dolžinami visoko energijo in visoke frekvence, valovanja z dolgimi valovnimi dolžinami pa nizko energijo in nizke frekvence.

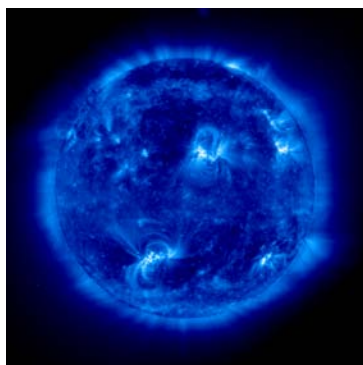


Slika 1: Spektri elektromagnetnega valovanja
(Kvarkadabra, časopis za tolmačenje znanosti, 2009)

Preglednica 1: Spektri elektromagnetnega valovanja
(standard ISO/DIS 21348, 2005)

Vrsta EMV	Valovna dolžina λ	Frekvenca valovanja ν
dolgi valovi	> 10 km	< $30 \cdot 10^3$ Hz
radijski valovi	1 m–10 km	$300 \cdot 10^6$ Hz– $30 \cdot 10^3$ Hz
mikrovalovi	1 mm–1 m	$300 \cdot 10^9$ Hz– $300 \cdot 10^6$ Hz
infrardeča svetloba	780 nm–1 mm	$384 \cdot 10^{12}$ Hz– $300 \cdot 10^9$ Hz
vidna svetloba	400 nm–780 nm	$789 \cdot 10^{12}$ Hz– $384 \cdot 10^{12}$ Hz
ultravijolična svetloba	10 nm–400 nm	$300 \cdot 10^{15}$ Hz– $789 \cdot 10^{12}$ Hz
žarki X (rentgenski žarki)	0,01 nm–10 nm	$30 \cdot 10^{18}$ Hz– $300 \cdot 10^{15}$ Hz
žarki gama (γ)	< 0,01 nm	> $30 \cdot 10^{18}$ Hz

Ime ultravijolične svetlobe izhaja iz latinske besede *ultra*, ki pomeni preko oz. na drugi strani in bi pomenilo "preko vijolične" ali "na drugi strani vijolične". UV svetloba je del spektra elektromagnetnega valovanja med vidno svetlobo in žarki X z valovno dolžino med 400 nm in 10 nm ter frekvenco valovanja približno med 10^{15} Hz in 10^{17} Hz. V kratkovalovnem delu, kjer se UV svetloba približuje žarkom X, se ji povečuje sposobnost ioniziranja snovi. Sposobnost ioniziranja snovi se razlikuje glede na vrsto EMV – žarki gama in X ionizirajo skoraj vse molekule in atome, kratkovalovna UV svetloba ionizira mnogo atomov in molekul, dolgovalovna UV svetloba in vidna svetloba ionizirata zelo malo atomov in molekul, mikrovalovi in radijski valovi pa sodijo med neionizirajoč del EMV.



Slika 2: Sonce v UV spektru –
barvna upodobitev
(NASA, 2008)

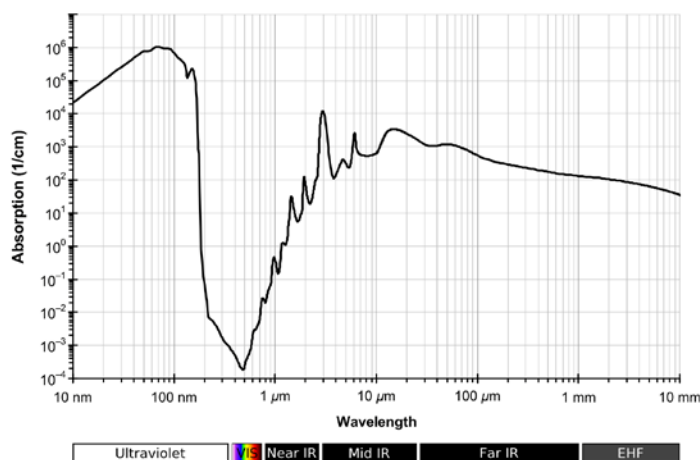
Večinoma v praktičnih primerih uporabljamo klasifikacijo, ki deli UV svetlobo na UV-A, UV-B, UV-C in vakuumsko UV svetlobo, torej med 400 nm in 100 nm (glej Preglednico 2). Vakuumsko UV svetlobo poimenujemo s tem imenom, ker obstoja le v brezračnem prostoru, saj jo v celoti absorbirajo molekule v zraku.

Preglednica 2: Delitev UV svetlobe na spektralne podskupine
(standard ISO/DIS 21348, 2005)

ime	kratica	valovna dolžina [nm]	energija elektrona [eV]
ultravijolična A svetloba, dolgovalovna UV svetloba	UV-A	400 – 315	3,10 – 3,94
ultravijolična B svetloba, srednjevalovna UV svetloba	UV-B	315 – 280	3,94 – 4,43
ultravijolična C svetloba, kratkovalovna UV svetloba	UV-C	280 – 100	4,43 – 12,4
vakuumska UV svetloba	VUV	200 – 10	6,20 – 124

2.2 OBNAŠANJE UV SVETLOBE V VODNI RAZTOPINI

2.2.1 VPIJANJE UV SVETLOBE V VODI



Grafikon 1: Vpitanje UV svetlobe v vodi
(OMLC, 2008)

Vpitanje ali vsrkavanje oz. absorpcija svetlobe v vodi je pojav pri prehodu te vrste EMV skozi medij, ki vsebuje molekule vode. Z vodo so v okviru te razlage mišljene molekule vode in ne vodna raztopina neke snovi. Določene valovne dolžine EMV vzbujajo molekule vode, kar pomeni spremembe v nihanju dveh atomov vodika okrog atoma kisika v tej molekuli. Te spremembe so lahko simetrično ali asimetrično "raztegovanje" vezi ali uklanjanje (striženje) vezi izven normalnega kota in pomenijo prirast toplote. Vodne molekule ne vsrkavajo enako vseh valovnih dolžin svetlobe, nekatere skozi vodo prehajajo z minimalnim vplivom, kar je ponazorjeno na Grafikonu 1. Svetloba se v delu UV spektra med 200 nm in 400 nm v vodi relativno slabo vpija, kar je ugodno za postopke, ki jih s to svetlobo izvajamo.

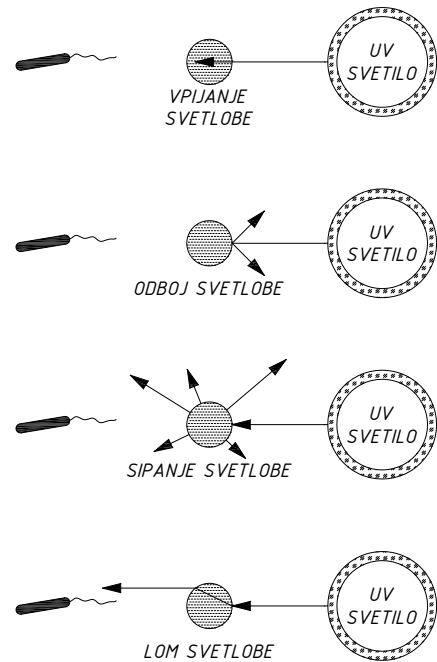
Vpitanje ali vsrkavanje oz. absorpcija svetlobe v vodi je pojav pri prehodu te vrste EMV skozi medij, ki vsebuje molekule vode. Z vodo so v okviru te razlage mišljene molekule vode in ne vodna raztopina neke snovi. Določene valovne dolžine EMV vzbujajo molekule vode, kar pomeni spremembe v nihanju dveh atomov vodika okrog atoma kisika

2.2.2 VPLIV SUSPENDIRANIH SNOVI V VODI NA UV SVETLOBO

Zaradi svojih optičnih lastnosti suspendirane snovi zmanjšujejo prepustnost vode za UV svetlobo. Največje vplive predstavljajo:

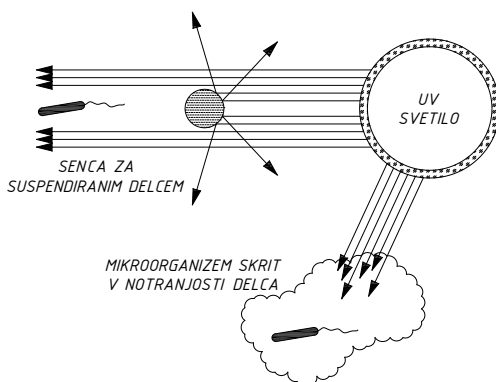
- vpijanje,
- odboj,
- sipanje in
- lom svetlobe.

Drugače povedano, v neki točki UV reaktorja bo pri konstantni intenziteti, ki jo oddaja UV svetilo ter pri ostalih nespremenjenih pogojih, obsevanost z UV svetlobo tem manjša, kolikor bo večja količina suspendiranih snovi.



Slika 3: Ilustracija vpliva suspendiranih delcev na foton UV svetlobe

Z nadzorom nad številom delcev, ki prispejo v UV reaktor, bistveno pripomoremo k učinkovitosti samih procesov, kar se odraža v večjem številu fotolitskih reakcij ter boljšem dezinfekcijskem učinku na enoto vložene energije. Pred samim postopkom z UV svetlobo je zato dobro, da poskrbimo za učinkovito usedanje in/ali filtracijo, če je to potrebno. Delci imajo na fizikalne, kemijske in (mikro)biološke lastnosti vode širok spekter vplivov. Zaradi njihove majhnosti imajo veliko specifično površino, na katero se adsorbirajo (se zgostijo na



Slika 4: Ilustracija vpliva suspendiranih delcev na zaščito mikroorganizmov pred UV svetlobo

površini delcev) različne snovi, med njimi toksične kot npr. težke kovine in klorirani ogljikovodiki. Delci lahko predstavljajo substrat za mikroorganizme, jim zagotavljajo "zavetje" pred EMV, poleg tega pa se nanje adsorbirajo naravne organske snovi, kar negativno vpliva na dezinfekcijske postopke tudi v primeri uporabe kemičnih oksidantov.

Naravne organske snovi namreč s klorom lahko tvorijo nezaželene stranske produkte. Posebno velik je vpliv delcev na postopke priprave vode kot npr. na koagulacijo in flokulacijo (bistrenje), usedanje, filtracijo, membranske postopke filtracije ter zaradi medsebojnega vplivanja s patogenimi mikroorganizmi tudi na dezinfekcijo.

Koloidni delci, to so delci s premerom $0,1 \leq d \leq 1 \mu\text{m}$, v vodi povzročajo motnost. Motnost je izraz optičnih lastnosti, ki povzročijo, da se svetloba v vodnem stolpcu odbija, sipa, razprši in absorbira, ter na ta način ne prehaja vzorca brez sprememb v smeri in jakosti svetlobnega toka. Motnost ima, zaradi vplivov delcev na EMV v vodi, velik vpliv na uspešnost dezinfekcije z UV svetlobo. Zato je v primeru pitne vode zahtevana motnost pod 1 NTU. Takšno vrednost za izstope iz naprav za pripravo pitne vode predpisuje trenutno veljavni Pravilnik o pitni vodi (Uradni list RS, št 19/2004).

2.2.3 VPLIV ANORGANSKIH SNOVI V RAZTOPINI NA UV SVETLOBO

Vsebnost anorganskih snovi v vodi je s stališča uporabe UV tehnologije pomembna predvsem zaradi možnega nastajanja in odlaganja trdnih netopnih oblog na vročih steklih UV svetil. Ta pojav zmanjša prepustnost stekla za UV svetlobo, pri čemer se posledično zmanjša tudi fotolitska in dezinfekcijska učinkovitost. Najbolj pogoste so karbonatne obloge s kalcijem in magnezijem, obloge z železovimi spojinami, sulfidi, sulfiti in sulfati, kompleksi z organskimi snovmi ter nastanek biofilma na mineralnih oblogah. Visoka vsebnost karbonatov vpliva tudi na mikroorganizme same, saj ti lahko na površini celic tvorijo tanek film karbonatnih oblog, ki jih dodatno ščitijo pred zunanjimi vplivi. Verjetnost nastanka oblog narašča, če so v vodi prisotne raztopljene organske snovi in vsebnost anorganskih snovi znaša:

- več kot 0,1 mg/L železa,
- več kot 140 mg/L kalcijevega karbonata (trdota $> 8 \text{ }^\circ\text{dH}$),
- več kot 0,2 mg/L vodikovega sulfida.

Zaradi narave UV svetlobe kot EMV in ne kot kemijskega oksidanta, na njeno uporabo za dezinfekcijske namene neposredno ne vplivajo pH vrednost vode, temperatura, alkaliteta in vsebnost anorganskega ogljika. Vsi naštetih parametri so pomembni pri postopkih pospešene oksidacije, saj glede na njihovo vsebnost spreminjajo lastnosti kemijskih oksidacijskih sredstev, s katerimi UV svetloba deluje sinergijsko. V odvisnosti od pH vrednosti se npr. spreminjajo oblike in lastnosti snovi, ki jih v postopkih pospešene oksidacije želimo oksidirati. Nek parameter lahko posredno vpliva na ciljno snov, saj sprememba v koncentraciji neke druge snovi vodi k zmanjšanju ali povečanju hitrosti reakcije ciljne snovi.

Nekatere anorganske snovi, kot so npr. kovinski ioni (železo, mangan, krom, baker, kobalt, nikelj,...), sulfidi, sulfiti, nitriti idr., neposredno absorbirajo UV svetlobo, zato je vsebnost teh snovi lahko pomembna pri projektiranju UV sistemov (Bagwell, T., et al., 2000).

2.2.4 VPLIV ORGANSKIH SNOVI V RAZTOPINI NA UV SVETLOBO

S stališča zdravstvene hidrotehnike lahko v grobem ločimo naslednje vire organskih snovi v vodi:

- Organske snovi naravnega izvora ali NOM (iz angl. *natural organic matter*). Naravne organske snovi se v vodi pojavljajo kot rezultati (mikro)biološke aktivnosti, vključno s celičnim materialom in presnovnimi produkti vodnih rastlin in živali. NOM se v vode izpirajo tudi iz zaledja, kjer nastajajo v prisotnosti kopenskih rastlin in živali ter v zemljinah, kjer jih srečamo kot huminske in fulvinske kisline. Žive organizme sestavljajo predvsem naslednje organske snovi: ogljikovi hidrati, maščobe, aminokisline in nukleinske ali jedrne kisline. NOM so torej sestavljene iz naštetih snovi, produktov teh snovi med seboj in produktov teh snovi z anorganskimi snovmi v vodi.

- Organske snovi umetnega izvora oz. umetne organske snovi ali SOC (iz angl. *synthetic organic compounds*) so organske snovi, ki izvirajo iz dejavnosti človeka – industrija, kmetijstvo, promet, komunalne dejavnosti, gospodinjstva,... Ker živi organizmi niso prilagojeni na izpostavljenost snovem umetnega izvora, te lahko predstavljajo motilce endokrinega sistema (motijo delovanje žlez z notranjim izločanjem) oz. hormonske motilce, so genotoksične, karcinogene, mutagene in imajo še celo vrsto za organizme škodljivih, nevarnih ali strupenih lastnosti.
- Organske snovi, ki se pojavljajo kot stranski produkti med postopki priprave in čiščenja vode ter dezinfekcije. Pri dezinfekciji vode se ob reakcijah nekaterih organskih snovi, ki so se v vodi nahajale že pred samim procesom, z dezinfekcijskimi sredstvi tvorijo nove vrste snovi, ki jih poznamo pod imenom stranski produkti dezinfekcije ali angl. *disinfection byproducts (DBP)*. Ti produkti imajo povečini škodljive učinke na organizme.

Predvsem organske snovi s cikličnimi ter aromatskimi funkcionalnimi skupinami in/ali dvojnimi ali trojnimi vezmi (nenasičene organske spojine) vpijajo določen spektralni pas UV svetlobe, pri čemer krajša valovna dolžina vzbuja bolj stabilne molekule, saj ima več energije. Preproste aciklične (alifatske) organske spojine, to so spojine brez obročev, ne težijo k vpijanju UV svetlobe, saj ima ta premalo energije, da bi vzbudila elektrone v višje energijsko stanje, medtem ko zapletenejše nenasičene spojine s cikličnimi strukturami zelo vpijajo UV svetlobo. To so npr. organska barvila, huminske snovi, aromatske spojine kot npr. benzen ali toluen, polimerne spojine s cikličnimi funkcionalnimi skupinami kot npr. fenoli, lignini,...

Obarvanost vode je kazalnik vsebnosti organskih snovi. Kaže na vsebnost huminskih in fulvinskih kislin, ki dajejo vodi značilno rjavo barvo, na prisotnost kovinskih ionov (npr. železovih in manganovih) ter je pogojena z motnostjo vode. Potrebno je poudariti, da obarvanost vode ni konstanten parameter, saj se spreminja npr. s spreminjanjem pH vrednosti, kar povzroči drugačno ionsko konfiguracijo vode in s tem različno vsrkavanje svetlobe. Podobne učinke na obarvanost imajo raztopljene in koloidne snovi v vodi.

Skupni organski ogljik ali TOC (iz angl. *total organic carbon*) predstavlja količino ogljika vodi, vezanega v organskih molekulah, neodvisno od porekla ali izvora. Množino organskega ogljika, ki je v vodi raztopljen, imenujemo raztopljeni organski ogljik ali DOC (iz angl. *dissolved organic carbon*). Vpliv organskega ogljika na prepustnost vzorca vode za UV svetlobo ponazorimo na naslednjem primeru. Vzorec vode je lahko brez prisotnih suspendiranih snovi, njegova motnost znaša < 1 NTU, tudi na pogled je vzorec bister, brez vidnih nečistoč in prozoren. Vendar je izmerjena prepustnost za UV svetlobo $T_{1\text{cm}}(254 \text{ nm})$ nepričakovano nizka. Meritve TOC (oz. DOC) pokažejo visoko vsebnost organskega ogljika. V tem je razlog, da se UV svetloba vsrkava v vzorcu in ga ne prehaja. Torej samo nizka motnost ter nizka vsebnost suspendiranih snovi v vzorcu same po sebi še ne pomenita visoke prepustnosti nekega vzorca za UV svetlobo.

2.2.5 **VPIJANJE SVETLOBE V RAZTOPINI IN PREPUŠČANJE SVETLOBE SKOZI RAZTOPINO**

Za praktično uporabo je zaželeno, da za obravnavo uporabljamo parameter, ki upošteva množico različnih vplivov na curek fotonov skozi vodno raztopino. Vpojnost (A) in prepustnost svetlobe (T) pri valovni dolžini λ nam povesta, koliko svetlobe pri določeni valovni dolžini se vpije (absorbira) ali preide skozi vzorec vode na dolžini optične poti l , na kar vplivajo snovi, ki se nahajajo v vzorcu. Pojava opisuje Beer–Lambertov zakon, ki pravi:

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot l = \alpha(\lambda) \cdot l = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = -\log_{10} T(\lambda). \quad (3)$$

$$T(\lambda) = \frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha(\lambda) \cdot l} = 10^{-\varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot l} = 10^{-A(\lambda)}. \quad (4)$$

Posamezni členi predstavljajo v Enačbah 3 in 4 predstavljajo:

I_0 = gostota svetlobnega toka oz. intenziteta svetlobe po prehodu svetlobe skozi prosojni slepi vzorec (destilirana voda) oz. pred prehodom skozi vzorec [$\text{W}/\text{m}^2 \equiv \text{mW}/\text{cm}^2$]

I_1 = gostota svetlobnega toka oz. intenziteta svetlobe po prehodu svetlobe skozi vzorec [$\text{W}/\text{m}^2 \equiv \text{mW}/\text{cm}^2$]

λ = valovna dolžina [nm]

$\varepsilon(\lambda)$ = molarna vpojnost svetlobe pri valovni dolžini λ [$\text{L}/\text{mol}\cdot\text{m}$]

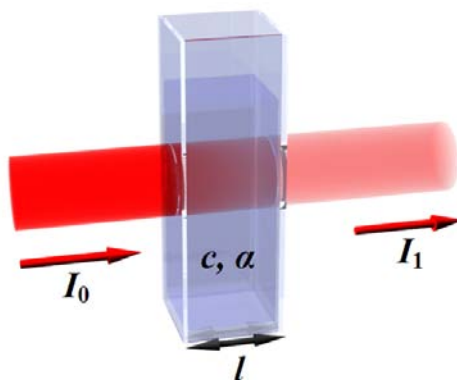
c = koncentracija snovi, ki vpija svetlobo [mol/L]

l = dolžina poti svetlobe skozi vzorec [m, cm – običajno 1 cm]

$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot c$ = vpojnostni (absorpcijski) koeficient pri valovni dolžini λ [m^{-1}]

$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot l$ = vpojnost (absorptivnost) svetlobe pri valovni dolžini λ

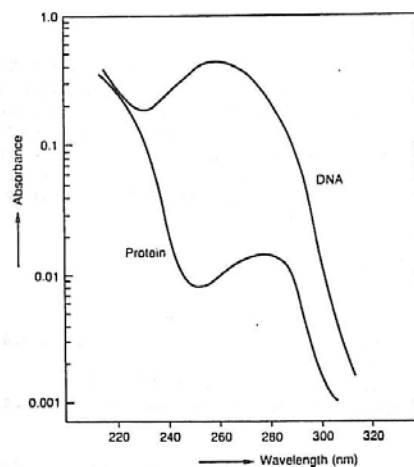
Enačba 4 ima obliko padajoče eksponentne funkcije in pri dani valovni dolžini izraža delež svetlobe, ki po prepotovanju optični poti l prispe do mesta, kjer jo merimo. Prepustnost svetlobe T zato vedno podajamo pri dani dolžini optične poti l . Prepustnost/vpojnost UV svetlobe v vodnem vzorcu običajno merimo z elektronskimi spektrofotometri pri valovni dolžini $\lambda = 254 \text{ nm}$ pri debelini vodne plasti 1 cm ali 5 cm ali 10 cm, npr. $T_{1\text{cm}}(254 \text{ nm})$, razen če ni drugače označeno.



Slika 5: Ilustracija parametrov Beer-Lambertovega zakona
(Wikipedia, spletna enciklopedija, 2008)

2.2.6 ABSORPCIJSKI SPEKTER

Vsaka snov ima t.i. absorpcijski spekter, ki ga ponazorimo s spektralno absorpcijsko krivuljo (spektralno krivuljo vpijanja). Ti podatki nam povedo, koliko svetlobe vpije določena snov pri neki valovni dolžini. Na Grafikonu 2 sta npr. prikazani spektralni krivulji vpijanja UV svetlobe za DNK in beljakovine (serumske albumine). Predvsem tista svetloba, ki jo vpije DNK, je odgovorna za dezinfekcijske učinke UV svetlobe.



Grafikon 2: Spektralna krivulja vpijanja UV svetlobe za DNK in beljakovine (Meulemans, C.C.E., 1986)

3. PATOGENI VODNI MIKROORGANIZMI

3.1 PREDSTAVNIKI

V pretežnem delu Diplomске naloge posvečamo prostor dezinfekciji z UV svetlobo. Svet mikroorganizmov (MO) je zaradi svoje majhnosti (večine posameznih MO ni mogoče videti s prostim očesom) zunanjemu, nepoučenemu opazovalcu odmaknjen in abstrakten. A potrebno je vedeti, da je mikrobiološka kvaliteta vode v veliki večini primerov celo bolj pomembna od fizikalno-kemijske. Skorajda brez izjem najdemo žive MO v vseh vodah, še posebej naravnih, le nekatere vode, ki se uporabljajo v znanosti, industriji in farmaciji, jih praktično ne vsebujejo. Organizmi višjih oblik, med njimi tudi sesalci in človek, smo svoja prebavila prilagodili vodam, ki vsebujejo običajne vrste in količine MO. Šele neobičajno povečanje števila MO ali prisotnost MO, na katere nismo prilagojeni, nam povzroči zdravstvene težave. Bolezni, ki jih povzročajo vodni MO, poznamo pod imenom "hidrične bolezni", organizme, ki jih povzročijo pa "patogeni mikroorganizmi". Zaradi naštetega je potrebno ob prisotnosti teh organizmov poskrbeti za dezinfekcijo, to pomeni zmanjšanje njihovega števila ali popolno odstranitev iz vode. Za te namene lahko uporabljamo tudi UV svetlobo.

Ob tem je potrebno dodati, da dezinfekcije ne izvajamo zgolj v primeru pitne vode. Zaradi zaščite vodnih teles je primerno in potrebno zagotoviti dezinfekcijo tudi v čedalje več primerih odvajanja komunalne odpadne vode v okolje. Z zagotavljanjem ustrezne higiene vodnih teles namreč varujemo ustrezne vire pitne vode in izboljšujemo življenjsko okolje vodnim organizmom.

Preglednica 3: Tipični predstavniki patogenih vodnih mikroorganizmov

Mikroorganizmi	Predstavniki
Virusi	Adenovirus (humani), Coxsackie, Echovirus, Enterovirus, Poliovirus, Hepatitis (A, B, C, E, Delta), Calicivirus, Rotavirus,...
Bakterije	<div data-bbox="603 792 834 987" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="560 987 874 1077">Slika 6: <i>Escherichia coli</i> pod mikroskopom (NIAID, 2009)</p> <p data-bbox="986 797 1406 1077"><i>Vibrio cholerae</i>, <i>Salmonella</i> spp., <i>Shigella</i> spp., <i>Escherichia coli</i>, <i>Yersinia enterocolitica</i>, <i>Campylobacter jejuni</i>, <i>Legionella pneumophila</i>, <i>Aeromonas hydrophila</i>, <i>Helicobacter pylori</i>, <i>Mycobacterium avium intercellulare</i>, <i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Francisella tularensis</i>, <i>Bacillus anthracis</i>,...</p>
Praživali	<div data-bbox="603 1095 834 1339" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="496 1339 943 1429">Slika 7: Ciste <i>Giardia lamblia</i> – dejanska velikost 10µm (Finch, G.R., Belosevic, M., 2000)</p> <div data-bbox="603 1485 834 1706" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="496 1727 943 1816">Slika 8: Oociste <i>Cryptosporidium parvum</i> – dejanska velikost 4 µm (Finch, G.R., Belosevic, M., 2000)</p> <p data-bbox="978 1395 1406 1518"><i>Acanthamoeba castellani</i>, <i>Balantidium coli</i>, <i>Entamoeba histolytica</i>, <i>Entamoeba dispar</i>, <i>Giardia lamblia</i>, <i>Naegleria fowleri</i>, <i>Cryptosporidium parvum</i>,...</p>
Vodni črvi	<i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Schistosoma</i> spp., <i>Necator americanus</i> , <i>Ancylostoma duodenale</i> , <i>Strongyloides stercoralis</i> , <i>Trichuris trichiura</i> ,...
Alge	<i>Staurodesmus</i> , <i>Staurastrum</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Tabellaria</i> , <i>Mallomonas</i> , <i>Peridinium</i> spp., <i>Ceratium</i> spp., <i>Asterionella</i> spp., <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Synedra</i> , <i>Anacystis</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Anabaena</i> (modrozelená alga oz. cianobakterija),...

Velikost, oblika, premičnost in površinski naboj imajo velik vpliv na učinkovitost odstranjevanja MO v postopkih priprave oz. obdelave voda. Veliko pomembnih patogenih MO je velikostnega reda med 1 μm in 10 μm , vključno bakterij in parazitskim *Cryptosporidium parvum*. Delci te velikosti so zaradi svoje majhnosti podvrženi Brownovemu gibanju in zanje veljajo lastnosti koloidov – lebdiyo v tekočini in se ne usedajo. Poleg tega imajo, skorajda brez izjeme, vsi MO negativen površinski naboj pri pH vrednostih, ki so običajne za vode v zdravstveni hidrotehnik. Prav tak naboj imajo tudi filtrski mediji, zato usedanje in filtracija na zrnatih medijih nista v celoti učinkovita postopka za odstranjevanje MO, razen v primeru dodajanja koagulantov, ki spreminjajo površinski naboj delcev in tudi MO. Poleg tega so nekateri MO premični, kar zmanjšuje učinkovitost filtracije na poroznih medijih.

Z običajnimi fizikalno-kemijskimi postopki (grobno mehansko čiščenje, ozračevanje, plavljenje, usedanje, koagulacija, flokulacija, filtracija) in sodobnejšimi pristopi (membranski postopki) lahko zato odstranimo MO le do določene stopnje, ki jo običajno določa dimenzija največjega prostega prehoda pri posameznem postopku. Med tistimi, ki nadaljujejo pot, je nekaj potencialno nevarnih ali patogenih, za njihovo odstranitev ali onesposobljenje pa moramo poskrbeti z ustreznim postopkom dezinfekcije.

Potrebno je tudi upoštevati, da so mikroorganizmi v različnih življenjskih stadiji različno občutljivi na dezinfekcijska sredstva. Prosto živeče živali so v tem smislu običajno veliko bolj občutljive kot njihove spore ali ciste.

3.2 HIDRIČNE BOLEZNI

Vse bolezni, ki se prenašajo z vodo, skupno poimenujemo hidrične bolezni. Prenasajo jih patogeni vodni mikroorganizmi. Vodo organizmi zaužijemo skozi prebavila, zato se morebitna okužba z vodo najprej kaže kot gastroenteritis. Pod pojmom gastroenteritis razumemo okužbo oziroma vnetje sluznice prebavnega trakta (želodca in črevesja), ki se izkazuje z različnimi simptomi, med drugim z občutki napetosti, bolečinami, vročino, bruhanjem, drisko,... Prebavni trakt je za organizme življenjskega pomena, saj se preko njega le-ti oskrbujejo s potrebnimi snovmi in vodo. Akutna obolenja prebavnega trakta zato lahko pomenijo, da organizem ne dobiva dovolj hranil, mineralov in vode, zato so lahko ogrožene njegove življenjske funkcije. Dehidracija oz. premajhen delež molekul vode v primerjavi z ostalimi snovmi v raztopini, ki lahko življenjsko ogrozi organizme, je npr. lahko posledica okužbe z patogenimi vodnimi mikroorganizmi. Na temo (patogenih) mikroorganizmov in hidričnih bolezni je na razpolago mnogo virov, ki podrobneje obravnavajo to temo, zato na to področje nadalje ne bomo posegali.

3.3 PATOGENOST

Žive organizme sestavlja znaten delež vode, to pa morajo organizmi sproti vnašati, saj igra bistveno vlogo v procesih presnove in prenosa snovi. Skupaj z vodo se v organizme vnašajo tudi v vodi prisotni MO. V kolikor se omejimo na človeka, z zaužitjem tekoče vode ali vode v hrani, zaužijemo tudi znaten delež MO. Odziv organizma na MO se lahko odraža na več načinov:

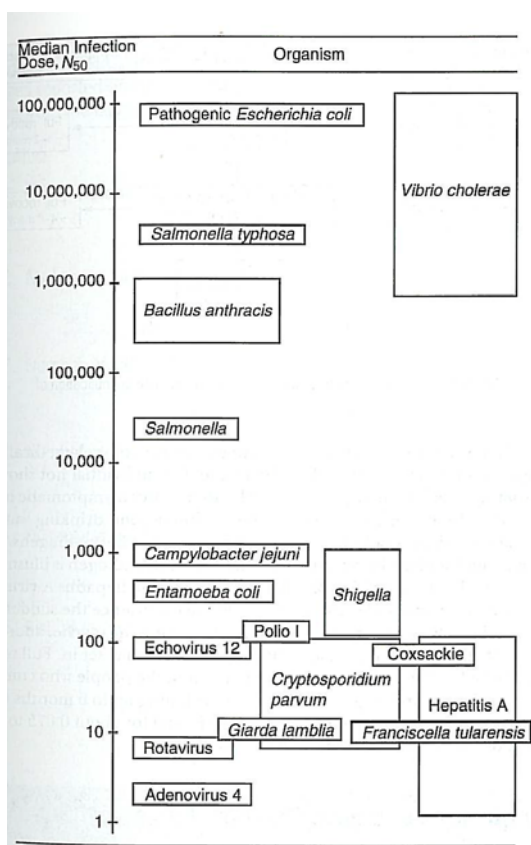
- MO naseli organizem brez povzročanja škodljivih učinkov ali ima naselitev celo ugodne učinke (npr. ugoden vpliv mlečnokislinskih bakterij na prebavila),
- MO naseli organizem in pri tem ne povzroči bolezenskih stanj - asimptomatska okužba,
- MO naseli organizem in povzroči bolezenska stanja - simptomatska okužba oz. okužba, ki se odrazi z boleznijo.

MO, katerih prisotnost v nekem organizmu povzroči škodo, ki se v končni fazi kaže kot (simptomatska) okužba oz. bolezen, imenujemo patogeni MO, njihovo lastnost, da povzročajo bolezen pa patogenost. Število MO, ki so potrebni, da v nekem organizmu sprožijo bolezensko stanje se zelo razlikuje glede na vrsto patogenega MO in obrambne mehanizme (imunski sistem) okuženega organizma. V ta namen se uporablja t.i. srednja infektivna doza (N_{50} ali ID_{50}), to je število patogenih MO neke vrste, ki v 50 % testnih primerov povzroči okužbo oz. bolezen. To število za posamezno vrsto MO, zaradi dolge vrste vplivov, lahko pokriva zelo široko območje. V primeru virusov (*Adenovirus 4*, *Echovirus 12*, *Rotavirus*, *Polio I*, *Hepatitis A*, *Coxsackie*,...), praživali (*Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, *Entamoeba coli*) ter nekaterih vrst bakterij (*Franciscella tularensis*, *Shigella*, *Campylobacter jejuni*) za okužbo lahko zadostuje že zgolj nekaj posameznih MO (predvsem pri virusih in praživalih), vsekakor pa N_{50} znaša pod 1000. V primeru bakterij *Salmonella typhosa*, *Vibrio cholerae* ali patogene *Echerichia coli* je za okužbo potrebnih bistveno več MO, od 10^4 in celo do 10^8 . Velikostni razredi N_{50} za običajne vodne patogene MO so prikazani na Sliki 9.

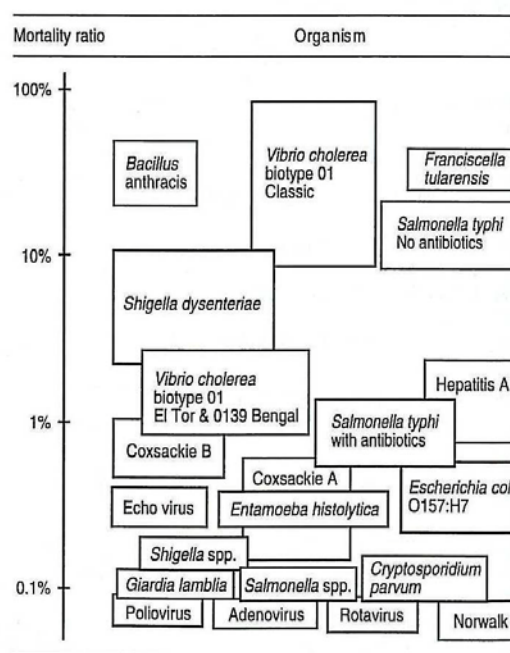
Patogenost je zapleten pojav, predvsem zaradi različnega možnega odziva organizma, ki ga patogen MO okuži. Okužba se namreč ne razvije v bolezensko stanje v vseh primerih. Pod pojmom okužba razumemo, da se patogeni MO uspešno razmnožuje znotraj organizma, v katerem gostuje. V odvisnosti obeh vpletenih organizmov ima lahko okužba naslednje izide:

- asimptomatska okužba (brez simptomov okužbe oz. z zelo blagimi simptomi, brez škode za gostitelja),
- blaga bolezen (blagi simptomi okužbe, brez trajne škode za gostitelja, popolno okrevanje),
- akutna bolezen (močni simptomi okužbe, pogosta trajna škoda za gostitelja, kljub temu možno popolno okrevanje),
- smrt gostitelja.

K sreči velik delež okužb izzveni in ne povzroča resnejših zdravstvenih zapletov. V primeru okužbe z virusom hepatitisa A, ki je med bolj raziskanimi patogenimi MO, približno 75 % okužb mine brez simptomov. Med ostalo četrtino okužb se 85 % – 90 % primerov izrazi kot blaga bolezen, po kateri gostitelj popolnoma okreva, v 10 % – 15 % primerov pa se razvije akutna bolezen. Slednja se v 96 % – 97 % primerov kljub zapletom sčasoma konča z okrevanjem. V 3 % – 4 % primerov akutne bolezni so zapleti tako hudi, da se končajo s smrtjo gostitelja. Količnik med številom smrtnih izidov neke bolezni in okužb imenujemo smrtnost. Na Sliki 10 je prikazana smrtnost v odvisnosti od vrste patogenih MO.



Slika 9: Srednja infektivna doza za različne patogene mikroorganizme (Crittenden, J., et al., 2005)



Slika 10: Smrtnost v primeru okužb s posameznimi patogenimi mikroorganizmi (Crittenden, J., et al., 2005)

V razvitih državah se prebivalstvo s pitno vodo oskrbuje skoraj izključno preko vodovodnih sistemov, odpadne voda pa naj bi se praviloma zbirale in pred izpustom v naravno okolje ustrezno očistile. Načeloma velja, da z velikostjo vodovodnega sistema narašča zanesljivost oskrbe, vendar je potrebno opozoriti na dejstvo, da je voda kot medij za prenos patogenih MO lahko vir okužbe, ki v odvisnosti od velikosti vodooskrbnega sistema, zajame veliko število, tudi do nekaj 100.000 ljudi. Precej več posameznih okužb manjšega števila ljudi se zgodi v primeru manjših (lokalnih) vodovodnih sistemov, predvsem v ruralnem okolju, kjer je možnost vnosa MO zaradi bolj ali manj intenzivnega kmetijstva večji, nadzor pa zaradi razdrobljenosti težji. Načeloma bi težko podali splošno oceno, kateri vodooskrbni sistemi so v mikrobiološkem smislu bolj zanesljivi, bistvenega pomena pa je prav gotovo stopnja zaščite vodnih teles, ki se na splošno izvaja na nekem območju ter spoštovanje oz. doseganje predpisane kvalitete vode z vzdrževanjem dobrega stanja infrastrukture. Zanesljivo in dobro delovanje vodovodnih in kanalizacijskih sistemov ter čistilnih naprav (tako za pitno kot odpadno vodo), skupaj z ustreznimi ukrepi za zaščito voda, so tudi v širšem smislu bistveni za zmanjševanje možnosti okužbe s patogenimi MO. V naslednjih nekaj stavkih pogledajmo zakaj.

Četudi se neka obolela oseba ni okužila z vodo (znotraj nekega oskrbovalnega sistema), lahko patogeni MO pridejo v vodno okolje z izločki te osebe. Slednji običajno pristanejo v kanalizacijskem sistemu, od tam pa se odplake vodijo bodisi na čistilno napravo za odpadne vode, bodisi se iztekajo v odvodnike brez obdelave. Na ta način patogeni MO vstopijo v vodna telesa, v primeru uporabe takšnih vodnih teles za namene pridobivanja pitne vode, je to ena od možnih poti, kako se lahko znajdejo v sistemu, ki ljudi oskrbuje s pitno vodo. Zaradi naštetega je bistveno, da se zagotovi sistem prestrezanja patogenih MO, to se v eni od oblik dezinfekcije običajno izvaja na čistilnih napravah. Vsekakor je bolj pomembna ustrezna dezinfekcija pri pitnih vodah, a z dezinficiranjem (higienizacijo, razkuževanjem) odpadnih voda na iztokih iz čistilnih naprav lahko bistveno pripomoremo k preprečevanju širjenja patogenih MO v okolju. Zakonodaja sicer predpisuje, na katerih (občutljivih) območjih je potrebna dezinfekcija odpadne vode, a sčasoma se bo z naraščajočo zavestjo, da je potrebno naravne vodne vire ščititi tudi pred antropogenimi viri mikrobiološkega onesnaženja, dezinficiralo vse več le-te.

4. DEZINFEKCIJA

4.1 OSNOVNI POJMI

Dezinfekcija ali razkuževanje pomeni odstranjevanje (zmanjševanje števila), uničevanje ali onesposabljanje patogenih mikroorganizmov. Zagotavljanje mikrobiološke ustreznosti in stabilnosti vode je s stališča zdravstvene hidrotehnike ena izmed prvenstvenih nalog, če ne najpomembnejša. Pri tem se izvajajo različni pristopi, ki se ob sočasnem izvajanju dopolnjujejo:

- preprečevanje vstopa patogenih MO v vodni vir (pasivna in aktivna zaščita vodnih virov),
- uporaba postopkov čiščenja vode za zmanjšanje števila patogenih MO in
- vzdrževanje dobrega stanja vodooskrbnega sistema, ki ohranja kvaliteto vode.

Prva in tretja alineja sta lokalno predvsem odvisni od načina ravnanja z okoljem, stopnje ozaveščenosti, stopnje zaščite voda, stanja hidrotehnične infrastrukture itd. Druga alineja pa se bolj nanaša na tehnologije čiščenja vode in uporabljena sredstva, katerih želene lastnosti so:

- učinkovitost delovanja na celotno paleto MO pri različni fizikalno-kemijski sestavi vode,
- ne vplivajo na organoleptične lastnosti vode,
- ne zmanjšujejo primernost za njeno uporabo, ne tvorijo nevarnih, škodljivih ali strupenih stranskih produktov z drugimi snovmi v vodi,
- so varne in enostavne za rokovanje, določanje doze oz. koncentracije in sledljivost (analitika),
- z rezidualnim učinkom zagotavljajo stabilno delovanje celotnega vodooskrbnega sistema, nanj pa škodljivo ne vplivajo,
- zagotavljajo ekonomsko učinkovitost sistema.

S stališča izpolnjevanja vseh navedenih pogojev v celoti ter ob poznavanju lastnosti posameznih metod in sredstev za dezinfekcijo, lahko ugotovimo, da je pri izbiri tehnologije možen zgolj kompromis med navedenimi lastnostmi, saj istočasno vseh ni mogoče izpolniti. S povečano stopnjo zaščite vodnih virov, s tehnološkimi izboljšavami priprave vode, višjim standardom hidrotehnične infrastrukture in kombinacijo ukrepov med seboj je kljub temu mogoče dosegati optimalne rezultate.

V postopkih čiščenja vode, zmanjševanje mikrobiološkega onesnaženja zajema dva osnovna mehanizma:

Odstranjevanje (patogenih) MO:

Iz vode MO odstranjujemo s fizikalnimi postopki, kot so usedanje, plavljenje, filtracija in membranski postopki. Z razvojem tehnologije, predvsem membranskih postopkov (ultrafiltracija), odstranjevanje MO v zadnjem času marsikje izpodriva primarno dezinfekcijo.

Onesposabljanje (patogenih) MO:

Onesposabljanje MO največkrat pripisujemo pojmu dezinfekcija. Onesposabljanje MO pomeni, da so le-ti v vodi še vedno prisotni, vendar zaradi dezinfekcijskega učinka nanje v gostitelju ne morejo več povzročiti bolezni ali celo odmrjejo. Pri tem učinkovitost izkazujejo:

- prekuhanje ali izpostavljanje povišani temperaturi (pri čemer so potrebni visoki vložki energije),
- izpostavljanje elektromagnetnemu valovanju (UV svetlobi, gama žarkom) in,
- uporaba kemičnih oksidacijskih sredstev (sredstva na osnovi klora, ozon, vodikov peroksid,...).

Našteta mehanizma je dobro medsebojno ločiti, še posebej pri interpretaciji zahtev, ki jih predpisujejo določeni obvezujoči dokumenti (standardi, predpisi, zakonodaja). Ni namreč isto, če v vodi nek (patogeni) MO ni prisoten, ali smo ga uspeli onesposobiti in kot tak ni več nevaren, čeprav se v vodi še vedno nahaja.

Vsi postopki onesposabljanja se ne odrazijo s smrtjo ciljnega mikroorganizma neposredno ob uporabi dezinfekcijskega sredstva. To sicer drži v primeru prekuhavanja in pretežno ob uporabi kemičnih oksidantov, ne drži pa (v veliki večini) ob uporabi UV svetlobe.

Učinkovitost dezinfekcije je odvisna od številnih dejavnikov:

- Vrste dezinfekcijskega sredstva – različna dezinfekcijska sredstva onesposabljujejo mikroorganizme na različne načine.
- Koncentracije dezinfekcijskega sredstva in kontaktnega časa, to je doze dezinfekcijskega sredstva – višje doze sredstev običajno (do neke mere) pomenijo boljši učinek.
- Vrste MO in njihovega fiziološkega stanja – nekatere vrste MO tvorijo odpornejše oblike (npr. ciste, spore ali jajčeca).
- Fizikalno-kemijskih lastnosti vode.

Za dezinfekcijo pomembnejše fizikalno-kemijske lastnosti vode so:

- Temperatura – višja temperatura običajno pomeni boljši dezinfekcijski učinek (na splošno to bolj velja za kemična oksidacijska sredstva).
- pH vrednost – učinkovitost nekaterih sredstev, še posebej klora, je v visoki meri odvisna od pH vrednosti. Dezinfekcijski učinki UV svetlobe niso odvisni od pH vrednosti.
- Vsebnost anorganskih in organskih snovi – dezinfekcijska sredstva reagirajo s snovmi v vodi, se na ta način porabljajo, manjša se njihova učinkovitost, lahko tvorijo nezaželene stranske produkte.
- Suspendirani delci, motnost – lahko ščitijo MO pred dezinfekcijskim sredstvom, lahko z njim reagirajo in zmanjšujejo njegov učinek.

Pojem dezinfekcija v praksi ločimo glede na dva različna cilja:

- Primarna dezinfekcija - onesposabljanje patogenih MO.
- Sekundarna ali rezidualna dezinfekcija - vzdrževanje dezinfekcijskega učinka skozi celotni vodooskrbni sistem s prebitkom koncentracije dezinfekcijskega sredstva. Potrebna je predvsem zato, ker vodo v sistemu lahko onesnažijo različni zunanji vplivi na omrežje (poškodbe cevovodov, slabo tesnjenje stikov cevi in armatur,...) ali zaradi vsebnosti hranilnih snovi v vodi, ki lahko sproži naknadno razrast MO.

UV svetloba se zaradi narave delovanja lahko uporablja zgolj kot primarno dezinfekcijsko sredstvo. UV svetloba na neko prostornino vode deluje dezinfekcijsko samo ob njenem stiku, to je v UV reaktorju, v neposredni bližini UV svetil. Dezinfekcijski učinek je zato časovno omejen zgolj na zadrževalni čas vode v UV reaktorju.

4.2 STOPNJA DEZINFEKCIJE – KINETIKA REAKCIJ:

Stopnjo dezinfekcije SD , to je v kolikšni meri se zmanjša število patogenih bakterij oz. v kolikšni meri se zmanjša njihova patogenost v času t , običajno izražamo v logaritmskih stopnjah:

$$SD = \log\left(\frac{N_t}{N_0}\right), \quad (5)$$

kjer smo z N_0 označili začetno število (koncentracijo) MO in z N_t število (koncentracijo) MO po času t .

Pri tem velja:

- 1 log ustreza 90 %,
- 2 log ustreza 99 %,
- 3 log ustreza 99,9 % in
- 4 log ustreza 99,99 % odstranjenih mikroorganizmov.

Takšno podajanje je relativno glede na začetno vsebnost posameznih MO. Za povzročitev neke bolezni lahko zadostuje absolutno majhno število MO. Na to moramo biti pozorni, ko načrtujemo uspešnost delovanja nekega sistema ali interpretiramo rezultate. Poglejmo, kaj to pomeni na primeru srednje infektivne doze N_{50} (glej Sliko 9) v primeru bakterije *Shigella* ($1000 < N_{50} < 100$) in praživali *Cryptosporidium parvum* ($100 < N_{50} < 10$). Predpostavimo, da se v vzorcu nahaja 1000 primerkov vsakega naštetega MO. 2 log zmanjšanje vsakega MO bi imelo za posledice drugačne izide: v primeru bakterije *Shigella* bi se v vzorcu nahajalo 10 takšnih MO, kar je manj kot N_{50} , v primeru *Cryptosporidium parvum* pa isto število MO še vedno v 50 % primerov lahko povzroči bolezen. Na splošno je za MO, ki že v majhnem številu povzročajo bolezen, potrebna višja stopnja onesposabljanja (3 log in več).

Za matematično opisovanje padanja števila MO s časom uporabljamo enega izmed kinetičnih modelov. Različni kinetični modeli upoštevajo lastnosti dezinfekcijskih sredstev in odzive MO na različne načine. Med njimi nekateri bolj natančno opisujejo odnose med določenimi sredstvi in MO, za ostale pa niso tako natančni. Modeli vsebujejo različno število in različne vrste parametrov za opis dogajanja pri dezinfekciji. Parametri so prilagojeni določenemu dezinfekcijskemu sredstvu ali posamezni vrsti MO ali kombinaciji nekega sredstva in določenega MO.

Krivulje takšnih modelov imajo običajno obliko (padajoče) eksponentne funkcije oz. premice, če za prikaz uporabljamo logaritemske vrednosti na eni izmed osi (ali na obeh oseh), odvisno od vrste modela, uporabljenih parametrov, reda reakcij,... Na dejanske učinke dezinfekcije vplivajo nekateri dejavniki, ki jih je v matematičnih modelih težko natančno upoštevati, zato običajno prihaja do odstopanj med dejanskimi in modeliranimi vrednostmi. Primerno je, da glede na predmet raziskave izberemo takšen model, ki znotraj reprezentativnih pogojev daje dovolj zanesljive rezultate.

Dr. Harriet Chick je leta 1908 predstavila prvi enostaven model za opis zmanjševanja števila MO s časom:

$$\log\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -K \cdot t, \quad (6)$$

pri čemer je K [časovna enota⁻¹] konstanta reakcije 1. reda, drugačna za različna sredstva in drugačna za isto sredstvo pri različnih koncentracijah ter drugačna za različne MO. Grafični prikaz običajno podajamo tako, da na absciso rišemo čas, na ordinato pa logaritemske vrednosti N_t/N_0 . Chickin zakon neposredno ne upošteva pomena koncentracije dezinfekcijskega sredstva, ki sicer bistveno vpliva na potek dezinfekcije. Visoka začetna ali prebitna koncentracija sredstva načeloma pomeni hitrejše zmanjševanje števila MO, vendar moramo pri tem upoštevati vplive fizikalno-kemijske sestave vode, ki s sredstvom lahko reagira na različne, tudi nezaželene načine.

Istega leta kot dr. Chick je, neposredno upoštevajoč koncentracijo dezinfekcijskega sredstva, Herbert Watson predlagal naslednji izraz:

$$C^n \cdot t = konst.$$

C predstavlja koncentracijo dezinfekcijskega sredstva [mg/L], n je empirični koeficient, ki se nanaša na koncentracijo, t potreben čas za doseganje določenega deleža onesposabljanja (npr. 99 %) in $konst$ neka vrednost, ki se nanaša na delež onesposabljanja za določen MO.

Izraza Chick in Watson sta pogosto uporabljena v kombinaciji, ki jo poznamo pod imenom model Chick-Watson. Ta model združuje parametre obeh posameznih modelov:

$$\log\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -K \cdot C^n \cdot t. \quad (7)$$

4.3 DOZA DEZINFEKCIJSKEGA SREDSTVA:

Za uspešno delovanje dezinfekcijskih sredstev je poleg ustrezne koncentracije oz. odmerka pomemben še dovolj dolg čas, ko so MO v stiku s sredstvom (zadrževalni oz. kontaktni čas). Produktu koncentracije oz. odmerka dezinfekcijskega sredstva oz. dezinfekcijskega sredstva v prebitku C ter kontaktnega časa t pravimo doza:

$$D = C \cdot t . \quad (8)$$

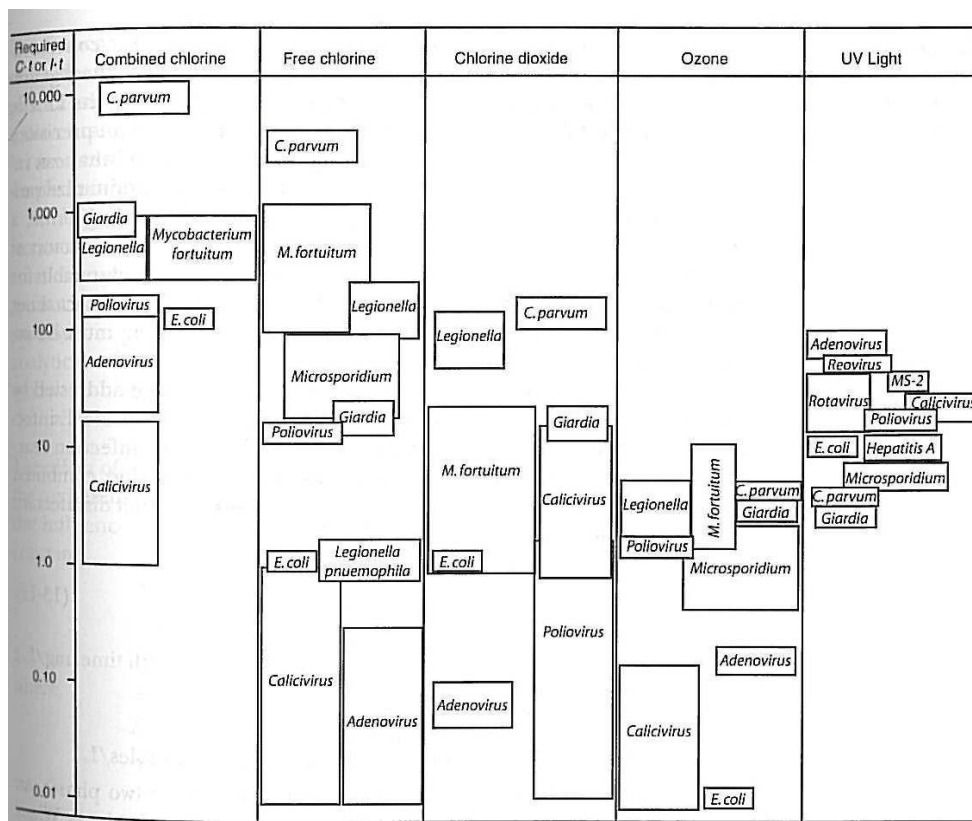
Doza dezinfekcijskega sredstva je lastna vsakemu obravnavanemu vzorcu vode, tako glede uporabljenega dezinfekcijskega sredstva, kot fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov, ki vplivajo na dezinfekcijo. Običajno je, da se za praktično vsa znana dezinfekcijska sredstva podajajo doze za želeno stopnjo onesposabljanja. Takšen pristop nam omogoča, da npr. primerjamo, kakšne doze sredstev so potrebne, da onesposobimo primerljivo število MO z različnimi dezinfekcijskimi sredstvi.

Model Chick-Watson neposredno upošteva pomen doze sredstva. V primeru uporabe UV svetlobe, lahko za opis kinetike reakcij večine MO z zadovoljivo natančnostjo uporabimo model Chick ali Chick-Watson. Še posebej je to prikladno zaradi medsebojne primerljivosti različnih podatkov, ki jih navajajo raziskave ali literatura. Pri tem koncentracijo dezinfekcijskega sredstva nadomestimo z obsevanostjo z UV svetlobo E_0 :

$$\log\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -K \cdot E_0 \cdot t . \quad (9)$$

Dozo UV svetlobe v tem primeru predstavlja produkt $E_0 \cdot t$.

Slika 11 prikazuje, kakšen je vpliv doze različnih dezinfekcijskih sredstev na 99 % (2 log) onesposabljanje različnih patogenih MO. Ker se MO zaradi drugačnih mehanizmov delovanja različno odzivajo na različna dezinfekcijska sredstva, se pripadajoče doze posameznih sredstev za doseganje istih učinkov razlikujejo za več redov velikosti. Zgoščen interval potrebnih doz (med 1 mJ/cm² in 100 mJ/cm²) pri uporabi UV svetlobe lahko pripišemo prvenstvenemu dezinfekcijskemu učinku UV svetlobe na dedni material, ne glede na vrsto MO, medtem ko pri drugih sredstvih dezinfekcijski učinek narekuje več različnih mehanizmov onesposabljanja.



Slika 11: Doze različnih dezinfekcijskih sredstev za onesposabljanje patogenih mikroorganizmov za 2 log stopnji (Crittenden, J., et al., 2005)

4.4 DOZA UV SVETLOBE

Osnovni parameter dezinfekcije z UV svetlobo je t.i. UV doza [$\text{J/m}^2 \equiv \text{mJ/cm}^2$] (angl. *UV dose* oziroma *UV fluence*). V splošnem je produkt obsevanosti z UV svetlobo E_0 [$\text{W/m}^2 \equiv \text{mW/cm}^2$] in zadrževalnega časa t_z [s] kontrolnega volumna vode v UV reaktorju, kjer je voda v stiku z UV svetlobo. Velja naslednja zveza:

$$D_{UV} = E_0 \cdot t_z = E_0 \cdot \frac{V}{Q}. \quad (10)$$

Enačba 10 velja zgolj kot idealiziran prikaz. Dejansko UV dozo je namreč težko določiti zaradi neenakomerne porazdelitve svetlobnega polja oziroma obsevanosti z UV svetlobo, saj je nemogoče idealno razporediti UV svetila tako, da bo v vsaki točki UV reaktorja svetlobno polje enako ter zaradi različne intenzitete UV svetlobe pri različnih valovnih dolžinah (v primeru srednjetačnih UV svetil). Običajno se za računске vrednosti upošteva obsevanost z UV svetlobo pri valovni dolžini 254 nm. Nadalje se v odvisnosti od nihanja pretoka spreminja tudi zadrževalni čas, zato pri izračunu doze zanj uporabimo povprečne vrednosti, prav tako to storimo za UV obsevanost.

V UV reaktorjih za svetlobo veljajo principi optike. Za opis količin uporabljamo radiometrične veličine, zato najprej pojasnimo nekatere osnovne pojme in definicije s teh področij.

4.4.1 MOČ SEVANJA Φ (angl. *radiant flux, radiant power*)

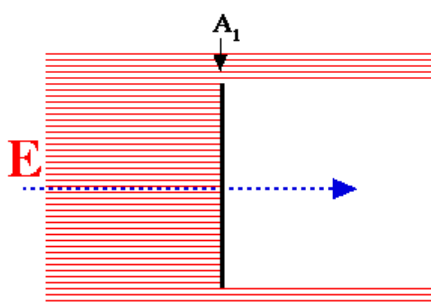
Sevanje je širjenje elektromagnetnega valovanja skozi prostor. V primeru UV svetlobe je lahko ta prostor "prazen" (vakuum) ali pa se v njem nahaja plin ali tekočina. Moč sevanja Φ [W] predstavlja energijo fotonov v časovni enoti, ki se širijo v vse smeri od vira sevanja (UV svetlobe).

4.4.2 IRADIANCA E (angl. irradiance)

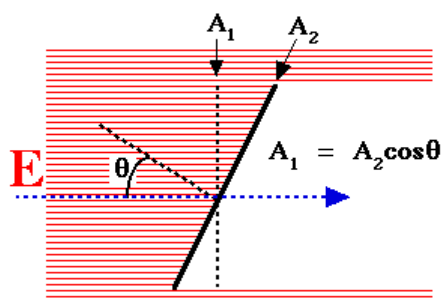
Definirana je kot skupna moč sevanja Φ iz določene smeri na enoto površine infinitezimalno majhnega elementa dS v neki točki ploskve in fizikalno predstavlja gostoto energijskega toka:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (11)$$

Irradianca se nanaša na snop svetlobe, ki ga opazovani element ali njegova okolica ne sipata ali odbijata. Vir svetlobe s snopom vzporednih žarkov je npr. lahko zelo oddaljen točkovni vir (Sonce) ali laser. Irradianco izražamo v $[\text{W}/\text{m}^2]$. Odvisna je od površine pravokotne projekcije elementa na smer širjenja snopa svetlobe (Slika 12). Prestrežena moč se lahko znotraj elementa vpija ali ga prehaja. Če snop svetlobe pada na element pod kotom θ glede na normalo, znaša pravokotna projekcija $A_1 = A_2 \cdot \cos\theta$. Irradianca dveh elementov z različnima površinama A_1 in A_2 je enaka, ker je enaka površina njune pravokotne projekcije (Slika 13).



Slika 12: Irradianca na elementu s površino A_1 (OMLC, 2009)



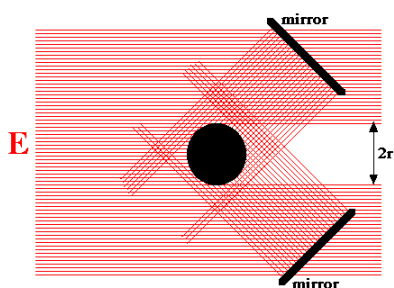
Slika 13: Irradianca na elementih s površinama A_1 in A_2 (OMLC, 2009)

Če predpostavimo, da fotoni izhajajo iz točkovnega vira in se širijo enako v vse smeri ter pri tem ni energijskih izgub v mediju, potem se E zmanjšuje s kvadratom oddaljenosti od vira svetlobe. V primeru oddaljenost r od točkovnega vira svetlobe (na površini krogle s polmerom r) znaša:

$$E = \frac{\Phi}{4\pi \cdot r^2}. \quad (12)$$

4.4.3 OBSEVANOST E_0 (angl. fluence rate)

Obsevanost E_0 [W/m^2] se nanaša na razmerje med močjo sevanja Φ , ki v danem delu prostora iz vseh smeri (iz vseh kotov) pada na infinitezimalno majhno kroglo z radijem r ter prečnim presekom te krogle $A = \pi \cdot r^2$. Imenujemo jo tudi sferna (krogelna) obsevanost. Z njo opisujemo takšno sevanje, ki pada na telo neposredno ter sevanje, ki na to telo pada z odbijanjem ali sipanje z drugih delcev iz kateregakoli dela prostora. Pri tem količino prejete



Slika 14: Ilustracija krogelne obsevanosti (OMLC, 2009)

moči ne določa površina krogle, pač pa njen prečni presek, ki iz vseh smeri prestreza sevanje. To si lahko predstavljamo tako, da na kroglo seva snop svetlobe. Nek delež svetlobe, ki seva mimo krogle, odbijemo na kroglo z "zrcali" (delci, ki sipajo in odbijajo svetlobo). Obsevanost je torej vsota vse irradiance na površino prečnega preseka. V primeru, da na kroglo pada snop žarkov iz ene smeri, in jih ne sipa ali odbija okolica, je obsevanost enaka iradianci.

Obsevanost E_0 in iradianco E večkrat napačno poimenujemo kot "intenziteta svetlobe". Po definiciji ima intenziteta sevanja drugačno definicijo in drugačne enote (glej poglavje "Optika UV reaktorjev"). Zaradi dolgoletne "prakse" napačnega poimenovanja se zaradi lažjega razumevanja, skladnosti med navedenimi vrednostmi, preglednosti in primerljivosti pogosto v literaturi še nadalje uporablja kar intenziteta I [W/m^2]. Prav je, da se razlike med obsevanostjo in intenziteto zavedamo vsaj na načelnem nivoju, če jih že v praksi drugače uporabljamo.

Ker včasih pri modeliranju UV reaktorjev privzamemo, da na neko prostornino vpliva samo svetloba, ki nanjo neposredno vpada iz smeri izvora, brez vplivov odboja in sipanja svetlobe, se v takšnih primerih obsevanost poenostavi v iradianco E .

4.4.4 UV DOZA (angl. UV dose ali UV fluence):

Časovni integral obsevanosti z UV svetlobo oz. skupna energija UV svetlobe, ki iz vseh smeri pada na infinitezimalno majhno kroglo, se imenuje UV doza. Izražamo jo v [mWs/cm² ≡ mJ/cm² ali Ws/m² ≡ J/m²]:

$$D = \int_0^t E_0(t) dt . \quad (13)$$

Obsevanost z UV svetlobo oz. UV intenziteto običajno merimo s fotodiodnim senzorjem (ali več senzorji), ki intenziteto merijo točkovno, torej bolj ali manj odvisno od svetlobnega polja UV svetil, ki se nahajajo v bližini ter trenutne fizikalno-kemijske in mikrobiološke kvalitete vode. Če takšne meritve intenzitete privzamemo za povprečne ali reprezentativne za obravnavani UV reaktor ter za zadrževalni čas upoštevamo, da je v času t odvisen od pretoka, se pomensko pravilnejši zapis enačbe za (povprečno) UV dozo glasi:

$$\overline{D_{UV}(t)} = \overline{E_0} \cdot \frac{V}{\overline{Q(t)}} . \quad (14)$$

Upravičenost uporabe doze kot merila za količino dezinfekcijskega sredstva, je v primeru UV svetlobe izrazita. Mehanizem onesposabljanja ni zgolj ali pretežno odvisen od intenzitete UV svetlobe, temveč od števila fotolitskih reakcij UV svetlobe z DNK in celičnimi sestavinami. To lahko dosežemo z tako z večjo obsevanostjo z UV svetlobo, kot z daljšim kontaktnim časom. Ob primerjavi doz UV svetlobe in kemičnih oksidantov (Slika 11), lahko za isto vrsto MO opazimo le majhno podobnost v vrednostih $E_0 \cdot t$ oz. $I \cdot t$ ter $C \cdot t$. Medtem ko se potrebne UV doze medsebojno razlikujejo za dva reda velikosti (za približno 100 krat), se doze kemičnih oksidantov bistveno bolj razlikujejo (v primeru prostega klora npr. tudi za 7 redov velikosti). To lahko pripišemo dejstvu, da ima UV svetloba na različne MO enak dezinfekcijski učinek, saj ne glede na vrsto vpliva na poškodbe DNK in beljakovin na enak način. Nasprotno imajo kemični oksidanti lahko več dezinfekcijskih mehanizmov, odvisno od vrste MO.

4.5 KEMIČNA OKSIDACIJSKA SREDSTVA

Med kemičnimi oksidacijskimi sredstvi oz. kemičnimi oksidanti se za namene dezinfekcije uporabljajo:

- sredstva na osnovi klora: plinski klor (Cl_2), natrijev hipoklorit (NaOCl), klordioksid (ClO_2), kloramini (npr. monokloramin NH_2Cl) idr., ki so najpogosteje uporabljena,
- ozon (O_3),
- vodikov peroksid (H_2O_2),
- kalijev permanganat (KMnO_4),
- in redkeje še nekatera druga, običajno v kombinaciji z drugimi sredstvi (npr. srebrovi ioni, titanov dioksid,...).

V podrobnosti različnih sredstev se zaradi široke množice razpoložljive literature in podatkov ne bomo spuščali. V nadaljevanju bomo najbolj uporabljena sredstva primerjali med seboj in z UV svetlobo.

Kemična oksidacijska sredstva mikroorganizme onesposobijo z enim ali kombinacijo naštetih mehanizmov, odvisno od vrste sredstva in lastnosti MO (Bagwell, T., et al., 2001):

- uničijo ali poškodujejo celično zgradbo MO pri reakcijah z bistvenimi celičnimi strukturami, npr. uničijo celično steno ali poškodujejo polprepustne membrane,
- poškodujejo oz. spremenijo encime ter tako vplivajo na presnovne procese, ki celici zagotavljajo energijo,
- preprečujejo nastajanje (normalnih) beljakovin, nukleinskih kislin, (ko)encimov ali celičnih sten ter tako ovirajo biosintezo.

Ker kemični oksidanti hkrati lahko delujejo na več mest v celici, lahko povečini računamo z dobrim dezinfekcijskim učinkom. Največji vplivi na učinkovitost dezinfekcije se pripisujejo sposobnosti sredstev za oksidacijo in poškodbe celičnih sten MO ter sposobnosti sredstev za difuzijo znotraj celice in motenje celičnih aktivnosti. Hitrosti delovanja posameznih mehanizmov se med seboj bistveno razlikujejo, zato se doze temu ustrezno razlikujejo tudi za več redov velikosti (glej Slika 11).

Dozo kemičnega oksidanta kot dezinfekcijskega sredstva v splošnem določajo (Bagwell, T., et al., 2000):

- takojšnja poraba sredstva v vodi (hitre reakcije s snovmi v vodi, ki se nato ustavijo),
- počasen razpad sredstva (počasne reakcije, ki trajajo dalj časa, sredstvo izgublja dezinfekcijski učinek) in
- rezidualna oz. prebitna koncentracija (zagotavlja dezinfekcijske učinke).

Prebitna koncentracija je tista, ki je mora poskrbeti za ustrezno dozo. Za vsak obravnavani vzorec vode moramo torej določiti, koliko dezinfekcijskega sredstva se "porabi" za oksidacijo snovi ter koliko sredstva je potrebno za dezinfekcijske učinke. Pozorni moramo biti na dejstvo, da vsa sredstva ne ostanejo v prebitku skozi daljše časovno obdobje. Velja namreč, da se zaradi svoje reaktivnosti ozon in vodikov peroksid v vodi porabita prej, kot bi bilo potrebno, da bi ju smatrali kot sekundarni dezinfekcijski sredstvi. Takšne lastnosti izkazujejo predvsem sredstva na osnovi klora.

Nekatere lastnosti kemičnih oksidantov narekujejo, da podrobneje poznamo njihove lastnosti, fizikalno-kemijsko sestavo vode in možna součinkovanja. Pozorni moramo biti predvsem na to, da ta sredstva oksidirajo snovi v vodi, se na ta način porabljajo in lahko z znanilci tvorijo nezaželene stranske produkte. Predvsem so tu pomembni znanilci organske snovi, tako naravnega (NOM, huminske snovi,...), kot umetnega izvora.

Stranski produkti dezinfekcije so lahko tudi načeloma nenevarne oksidirane organske snovi. Nekje v vodooskrbnem sistemu, daleč od čistilne naprave ali mesta, kjer izvajamo dezinfekcijo, prebitok sredstva pade pod mejo, ki škoduje MO. Organske molekule, ki jih je sredstvo oksidiralo v enostavnejše oblike, MO lažje asimilirajo – drugače rečeno, služijo jim kot hrana. Dani so torej pogoji za nezaželeno rast MO. Z dobrim poznavanjem dezinfekcijskih sredstev, lokalno pogojenih lastnosti vode ter vodooskrbnih sistemov, se skušamo z ustreznimi ukrepi takšnemu scenariju čim bolj izogniti.

Pomembno je tudi, da vedno vzdržujemo dovolj visoko prebitno (rezidualno) dozo sredstev, ki vrši dezinfekcijske učinke. Pri nizkih koncentracijah sredstev, podaljševanje kontaktnega časa ne pomeni vedno povišanja doze. Za njihovo učinkovito delovanje je prav tako pomembna dovolj visoka koncentracija. To lahko enostavno dosežemo z dodajanjem sredstva do zahtevane količine, vendar smo pri tem omejeni z vsebnostjo nekaterih v vodi prisotnih snovi, predvsem organskega ogljika (TOC), ki je v največji meri povzročitelj stranskih produktov dezinfekcije.

Kemičnim oksidantom kot dezinfekcijskim sredstvom, še posebej kloru, kljub naštetim pomanjkljivostim ne smemo "delati krivice". Prav uporaba teh sredstev je skozi čas bistveno izboljšala mikrobiološko ustreznost in stabilnost pitne vode. Njihova uporaba je primerna in upravičena tam, kjer je fizikalno–kemijski in mikrobiološki parametri vode ter lastnosti vodooskrbnega sistema izkazujejo, da so zanesljiva, varna ter tehnološko in ekonomsko učinkovita ali na razpolago nimamo boljše alternative.

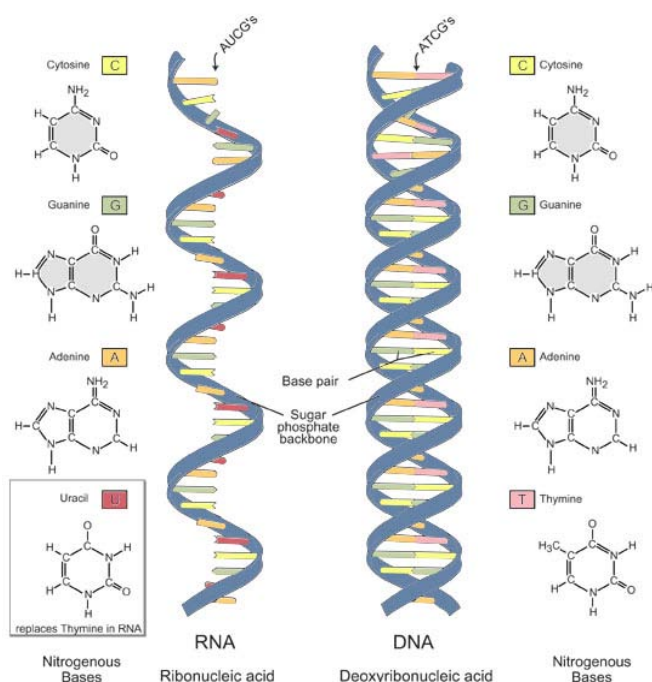
4.6 DEZINFEKCIJSKI UČINEK UV SVETLOBE

Prva uporaba UV svetlobe za dezinfekcijo pitne vode sega v leto 1910 v francosko mesto Marseille. Splošnejšo uporabo UV svetlobe kot dezinfekcijskega sredstva so zavrli predvsem visoki stroški tehnologije, slaba zanesljivost delovanja takratnih sistemov in sočasna uveljavitev kloriranja vode, ki je bilo cenejše in zanesljivejše. Poleg tega se prebitok klora v vodi zlahka meri. Sčasoma so se odkrivale nove informacije o možnosti tvorjenja nevarnih stranskih produktov oksidacije pri uporabi klora ali ozona, zato je UV svetloba počasi zopet pridobivala na veljavi. Nizkotlačna, monokromatska UV svetila namreč tvorijo stranske produkte le v redkih oz. izjemnih primerih. Poleg tega, v nasprotju s kemičnimi oksidacijskimi sredstvi, UV svetloba pri valovni dolžini 254 nm in običajnih dozah ne spreminja biološke stabilnosti vode, ker ne oksidira organskih molekul v oblike, ki jih mikroorganizmi lažje asimilirajo.

Po letu 1980 se je uporaba UV svetlobe v dezinfekcijske namene začela širiti. V Evropi in ZDA je ta tehnologija doživela preboj po raziskavi (Clancy, J.L., et al., 1998) z odkritjem, da je kot primarno dezinfekcijsko sredstvo zelo učinkovita pri onesposabljanju praživali *Cryptosporidium* in *Giardia*. Klor se je izkazal kot neučinkovit proti tem praživalim, uporabo zadostnih doz ozona pa marsikje omejuje tvorjenje bromata kot stranskega produkta. Nasprotno se UV svetloba izkazuje kot zelo učinkovito sredstvo že pri dozah, ki se dosegajo s standardno opremo. UV svetloba se dandanes smatra kot dezinfekcijsko sredstvo s širokim spektrom delovanja proti patogenim vodnim mikroorganizmom (Hijnen, W.A.M., et al., 2006).

Mehanizmi, s katerimi UV svetloba učinkuje na mikroorganizme, so v nasprotju z ostalimi sredstvi dobro poznani in pojasnjeni. Celice (mikro)organizmov sestavljajo relativno zapletene organske molekule – polimeri, ciklične molekule, vsebujejo različne funkcionalne skupine, atome v molekulah povezujejo dvojne ali trojne vezi (nenasičene organske spojine),... Vemo, da UV svetloba reagira s takšnimi organskimi molekulami. S katerimi in v kolikšni meri, je odvisno od stopnje vpijanja UV svetlobe, ki je lastna vsaki snovi.

Fotoni UV svetlobe največ škode povzročijo na dednem materialu celice, na t.i. nukleinskih kislinah. Deoksiribonukleinska kislina (DNK) služi kot podatkovna banka, ki v organizmu določa zgradbo in funkcijo novonastale celice. Običajno je v obliki dvojne vijačnice (spirale). "Hrbtenico", ki nosi ostale molekule in tvori dvojno vijačnico, v molekuli DNK predstavljajo molekule 2-deoksiriboze (ki je v kemijski osnovi sladkor) in fosfatne skupine. Vijačnici med seboj povezujejo baze - nukleotidi adenin (A) in timin (T) ter citozin (C) in gvanin (G). Adenin in gvanin sta heterociklični spojini, ki jih v organski kemiji prištevamo k purinom, citozin in timin, prav tako heterociklični spojini, pa prištevamo k pirimidinom. V nedotaknjeni molekuli DNK se med seboj vežeta le adenin in timin (A–T) ter citozin in gvanin (C–G). Ribonukleinska kislina (RNK) je v celici odgovorna predvsem za presnovne procese (npr. tvorjenje beljakovin). Za razliko od DNK je običajno v obliki enojne vijačnice (spirale), vsebuje sladkor ribozo, namesto timina pa jo sestavlja molekula uracila (U).



Slika 15: Ilustracija RNK in DNK ter strukturne formule nukleotidov
(National human genome research institute, 2009)

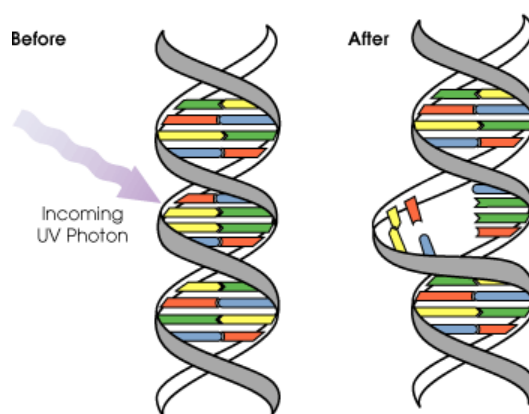
Dezinfekcijski učinek splošno pripišemo valovnim dolžinam med 200 nm in 300 nm. Krajše valovne dolžine vpija voda sama, medtem ko daljše valovne dolžine DNK zelo slabo vpija. Molekula DNK v UV-C spektru lokalno najbolj vpija svetlobo z valovno dolžino med 240 nm in 280 nm z viškom med 250 nm in 260 nm. Pod 230 nm vpijanje sicer izrazito narašča, vendar s padanjem valovne dolžine hkrati narašča tudi vpijanje UV svetlobe v vodi.

Dezinfekcijski učinek UV svetlobe je najbolj odvisen od poškodb DNK mikroorganizma. Pri tem poznamo dve vrsti poškodbe DNK:

4.6.1 NEPOSREDNA POŠKODBA DNK – NASTANEK PIRIMIDINSKIH DIMEROV

Pri reakciji fotonov UV svetlobe in DNK se cepijo A–T vezi med dvema zaporednima molekulama timina na vijačnici in nastanejo t.i. pirimidinski dimeri. Največkrat se med seboj povežeta molekuli timina (T–T). S tem je prizadet genski zapis celice in nadaljnji prepis genetskega materiala, pri čemer se ta škoda običajno ne izraža s smrtjo celice ali organizma, temveč onemogoči uspešno razmnoževanje. Možna je tudi tvorba dimerov med citozinom in timinom (C–T) ter dvema molekulama citozina (C–C), vendar se pojavljajo v bistveno manjšem številu kot T–T dimeri. Zaradi tega dejstva so organizmi, ki v dednem zapisu vsebujejo več timina, bolj občutljivi na UV svetlobo. Bakterije in praživali (*Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*), ki vsebujejo DNK, so zato občutljive na UV svetlobo in je ta učinkovito dezinfekcijsko sredstvo že pri nizkih dozah, večina virusov v vodi pa vsebuje RNK, v kateri timin nadomešča uracil, zato so manj občutljivi na UV svetlobo. Virusi iz družine Adenovirus in Rotavirus vsebujejo posebno dvojno vijačnico RNK in jih prištevamo med najbolj odporne na UV svetlobo (Crittenden, J., et al., 2005).

UV svetloba lahko v celicah povzroči trganje verig DNK, navzkrižno povezovanje molekule DNK same s seboj, povezovanje DNK z beljakovinskimi molekulami ter "stranske produkte" z drugimi molekulami. Našteti mehanizmi se načeloma, v primerjavi s tvorbo pirimidinskih dimerov, pojavljajo manj pogosto in običajno le ob (zelo) visokih UV dozah. Obstaja še več dejavnikov, ki vplivajo na uspešnost dezinfekcije z UV svetlobo. Nekaterih med njimi ne poznamo in/ali jih slabo razumemo.



Slika 16: Ilustracija neposredne poškodbe DNK (NASA, 2008)

4.6.2 POSREDNA POŠKODBA DNK – BIOMOLEKULARNE REAKCIJE

Nastane, ko kromofori (molekule, ki vpijejo fotone) nimajo sposobnosti, da hitro pretvorijo energijo fotona v toploto. Namesto tega preidejo v vzbujeno stanje, ki traja relativno dolgo. Na ta način se poveča verjetnost reakcij z drugimi molekulami, t.i. biomolekularnih reakcij. Slednje potekajo med vzbujenimi kromofori in DNK ali med vzbujenimi kromofori in drugimi molekulami, pri čemer nastajajo prosti radikali in reaktivne kisikove spojine (angl. *reactive oxygen species*) – ROS: superoksidni anion O_2^- , hidroksilni ion OH^- , hidroksilni radikal $\bullet OH, \dots$). ROS povzročajo t.i. oksidativni stres, ki v celicah najpogosteje povzroča (Clauss, M., et al., 2005):

- poškodbe DNK,
- oksidacijo nenasičenih maščobnih kislin, lipidov, aminokislin in beljakovin, ki vodijo v poškodbe celičnih membran, ostalih celičnih sestavin in organelov,
- onesposabljanje encimov z oksidacijo posredno vpletenih snovi.

Vse naštetе spremembe snovi, zaradi katerih le-te ne opravljajo osnovne funkcije, za celico pomenijo težave pri opravljanju življenjskih funkcij – predvsem presnove in razmnoževanja. Na ta način se torej posredno poveča dezinfekcijski učinek.

4.7 MEHANIZMI ZA OBNOVO DNK

Zaradi naravnih škodljivih vplivov na (mikro)organizme, med njimi tudi škodljivega vpliva sončnega obsevanja, ki vsebuje znaten delež UV svetlobe, so organizmi skozi tisočletja evolucije razvili mehanizme v obliki encimov, ki so sposobni odpraviti povzročeno škodo tako, da obnovijo poškodovane dele dednega zapisa. Na ta način je (mikro)organizmom oz. celicam omogočeno nadaljnje življenje, rast in razmnoževanje. Pri uporabi UV svetlobe kot dezinfekcijskega sredstva se moramo torej zavedati, da obstaja več načinov, s katerimi celice lahko obnovijo DNK. Osnovna dva mehanizma, ki odpravljata okvare na DNK, povzročene z UV svetlobo sta:

- obnova na svetlem oz. fotoreaktivacija in
- obnova v temi ali angl. *dark repair*.

Fotoreaktivacija, kot pove že ime samo, poteka le ob daljši, nekajurni prisotnosti svetlobe z valovno dolžino med 310 nm in 480 nm, kar ustreza spektru UV-A svetlobe in modro-vijoličnem delu vidne svetlobe, ki prispevata potrebno energijo ter ob prisotnosti encima DNK fotoliazze (deoksiribodipirimidin fotoliazze). Ta se v temi "prilepi" na T–T dimer. Ko na celico posije ustrezna svetloba, v celici prisotna folna kislina (ki je potrebna součinkovina) vpije fotone in njihovo energijo porabi za razcepitev vezi v T–T dimeru. Fotoliazza nato "odpade" z DNK, obe molekuli T pa se nato pravilno povežeta z molekulama A na drugi vijačnici. Sposobnost fotoreaktivacije se razlikuje med posameznimi vrstami (mikro)organizmov in celo med istimi vrstami (mikro)organizmov v različnem okolju, zato jo je v dejanskih primerih potrebno preveriti.

Raziskavi (Oguma, K., et al, 2004) ter (Hijnen, W.A.M., et al, 2006) sta pokazali, da je fotoreaktivacija možna v primerih bakterij *Escherichia coli*, *Legionella pneumophila*, *Yersinia enterocolitica*, *Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae* in drugih ter v primerih praživali *Cryptosporidium parvum*, *Giardia muris* in *Giardia lamblia*.

Virusi naj se ne bi bili sposobni fotoreaktivirati in obnoviti v temi, vendar v nekaterih primerih ti mikroorganizmi izkoristijo prisotnost encimov v celici, ki so jo okužili ter na ta način popravijo svoj dedni material. Dodajmo, da so bile raziskave večinoma opravljene v laboratorijskih pogojih in bi jih bilo potrebno ovrednotiti na primerih delujočih sistemov v polnem merilu.

Obnova v temi poteka le ob prisotnosti encimov, dodatna svetloba za ta proces ni potrebna. Izkazuje se npr. pri skoraj vseh vrstah bakterij. V angleščini je poimenovana NER oz. *nucleotide excision repair*. To poimenovanje na načelni ravni opisuje, kaj se pri tem dogaja. Encimi poškodovani del DNK verige "izrežejo" in "pokrpajo". Čeprav je npr. narobe povezan samo en pirimidinski bazni par, encimi odstranijo več sosednjih nukleotidov. Drugi encimi poskrbijo, da "praznino" pravilno "zapolnijo". Na ta način "popravljen" celica se je zopet sposobna uspešno razmnoževati. Obnova v temi praviloma poteka počasneje, zanjo je potrebnih nekaj dni in se uspešno zaključi v veliko manj primerih kot fotoreaktivacija (Hijnen, W.A.M, et al, 2006).

Ob mehanizma obnove dednega materiala sta izrazitejša, ko so bili opazovani mikroorganizmi obsevani z relativno majhnimi UV dozami, to je npr. 5–25 mJ/cm² v primeru praživali *Giardia lamblia*. Strategijo dezinfekcije z UV svetlobo je, upoštevajoč možne vplive, potrebno zasnovati tako, da z dovolj visoko dozo UV svetlobe povzročimo dovolj škode na nukleinskih kislinah, da jih zgoraj naštetih mehanizmi niso sposobni učinkovito odpraviti.

4.8 STRANSKI PRODUKTI DEZINFEKCIJE

Poleg zaželenih učinkov na MO, dezinfekcijska sredstva reagirajo s snovmi v vodi. To so običajno reakcije oksidacije, ki imajo lahko več izidov. Oksidirana snov lahko izboljša nek fizikalno-kemijski parameter (npr. razbarvanje zaradi oksidacije organskih snovi, ki povzročajo barvo), ali pa tvori nezaželene stranske produkte dezinfekcije (angl. *disinfection byproducts* ali *DBP*). Slednji so zaradi svojih lastnosti lahko nevarni za zdravje ljudi in vodnih (mikro)organizmov. Stranski produkti dezinfekcije izkazujejo eno ali več naštetih lastnosti:

- so karcinogeni – povzročajo nepopravljive spremembe v tkivih, ki na ta način ne opravljajo svoje osnovne funkcije (rak),
- so mutageni – povzročajo nepravilno podvajanje dednega materiala,
- so motilci endokrinega sistema – posledica je nepravilno delovanje žlez z notranjim izločanjem in hormonsko neravnovesje,
- povzročajo nepravilno delovanje živčnega sistema,
- imajo lastnosti strupov ter povzročajo še mnoge druge škodljive učinke.

Toliko bolj je škodljivost izražena, če se v enem vzorcu sočasno pojavi več vrst takšnih snovi. V tem primeru, ki ga poznamo tudi pod imenom "koktajl efekt" (iz angl. *cocktail effect*), se škodljivi učinki takšne mešanice večkrat pomnožijo v primerjavi s škodljivimi učinki posameznih snovi. Dezinfekcijska sredstva običajno tvorijo nevarne stranske produkte s točno določenimi v vodi prisotnimi snovmi, ki jim pravimo znanilci stranskih produktov (angl. *disinfection byproduct precursors* oz. *DBP*). To so povečini organske snovi, tako naravnega (NOM) kot umetnega izvora, ki jih izražamo kot skupni organski ogljik (angl. *total organic carbon* ali *TOC*). Visoke vsebnosti organskega ogljika v vzorcu vode posredno omejujejo uporabo določenih dezinfekcijskih sredstev, če le-ta z njimi tvorijo nevarne stranske produkte. Ustrezni ukrepi zaščite vode (zakonodajni in tehnični), ki znanilcem preprečujejo vstop v vodna telesa, izbira optimalne tehnologije čiščenja in dezinfekcijskega sredstva, lahko bistveno zmanjšajo (tveganje za) nastanek takšnih snovi.

Stranske produkte dezinfekcije lahko razdelimo na (EPA, 1999):

- anorganske (kloratni, kloritni, bromatni, iodatni ioni, vodikov peroksid, amonijak,...),
- oksidirane organske (aldehidi, karboksilne kisline, razgradljivi organski ogljikovodiki,...) in
- halogenirane organske (trihalometani, halogenirane očetne kisline, halogenirani ketoni, klorirani fenoli,...).

Večina virov ne navaja stranskih produktov dezinfekcije z UV svetlobo pri običajnih dozah (do 100 mJ/cm^2). Nekatere raziskave kažejo, da je ob nenavadno visokih dozah ($> 500 \text{ mJ/cm}^2$) možen pojav aldehydov in karboksilnih kislin. Bistveno je, da za razliko od klora, UV svetloba ne tvori trihalometanov (THM), kloriranih (halogeniranih) očetnih kislin (HAA), halogeniranih aldehydov ter halogeniranih ketonov, ki so dokazano nevarni za zdravje ljudi in vodnih (mikro)organizmov. Raziskave kažejo, da visoke doze UV svetlobe ($> 1000 \text{ mJ/cm}^2$) celo zmanjšujejo raven THM in HAA ob naknadni dezinfekciji s klorom, verjetno zaradi fotolitskih učinkov in posledično zmanjševanja koncentracije znanilcev stranskih produktov (Liu, W., et al., 2002).

Na podlagi razpoložljivih virov lahko zaključimo, da UV svetloba kot dezinfekcijsko sredstvo, v običajnih, fizikalno-kemijsko nizko obremenjenih vodah, ne tvori nevarnih stranskih produktov. Ti se načeloma ne tvorijo zato, ker UV svetloba ne reagira s snovmi v vodi s klasičnimi kemijskimi reakcijami (reaktanti \rightarrow produkti), kjer iz izhodnih snovi nastajajo nove snovi. Vemo pa, da ima UV svetloba dovolj energije za proženje fotolitskih procesov, kar se kaže kot cepljenje vezi in tvorjenje radikalov pri nekaterih organskih molekulah. V redkih primerih vode z visoko vsebnostjo raztopljenega organskega ogljika (TOC $> 20 \text{ mg/L}$), predvsem huminskih snovi, tvorijo z UV svetlobo nizke koncentracije formaldehida ($1\text{-}2 \text{ }\mu\text{g/L}$). Kljub temu raziskave kažejo, da uporaba UV svetlobe ne prispeva k vsebnosti škodljivih, nevarnih ali strupenih stranskih produktov dezinfekcije. Prav tako so raziskave pokazale, da predhodna uporaba UV svetlobe nima pomembnih učinkov na tvorjenje stranskih produktov sekundarne (naknadne) dezinfekcije s klorom ali kloramini (EPA, 1999).

4.9 VPLIVI DEZINFEKCIJE NA STRUPENOST VODE

Strupenost običajno testiramo na laboratorijskih MO in jo izražamo kot srednjo smrtno dozo LD_{50} , pri kateri je 50 % verjetnost, da testni organizem odmre ali postane neaktiven. LD_{50} običajno podajamo za neko vrsto organizma in v mg strupene snovi na kg telesne teže, lahko tudi drugače.

Teste strupenosti običajno izvajamo predvsem na vzorcih odpadne vode, predvsem zaradi potencialne nevarnosti za vodna telesa in vodne (mikro)organizme. V pitnih vodah so strupene snovi prisotne v majhnih koncentracijah, vendar je potrebno upoštevati, da se poškodbe dednega materiala celic zaradi delovanja strupenih snovi kopičijo in po določenem času izzovejo različna obolenja. Raziskave strupenosti pitnih voda bi zato veljalo opravljati na različnih vrstah celic, predvsem človeških. Primerne metode testiranja strupenosti bi bilo smiselno vključiti v redni monitoring pitnih voda v Sloveniji, kar sedaj ni praksa (Marinšek Logar, R., et al., 2006).

V splošnem velja, da vzorec vode, ki ni izkazoval strupenosti pred dezinfekcijo, tudi po dezinfekciji ni strupen. Vsa dezinfekcijska sredstva načeloma imajo vpliv na obstoječo strupenost vode, povečini se le-ta poveča. Najbolj so razlike opazne pri uporabi sredstev na osnovi klora, manj pri uporabi ozona in najmanj ob uporabi UV svetlobe. Pri tem velja, da je vpliv na strupenost pogojen izrazito lokalno in časovno. V primerjavi s kemičnimi dezinfekcijskimi sredstvi, UV svetloba izkazuje bistveno nižje vplive na strupenost vode (Blatchley, E. R., et al., 1997). To gre verjetno pripisati dejstvu, da UV svetloba tvori bistveno manj ali celo nič stranskih produktov v primerjavi s kemičnimi oksidanti.

Strupenost komunalne odpadne vode po dezinfekciji z UV svetlobo je odvisna od kemijske sestave vode, ki se lahko razlikuje glede na letne čase (v poletni sezoni so npr. odpadne vode običajno organsko bolj obremenjene), predvsem pa od vrste in količine organskih snovi ter UV doze (pri višjih UV dozah je vpliv na strupenost večji). Testi strupenosti večinoma kažejo, da ima UV svetloba malo učinkov na strupenost vode ali zaradi fotolitskih učinkov iz nje celo odstrani nekatere toksične snovi. Vendar je kljub temu možno, predvsem ob prisotnosti povišanih koncentracij organskih snovi, še posebej, če so umetnega izvora, da strupenost vode po UV dezinfekciji naraste (Monarca, S., et al., 2000). Ker je vplivov na omenjene spremenljivke ogromno in so mnoge (predvsem sestava odpadne vode) lokalno pogojene, splošne trditve o vplivu UV svetlobe na strupenost vzorca ne moremo podati in jo je, če obstaja zahteva, potrebno določiti na vsakem primeru posebej.

4.10 PRIMERJAVA KEMIČNIH OKSIDACIJSKIH SREDSTEV IN UV SVETLOBE

Primerjavo različnih najpogosteje uporabljenih dezinfekcijskih sredstev za boljšo preglednost strnjeno podajamo v obliki Preglednice 5. Pri primerjavi se naslanjamo predvsem na izsledke in primerjave, objavljene v znanstvenih člankih in priročnikih (npr. EPA). Ugotovitve se nanašajo na splošne lastnosti sredstev pri normalnih pogojih obratovanja in pri običajnih dozah. V Preglednici 6 na primeru različnih ciljnih mikroorganizmov podajamo, katera dezinfekcijska sredstva so primerna za njihovo onesposabljanje (pri tem primernosti ne izražamo z vrstnim redom naštevanja). V Preglednici 7 primerjamo učinkovitost različnih dezinfekcijskih sredstev na izbrane patogene mikroorganizme.

Preglednica 4: Primerjava lastnosti različnih dezinfekcijskih sredstev

	Dezinfekcijsko sredstvo				
	Prosti klor	Vezani klor (kloramini)	Kloridioksid	Ozon	UV svetloba
Onesposabljanje					
Bakterij	Odlično	Dobro	Odlično	Odlično	Dobro
Virusov	Odlično	Zadovoljivo	Odlično	Odlično	Zadovoljivo
Praživali	Večinoma slabo	Slabo	Dobro	Dobro	Odlično
Endospor	Deloma	Slabo	Zadovoljivo	Odlično	Zadovoljivo
Primarno dezinfekcijsko sredstvo	Najbolj pogosto	Občasno	Občasno	Občasno	V naraščanju
Trajni rezidualni učinek	Da	Da	Zmeren	Ne	Ne
Stranski produkti:					
THM, HAA, halogenirane organske snovi	Da	V sledovih	Ne	Ne	Ne
Oksidirane organske snovi	Da	Da (<i>N</i> -nitrosodimetilamin)	Da	Da	Možno
Biorazgradljivi organski ogljik	Možno	Ne	Možno	Da	Ne
Oksidirane anorganske snovi	Da	Da (cianogeni halogenidi)	Da (klorit, klorat,...)	Da (bromat,...)	Ne
Vpliv delcev in motnosti	Nizek	Nizek	Nizek	Srednji	Visok
Vpliv pH vrednosti	Da	Srednji	Nizek	Nizek	Ne
Način doziranja sredstva	Proporcionalno doziranje v cevovod, izboljšano mešanje	Proporcionalno doziranje v cevovod, izboljšano mešanje	Proporcionalno doziranje v cevovod, izboljšano mešanje	Posebno zasnovane kontaktne komore, cevni injektorji	Kanal (tok s prosto gladino) ali zaprt reaktor (tok pod tlakom)
Tveganje za nevarnosti pri upravljanju	Nizko (hipoklorit) – visoko (plinski klor)	Srednje	Visoko	Srednje	Nizko
Zahtevnost obratovanja in vzdrževanja	Nizka	Srednja	Visoka	Visoka	Srednja

Preglednica 5: Primerna dezinfekcijska sredstva za izbrane ciljne mikroorganizme

Ciljni mikroorganizem	Primerno dezinfekcijsko sredstvo
Koliformne bakterije	Klor Kloramini Klordioksid Ozon UV svetloba
Ciste <i>Giardia</i>	Klor Klordioksid Ozon UV svetloba
Virusi	Klor Klordioksid Ozon
Oociste <i>Cryptosporidium</i>	Klordioksid Ozon UV svetloba

Preglednica 6: Učinkovitost posameznih sredstev pri onesposabljanju izbranih ciljnih mikroorganizmov

Sredstvo	Učinkovitost onesposabljanja MO			
	<i>Escherichia coli</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Virusi
Klor	Zelo učinkovito	Zmerno učinkovito	Neučinkovito	Zelo učinkovito
Klordioksid	Zelo učinkovito	Zmerno učinkovito	Zmerno učinkovito	Zelo učinkovito
Kloramini	Zelo učinkovito	Zmerno učinkovito	Neučinkovito	Zmerno učinkovito
Ozon	Zelo učinkovito	Zelo učinkovito	Zelo učinkovito	Zelo učinkovito
UV svetloba	Zelo učinkovito	Zelo učinkovito	Zelo učinkovito	Zmerno učinkovito

5. UČINKOVITOST DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO

5.1 VREDNOTENJE UČINKOVITOSTI DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO

Poleg vprašanja, ali je neko dezinfekcijsko sredstvo učinkovito proti ciljnim mikroorganizmom, je pomembno odgovoriti tudi na vprašanje, koliko tega sredstva je potrebnega za doseganje zelenih učinkov. Na voljo je kar nekaj raziskav in literature na temo, kakšne doze UV svetlobe so potrebne za doseganje zelene stopnje dezinfekcije posameznih mikroorganizmov. Opozoriti je potrebno, da je v primeru uporabe UV svetlobe dezinfekcijski mehanizem drugačen kot v primeru uporabe kemičnih oksidacijskih sredstev. Prav zato za ovrednotenje teh učinkov ne moremo uporabljati enakih metod. Na podlagi razpoložljive literature lahko sklepamo, da je nekje do leta 1998 veljalo prepričanje, da UV svetloba ni učinkovita proti praživalim.

Razlog za takšno mnenje je bil, da so se za vrednotenje uporabljale t.i. *in vitro* analize, to so analize v laboratorijskih epruveh. V tem primeru gre za primerjavo med številom živih MO pred izpostavljanjem dezinfekcijskemu sredstvu in potem. UV svetloba MO ne "ubije", kot to počno kemični oksidanti, zato štetje "preživelih" MO v epruveli ne pokaže dejanskih dezinfekcijskih učinkov UV svetlobe oz. jo pretirano podceni. Boljša metoda za določanje dezinfekcijskih učinkov UV svetlobe je t.i. *in vivo*. Pri njej se dezinfekcijski učinek preverja tako, da se z dezinficirano vodo okuži testne laboratorijske mikroorganizme, npr. miške. Število testnih organizmov, pri katerih se izrazi okužba, je zato merodajen rezultat za določevanje dezinfekcijskega učinka UV svetlobe. Novejše raziskave so tako pokazale, da so praživali občutljive že na relativno zelo majhne doze UV svetlobe (Craik, S.A, et al, 2001; Finch, G.R., Belosevic, M., 2002; Hijnen W.A.M., et al, 2006).

Dezinfekcijski učinek UV svetlobe je bil v različnih raziskavah podvržen različnim pogojem izvajanja poizkusa. Večina raziskav na tem področju se je izvajala v dobro nadzorovanih laboratorijskih pogojih, bodisi z laboratorijskimi testnimi MO ali MO iz dejanskega vodnega okolja. Za namene raziskav se lahko uporabljajo dejanski UV reaktorji s stalnim tokom ali prilagojene laboratorijske naprave. Celokupne obsevanosti z UV svetlobo v nekem reaktorju ni mogoče neposredno meriti, saj meritve z UV senzorji dajejo točkovne vrednosti, lahko jo le čim bolj natančno opišemo z matematičnim modelom.

Zato se za raziskave uporablja t.i. aparat z usmerjenim snopom svetlobe ali angl. *collimated beam apparatus* – CBA (prikazan na Sliki 17), pri katerem je obsevanost mogoče natančno meriti. S to napravo se obseva testne mikroorganizme v petrijevki oz. epruveti natančno toliko dolgo, da se doseže želena doza. Poizkusi, izvedeni v polnem merilu, so manj pogosti in splošno izkazujejo manjšo učinkovitost kot laboratorijski poizkusi. To gre pripisati tako dejavnikom, ki se nanašajo na MO, kot nepopolnostim pri modeliranju (izračunu) doze v dejanskih UV reaktorjih.

Merodajno in primerljivo dozo za onesposabljanje ciljnega MO določamo s postopkom biodozimetrije. Ta se izvaja tako, da učinkovitost UV reaktorja preverjamo na primeru izbranega MO, katerega kinetiko dezinfekcije, to je občutljivost MO na različne doze UV svetlobe, vnaprej preverimo s CB aparatom. Na ta način ovrednoten MO (biodozimeter) nato izpostavimo dejanskim pogojem UV reaktorja v polnem merilu. Kinetika dezinfekcije v polnem merilu se nato primerja s kinetiko v laboratorijskem merilu. Nato se določijo medsebojna razmerja. Na podlagi takšnih biodozimetričnih testov se nato UV reaktorjem lahko pripiše merodajna ali primerljiva dezinfekcijska učinkovitost na nek MO.



Slika 17: CB aparat za izvedbo biodozimetričnih poizkusov (ITT WEDECO, 2008)

5.2 OBČUTLJIVOST RAZLIČNIH MIKROORGANIZMOV NA UV SVETLOBO

Občutljivost nekega MO na UV svetlobo v matematičnem smislu opisujemo s konstanto reakcije K [cm^2/mJ]. Kinetični model, ki ga opisuje Enačba 14, predpostavlja enačbo prvega reda. To pomeni, da je razmerje med logaritemsko stopnjo dezinfekcije in UV dozo linearno:

$$\log\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -K \cdot E_0 \cdot t \quad (14)$$

S takšno obliko matematičnega zapisa zadovoljivo dobro opišemo odziv MO na širok razpon UV doz. Težje opišemo odziv nekaterih MO na nizke ali visoke UV doze. Pri nizkih UV dozah pri nekaterih vrstah bakterij ali bakterijskih spor (*Bacillus spp.*) ter praživali *Acanthamoeba spp.* praktično ni odziva, medtem ko se pri naraščanju doze od neke vrednosti naprej vzpostavi običajna oblika krivulje reakcije prvega reda. Drugo možno odstopanje od modela je v primeru, ko od neke točke naprej povečevanje UV doze ne izboljšuje več dezinfekcijskega učinka. Raziskave kažejo, da se Poliovirusi, Rotavirusi, *E. coli*, *C. parvum* in *G. muris* obnašajo na ta način. Običajno lahko ta pojav opazujemo, ko smo že odstranili 99 % (2 log) začetnega števila MO ter v večji meri pri MO, ki so bolj občutljivi na UV svetlobo. Možnih hipotez za pojasnitev tega dejstva je več, od vplivov izvedbe eksperimentov, hidravličnih pogojev, združevanja MO v agregate, ki ščitijo posameznike v notranjosti, obstoj manjšine bolj odpornih MO v populaciji ipd., vendar nobene ni mogoče z gotovostjo potrditi.

V nadaljevanju podajamo rezultate statistične analize, ki so jo opravili (Hijnen, W.A.M., Beerdonk, E.F, Medema, G.J., 2006). Za posamezne vrste MO so podane konstante reakcije K za izračun kinetike dezinfekcijskih reakcij po Enačbi 14. Dodanimi so 95 % intervali zaupanja $1-\alpha$ in determinacijski koeficient r^2 . Podane so tudi največje dosežene stopnje onesposabljanja SD_{maks} (v logaritemskih stopnjah) posameznega MO in vrsta uporabljenega svetila.

Mikroorganizmi, ki so zelo občutljivi na UV svetlobo, imajo visok K in potrebujejo relativno manjše doze za doseganje zelenega učinka. Interval zaupanja, ki ga določata njegova spodnja in njegova zgornja meja, je interval, v katerem se z dano gotovostjo nahaja ocenjevani parameter. Drugače povedano, s stopnjo tveganja α se parameter nahaja znotraj intervala. Determinacijski koeficient je kvadrat korelacijskega koeficienta in pove, kolikšen del spremembe ene spremenljivke lahko pojasnimo s spreminjanjem druge.

Ker so bile raziskave opravljene v različnih pogojih, so avtorji opozorili na potrebne popravke pridobljenih podatkov, saj moramo za njihovo merodajnost upoštevati vsaj:

- vplive, ki se nanašajo na mikroorganizme: fiziološko stanje (življenjski, razvojni stadij), raznolikost med genetskimi (pod)tipi, mehanizmi za popravilo genetskih okvar, združevanje v agregate,...
- vplive, ki se nanašajo na UV dozo: porazdelitev obsevanosti znotraj reaktorja, hidravlični pogoji znotraj reaktorja (zadrževalni čas), vpijanje, odboj in lomljenje svetlobe v vodi, spreminjanje intenzitete sevanja UV svetil (staranje in obloge),...
- vplive, ki se nanašajo na uporabo različnih UV svetil: nekatere vrste MO izkazujejo večjo občutljivost na svetlobo nizkotlačnih, monokromatskih (NT) ali srednjetlačnih, polikromatskih (ST) UV svetil.

5.2.1 VIRUSI IN BAKTERIOFAGI

Adenovirus 40 je na UV svetlobo najbolj odporen znan patogen mikroorganizem. Virusi so v splošnem tisti mikroorganizmi, ki so najbolj odporni proti UV svetlobi. Vzrok je dejstvo, da večina dezinfekcijskega učinka UV svetlobe deluje na nukleotid timin v DNK, dedni material velikega deleža virusov pa sestavlja RNK, v kateri timin zamenjuje nukleotid uracil. Zato je potrebna relativno zelo visoka doza UV svetlobe pri 254 nm za doseganje zaželenih učinkov. Tisti virusi, ki vsebujejo DNK, so po drugi strani bistveno bolj občutljivi na UV svetlobo, npr. virusi Hepatitis. Pri uporabi srednjetačnih UV svetil je opazno, da so učinki nekoliko boljši zaradi bolj širokega spektra delovanja UV svetlobe med 200 nm in 300 nm na bistvene sestavine. Rezultati raziskav podajamo v Preglednici 7 in Preglednici 8.

Preglednica 7: Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju virusov, določeni s CB aparatom (Hijnen, W.A.M., et al., 2006)

virus	UV doza [mJ/cm ²]	vrsta UV svetila	K [cm ² /mJ] (± α = 5 %; r ²)	SD _{maks}
Poliovirus tip 1	5–50	NT	0,135 (0,007; 0,79)	5,4
Adenovirus ST2,15, 40, 41	8–306	NT	0,024 (0,001; 0,87)	6,4
Adenovirus ST40	8–184	NT	0,018 (0,004; 0,88)	3,0
Adenovirus ST2, 41	30–90	ST	0,040 (0,003; 0,77)	4,3
Rotavirus SA-11	5–50	NT	0,102 (0,006; 0,78)	4,1
Rotavirus SA-11	5–20	ST	0,154 (0,011; 0,92)	4,6
Calicivirus feline, canine	4–49	NT	0,106 (0,010; 0,67)	5,5
Calicivirus bovine	4–33	NT	0,190 (0,008; 0,96)	5,7
Calicivirus bovine	2–15	ST	0,293 (0,010; 0,97)	5,9
Hepatitis A	5–28	NT	0,181 (0,028; 0,70)	5,4
Coxsackie virus B5	5–40	NT	0,119 (0,006; 0,97)	4,8

Preglednica 8: Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju bakteriofagov, določeni s CB aparatom (Hijnen, W.A.M., et al., 2006)

bakteriofag	UV doza [mJ/cm ²]	vrsta UV svetila	K [cm ² /mJ] (± α = 5 %; r ²)	SD _{maks}
MS2	5–139	NT	0,055 (0,002; 0,93)	4,9
MS2	12–46	ST	0,122 (0,009; 0,92)	5,3
φX174	2–12	NT	0,396 (0,025; 0,85)	4,0
PRD1	9–35	NT	0,128 (0,014; 0,98)	3,8
B40-8	1–39	NT	0,140 (0,010; 0,96)	5,6
T7	5–20	NT	0,232 (0,080; 0,90)	4,6
Qβ	10–50	NT	0,084 (0,003; 0,99)	4,2

5.2.2 BAKTERIJE IN BAKTERIJSKE SPORE

Bakterije in bakterijske spore so veliko bolj občutljive na UV svetlobo kot virusi. Za doseganje enake stopnje dezinfekcije so potrebne bistveno nižje doze, prav tako so dosežene višje vrednosti največje stopnje dezinfekcije. Rezultati raziskav za različne vrste bakterij in bakterijskih spor so podani v Preglednici 9.

Preglednica 9: Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju bakterij in bakterijskih spor, določeni s CB aparatom (Hijnen, W.A.M., et al., 2006)

bakterija	UV doza [mJ/cm ²]	vrsta UV svetila	K [cm ² /mJ] ($\pm \alpha = 5\%$; r^2)	SD _{maks}
<i>Salmonella typhi</i>	2–10	NT	0,515 (0,047; 0,83)	5,6
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,5–6	NT	0,880 (0,124; 0,65)	5,3
<i>Yersenia enterocolitica</i>	0,6–5	NT	0,889 (0,060; 0,87)	5,0
<i>Shigella dysenteriae</i>	1–5	NT	1,308 (0,087; 0,95)	5,9
<i>Shigella sonnei</i>	3–8	NT	0,468 (0,053; 0,89)	4,7
<i>Vibrio cholerae</i>	0,6–4	NT	1,341 (0,113; 0,94)	5,8
<i>Legionella pneumophila</i>	1–12	NT	0,400 (0,040; 0,92)	4,4
<i>Legionella pneumophila</i>	0,5–3	NT	1,079 (0,077; 0,99)	3,0
<i>Escherichia coli O157</i>	1–7	NT	0,642 (0,082; 0,85)	5,5
<i>Escherichia coli</i>	1–15	NT	0,506 (0,049; 0,71)	6,0
<i>Escherichia coli</i>	1,5–9	ST	0,539 (0,070; 0,64)	5,2
<i>Streptococcus faecalis</i>	2,5–16	NT	0,312 (0,032; 0,85)	4,6
<i>Bacillus subtilis</i>	5–78 ^{a)}	NT	0,059 (0,007; 0,91)	4,0
<i>Clostridium perfringens</i>	48–64 ^{b)}	ST	0,060 (0,027; 0,81)	3,0

^{a)} Mejna vrednost, ko je regresijska krivulja > 0 , znaša 12,3 mJ/cm².

^{b)} Mejna vrednost, ko je regresijska krivulja > 0 , znaša 18 mJ/cm².

5.2.3 PRAŽIVALI

Praživali so do konca 90. let prejšnjega stoletja veljale za zelo odporne proti UV svetlobi. Takratne raziskave so pokazale, kasnejše pa potrdile, da so praživali nanjo bolj občutljive kot virusi, a manj občutljive kot bakterije. Analiza raziskav je pokazala, da kinetiko onesposabljanja najbolj pomembnih praživali, *Cryptosporidium parvum* in *Giardia* spp., težko opišemo z modelom, ki vsebuje parametre reakcije prvega reda oziroma je ujemanje dobro le v zelo ozkem območju UV doz. Ugotovljeno je bilo tudi, da je odpornosti teh dveh praživali UV svetlobo nizko- in srednjetačnih UV svetil enakega reda velikosti. Hijnen et al. (2006) so zato za opis kinetike reakcij predlagali naslednje izraze:

za *Cryptosporidium parvum*:

$$SD = \log\left(\frac{N_t}{N}\right) = 1,2344 \cdot \ln D - 0,1283, \quad (15)$$

kjer D predstavlja UV dozo in determinacijski koeficient znaša $r^2 = 0,99$. Največja stopnja dezinfekcije SD_{maks} znaša 3 log stopnje.

za *Giardia lamblia*:

$$SD = \log\left(\frac{N_t}{N}\right) = 1,2085 \cdot \ln D + 0,0715, \quad (16)$$

pri čemer je $r^2 = 0,99$ in SD_{maks} znaša 3 log stopnje.

Praživali *Acanthamoeba* spp. so na UV svetlobo najodpornejše praživali, primerljive z Adenovirusi. Njihovo kinetiko lahko z zadovoljivo natančnostjo opišemo s parametri reakcije prvega reda.

Preglednica 10: Parametri kinetičnih modelov pri onesposabljanju praživali *Acanthamoeba* spp., določeni s CB aparatom (Hijnen, W.A.M., et al., 2006)

pražival	UV doza [mJ/cm ²]	vrsta UV svetila	K [cm ² /mJ] ($\pm \alpha = 5\%$; r^2)	SD_{maks}
<i>Acanthamoeba</i> spp.	43–172	NT	0,0251 (0,004; 0,94)	4,5

5.2.4 DOZE UV SVETLOBE IN STOPNJA DEZINFEKCIJE

Raziskava (Hijnen, W.A.M., et al., 2006) je za viruse, bakterije, bakterijske spore in (oo)ciste prazivali podala UV doze, ki so potrebne za doseganje določene stopnje dezinfekcije z uporabo nizkotlačnih, monokromatskih (NT) UV svetil. Rezultate predstavljamo v Preglednici 11. Rezultati so pridobljeni s pomočjo analiz predhodno opravljenih raziskav, pri čemer so se različni pogoji izvedbe le-teh upoštevali s korekcijskimi faktorji.

Preglednica 11: Doze UV svetlobe za doseganje različnih stopenj dezinfekcije
(Hijnen, W.A.M., et al., 2006)

SD [log]	UV doza [mJ/cm ²]			
	1	2	3	4
<i>Bacillus subtilis</i> ^{a)}	56	111	167	222
Adenovirus tip 40	56	111	167	b)
<i>Clostridium perfringens</i> ^{a)}	45	95	145	b)
Adenovirus tip 2, 15, 40, 41	42	83	125	167
<i>Acanthamoeba</i> ^{c)}	40	71	119	167
Adenovirus ^{a)} (razen tip 40)	25	50	b)	b)
Calicivirus canine	10	21	31	41
Rotavirus SA-11	10	20	29	39
Coxsackie virus B5	8	17	25	34
<i>Streptococcus faecalis</i> ^{a)}	9	16	23	30
<i>Legionella pneumophila</i> ^{d)}	8	15	23	30
Poliovirus tip 1	7	15	22	30
<i>Shigella sonnei</i> ^{d)}	6	13	19	26
<i>Salmonella typhi</i> ^{a)}	6	12	17	51
Hepatitis A	6	11	17	22
Calicivirus bovine	5	11	16	21
<i>Escherichia coli</i> O157 ^{d)}	5	9	14	19
<i>Escherichia coli</i> ^{a)}	5	9	14	18
<i>Cryptosporidium</i> ^{c)}	3	6	12	e)
<i>Giardia</i> ^{c)}	2	5	11	e)
<i>Campylobacter jejuni</i> ^{d)}	3	7	10	14
<i>Yersinia enterocolitica</i> ^{d)}	3	7	10	13
<i>Shigella dysenteriae</i> ^{d)}	3	5	8	11
<i>Vibrio cholerae</i> ^{d)}	2	4	7	9

a) v naravnem vodnem okolju živeča vrsta

b) najvišja možna stopnja dezinfekcije $SD_{maks} < 4 \log$

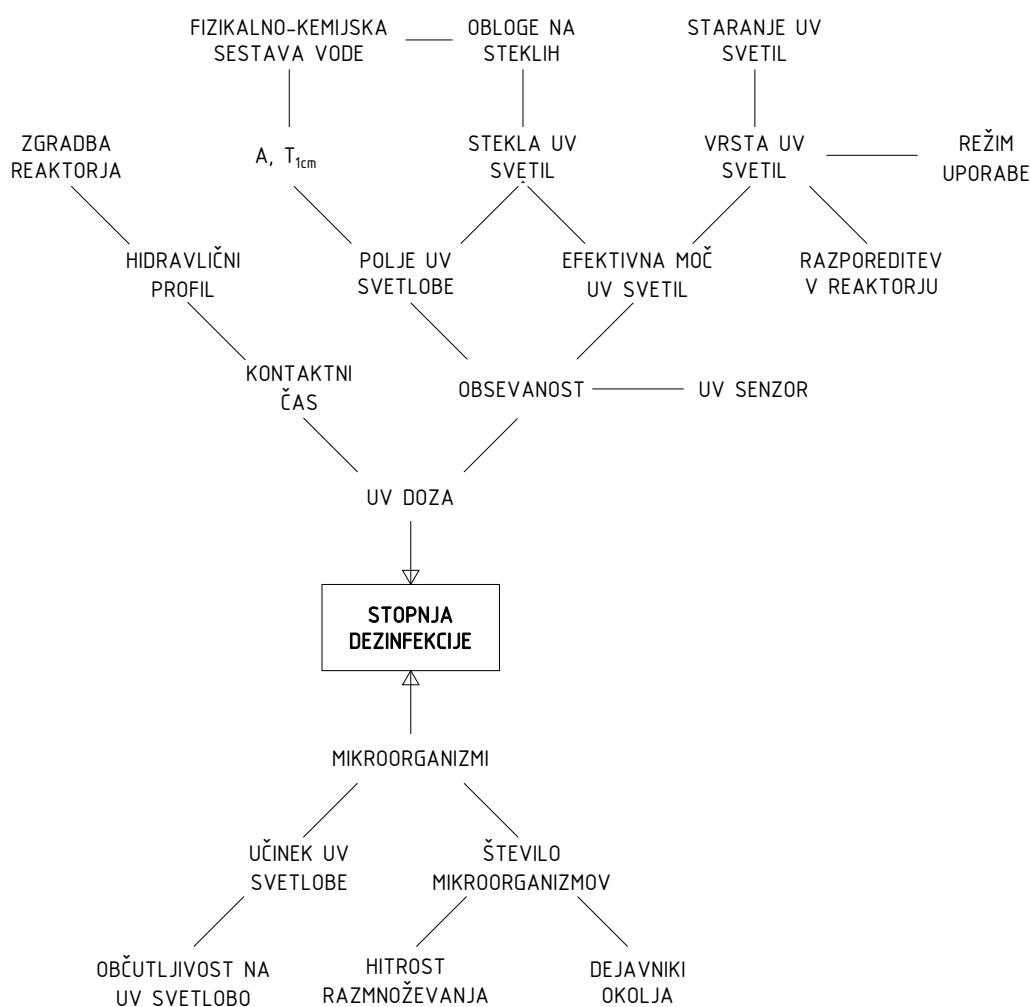
c) ni raziskav na mikroorganizmih iz naravnega vodnega okolja

d) opravljena korekcija na vrste, živeče v naravnem vodnem okolju

e) povečevanje UV doze nima učinka na stopnjo dezinfekcije

Predstavljena analiza je pokazala, da še vedno obstajajo neodgovorjena vprašanja in neraziskane podrobnosti. Za boljšo oceno vplivov posameznih spremenljivk na rezultate bi bilo potrebnih še več raziskav in merodajnih podatkov. Vzoredni biodozimetrični poizkusi so zato še vedno potrebni za preverjanje dejanskih rezultatov sistemov v polnem merilu.

Na uspešnost dezinfekcije z UV svetlobo poleg dejavnikov, povezanih z lastnostmi vode in mikroorganizmi, vpliva tudi kopica povsem tehničnih lastnosti sistema za dezinfekcijo. Obravnavamo jih v naslednjih poglavjih. Ponazoritev prepletenosti posameznih dejavnikov na uspešnost dezinfekcije podajamo v obliki miselnega vzorca (Slika 18).



Slika 18: Pregled glavnih dejavnikov na uspešnost dezinfekcije z UV svetlobo

6. POSPEŠENA OKSIDACIJA

6.1 OKSIDACIJA PRI PRIPRAVI VODE

Nekateri vodni viri so zaradi snovi, ki jih vsebujejo, neprimerni za neposredno uporabo tudi, če je voda obdelana s klasičnimi fizikalno-kemijskimi postopki čiščenja. S tega vidika so predvsem problematične v vodi prisotne umetne organske snovi pa tudi naravne organske snovi (NOM), če lahko reagirajo s snovmi, ki jih uporabljamo v postopkih priprave vode.

Reakcije oksidacije in redukcije, t.i. redoks reakcije, v tehnologiji vode izkoriščamo za "obdelavo" določenih organskih in anorganskih snovi, ki jih na ta način spremenimo v neškodljive ali manj neprijetne oblike. Zaželeno je npr., da oksidiramo škodljive (strupene) organske snovi v ogljikov dioksid (CO_2) in mineralne kisline (HCl ,...) ali da oksidiramo snovi, ki povzročajo barvo, vonj in okus v organoleptično nevtralne. Osnovne skupine uporabe kemijske oksidacije so:

- odstranjevanje vonja in okusa vode,
- odstranjevanje vodikovega sulfida (H_2S),
- odstranjevanje obarvanosti vode,
- odstranjevanje železa in mangana,
- dezinfekcija vode.

Oksidacija umetnih organskih snovi je pomembna predvsem s stališča zagotavljanja zdravstvene neoporečnosti vode. Preden z naštetimi snovmi obremenjeno vodo uporabimo za oskrbo ali v procesih, je potrebno zmanjšati njeno potencialno škodljivost. Za različne namene uporabe so se zatorej razvili različni tehnični načini oksidacije, ki jih lahko razvrstimo v 3 skupine:

- oksidacija s klasičnimi (kemičnimi) oksidacijskimi sredstvi,
- oksidacija pri povišani temperaturi in/ali povišanem tlaku ter z dodatki katalizatorjev in
- pospešena oksidacija.

6.1.1 POSPEŠENA OKSIDACIJA

Medtem, ko fotoliza pomeni direktno vsrkavanje UV svetlobe, ki se odrazi v kemijski reakciji. UV svetloba v kombinaciji s kemijskimi oksidacijskimi sredstvi, npr. ozonom O_3 , vodikovim peroksidom (H_2O_2), ali titanovim dioksidom (TiO_2), povzroča nastanek še posebno močnih hidroksilnih radikalov ($\bullet OH$), ki povzročijo s svetlobo sproženo oksidacijo (angl. *photo-initiated oxidation*) že pri temperaturi okolice in atmosferskem tlaku. Tudi medsebojno učinkovanje klasičnih kemijskih oksidantov, npr. ozona in vodikovega peroksida ter druge kombinacije naštetih sredstev, se odraža v nastanku hidroksilnih radikalov. Zaradi svoje učinkovitosti ta postopek imenujemo pospešena oksidacija, včasih tudi napredna stopnja oksidacije iz angl. *AOP – advanced oxidation process*.

Pri uporabi UV svetlobe za namene pospešene oksidacije je potrebno poudariti, da tu nastopajo nekajkrat višje doze (običajno $> 500 \text{ mJ/cm}^2$) kot pri dezinfekciji ter da se svetila (večinoma srednjetačna) in lastnosti steklenih cevi (npr. prepustnost za določene spektralne pasove) prilagajajo namenu uporabe.

6.2 HIDROKSILNI RADIKAL

Množici postopkov, ki jih štejemo med AOP, je skupen hidroksilni radikal, ki se tvori pri temperaturi okolice in atmosferskem tlaku. Pojma "hidroksilen, hidroksilna" se v kemiji nanašata na molekulo iz kisika in vodika, ki ju povezuje kovalentna vez. Nevtralna oblika je hidroksilni radikal ($\bullet OH$), ionska oblika pa je hidroksilni anion, ki ga običajno imenujemo hidroksidni ion z nabojem -1 in ga označimo z OH^- . V primeru, da je kisikov atom vezan na večjo molekulo, hidroksilna skupina postane funkcionalna skupina. V organski kemiji spojine, ki vsebujejo hidroksilno funkcionalno skupino $-OH$ imenujemo alkoholi.

Hidroksilni radikal, označimo ga z $\bullet OH$, predstavlja molekulo iz dveh atomov kisika in atoma vodika, ki sta povezana s kovalentno vezjo. V zunanji orbitali te molekule se nahaja nevezani elektron, ki ga ponazorimo s pikico pri simbolu.

Hidroksilni radikal je reaktivni elektrofil, to pomeni da je visoko reaktiven in zato slabo obstojen ter ima "rad" elektrone (te dobi od molekule, ki jo oksidira). Organske molekule so "bogate" z elektroni (v organskih molekulah je običajno veliko število atomov, veliko je dvojnih ali trojnih vezi, ki so dovzetne za razpadanje), zato hitro reagirajo s hidroksilnim radikalom. Konstanta reakcije hidroksilnega radikala z večino organskih onesnažil je velikostnega reda med 10^8 L/mol·s in 10^9 L/mol·s, kar 3- do 4-krat presega velikostni red reakcijskih konstant pri reakcijah teh onesnažil s katerimkoli drugim oksidantom (Crittenden, J. et al., 2005).

Hidroksilni radikal sodi med najmočnejše kemijske oksidante. Njegov oksidacijski potencial znaša 2,80 eV (elektronvolt). Za primerjavo, oksidacijski potencial fluora (F_2) znaša 2,87 eV, ozona (O_3) 2,07 eV, vodikovega peroksida (H_2O_2) 1,78 eV, prostega klora (Cl_2) 1,36 eV in prostega kisika (O_2) 1,23 eV (Lazarini, F., Brenčič, J., 1992).

6.3 REAKCIJE V POSTOPKIH POSPEŠENE OKSIDACIJE

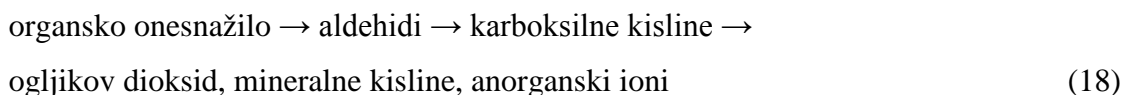
V postopkih pospešene oksidacije je posebna pozornost namenjena količini oksidanta, ki se porabi za razgradnjo snovi, ki jih želimo odstraniti (ciljna snov je običajno neko organsko onesnažilo) ter količini oksidanta, ki ga porabijo ostale v vodi prisotne organske in anorganske snovi.

6.3.1 REAKCIJE POSPEŠENE OKSIDACIJE S CILJNIMI SNOVMI

Splošno lahko reakcijo pospešene oksidacije ponazorimo z enosmerno kemijsko reakcijo, pri čemer z R ponazorimo reaktant - ciljno snov, običajno neko organsko onesnažilo:



Bolj podrobno za reakcije pospešene oksidacije običajno velja naslednje zaporedje:



Dva značilna mehanizma reakcij hidroksilnega radikala z organskimi molekulami sta:

- adicijske reakcije z dvojnimi (trojnimi) vezmi in
- izločevanje (odvzem) vodikovega atoma iz organske molekule.

Prva vrsta reakcije je bistveno hitrejša kot druga, zato je pospešena oksidacija hitreje poteka s snovmi, ki vsebujejo več mnogoternih vezi in počasneje s snovmi, ki imajo preprostejšo strukturo. Slednje zato v postopku pospešene oksidacije zahtevajo daljše reakcijske čase in/ali večje koncentracije $\bullet\text{OH}$.

Obe vrsti opisanih reakcij proizvajata reaktivne radikale organskih snovi, ki so nadalje hitro podvržene oksidaciji. Najbolj pogosto reagirajo z raztopljenim kisikom in tvorijo peroksi radikale ($\bullet\text{OOR}$), ti pa so podvrženi verižnim reakcijam, ki tvorijo številne nezaželene (in nevarne) oksidirane stranske produkte. Najbolj množičen stranski produkt pospešene oksidacije so karboksilne kisline, to so organske kisline s funkcionalno skupino $-\text{COOH}$, ki razpadajo počasneje. Ostale nezaželene stranske produkte predstavljajo npr. halogenirane očetne kisline, ki se tvorijo z oksidacijo halogeniranih alkenov kot je trikloroeten.

6.3.2 REAKCIJE POSPEŠENE OKSIDACIJE Z OSTALIMI SNOVMI V VODNI RAZTOPINI

Na potek reakcij pospešene oksidacije imajo vpliv tudi snovi, ki so v vodi prisotne, a jih ne želimo nujno odstraniti. Pomembne so predvsem zaradi tega, ker reagirajo s hidroksilnimi radikali in jih na ta način odstranjujejo ali pa vpijajo UV svetlobo, ki se uporablja za pridobivanje hidroksilnih radikalov iz ozona O_3 ali vodikovega peroksida H_2O_2 . Vsled obravnavanih dejavnikov, potrebujemo za oceno izvedljivosti procesov pospešene oksidacije oz. pri samem načrtovanju in projektiranju postopkov vsaj podatke o alkaliteti, pH vrednosti, kemijski porabi kisika KPK, vsebnosti skupnega (raztopljenega) organskega ogljika TOC (DOC) oz. naravnih organskih snovi NOM, količini raztopljenih kovin (predvsem Fe in Mn) in prepustnosti vode za UV svetlobo. Na podlagi teh podatkov že lahko predvidimo, kakšno tehnologijo bi lahko uporabili, s kakšnimi omejitvami in kakšno predhodno obdelavo vode bi pri tem potrebovali.

6.4 PREGLED POSTOPKOV POSPEŠENE OKSIDACIJE

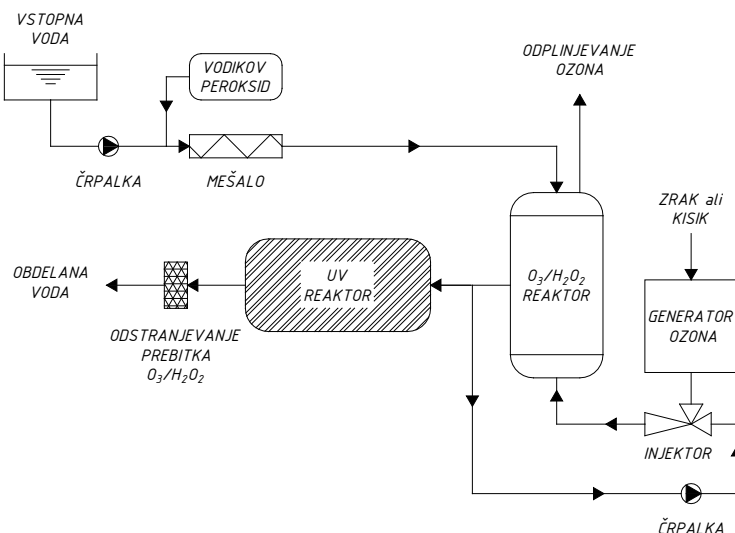
Zavedati se moramo, da je Slovenija v hidrološkem smislu bogata z vodo. Zato je v večini primerov sorazmerno enostavno zagotavljati potrebne količine vode primerne kakovosti, ne glede na namen uporabe (pitna voda, industrija,...). Povsod tam, kjer temu ni tako, je potrebno vodo pridobiti iz tistih virov, ki so dostopni. Včasih to pomeni, da moramo vodo, preden je primerna za uporabo, tehnološko obdelati. Takšno vodo, ko enkrat z njo razpolagamo, je do neke mere smiselno čim večkrat uporabiti, preden jo vrnemo v naravno okolje. Z uporabo v procesih vodo onesnažimo oz. obremenimo, zato je lahko kot takšna neposredno neprimerna za ponovno uporabo ali izpust v naravna vodna telesa. Poleg uveljavljenih mehanskih, fizikalno-kemijskih in (mikro)bioloških načinov odstranjevanja neželenih snovi iz vode, postopki pospešene oksidacije pridobivajo na veljavi povsod tam, kjer se druge metode izkazujejo kot neučinkovite.

Splošno postopke pospešene oksidacije uporabljamo za:

- pripravo pitne vode iz virov, ki so močno obremenjeni z (umetnimi) organskimi snovmi,
- pripravo tehnološke vode - iz surove vode ali za obdelavo vode, ki jo nameravamo ponovno uporabiti,
- pripravo vode za posebne vrste uporabe - medicina, farmacija, visokotehnološki postopki v elektroniki in mikroelektroniki,...
- obdelavo komunalne odpadne vode pred izpustom v posebej varovana vodna telesa,
- obdelavo posebnih vrst odpadne vode (bolnišnice, kemična industrija,...) pred izpustom v okolje,
- v primerih ponovne uporabe odpadne vode (za uporabo v tehnoloških procesih, za bogatenje podtalnice,...) ipd.

Preglednica 12: Pregled izbranih postopkov pospešene oksidacije

Postopek pospešene oksidacije	Prednosti	Pomanjkljivosti
Vodikov peroksid / UV svetloba	H ₂ O ₂ je obstojen v kontroliranih pogojih in ga je pred uporabo možno skladiščiti.	H ₂ O ₂ relativno slabo vpija UV svetlobo. Če vodna raztopina vpija velike količine UV svetlobe, slednja ne reagira z H ₂ O ₂ v zelenem obsegu. Pri takšni oksidaciji so potrebni dodatni UV reaktorji. Potrebna nevtralizacija prebitka H ₂ O ₂ .
Vodikov peroksid / ozon	Pospešeno oksidacijo je možno izvajati v vodah z nizko UV prepustnostjo. Dodatni UV reaktorji niso potrebni.	Izločanje hlapnih organskih snovi v reaktorju. Proizvodnja O ₃ je lahko draga in neučinkovita. Potrebno odplinjevanje prebitka O ₃ . Težavno določanje in zagotavljanje natančne doze H ₂ O ₂ / O ₃ . Postopek ni učinkovit pri nižjih pH vrednostih.
Titanov dioksid / UV svetloba	Če uporabimo TiO ₂ kot gosto suspenzijo, je pri postopku potrebno mešanje – postopek je zato možno izvajati tudi v primeru vode z nizko UV prepustnostjo, saj je v primeru mešanja vsa prostornina vode prej ali slej izpostavljena zadostni količini UV svetlobe za potek reakcije.	Zaradi goste suspenzije TiO ₂ je možno oblaganje in mašenje reaktorja. Potrebno odstranjevanje odvečne gošče iz obdelane vode.
Ozon / UV svetloba	Ni potrebe po zagotavljanju natančne doze H ₂ O ₂ / O ₃ . Prebitek oksidanta se hitro porabi (običajna razpolovna doba O ₃ je 7 min). Pri enaki dozi ozon vpija več UV svetlobe kot H ₂ O ₂ (pri 254 nm približno 200-krat).	Pri nastajanju hidroksilnih radikalov pri postopku O ₃ /UV je vmesna stopnja nastanek H ₂ O ₂ – uporaba O ₃ za tvorjenje H ₂ O ₂ je manj učinkovito kot neposredna uporaba H ₂ O ₂ . Pri takšni oksidaciji so potrebni dodatni UV reaktorji. Potrebno odplinjevanje O ₃ iz reaktorja in razgradnja O ₃ . Izločanje hlapnih organskih snovi v reaktorju.
Vodikov peroksid / ozon / UV svetloba	Na tržišču obstajajo tipski sistemi. Součinkovanje posameznih stopenj privede do boljšega učinka. H ₂ O ₂ pospešuje pretvorbe O ₃ .	Pri takšni oksidaciji so potrebni dodatni UV reaktorji. Potrebno odplinjevanje ozona iz reaktorja in razgradnja ozona. Izločanje hlapnih organskih snovi v reaktorju.



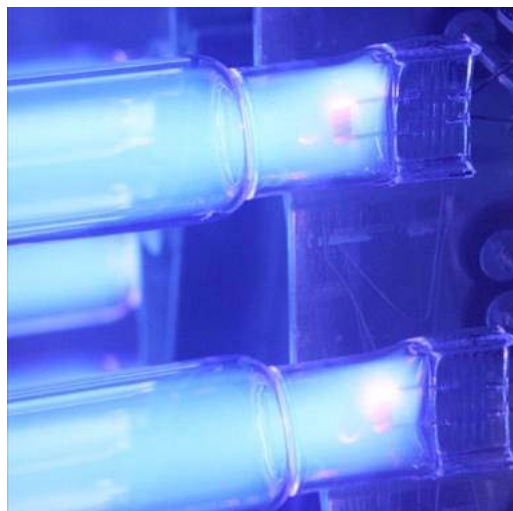
Slika 19: Tipična procesna shema postopka H₂O₂ / O₃ / UV

Kdaj in kje uporabiti postopke pospešene oksidacije, je odvisno predvsem od namena uporabe obdelane vode (pitna, tehnološka, odpadna, za ponovno uporabo,...) in razpoložljivih alternativnih možnosti oz. virov vode ustrezne količine in kakovosti. Zaradi narave reakcij ima pospešena oksidacija kot "stranski produkt" dezinfekcijske učinke, četudi se primarno v te namene ne uporablja. Pri izbiri tehnologije čiščenja vode moramo gledati predvsem skozi prizmo zaščite naravnih virov in dobrin ter analize stroškov skozi celoten življenjski cikel naprav, ki smo jih pri tem uporabili. S tega stališča je AOP tehnologija, ki zaradi dovršene opreme zahteva visoke investicijske stroške. Vrste naprav, ki se pri teh postopkih uporabljajo (generatorji ozona, UV sistemi,...) zahtevajo visoke vložke energije, zato so visoki tudi obratovalni stroški, kar za sedaj znižuje konkurenčnost.

V slovenskem prostoru pospešena oksidacija za namene zdravstvene hidrotehnike (še) ni v uporabi. Širše se postopki pospešene oksidacije uporabljajo v industriji, medicini, farmaciji,... in povsod tam, kjer je potrebna visoka kakovost vode. Z zmanjševanjem količine in kakovosti virov (neoporečne) vode lahko pričakujemo, da bo tehnologija sčasoma pridobivala na veljavi. Večje število delujočih naprav v svetovnem merilu pomeni, da bo na voljo več tipskih sistemov, ki bodo napredovali s stališča učinkovitosti, s tem pa se bodo zmanjšali tudi stroški.

7. UV SVETILA

Za potrebe dezinfekcije in fotolitskih procesov se UV svetloba največkrat pridobiva s pomočjo t.i. plinskih razelektritvenih svetil, poimenovanih tudi obločna svetila (med dvema elektrodama nastane oblok, če je med njimi zelo velika električna napetost). Plin, ki se nahaja v stekleni cevi, je v primeru UV svetil mešanica živega srebra v plinasti fazi in ostalih (inertnih) plinov. Ko svetilo ne deluje, je živo srebro v tekoči fazi ali v trdni fazi, če je shranjeno v obliki amalgama. Ob zagonu svetila se živo srebro izpostavi električnemu polju s pomočjo elektrod na vsakem koncu cevi. Pri tem se zaradi povišane temperature živo srebro uplini. Plin nato ionizira (nastane plazma), prosti elektroni, ki jih pospešuje električno polje pa se zaletavajo v atome plina. Elektrone v zunanjih orbitalah atoma vzbujajo v višje energijsko stanje. Ob vrnitvi v običajno energijsko stanje, elektron odda foton svetlobe v ultravijoličnem spektru.

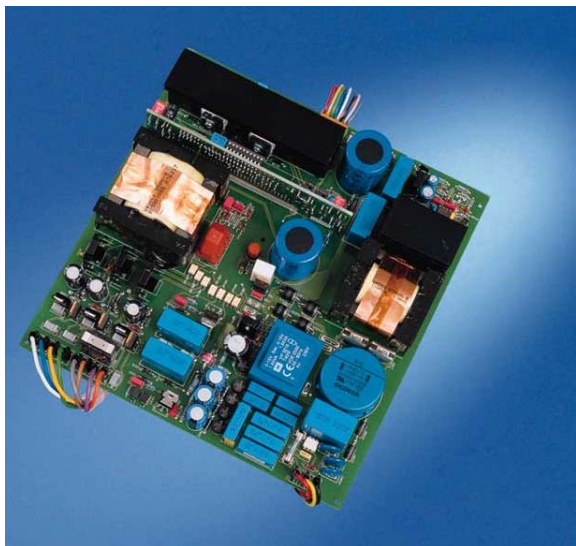


Slika 20: UV svetila z elektrodami
(ITT WEDECO, 2008)

UV svetila, kot ostala plinska razelektritvena svetila, potrebujejo napajalno enoto (angl. *electrical ballast*), ki ob vžigu zagotavlja visoke napetosti. Ta v primeru nizkotlačnih UV svetil z visoko intenziteto znaša okoli 800–1200 V. Napajalne enote preko elektrod "ogrejejo" svetilo in vzpostavijo plazmo, skozi katero nato poteka razelektritev. Ko je plazma enkrat vzpostavljena, električna upornost znotraj svetila pade, svetilo postane zelo prevodno, zato potrebuje neke vrste tokovni regulator. Za regulacijo potrebne napetosti in toka svetilo potrebuje napajalno enoto, ki poenostavljeno rečeno ustvarja primerni "upor". V osnovi ločimo 2 vrsti napajalnih enot:

- induktivne ali magnetne (predvsem pri manjših sistemih s pretoki do nekaj 10 m³/h ter svetil z nizko intenziteto) in
- elektronske (praviloma v primeru večjih sistemov ter svetil z visoko intenziteto).

Proces ogrevanja elektrod, vžiga svetila in doseganja polne zmogljivosti lahko, v odvisnosti od izvedbe svetila in napajalne enote, traja od nekaj do 10 min. Napajalne enote predstavljajo enega od vitalnih delov UV sistema, saj lahko podprte s senzorji in programsko-logičnim krmilnikom, ki stalno nadzoruje parametre (pretok, intenziteto UV sevanja,...), prilagajajo



Slika 21: Napajalna enota
(ITT WEDECO, 2008)

(zmanjšujejo, povečujejo) moč UV svetil tako, da je dosežena zaželena UV doza. V primeru, ko je za to potrebna manjša intenziteta UV svetlobe (manjši pretoki, boljša prepustnost vode za UV svetlobo, nova svetila,...), lahko z zmanjšanjem moči UV svetil napajane enote privarčujejo velike količine električne energije. UV svetila so z napajalnimi enotami povezana s kabli. Njihova največja dolžina je, zaradi upora v vodniku ter vplivov na napajanje, elektronske komponente in svetilo, omejena na 25–30 m.

Za sam UV sistem je najbolj primerno neprekinjeno obratovanje. Vsak zagon UV sistema zahteva visoke vložke energije za vžig in ogrevanje UV svetil. Zaradi občutljivosti elektrod UV svetil ter elektronskih komponent, ki sestavljajo napajalno enoto, na velika nihanja električne napetosti, je s strani proizvajalcev komercialnih sistemov običajno priporočeno (ali zahtevano za veljavnost garancije), da se v 24 urah obratovanja sistem ne izklopi/vklopi več kot nekajkrat (npr. 4 krat). Višje število vklopov/izklopov skrajša življenjsko dobo UV svetil in napajalnih enot, zmanjša se zanesljivost ter povečajo stroški obratovanja sistema.

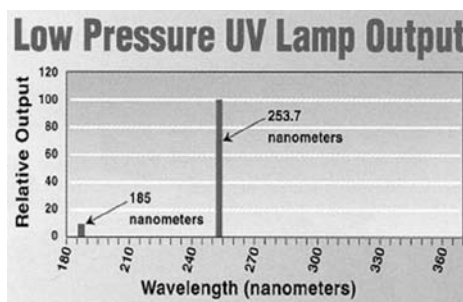
UV svetila imajo lastnost, da se s časom starajo. To pomeni upadanje UV intenzitete pri nespremenjenem vložku energije. Nova svetila zato običajno potrebujejo manj moči za doseganje iste intenzitete. Staranje svetil je prvenstveno posledica difundiranja atomov plina v strukturo steklene cevi, pri čemer pada koncentracija atomov živega srebra, ki "proizvaja" UV svetlobo. Sočasno se zaradi nastanka živosrebrih oksidov slabša prepustnost stekla za UV svetlobo. Na staranje prav tako pomembno vpliva stanje elektrod v svetilih, temperaturne obremenitve, spremembe v sestavi plina idr. Stara nizkotlačna UV svetila pri nespremenjeni moči napajanja oddajajo 70–80 % UV svetlobe novih svetil (odvisno od proizvajalca in tipa svetila). Srednjetačna UV svetila se zaradi vplivov hitrejšega obarvanja stekel (solarizacije) običajno starajo nekoliko hitreje. Projektna vrednost doze se mora zato vedno nanašati na intenziteto UV svetil ob koncu predvidene življenjske dobe. To moramo upoštevati pri zasnovi UV sistemov in podatke o svetilih preveriti pri proizvajalcih.

Steklena cev, ki obdaja in ščiti UV svetilo ter je na zunanji strani v stiku z vodo, je običajno narejena iz amorfne silikatnega stekla. Potrebna lastnost takšnega stekla je, da je popolnoma prosojna za UV svetlobo, da ne odbija in ne sipa UV svetlobe. Nezaželeno lastnost UV svetil je, da vplivajo na prosojnost steklene cevi. Zaradi solarizacije, spremembe v barvi stekla zaradi izpostavljenosti UV svetlobi, se prosojnost zmanjšuje, zato je sčasoma lahko potrebna menjava stekel. Nasprotno včasih želimo spremeniti lastnosti UV svetlobe. S prilagajanjem optičnih lastnosti stekla (dodajanjem primesi, oplaščevanjem), v primeru posebnih zahtev ali področij uporabe, lahko dosegajo izbrane valovne dolžine ali spektralni pasovi izstopne svetlobe. Zaradi možnega nastajanja mineralnih in mikrobioloških oblog na steklih UV svetil, ki lahko vplivajo na uspešnost dezinfekcije, je potrebno zagotoviti čiščenje le-teh. Možno je občasno mehansko čiščenje s curkom vode in čistilnimi sredstvi, s curkom stisnjene zraka ali z brisalci. Slednji so v avtomatizirani izvedbi standardna rešitev večine večjih sistemov, običajno so v obliki obročkov iz posebnih vrst plastike ali gume (npr. PTFE – teflon, viton,...), ki jih električno ali pnevmatsko gnani sistem potegne vzdolž stekel.

S periodičnim in pogostim (avtomatskim) čiščenjem se zagotavlja kar najboljša prepustnost stekel za UV svetlobo.

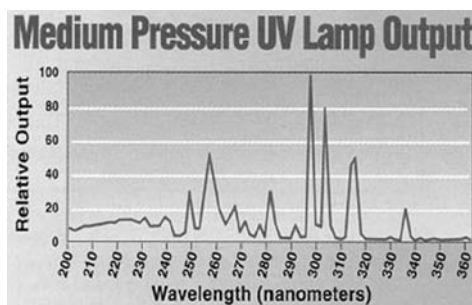
Med različnimi vrstami UV svetil se najpogosteje uporabljajo naslednji 2 vrsti (poimenovanje glede na tlak se nanaša na tlak plina v svetilu v fazi obratovanja):

- nizkotlačna UV svetila – imenujemo jih monokromatska UV svetila, ker okoli 85 % svetlobe oddajajo pri valovni dolžini 253,7 nm (običajno privzamemo kar 254 nm). Njihovo lastnost lahko s pridom izkoristimo, saj DNK pri tej valovni dolžini (nekje med 250 nm in 260 nm) lokalno najbolj vpija UV svetlobo. Ločimo nizkotlačna UV svetila z nizko intenziteto v katerih je tekoče živo srebro in se uporabljajo za manjše sisteme ter nizkotlačna UV svetila z visoko intenziteto, v katerih je živo srebro shranjeno v obliki amalgama (zlitine živega srebra in neke druge kovine) in se uporabljajo pri večjih sistemih.



Grafikon 3: Emisijski spekter nizkotlačnega UV svetila
(Summerfelt, S.T., 2003)

- srednjetačna UV svetila (z visoko intenziteto) – imenujemo jih polikromatska UV svetila, saj oddajajo svetlobo v več delih UV spektra in tudi v vidnem spektru. Dezinfekcijski učinek je drugačen pri različnih valovnih dolžinah izsevane UV svetlobe med 200 nm in 300 nm, zato moramo pri uporabi teh svetil upoštevati občutljivost nekega mikroorganizma na različne valovne dolžine.



Grafikon 4: Emisijski spekter srednjetačnega UV svetila
(Summerfelt, S.T., 2003)

Preglednica 13: Pregled lastnosti najpogosteje uporabljenih UV svetil

Lastnost	Enota	Tip UV svetila		
		Nizkotlačna z nizko intenziteto	Nizkotlačna z visoko intenziteto	Srednjtlačna
Spekter	/	monokromatski - 253,7 nm	monokromatski - 253,7 nm	polikromatski - 180–1370 nm (večina 200–360 nm)
Agregatno stanje živega srebra v hladnem svetilu	/	tekoče	trdno (amalgam)	tekoče
Tlak plina	Pa	~ 1	0,1–15	100–15.000
Okvirna življenjska doba UV svetil	obratovalne ure	8.000–10.000	8.000–12.000 (novejši podatki 12.000–16.000)	3.000–5.000 (novejši podatki 3.000–8.000)
Obratovalna temperatura	°C	35–60	60–120	400–900
Moč posameznega svetila	W	40–100	200–500	1.000–10.000
Moč napajanja na enoto dolžine svetila	W/cm'	0,5	1,5–10	50–150
Izhodna moč v UV-C spektru na enoto dolžine svetila	W/cm'	0,2	0,5–3,5	5–30
Izkoristek (moč napajanja/izhodna moč v UV-C spektru)	%	30–40	25–40	10–20
Relativno število svetil za doseganje potrebne UV doze	/	visoko	srednje	nizko
Prilagajanje moči	/	ne - delujejo stalno pri 100 % moči	da - med 50 % in 100 %	da - med 50 % in 100 %
Pred ponovnim zagonom je potrebno ohlajevanje	/	ne	ne	> 10 min
Življenjska doba kvarčnega stekla in napajalne enote	/	relativno dolga	relativno dolga	relativno kratka

8. UV REAKTORJI

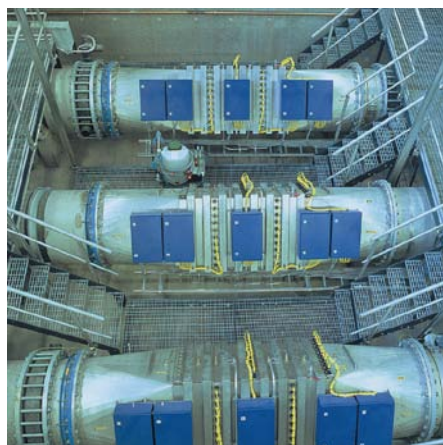
Kot UV reaktor se smatra prostor, v katerem voda prihaja v stik z UV svetlobo. Ločimo:

- UV reaktorje v odprtem kanalu
– tok s prosto gladino, običajna rešitev za odpadno vodo.



Slika 22: UV reaktor pri toku s prosto gladino
(ITT WEDECO, 2008)

- UV reaktorje v zaprtih posodah
oz. tlačne UV reaktorje – tok pod tlakom, običajna rešitev za pitne vode, uporabljajo se tudi za odpadno vodo.



Slika 23: UV reaktor pri toku pod tlakom
(ITT WEDECO, 2008)

V obeh primerih so lahko UV svetila orientirana vzporedno s tokom vode ali pravokotno na tok vode v vodoravni ali navpični smeri, odvisno od tipa in izvedbe naprave. Manjše naprave lahko v reaktorju vsebujejo samo eno UV svetilo. Zaradi vzdrževanja, čiščenja in interventnih posegov je dobro načrtovati sisteme z več vzporednimi reaktorji (še posebej pri višjih pretokih) oziroma zagotoviti obtočni kanal ali cev. V primeru, ko vzporedno obratuje več reaktorjev je potrebno zagotoviti hidravlično čim bolj enakomerno porazdelitev toka voda, da je v vseh reaktorjih dosežena primerna in čim bolj enaka doza.

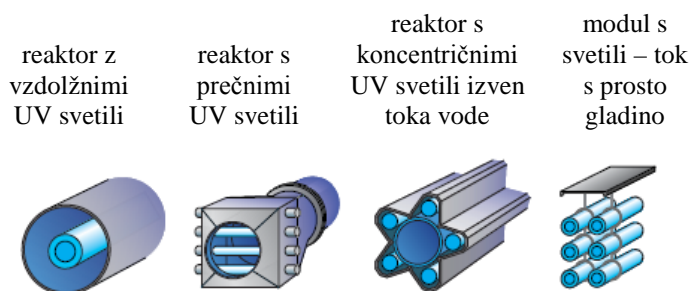
V fazi obratovanja je potrebno skrbeti za ustrezen nivo vode v reaktorju, skrbeti da so UV svetila stalno potopljena (z drugimi besedami preprečiti suhi tek) oziroma preprečiti, da bi se UV svetila vključila, v kolikor v reaktorju niso vzpostavljeni ustrezni hidravlični pogoji ali bi se v primeru izpolnjenih pogojev za delovanje po nepotrebnem izključila.

UV svetloba učinkuje samo v neposrednem stiku elektromagnetnega valovanja z vodo znotraj reaktorja. Da bi se dosegel zaželeni učinek, potrebujemo dovolj visoko dozo UV svetlobe. Pri konstantnem pretoku skozi UV reaktor in konstantnem zadrževalnem času, je pri ostalih nespremenjenih pogojih zato potrebno v vsaki točki reaktorja doseči dovolj visoko obsevanost z UV svetlobo. Poleg fizikalno-kemijskih parametrov, ki pogojujejo prepustnost vode za UV svetlobo, na obsevanost vplivajo pogoji, ki so neposredno odvisni od zgradbe reaktorja: geometrije, prostornine, števila in razporeditve UV svetil ter hidravlične oblike. Najpomembnejše spremenljivke, ki izhajajo iz zgradbe UV reaktorjev so:

- polje intenzitete UV svetlobe,
- pretok skozi reaktor in zadrževalni čas,
- disperzija delcev in
- turbulenca.



Slika 24: Notranjost tlačnega UV reaktorja (ITT WEDECO, 2008)



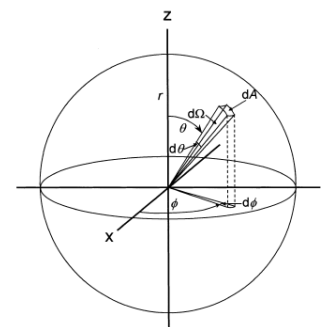
Slika 25: Ilustracija možne razporeditve UV svetil v reaktorjih (ITT WEDECO, 2008)

8.1 OPTIKA UV REAKTORJEV

Zanima nas, kako v UV reaktorjih določiti obsevanost. Pred podrobnejšo analizo najprej podajmo nekaj definicij, ki se tičejo optike UV reaktorjev.

8.1.1 PROSTORSKI KOT

Prostorski kot Ω je definiran kot površina krogelnega izseka, deljena s kvadratom polmera krogle r^2 . Največja vrednost prostorskega kota, to je v primeru cele krogle, znaša 4 steradianov [sr]. Element prostorskega kota $d\Omega$ predstavlja razmerje dA/r^2 , kjer je dA površina krogle, ki jo omejuje prostorski kot $d\Omega$ (Slika 26). V polarnih koordinatah zapišemo:



Slika 26: Prostorski kot

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi, \quad (19)$$

kjer kot θ merimo od osi z in ϕ od osi x .

8.1.2 INTENZITETA SEVANJA oz. SVETLOBE I (angl. radiant intensity)

Intenziteta sevanja I predstavlja moč, ki jo točkovni vir v dano smer oddaja v prostorski kot $d\Omega$. Izražamo jo v [W/sr]. Za točkovni vir velja:

$$\Phi = 4\pi \cdot I, \quad (20)$$

pri čemer I ne pada z oddaljenostjo od vira sevanja v mediju, ki ne vpija sevanja. Velja tudi:

$$d\Phi = I \cdot d\Omega = I \cdot \sin \theta d\theta d\phi. \quad (21)$$

8.1.3 LOM SVETLOBE

Snellov zakon o lomu svetlobe podaja lastnosti energije sevanja pri prehodu skozi površino, ki ločuje dva različna medija:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2, \quad (22)$$

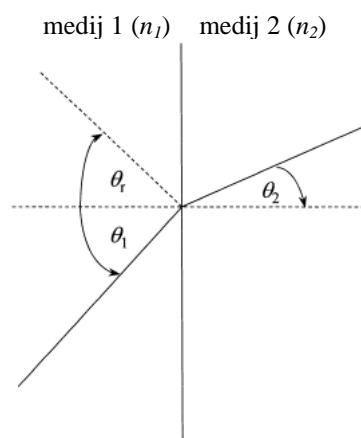
kjer sta n_1 in n_2 lomna količnika svetlobe v obeh medijih. Pri tej razlagi smo privzeli, da je $n_2 > n_1$, lomni kot θ_2 med normalo na površino in žarkom pa večji kot vpadni kot θ_1 med normalo in žarkom.

8.1.4 ODBOJ SVETLOBE

Pri prehodu svetlobe skozi površino, ki ločuje dva medija, se del svetlobe odbije nazaj v prvi medij s kotom, ki je enak vpadnemu kotu svetlobe $\theta_r = \theta_1$ (glej Sliko 27). Delež odbite svetlobe izražamo z odbojnostjo R_i . Ta nam pove, kolikšen del svetlobe se pri prehodu valovanja med različnima medijema odbije. Opis optičnih procesov pri odboju svetlobe je relativno zapleten, saj je količina odbite svetlobe odvisna od polarizacije (smeri nihanja) valovanja. Če z r_p označimo amplitudo valovanja pravokotno na vpadno ravnino in z r_v amplitudo valovanja vzporedno z vpadno ravnino, Fresnelovi zakoni za odboj svetlobe določajo:

$$r_p = \frac{n_1 \cdot \cos \theta_1 - n_2 \cdot \cos \theta_2}{n_1 \cdot \cos \theta_1 + n_2 \cdot \cos \theta_2}, \quad (23)$$

$$r_v = \frac{n_2 \cdot \cos \theta_1 - n_1 \cdot \cos \theta_2}{n_1 \cdot \cos \theta_2 + n_2 \cdot \cos \theta_1}. \quad (24)$$



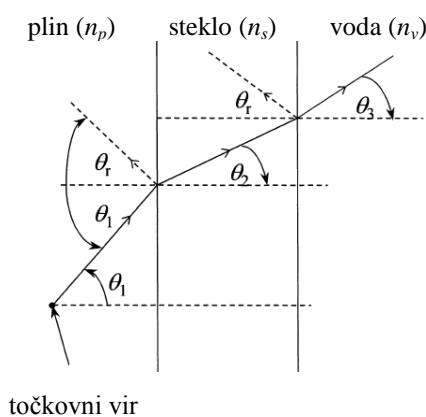
Slika 27: Lom in odboj svetlobe na prehodu med dvema medijema

Za nepolarizirano valovanje (r_p in r_v sta enakomerno porazdeljena), kamor lahko prištejemo tudi UV svetlobo, velja:

$$R_i = \frac{1}{2}(r_p^2 + r_v^2). \quad (25)$$

Pomembno je, da je R_i relativno neodvisen od vpadnega kota (4-5 % razlika), če ta znaša manj kot 40° , nato pa zelo hitro narašča. Valovanje razdelimo na delež, ki se odbije nazaj v medij (R_i) in delež, ki prehaja v drug medij (T_i). Pri tem opozorimo, da tu ne gre za koeficient svetlobne prepustnost v vodi (npr. T_{1cm}):

$$T_i = 1 - R_i. \quad (26)$$



Slika 28: Lom svetlobe na mejnih ploskvah

UV svetloba "nastaja" v plinu znotraj svetila, od koder se preko steklene cevi, ki svetilo obdaja, širi v vodo. Povprečne vrednosti lomnih količnikov pri valovnih dolžinah 200–300 nm pri 20°C znašajo za pline $n_p = 1,00$, za silikatno steklo $n_s = 1,52$ in za vodo $n_v = 1,38$ (Bolton, J.R., 2000). Pri vpadnih kotih svetlobe $< 40^\circ$ se okoli 4 % izsevane energije svetila odbije na mejni ploskvi svetilo/steklena cev, vendar le okoli 0,2 % na mejni ploskvi steklena cev/voda. Če uporabimo Snellov zakon o lomu svetlobe, potem znašajo koti svetlobe v vsakem mediju:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1\right), \quad (28)$$

$$\theta_3 = \arcsin\left[\frac{n_2}{n_3} \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1\right)\right)\right] = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_3} \cdot \sin \theta_1\right). \quad (29)$$

Kot vidimo, je kot θ_3 neodvisen od steklene cevi med vodo in svetilom.

8.2 MODELIRANJE OBSEVANOSTI V UV REAKTORJIH

Da bi dobro zasnovali UV reaktorje, je zelo pomembno vedeti, koliko znaša obsevanost v neki točki reaktorja. Za to obstaja več pristopov oz. matematičnih modelov, od katerih za predstavitev izberemo dva. Prvi natančno upošteva zakone optike in obnašanja svetlobe v vodi in je zato za modeliranje zahtevnejši. Drugi je poenostavljen in lahko služi v inženirski praksi za "grobe" izračune.

8.2.1 METODA VSOTE TOČKOVNIH VIROV

Izpeljava se nanaša na oznake, uporabljene na Slikah 26 in 29. Točkovni vir UV svetlobe oddaja valovanje znotraj prostorskega kota $d\Omega$. Intenziteta svetlobe znotraj tega kota ne pada, dokler ne naleti na stekleno cev, od katere se svetloba odbija s faktorjem R_i in skozi katero se svetloba lomi s faktorjem $(1-R_i)$. Moč sevanja $d\Phi$ znotraj prostorskega kota $d\Omega$ znaša:

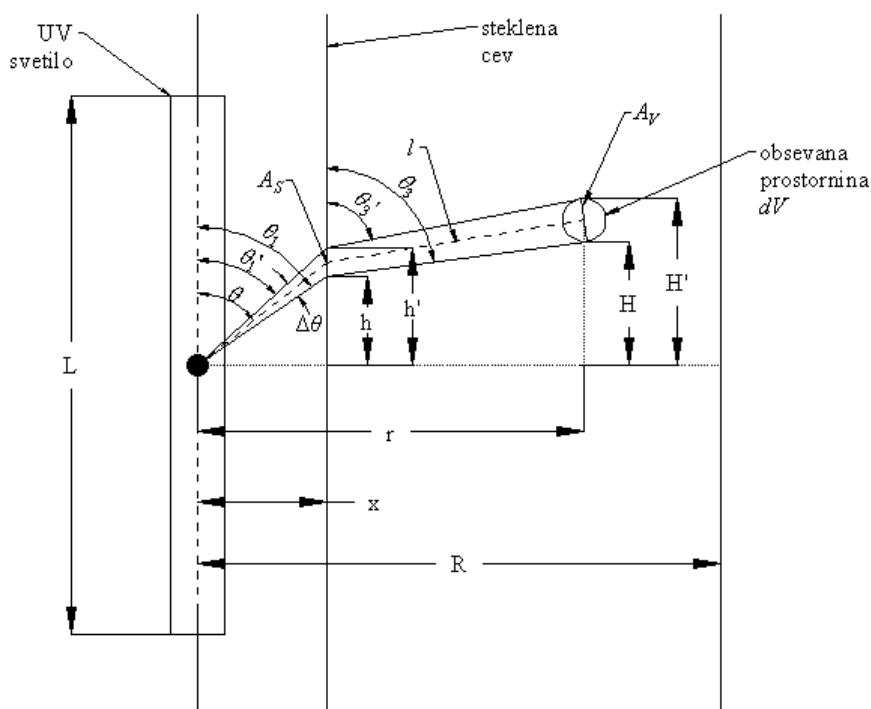
$$d\Phi(\theta, \phi) = I \cdot d\Omega = I \cdot \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\Phi}{4\pi} \sin \theta d\theta d\phi, \quad (30)$$

kjer kot θ merimo od vzdolžne osi in ϕ od radialne osi ter upoštevamo Enačbo 20 in 21. Ker je reaktor zaradi valjaste oblike osno simetričen, lahko Enačbo 30 integriramo po ϕ in dobimo:

$$d\Phi(\theta) = \frac{\Phi}{4\pi} \sin \theta d\theta \cdot \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{\Phi}{2} \sin \theta d\theta. \quad (31)$$

Obsevanost dobimo tako, da zgornjo enačbo delimo z obsevano površino $dA(\theta)$ med kotoma θ in $\theta + d\theta$:

$$dE_0(\theta) = \frac{\Phi}{2 \cdot dA(\theta)} \sin \theta d\theta. \quad (32)$$



Slika 29: Parametri računskega modela obsevanosti

Za potrebe izdelave računskega modela preidimo z Enačbo 32 iz diferencialne oblike na obliko s končnimi razlikami:

$$\Delta E_0(\theta) = \frac{\Phi \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta A(\theta)}. \quad (33)$$

Enačba 33 je za majhne kote θ dovolj dober računski približek Enačbe 32. Enačba 33 je primerna za izračun obsevanosti med svetilom in stekleno cevjo, ki obdaja svetilo. V tem primeru znašajo:

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_1'}{2}, \quad (34)$$

$$\Delta \theta = \theta_1' - \theta_1. \quad (35)$$

Obsevana površina na stekleni cevi je:

$$\Delta A(\theta) = A_s = \frac{2\pi \cdot r \cdot (h' - h)}{\sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_1'}{2}\right)}, \quad (36)$$

kjer je r radialna oddaljenost od osi svetila in h oddaljenost od središča svetila do ploskovnega elementa s površino A_s :

$$h = \frac{x}{\tan \theta}. \quad (37)$$

V Enačbi 37 x predstavlja polmer steklene cevi, ki obdaja UV svetilo.

Delež svetlobe, ki se lomi skozi stekleno cev označimo z $(1-R_i)$. Ko prehaja skozi stekleno cev in nadalje skozi plasti vode, se del svetlobe vpije (absorbira). To zajamemo s koeficientom U :

$$U = U_1 + U_2. \quad (38)$$

Koeficient U_1 predstavlja delež svetlobe, ki se vpije v stekleni cevi:

$$U_1 = \frac{\alpha_s \cdot d_s}{\sin \theta}. \quad (39)$$

d_s predstavlja debelino in α_s absorpcijski koeficient stekla pri $\theta = 0$. Koeficient U_2 predstavlja delež svetlobe, ki se vpije v vodi:

$$U_2 = \frac{A(\lambda)}{l}. \quad (40)$$

V Enačbi 40 je A vpojnost svetlobe pri valovni dolžini λ ter l dolžina optične poti:

$$l = \frac{r - x}{\sin\left(\frac{\theta_3 + \theta_3'}{2}\right)}. \quad (41)$$

Pri zelo nizkih vpojnostih A , to je v primeru, ko raztopina vpija zelo malo svetlobe pri valovni dolžini λ , se od ostenja reaktorja odbija določen del UV svetlobe. Obsevanost se zato v bližini ostenja nekoliko poveča. V matematičnem modelu bi vplive odboja svetlobe od ostenja upoštevali tako, da bi dodali "zunanje" vire obsevanja nekega prostorninskega elementa. O upoštevanju odboja od ostenja velja razmisliti predvsem v primeru dezinfekcije pitne vode z zelo nizkim A oz. (T_{Icm}), ko do ostenja reaktorja dejansko prispe nezanemarljiv delež UV svetlobe. UV reaktorji s tokom pod tlakom so običajno izdelani iz nerjavnega jekla, ki nazaj v reaktor odbija manj kot 20% svetlobe v UV-C spektru, ki prispe do ostenja (Bolton, J.R., 2000). Kljub temu, da odboj od ostenja reaktorja zanemarimo (kar običajno storimo), smo torej pri rezultatih modela "na varni strani".

Upošteevamo navedene izraze in pišemo:

$$d\Phi(\theta) = (1 - R_i) \cdot 10^{-U} \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot \sin \theta d\theta. \quad (42)$$

Na oddaljenosti $r > x$ znaša obsevanost (pretvorjeno v obliko s končnimi razlikami):

$$\Delta E_0(\theta) = (1 - R_i) \cdot 10^{-U} \cdot \frac{\Phi \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta}{2 \cdot A_v}, \quad (43)$$

pri čemer je A_v površina prečnega preseka obsevane prostornine:

$$A_v = \frac{2\pi \cdot r \cdot (H' - H)}{\sin\left(\frac{\theta_3 + \theta_3'}{2}\right)}. \quad (44)$$

S H in H' smo označili vzdolžno oddaljenost od sredine svetila za bližnji in oddaljeni del obsevane prostornine ($H' - H$ predstavlja premer obsevane prostornine):

$$H = h + \frac{r - x}{\tan \theta_3}. \quad (45)$$

Enačba 43 predstavlja obsevanost prostornine, določene z azimutnima kotoma θ in θ' , radialno oddaljenostjo r ter vzdolžno oddaljenostjo H od sredine svetila. Za določevanje porazdelitve obsevanosti znotraj celotnega reaktorja, je potrebno obsevanost iz Enačbe 43 izračunati za vse vrednosti r in H .

Do tu smo izračunali obsevanost iz enega vira. UV svetilo z močjo Φ je linijski vir svetlobe, ki ga razdelimo na n enakomerno porazdeljenih točkovnih virov svetlobe. Vsak točkovni vir oddaja svetlobo z močjo Φ/n v vse smeri. Obsevanost je v točki prostora asociativna v matematičnem smislu. Skupna obsevanost prostorninskega elementa dV je torej vsota (integral) obsevanosti tega elementa iz vseh n točkovnih virov. Metodo poznamo pod angleškim imenom *Multiple Point Source Summation (MPSS)*.

Izračun povprečne obsevanosti znotraj reaktorja predstavlja povprečje obsevanosti vseh prostorninskih elementov. K izračunu lahko pristopimo tako, da na radialni oddaljenosti od svetila r vzdolž celotne dolžine reaktorja izračunamo povprečno obsevanost, nato pa izračune ponavljamo za enako velike intervale v prečnih oz. radialnih smereh. Povprečje obsevanosti v radialni smeri mora biti povprečje na enoto radialne oddaljenosti r , saj z naraščanjem slednje narašča tudi število prostorninskih elementov v ravnini (krogu), ki jo določa r . Povprečna vrednost vsote obsevanosti prostorninskih elementov je potemtakem iskani parameter.

8.2.2 **PRISTOP Z OBSEVANOSTJO NA RADIALNI ODDALJENOSTI OD LINIJSKEGA VIRA SVETLOBE**

Poglejmo si nekoliko poenostavljen model izračuna povprečne obsevanosti znotraj reaktorja. Predpostavimo, da imamo valjasti reaktor s premerom R , z enim vzdolžnim UV svetilom, ki oddaja fotone zgolj v radialni smeri glede na os svetila. Vplive odboja in loma svetlobe zanemarimo, vendar upoštevamo vpijanje svetlobe v vodi. F. Taghipour (2004) je za obsevanost na radialni oddaljenosti od osi svetila r izpeljal izraz:

$$E_0(r) = \frac{P' \cdot T^{\alpha(r-x)}}{2\pi \cdot r}, \quad (46)$$

pri čemer je x premer steklene cevi svetila, α absorpcijski koeficient, T prepustnost UV svetlobe v vodi in P' moč svetila na enoto dolžine. Za izračun povprečne obsevanosti znotraj reaktorja v tem primeru velja:

$$\overline{E_0} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_x^R E_0(r) \cdot r dr d\theta}{\pi \cdot (R^2 - x^2)} = \frac{P' \cdot (T^{\alpha(R-x)} - 1)}{\alpha \cdot \pi \cdot \ln(T) \cdot (R^2 - x^2)}. \quad (47)$$

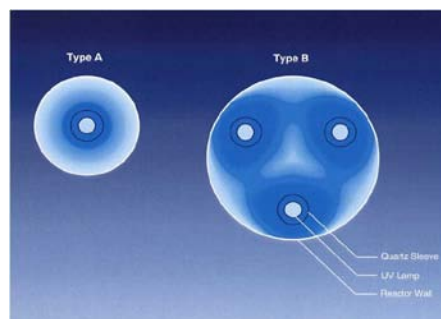
8.2.3 **SPREMENLJIVKE V MATEMATIČNIH MODELIH**

V matematičnih modelih obsevanosti reaktorjev je potrebno upoštevati, kakšna svetila uporabljamo. Prepustnost svetlobe v vodi, prepustnost svetlobe skozi steklo, ki obdaja UV svetilo ter dezinfekcijski učinek so tiste spremenljivke, ki so odvisne od valovne dolžine UV svetlobe. Predvsem je to pomembno ob uporabi srednjetačnih, polikromatskih svetil. V tem primeru postopamo npr. tako, da valovne dolžine med 200 nm in 300 nm razdelimo na spektralne pasove s korakom 5 nm in upoštevamo vrednosti posameznih spremenljivk v določenem spektralnem pasu. Nadalje je potrebno upoštevati, da je občutljivost mikroorganizmov na UV svetlobo različna pri različnih valovnih dolžinah. Nizkotlačna, monokromatska svetila so s tega stališča preprostejša za obravnavo, saj ves "zanimivi" spekter UV svetlobe oddajajo pri valovni dolžini 254 nm.

Podrobnejše analize kažejo, da pri prepustnosti vode za UV svetlobo $T_{Icm} < 80\%$, neupoštevanje vplivov odboja in loma svetlobe predstavlja 5–10% razliko v povprečni obsevanosti znotraj reaktorja. Pri modeliranju reaktorjev za odpadne vode, katerih T_{Icm} običajno znaša manj kot 70%, z zanemarjanjem vplivov loma in odboja svetlobe naredimo napako, ki znaša približno 6,5%. Napako lahko upoštevamo tako, da rezultate modela "popravimo" za to razliko. Ko obravnavamo pitne vode, vrednosti T_{Icm} običajno znašajo več kot 90%. V tem primeru bi, z neupoštevanjem vplivov loma in odboja svetlobe, naredili napako reda velikosti 15–25%, zato moramo v modelih te vplive upoštevati (Bolton, J. R., 2000).

Pri naštetih modelih upoštevamo, da imajo svetila vpliv na okoliško prostornino v obliki valja. Predstavili smo vplive, ki jih povzroča dolgo svetilo, obdano s stekleno cevjo znotraj valjastega reaktorja. UV reaktorji običajno vsebujejo več svetil. Del obsevane prostornine je v tem primeru izpostavljen obsevanju iz več smeri. Ker se obsevanost prostorsko sešteva, v primeru več virov svetlobe enostavno seštejemo vse vrednosti.

Ker so UV reaktorji običajno zasnovani tako, da je dimenzija vzdolž reaktorja bistveno večja kot v prečni smeri, je porazdelitev obsevanja relativno bolj pomembna v radialni smeri, to je prečno na vzdolžno os svetila. S tem, ko zagotovimo enakomerno mešanje vode v prečni smeri, v smislu idealnega cevne ali "*plug-flow*" reaktorja, naj bi vsi elementi prostornine prejeli enako UV dozo. To je dejansko težko zagotoviti, zato je pravilno geometrijsko oblikovanje reaktorja zelo pomembno, da so razlike v prejetih dozah čim manjše.



Slika 30: Polje obsevanosti z UV svetlobo v primeru valjastega reaktorja z enim svetilom (A) in tremi svetili (B) – temnejši odtenki predstavljajo večjo obsevanost (ITT WEDECO, 2008)

8.3 VPLIVI HIDRAVLIČNE OBLIKE REAKTORJEV NA DEZINFEKCIJSKI UČINEK

8.3.1 *PRETOK IN HITROSTNI PROFIL*

Pretok skozi UV sistem Q [m^3/s], prostornina UV reaktorja V [m^3] in povprečni (hidravlični) zadrževalni čas v UV reaktorju t_z [s] so med seboj povezani, kot prikazuje naslednja zveza:

$$t_z = \frac{V}{Q}. \quad (48)$$

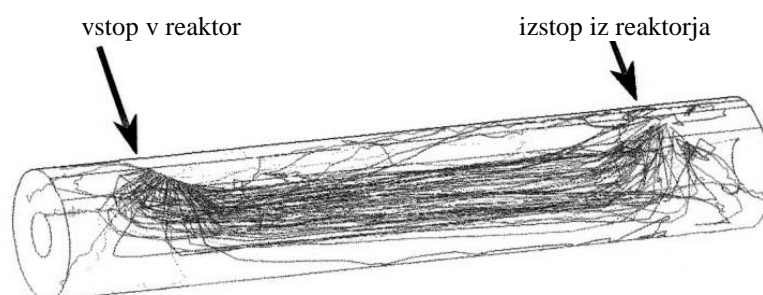
UV reaktorji se projektirajo na nek nazivni pretok, pri katerem morajo biti doseženi predpisani (zaželeni) parametri dezinfekcije pri danem minimalnem standardu za fizikalno-kemijsko in mikrobiološko kakovost vode. V hidravličnem smislu je potrebno UV reaktor oblikovati tako, da niso možne kratke veze oziroma, da je pot različnih kontrolnih volumnov skozi reaktor časovno čim bolj enaka. V primeru, da to ni zagotovljeno, je možno uhajanje mikroorganizmov iz reaktorja brez prejema dovolj visoke doze. Poleg modeliranja obsevanosti je zato pri snovanju UV reaktorjev potrebno poznati polja hitrosti v toku vode, ki posredno določajo zadrževalni čas kontrolnih volumnov.

8.3.2 *DISPERZIJA*

Disperzija je lastnost delcev, da se razpršijo v prostoru. Idealna oblika UV reaktorja je t.i. "plug-flow" ali cevni rektor, pri katerem se predpostavlja, da različni delci reaktor zapuščajo v istem vrstnem redu kot so vanj vstopili. To bi pomenilo, da je bil njihov zadrževalni čas v reaktorju približno enak. V idealnem cevnem reaktorju bi bili delci prostorsko enakomerno razporejeni, torej disperzije ne bi bilo. Dejansko je takšne pogoje nemogoče zagotoviti, lahko pa se jim približamo s takšnim oblikovanjem UV reaktorja, ki ima glede na tok vode dolgo vzdolžno komponento in visoko razmerje med dolžino in širino reaktorja (z drugimi besedami da je reaktor ozek glede na njegovo dolžino).

8.3.3 *TURBULENCA*

V idealnem cevnom reaktorju je tok vode turbulenten radialno na smer toka. Na ta način se izognemo t.i. mrtvim conam, vendar se pri tem poveča disperzija. Teh dveh zahtev hkrati ne moremo izpolniti – imeti čim manjšo disperzijo delcev ter čim večjo turbulenco. Lahko pa se s pravilnim oblikovanjem UV reaktorjev, kar pomeni visoko razmerje dolžine proti širini, ustrezno hidravlično oblikovanje vstopnih in izstopnih predelov (pri tlačnih reaktorjih npr. nasprotno orientirani vstopna in izstopna odprtina,...), uporabo elementov za enakomernejšo porazdelitev toka (usmerjevalniki toka, plošče z odprtinami,...), približamo optimalnemu kompromisu med disperzijo in turbulenco.



Slika 31: Računalniška simulacija poti delcev skozi valjasti UV reaktor z enim svetilom (Downey, D. et al., 1998)

9. TEHNIČNE LASTNOSTI UV REAKTORJEV

9.1 UV REAKTORJI PRI TOKU S PROSTO GLADINO

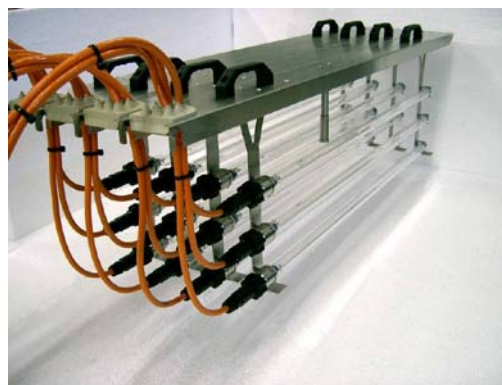
Pri toku s prosto gladino UV reaktor predstavljajo svetiila na nosilnih elementih v odprtem kanalu, skupaj s pomožnimi elementi. Pri večjih pretokih se običajno izvede 2 ali več vzporednih UV reaktorjev, pri čemer je možno izvajati posege (čiščenje, vzdrževanje, servisiranje,...) v enem kanalu pri nemotenem obratovanju. V fazi obratovanja je potrebno zagotoviti, da je porazdelitev pretokov med posameznimi UV reaktorji čim bolj enakomerna. Pri manjših pretokih običajno zadostuje en UV reaktor, v takšnih primerih se priporoča izvedba obtočnega kanala za nemoteno izvajanje posegov. V primeru, ko obtočnega kanala ni možno ali ga ni smotrno zagotoviti, je potrebno izbrati modularno zasnovo UV reaktorja, ki omogoča odstranitev opreme iz kanala po delih (modulih) ob normalnem pretoku vode. Zaradi možnega nabiranja mineralnih in mikrobioloških oblog na steklih UV svetil se, kjer je le možno, priporoča vgradnja avtomatskega sistema za čiščenje med obratovanjem.

Ob vstopu vode v kanal z UV reaktorjem se lahko vgradi hidravlični element, ki z ustvarjanjem nekaj centimetrске zajeze ter uporom skozi element prestreza hipna nihanja pretoka (zagotavlja čim bolj stalen tok in s tem zmanjšuje vplive na UV dozo) ter pripomore k čim bolj enakomerni razporeditvi hitrosti po prečnem profilu UV reaktorja. Tak element npr. predstavlja naluknjana umirjevalna plošča, prikazana na Sliki, kakšna drugačna oblika rešetk ipd. Če je, zaradi specifičnih lastnosti čistilne naprave, možen vnos večjih delcev suspendiranih snovi ali naplavin, je potrebno te elemente redno čistiti, saj se lahko zaradi mašenja zmanjša pretočna sposobnost teh elementov in povečajo hidravlične izgube.



Slika 32: Primer umirjevalne rešetke – ČN Radovljica (MAK CMC, 2006)

Reaktorji pri toku s prosto gladino se običajno nahajajo v kanalu pravokotne oblike, kjer sta spremenljivki širina in globina kanala. Temu se prilagaja število in razporeditev UV svetil ter konfiguracija same naprave. Poleg ostenja kanala reaktor sestavljajo moduli (prikazani na Sliki 33), kjer so v nizih (vodoravno v smeri toka vode ali navpično v smeri pravokotno na tok vode) nameščena UV svetila. Okvir, na katerem so pritrjena UV svetila mora biti izdelan iz odpornega nerjavnega jekla, na zgornji strani pa običajno služi za preprečevanje uhajanja UV svetlobe iz območja reaktorja. Dobro zasnovan in izdelan modul vsebuje sistem za avtomatsko čiščenje UV svetil, omogoča lahko in hitro zamenjavo UV svetil in stekel brez uporabe posebnih orodij. Modul ali eden od modulov običajno vključuje tudi senzor ali več senzorjev za merjenje obsevanosti z UV svetlobo.



Slika 33: Moduli z UV svetili
 (ITT WEDECO, 2008)

Standardne izvedbe naprav imajo določeno širino. V primeru, ko se širina naprave ne sklada s širino kanala in je naprava preozka, se razlike kompenzirajo z zožitvami iz betona, nerjavnega jekla ipd.



Slika 34: UV reaktor z delujočimi svetili –
 ČN Radovljica
 (MAK CMC, 2006)

Ostala oprema, ki podpira delovanje UV reaktorja, predvsem pa zagotavlja ustrezen nivo vode v kanalu, običajno vsebuje:

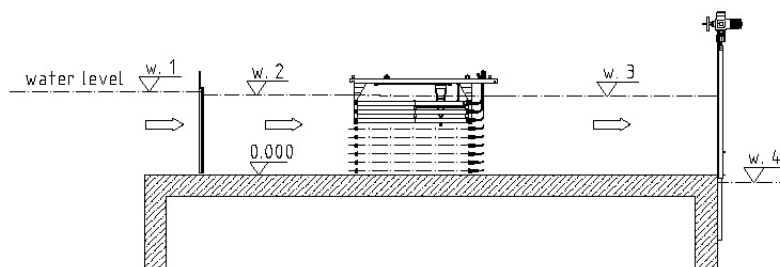
- Hidrostatično sondo za merjenje minimalnega nivoja vode – v primeru, da gladina vode v kanalu pade pod nivo, ki ga določa sonda (da so vsa UV svetila prekrita z vodo), se prekine električni tok med elektrodama sonde, nakar nadzorni sistem izključi UV svetila in tako sistem ščiti pred suhim tekom oz. preprečuje njegov zagon pred vzpostavitvijo primerne nivoja vode.

- Sonda za merjenje nivoja vode, ki preko nadzora zapornice vzdržuje ustrezen, čim bolj stalen nivo vode v kanalu.
- Zapornico ali prelivni žleb za regulacijo nivoja vode v UV kanalu, ki vzdržuje takšen nivo, da so UV svetila vedno primerno potopljena. V primeru vgradnje fiksnega prelivnega žleba, sonda za merjenje nivoja vode ni v funkciji regulacije nivoja.

Hidravlične izgube v UV reaktorjih s prosto gladino lahko ponazorimo v vzdolžnem profilu. Na Sliki 36 je prikazan tipičen vzdolžni profil UV reaktorja v kanalu z hidravličnim umirjevalnim elementom, moduli z UV svetili in zapornico. Lokalne hidravlične izgube na posameznih elementih so odvisne od njihove zasnove. Običajno so pri nazivnih pretokih naprav reda velikosti do 5 cm za hidravlične umirjevalne elemente (ko so normalno prehodni oz. niso zamašeni s suspendiranimi delci) ter do nekaj cm za module, odvisno od zasnove in izvedbe sistema, razporeditve UV svetil ter hidravličnih obtežb. Zaželeno oz. zahtevano je, da sta zapornica ali prelivni žleb v funkciji ostrorobega popolnega ozračenega preliva, tako da dolvodni tok vode nima vpliva na hidravlične razmere v reaktorju ali celo nadalje gorvodno.



Slika 35: Sonda za merjenje nivoja vode (zgoraj) in sonda za zaščito pred suhim tekom (spodaj) – ČN Radovljica (MAK CMC, 2006)



Slika 36: Tipični vzdolžni profil UV reaktorja v kanalu (ITT WEDECO, 2008)

9.2 TLAČNI UV REAKTORJI

Tlačni reaktorji so večinoma valjaste oblike s poudarjeno dimenzijo v smeri vzdolžne osi. Prav tako so v vzdolžni smeri so razporejena UV svetila. Obstajajo tudi izvedbe, ki so npr. oblike prizme in pri katerih so svetila razporejena v obeh pravokotnih prečnih smereh na os reaktorja. Na vstopni in izstopni strani je reaktor ustrezno (s prirobnicami, navojnimi priključki idr.) spojen s cevovodom.

Tlačni reaktorji so izdelani iz nerjavnega jekla, razen v primerih agresivnih tekočin, ko so izdelani npr. iz odpornega polimernega materiala ipd. Z notranje strani je lahko reaktor površinsko še posebej obdelan, da je dosežena čim večja gladkost in obstojnost površine. Posebne izvedbe vsebujejo tudi optične reflektorje, s pomočjo katerih se svetloba usmerja na želeno mesta v reaktorju. Na reaktorjih so običajno nameščeni še posebni odzračevalni in vzorčevalni ventili ter ventili za praznjenje in čiščenje. Za merjenje obsevanosti reaktorji vključujejo tudi priključek za senzor. Zaradi možnega nabiranja mineralnih in mikrobioloških oblog na steklih UV svetil se, kjer je le možno, priporoča vgradnja avtomatskega sistema za čiščenje med obratovanjem.



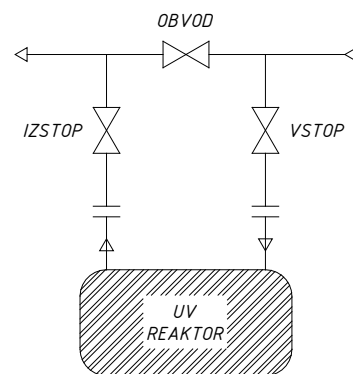
Slika 37: Primer usmerjevalnika toka v tlačnem reaktorju (ITT WEDECO, 2008)

Za ustvarjenje kar najbolj optimalnih hidravličnih pogojev se uporabljajo posebni elementi za usmerjanje toka, kot je npr. prikazano na Sliki 37. Vsako spreminjanje tokovne slike posledično prinaša dodatne hidravlične izgube. Poleg pretoka so geometrija reaktorjev, izvedba vtoka/iztoka, število in razporeditev UV svetil ter uporaba dodatnih hidravličnih elementov tisti parametri, ki najbolj vplivajo na hidravlični profil sistema. Hidravlične izgube v tlačnih UV reaktorjih proizvajalci podajajo v obliki diagramov Pr/Q /projektiranju sistemov UV reaktorje zato lahko upoštevamo kot znano lokalno izgubo glede na takšno krivuljo in dodatno modeliranje ni potrebno.

Tlačni reaktorji morajo biti priključeni na takšno cevovodno omrežje, kjer je s tehničnimi ukrepi preprečeno preveliko in nenadzorovano nihanje tlakov ter pretokov ali vodni udar. Vgradnja reaktorja in priključitev na cevovod mora biti izvedena tako, da je ustrezno statično podprt ter da na reaktor ne delujejo zunanje mehanske sile (napetosti) s strani priključnih cevovodov. Pred vstopom vode v reaktor in za izstopom iz njega, ki ga običajno predstavljata prirobnici standardnih dimenzij ali navojni priključek (pri manjših sistemih), se mora nahajati hidravlični zaporni element (ventil, zasun ali loputa), ki omogoča izločitev iz omrežja in posege na reaktorju.

V primeru posegov v UV sistem je mimo reaktorja potrebno zagotoviti obvod (by-pass), kot je prikazano na Sliki 38. Pri izločevanju UV reaktorja iz mreže, zaradi ščitenja pred nihanji tlakov, praviloma najprej zapremo izstopni zaporni element, nato vstopnega, šele nato vzpostavimo obtok mimo reaktorja.

Pri uporabi tlačnih reaktorjev je potrebno paziti, da je cevovod pred UV reaktorjem ustrezno odzračen. Poleg vplivov na hidravlično prepustnost in obremenitve pri nihanju tlakov, mešanica zraka in vode v UV reaktorju povzroča "motnost" in zmanjšuje učinkovitost.



Slika 38: Shema priključitve tlačnega UV reaktorja na cevovodno omrežje

9.3 POTOPNA UV SVETILA

Obstajajo tudi potopna UV svetila (angl. *immersible UV lamps*), namenjena dezinfekciji tekočin npr. v šaržnih reaktorjih. Le-ta se v primeru polnjenja/praznjenja iz reaktorja odstranijo in se za potrebe dezinfekcije ponovno namestijo. Ponekod se uporabljajo za dezinfekcijo manjših vodnih rezervoarjev. Poleg dezinfekcijskega učinka v vodi sočasno dezinficirajo okoliške površine ali pa so namenjene izključno temu. Uporabljajo se tudi za dezinfekcijo zraka. Predvsem je njihova uporaba namenjena manjšim prostorninam oz. površinam.

9.4 ČIŠČENJE STEKEL UV SVETIL

Vode z visoko vsebnostjo raztopljenih mineralnih snovi v stiku s steklenimi cevmi, ki obdajajo UV svetila, lahko tvorijo trdne netopne oborine. Površine stekel okoli UV svetil imajo lahko visoko temperaturo, še posebej srednjetačna. Topnost kalcijevega karbonata s temperaturo pada, zato se ob stiku z vročo površino UV svetil na njih izloči v trdni obliki. Na steklih UV svetil so sicer najbolj pogoste karbonatne obloge s kalcijem in magnezijem, železovi in manganovimi spojinami (oksidi, kompleksi,...), sulfidi, sulfati, trdne oborine z organskimi snovmi,... V primeru, da na steklih UV svetli pride do opisanih pojavov, se zmanjša količina prepuščene UV svetlobe, kar negativno vpliva na dezinfekcijski učinek. Ker takšne obloge praktično ne prepuščajo UV svetlobe, lahko predstavljajo substrat, na katerem se sčasoma naberejo mikrobiološke obloge ali biofilm.

Zaradi naštetega je potrebno stekla UV svetil občasno čistiti. Pogostost čiščenja je odvisna od fizikalno-kemijske in mikrobiološke sestave vode v stiku s svetili, njene predhodne obdelave in je zato vnaprej ni mogoče natančno določiti. Splošno velja, da je pri dezinfekciji pitne vode interval čiščenja načeloma lahko daljši, ker je voda fizikalno-kemijsko in mikrobiološko manj obremenjena. Ni neobičajno, da se svetila avtomatsko čistijo nekajkrat vsako uro, lahko pa

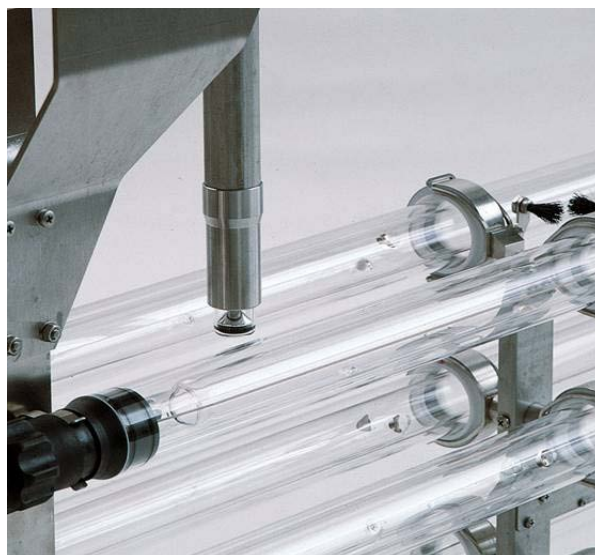


Slika 39: Vpliv avtomatskega čiščenja na čistočo stekel UV svetil

zgolj nekajkrat dnevno. Vsekakor je čiščenje stekel UV svetil potrebno najkasneje takrat, ko je opaziti, da pri normalno delujočih UV svetilih senzor meri obsevanost, ki pada proti meji projektne vrednosti. Pri ostalih nespremenjenih parametrih znotraj predvidenega okvira, je postopno padanje obsevanosti znak, da je potrebno čiščenje stekel UV svetil.

V primeru občasnega čiščenja stekel UV svetil je potrebno UV reaktor ustaviti, iz njega izpustiti vodo in odstraniti stekla. To je zaradi zasnove običajno lažje pri reaktorjih s prosto gladino, saj lahko module iz kanala odstranimo. Sledi ročno čiščenje stekel s čistilom ali kislino. Nato je potrebno reaktor ponovno pripraviti na obratovanje. V času čiščenja reaktorji ne obratujejo, zato je zaželeno, da je takšnih posegov čim manj. V ta namen se v reaktorjih uporabljajo sistemi za avtomatsko čiščenje stekel UV svetil z električnim ali pnevmatskim pogonom, ki v nastavljenem intervalu s hodom čistilnih obročkov po površini stekla odstranjujejo morebitne obloge.

Klasični sistem za avtomatsko čiščenje stekel UV svetil sestavljajo čistilni obročki iz odpornega polimernega materiala (npr. PTFE – komercialno Teflon ali Viton) in mehanizem, ki le-te vleče preko stekel. Na ta način se zagotavlja boljša prepustnost stekla za UV svetlobo, kar pomeni boljši dezinfekcijski učinek oz. za isti dezinfekcijski učinek naprava porabi manj energije. Poveča se zanesljivost delovanja, še posebej v sistemih, kjer je več suspendiranih in raztopljenih snovi. Sistemi za avtomatsko čiščenje ne odstranijo vseh oblog do popolnosti, vsekakor pa bistveno podaljšujejo intervale med ročnimi čiščenji, ko je potrebno UV sistem ustaviti.



Slika 40: Sistem za čiščenje stekel UV svetil s čistilnimi obročki in krtačkami za čiščenje senzorja (ITT WEDECO, 2008)

10. EKONOMIKA UV SISTEMOV IN PRIMERJAVA Z DRUGIMI SREDSTVI

V tem poglavju predstavljamo podrobnejšo analizo stroškov v 15-letnem življenjskem ciklu UV sistema. V grobem ocenjujemo stroške različnih tehnologij, pri čemer smo izhajali iz podatkov tržnih sistemov in se naslanjali na izkušnje strokovnjakov iz prakse.

10.1 PORABA ENERGIJE

Poraba energije nosi zajeten delež stroškov obratovanja UV sistemov. Najprej je, na podlagi vrste (pitna, odpadna,...) in lastnosti vode (UV prepustnost, vsebnost suspendiranih in raztopljenih snovi,...) ter zaželenih učinkov, potrebno izbrati ustrezno UV dozo. Nadalje moramo določiti primerno tehnologijo in zasnovo UV reaktorja s številom UV svetil. Pri takšnih robnih pogojih lahko vložek energije na m³ vode oz. specifično porabo energije E'_{UV} [kWh/m³] približno ocenimo z naslednjim izrazom:

$$E'_{UV} = \frac{n \cdot \Phi_s \cdot \eta_s + \Phi_p}{Q_m}, \quad (49)$$

kjer je n število UV svetil, Φ_s [kW] moč napajanja posameznega svetila, η_s električna učinkovitost svetil in napajalnih enot, Φ_p [kW] poraba moči ostalih delov sistema in Q_m srednja vrednost pretoka skozi UV reaktor [m³/h].

Osnovni in največji porabnik električne energije pri UV sistemih so UV svetila oz. napajalne enote. Poleg njih je napajanje potrebno še za:

- sisteme za čiščenje UV svetil (kompresorji, elektromotorji),
- hlajenje oz. ventilacijo elektrooparic, kjer nastaja veliko "odpadne" toplote,
- pogon elementov za hidravlično regulacijo (npr. zapornic),
- elemente za nadzor in krmiljenje – senzorje, strojno-uporabniški vmesnik,...

Specifična poraba srednjetačnih UV svetil je zaradi njihovih lastnosti do nekajkrat večja kot v primeru nizkotlačnih. Specifično porabo energije lahko zmanjšujejo posebni krmilniki, ki preko UV senzorjev in merilnikov pretoka stalno merijo/izračunavajo UV dozo v reaktorju. V primeru, ko je potrebna UV doza presežena, sistem lahko zmanjša moč delovanja UV svetil in tako zmanjša porabo energije.

10.2 ANALIZA STROŠKOV V ŽIVLJENJSKEM CIKLU UV SISTEMA

Po podatkih in nekajdesetletnih izkušnjah enega izmed najbolj uveljavljenih proizvajalcev UV sistemov, ITT WEDECO, povprečen UV sistem v 15-letni amortizacijski dobi izkazuje naslednje približne deleže v stroških življenjskega cikla:

- investicija v opremo (stroški amortizacije) – 30 %,
- stroški obratovanja, vzdrževanja in servisiranja (razen UV svetil) – 30 %,
- UV svetila – 40 %.

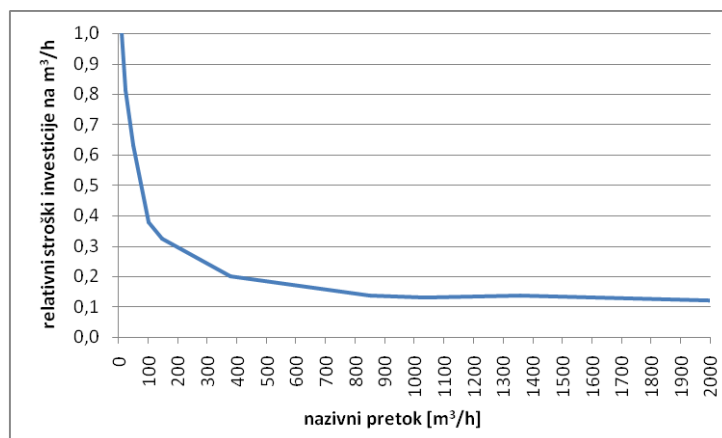
Da bi lahko vrednotili UV sisteme v ekonomskem smislu, moramo vsaj v osnovi poznati bistvene stroške, ki nastanejo v njihovem življenjskem ciklu. Za analizo smo izbrali "tipično" pitno in odpadno vodo ter glede na velikost nazivnih pretokov odgovarjajoče sisteme proizvajalca ITT WEDECO. Zaradi primerljivosti smo izbrali tlačne UV reaktorje. Opravljena analiza velja pri uporabi nizkotlačnih UV svetil. Upoštevali smo, da se pri različnih pretokih uporablja različno število UV svetil z različno pričakovano življenjsko dobo, ki narekuje število zamenjav. Ocenili smo naslednje stroške:

- investicijo v vzpostavitev sistema – UV reaktor, ustrezne cevovode, armature, material za podpiranje, elektrotehnična dela (priklop električnih povezav) in montažo,
- stroške električne energije po ceni 0,1 €/kWh za obratovanje pri nazivnem pretoku,
- stroške zamenjave UV svetil, zamenjave napajalnih enot in UV senzorjev ter stroške servisnih posegov in čiščenja stekel UV svetil.

Vse stroške smo prevedli na m^3 obdelane vode v 15-letnem obdobju pri stalnem obratovanju. Ker redki sistemi obratujejo pod nazivnimi hidravličnimi obtežbami, bi morali za natančnejšo oceno nekega sistema skupne stroške deliti še z dejanskim hidravličnim izkoristkom naprave η_H . Analiza upošteva trenutno dostopno tehnologijo, ki stalno napreduje, zato morda v nekaj letih ne bo več aktualna.

10.2.1 PITNA VODA

Izbrali smo pitno vodo z UV prepustnostjo $T_{Icm} = 96\%$ in projektno dozo $D = 40 \text{ mJ/cm}^2$. Analizo smo izvedli na pretokih med $12 \text{ m}^3/\text{h}$ in $2000 \text{ m}^3/\text{h}$, čemur bi ustrezalo 10 različnih tipov UV sistemov. Upoštevane so osnovne izvedbe naprav, brez sistemov za avtomatsko čiščenje in računalniškega krmiljenja izhodne moči UV svetil, ki sicer pomenita večjo investicijo, a manjšo porabo moči in daljše intervale med čiščenji. Rezultate podajamo v relativnih zneskih, saj se tržne razmere in cene stalno spreminjajo, za razmerja pa lahko pričakujemo, da se bodo manj spreminjala.

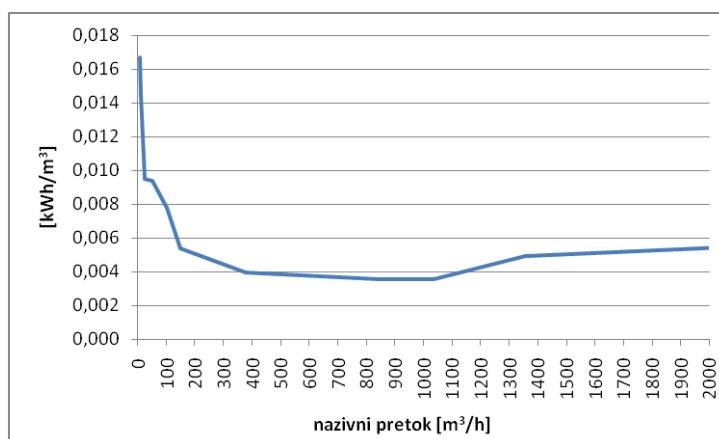


Grafikon 5: Relativni stroški investicije v UV reaktor za pitno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

Grafikon 5 prikazuje relativne stroške investicije na m^3/h v UV sistem z izbranim nazivnim pretokom ($1,0 = 12 \text{ m}^3/\text{h} \approx 5.000\text{--}6.000 \text{ €}$). Vidimo lahko, da stroški investicije na m^3/h nazivnega pretoka padajo z naraščanjem nazivnega pretoka. Razlog gre iskati v tem, da so stroški tehnološke opreme relativno večji pri manjših pretokih. Naslednji bistven strošek predstavlja porabljen energija. Grafikon 6 prikazuje, kako se gibljejo stroški na m^3 obdelane vode pri različnih nazivnih pretokih. Opazimo lahko, da je poraba energije relativno visoka pri pretokih pod $100 \text{ m}^3/\text{h}$ in še posebej pod $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

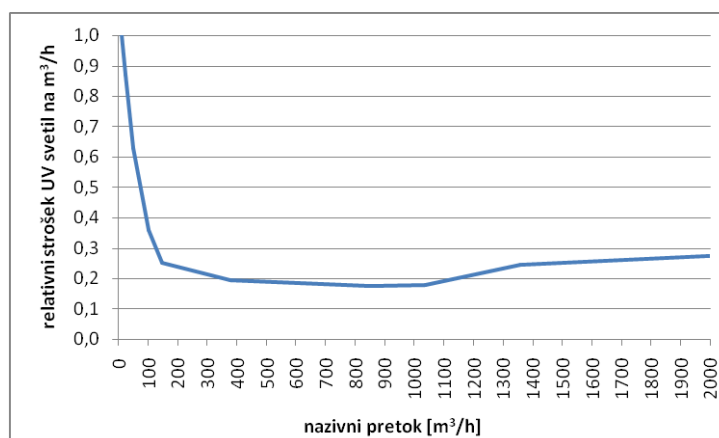
Pri teh pretokih se večinoma uporabljajo nizkotlačna UV svetila z nizko intenziteto. Njihova izhodna moč v UV-C spektru je manjša (kot pri nizkotlačnih svetilih z visoko intenziteto), zato je potrebnih več svetil na enoto pretoka, kar se v končni fazi pozna na porabi energije.

Opazimo, da z naraščanjem pretoka pada specifična poraba energije. Ta se nekoliko poveča pri pretokih nad 1000 m³/h, verjetno zaradi vpliva večjega premera reaktorja in večjega števila svetil v reaktorjih pri večjih pretokih, ko je specifični pretok na posamezno svetilo manjši. Slednji je odvisen od konstrukcije reaktorjev, njihove hidravlične oblike ter razporeditve svetil znotraj njih.



Grafikon 6: Specifična poraba električne energije UV sistema za pitno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

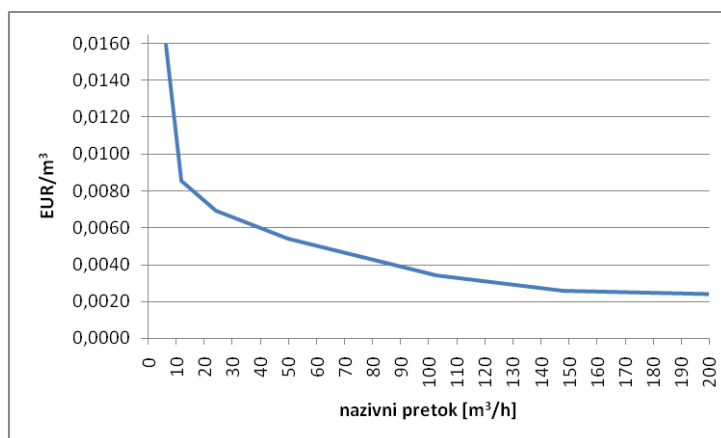
Skladno z navedenimi ugotovitvami se porazdeljujejo tudi relativni stroški menjave UV svetil in čiščenja stekel, ki jih obdajajo (Grafikon 7; 1,0 = 12 m³/h). Pri nižjih pretokih (< 100 m³/h) so uporabljena nizkotlačna svetila z nizko intenziteto, ki so sicer cenejša a jih potrebujemo več na enoto pretoka. Pri pretokih nad 1000 m³/h relativni stroški naraščajo zaradi naraščanja števila UV svetil na enoto pretoka.



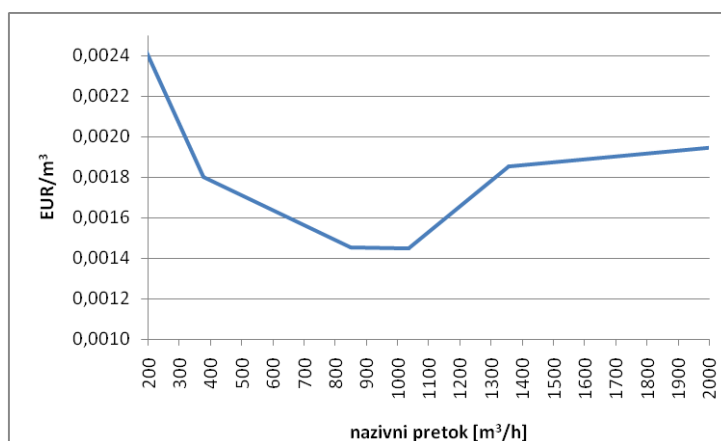
Grafikon 7: Relativni stroški zamenjave UV svetil in čiščenja stekel pri sistemu za pitno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

Skupne stroške na m^3 obdelane vode v 15-letni amortizacijski dobi predstavljamo na Grafikonu 8 (pretoki med $12 m^3/h$ in $200 m^3/h$) in Grafikonu 9 (pretoki med $200 m^3/h$ in $2000 m^3/h$). Cena dezinfekcije pitne vode smo dobili tako, da smo sešteli vse obravnavane stroške, ki smo jih prevedli na m^3 vode v 15 letih. Ugotavljamo, da stroški UV sistemov padajo z naraščanjem pretokov do okoli $1000 m^3/h$, ko se povečajo stroški, povezani z menjavo UV svetil, napajalnih enot in senzorjev.

Pri sistemih s pretoki pod $100 m^3/h$ in še posebej pod $20 m^3/h$ je očitno, da so relativni stroški zelo visoki, kar v mnogih primerih daje prednost drugim dezinfekcijskim sredstvom, še posebej kloru, katerega uporaba pri teh pretokih je še posebej ekonomična. Konkurenčnost UV tehnologije nato narašča z naraščanjem pretokov, saj se stroški na m^3 znižujejo. Zaradi velikega števila UV svetil pri reaktorjih s pretokih $> 1000 m^3/h$, delež stroškov njihove zamenjave nekoliko naraste in podraži m^3 obdelane vode.



Grafikon 8: Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m^3 pitne vode pri nazivnih pretokih od $12 m^3/h$ do $200 m^3/h$



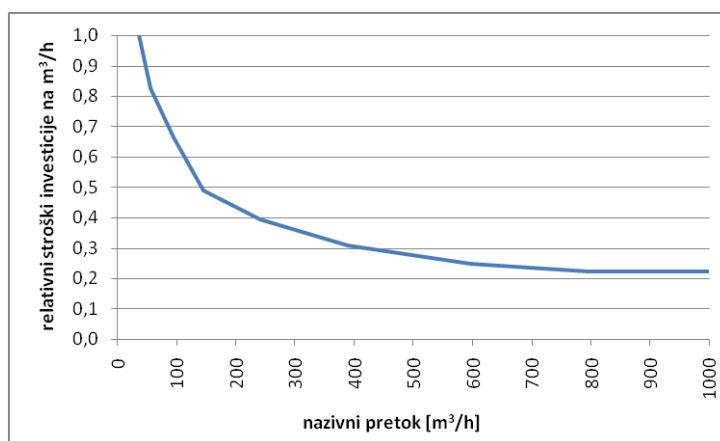
Grafikon 9: Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m^3 pitne vode pri nazivnih pretokih od $200 m^3/h$ do $2000 m^3/h$

10.2.2 ODPADNA VODA

Za odpadno vodo je značilna nižja prepustnost za UV svetlobo in običajno nižja doza. Za stroškovno analizo smo izbrali $T_{Icm} = 55 \%$ in $D = 25 \text{ mJ/cm}^2$. Zaradi večje obremenjenosti odpadne vode z suspendiranimi in raztopljenimi snovmi smo upoštevali stroške investicije v reaktor z sistemom za avtomatsko čiščenje stekel UV svetil, vendar brez računalniškega krmiljenja izhodne moči. V analizi je bilo upoštevanih 9 različnih reaktorjev pri pretokih med $10 \text{ m}^3/\text{h}$ in $1000 \text{ m}^3/\text{h}$.

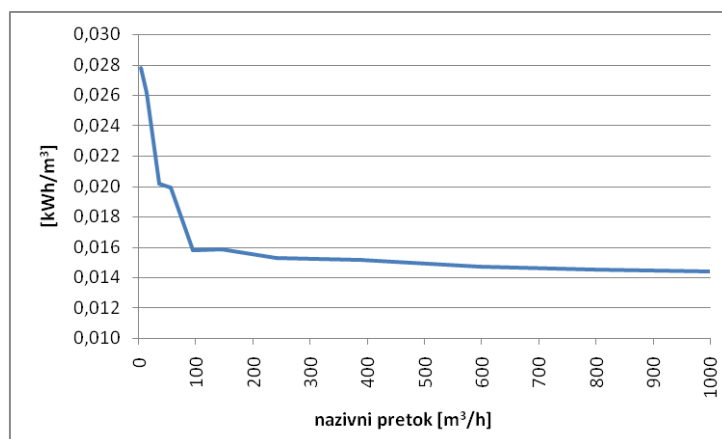
Zaradi nižje prepustnosti za UV svetlobo imajo reaktorji za odpadno vodo bolj na gosto razporejena UV svetila. Pri pretoku $150 \text{ m}^3/\text{h}$ zadostuje pri pitni vodi že reaktor z dvema svetiloma, pri odpadni vodi pa za isti pretok potrebujemo šest svetil istega tipa. Pri pretoku $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ za pitno vodo zadostuje reaktor z desetimi svetili, za odpadno vodo pa jih potrebuje kar 40. Pri tem je prostornina reaktorja za odpadno vodo približno za tretjino do polovico manjša. Stroški investicije pri reaktorjih za odpadno vodo so pri istih nazivnih pretokih zato dražji za faktor 2–2,5.

Grafikon 10 prikazuje, kako relativni stroški investicije na m^3/h , podobno kot pri pitni vodi, padajo z naraščanjem nazivnih pretokov ($1,0 = 36 \text{ m}^3/\text{h} \approx 25.000 \text{ €}$). Pri tem je, zaradi vpliva večjega števila UV svetil v reaktorju, padanje počasnejše kot pri pitni vodi.



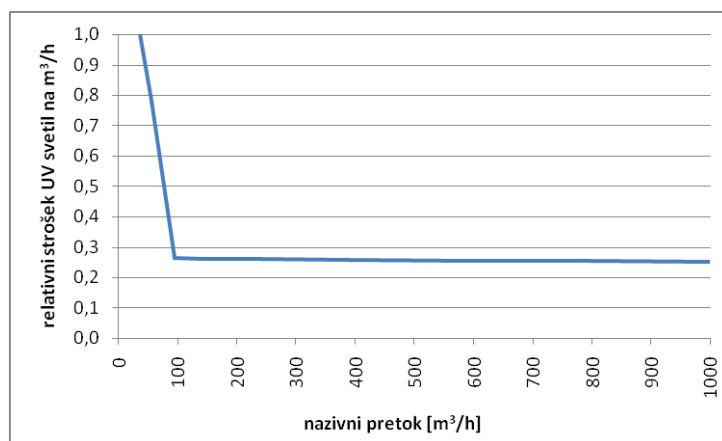
Grafikon 10: Relativni stroški investicije v UV reaktor za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

Do nazivnih pretokov okoli 70 m³/h se pri tej vrsti reaktorjev uporabljajo nizekotlačna svetila z nizko intenziteto, za večje pretoke pa nizekotlačna svetila z visoko intenziteto. S tem lahko razložimo, zakaj je specifična poraba pri nižjih pretokih občutno večja kot pri višjih. Na Grafikonu 11 je prikazana specifična poraba električne energije na m³ obdelane vode in je pri istih nazivnih pretokih za okoli 3–4 večja kot pri pitni vodi.



Grafikon 11: Specifična poraba električne energije UV sistema za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

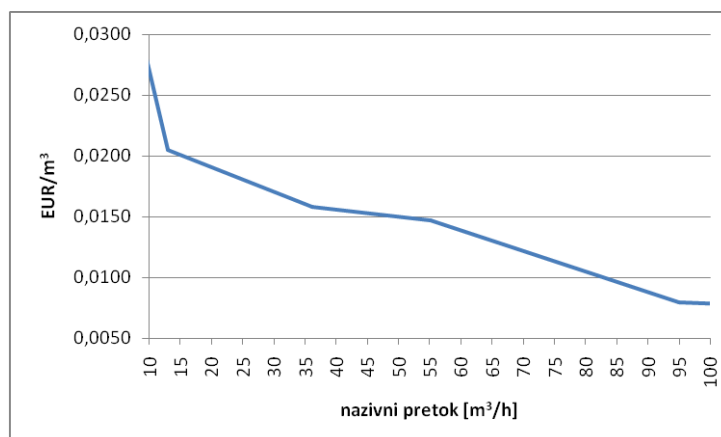
Relativni stroški zamenjave UV svetil in čiščenja stekel se porazdeljujejo podobno, kot pri pitni vodi. Absolutni stroški so, zaradi večjega števila UV svetil, okoli 2–3 krat višji. Tako kot pri porabi energije je tudi tu viden vpliv tipa svetila na stroške njegove zamenjave in vzdrževanja. Nizekotlačnih svetil z nizko intenziteto potrebujemo več



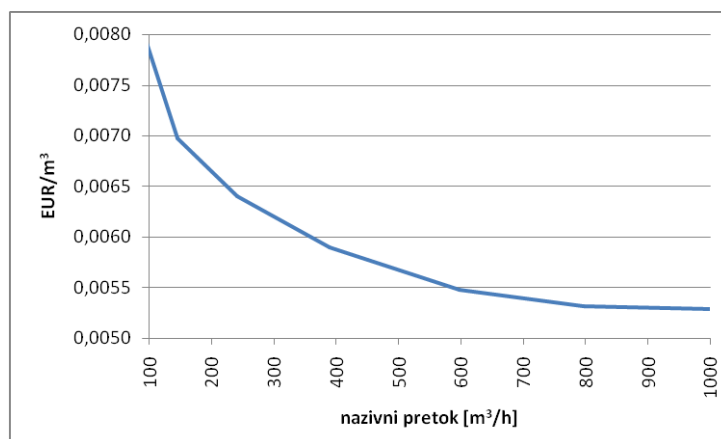
Grafikon 12: Relativni stroški zamenjave UV svetil in čiščenja stekel pri sistemu za odpadno vodo v odvisnosti od nazivnega pretoka

in imajo krajšo življenjsko dobo, zato je relativni strošek njihove zamenjave večji. Vprašanje je, zakaj torej ne uporabiti kar nizekotlačnih svetil z visoko intenziteto? Slednja za dobro delovanje potrebujejo dovolj veliko oblačno dolžino (razdaljo med elektrodama), kar bi v primeru manjših reaktorjev predstavljalo prevelik vpliv na zasnovo. Njihova izhodna moč na enoto dolžine toliko večja, da bi potrebovali reaktor z malo svetili, kar ni ugodno za polje obsevanosti in zagotavljanje dezinfekcijskih učinkov. Namesto tega je bolje uporabiti več manj zmogljivih svetil z nizko intenziteto in jih razporediti bolj na gosto.

Na koncu analize stroškov smo zopet sešteli vse obravnavane stroške na m^3 vode v 15 letih. Grafikon 13 prikazuje ceno dezinfekcije m^3 odpadne vode pri pretokih od $10 m^3/h$ do $90 m^3/h$, Grafikon 14 pa pri pretokih od $100 m^3/h$ do $1000 m^3/h$. V primerjavi s pitno vodo lahko zasledimo, da je pri istih pretokih cena dezinfekcije odpadne vode povečini od 3–4-krat dražja. Vidimo lahko, da cena dezinfekcije m^3 odpadne vode pada z naraščanjem nazivnih pretokov.



Grafikon 13: Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m^3 pitne vode pri nazivnih pretokih od $10 m^3/h$ do $100 m^3/h$



Grafikon 14: Cena dezinfekcije z UV svetlobo na m^3 pitne vode pri nazivnih pretokih od $100 m^3/h$ do $1000 m^3/h$

10.2.3 OPOMBE PRI ANALIZI STROŠKOV

Analizo stroškov smo izvedli pri danih parametrih za dezinfekcijo (T_{Icm} , D). Uporabili smo predpostavke glede opreme, stroškov materiala in dela. Pri odpadni vodi smo analizirali dezinfekcijo v tlačnih reaktorjih in ne pri toku s prosto gladino. Opozorimo, da gre pri analizi za oceno stroškov, ki izhajajo iz dejanskih naprav, a rezultati ne veljajo splošno v vseh primerih. Če bi spremenili enega od predpostavljenih parametrov, bi lahko dobili zelo različne slike. Tehnologija stalno napreduje, zato pričakujemo izboljšave pri stroških energije in daljšanju življenjske dobe UV svetil, kar bo imelo za posledico manj menjav in posegov ter manjše stroške.

10.3 PRIMERJAVA Z DRUGIMI TEHNOLOGIJAMI PRIMARNE DEZINFEKCIJE

Izbira tehnologije, zasnova uporabljenih sistemov, način obratovanja, vzdrževanja in servisiranja so temeljni parametri, s katerimi ocenjujemo nek sistem. Dober sistem je takšen, ki dosega zastavljene cilje pri čim nižjem vložku sredstev, materiala in energije, ob tem pa predstavlja optimalno izbiro v primerjavi s konkurenčnimi sistemi znotraj tehnologije in med različnimi tehnologijami. Naštejmo nekaj slabosti UV tehnologije na operativnem nivoju:

- zahteva relativno drago in tehnološko dovršeno opremo,
- za dezinfekcijo porablja električno energijo,
- stroški potrošnega materiala (UV svetila) so visoki.

Vendar moramo na tem mestu opozoriti na določena dejstva, zaradi katerih uporabe UV tehnologije ne gre vnaprej izključiti na podlagi navedenega. Pri odločitvi, katero dezinfekcijsko oz. oksidacijsko sredstvo uporabiti, ima UV svetloba namreč pred drugimi sredstvi nekatere prednost:

- V vodo z UV svetlobo ne vnašamo dodatnih snovi ter ne vplivamo na fizikalno-kemične in organoleptične lastnosti vode.
- Praktično ne tvori nevarnih stranskih produktov.
- Ne tvori prebitka (reziduala) – včasih je to lahko zaželeno, predvsem npr. v tehnoloških procesih.
- Njena uporaba ne vpliva na fizikalno-kemijska ravnotežja v vodi – ne povzroča korozije v cevovodih, armaturah in drugi opremi.
- Pri uporabi ni potrebno skladiščenje nevarnih kemikalij in rokovanje z njimi.
- V vodi se ne koncentrira, ne zastaja, ne tvori prebitkov in ostankov, ki bi jih bilo potrebno odstranjevati.
- Proizvodnja dezinfekcijskih sredstev (sinteza, elektroliza, generacija), transport do mesta uporabe in skladišče prav tako zahtevajo vložke energije in finančnih sredstev.
- Uporaba kemičnih dezinfekcijskih sredstev zahteva izgradnjo posebnih objektov in naprav za skladiščenje, doziranje, merjenje in regulacijo.

- Plinski klor in ozon sta zelo nevarni snovi, v bistvu strupa, pri katerih je zahtevana še posebna previdnost pri rokovanju.
- Membranski postopki so s stališča opreme, režima obratovanja, regulacije in krmiljenja procesa zelo dragi in zahtevni, zato njihova uporaba za namene primarne dezinfekcije ni vedno upravičena.

10.3.1 DEZINFEKCIJA S SREDSTVI NA OSNOVI KLORA

Dezinfekcija s klorom je še vedno najbolj razširjena metoda dezinfekcije pitne vode. Uporabo klora v zadnjih desetletjih zmanjšuje zavedanje nevarnosti tvorjenja stranskih produktov (npr. trihalometanov – THM, halogeniranih očetnih kislin – HAA,...) ob prisotnosti organskih snovi v vodi. Prav slednje so največkrat omejitveni dejavnik pri izbiri dezinfekcijskega sredstva. Kljub vsemu velja, da je ne glede na pomanjkljivosti klor rešil več življenj, kot jih je ogrozil. Pri dezinfekciji vode nastopa:

- kot disociirana oblika hipoklorove kisline (v odvisnosti od pH vrednosti sta v ravnotežju HOCl in OCl^- – hipokloritni ion) pri dodajanju plinskega klora (Cl_2) in natrijevega hipoklorita (NaOCl),
- kot klor dioksid (ClO_2) in
- v vezani obliki kot kloramini, ki se pri nas redkeje uporabljajo.

Uporaba plinskega klora se, zaradi strupenih lastnosti klora in zato potrebnih posebnih objektov in naprav za skladiščenje in doziranje, počasi zmanjšuje. Razširjena je uporaba natrijevega hipoklorita, ki je enostavna in cenovno zelo atraktivna. Uporabo klor dioksida, kljub prednostim zaradi nižjega potenciala tvorjenja stranskih produktov in dobrega učinka proti tvorjenju biofilma v ceveh, nekoliko zavirajo veliki stroški investicij.

Tehnologija je z leti tako napredovala, da klora do čistilne naprave ni potrebno več pripeljati v obliki, ki je neposredno primerna za doziranje. Namesto tega so se razvili sistemi za elektrolitsko proizvodnjo natrijevega hipoklorita iz čiste soli (NaCl) na licu mesta ali za generacijo klor dioksida iz raztopine natrijevega klorata (NaClO_2) in klorovodikove kisline (HCl). Njihova največja pomanjkljivost so relativno visoki stroški investicije v takšno opremo pri nizkih pretokih.

Ena izmed prednosti sredstev na osnovi klora je njihov trajen rezidualen učinek. Ker tako fizikalne metode odstranjevanja mikroorganizmov (npr. ultrafiltracija) kot UV svetloba običajno potrebujejo vsaj minimalno rezidualno dezinfekcijo, se klor v eni od oblik običajno še vedno uporablja skoraj na vsaki čistilni napravi.

Za primer vzemimo čistilno napravo za pitno vodo pri pretokih $36 \text{ m}^3/\text{h}$. Primerjamo doziranje natrijevega hipoklorita in UV svetlobo. Investicija v ustrezni UV reaktor z nizkotlačnimi UV svetili (npr. ITT WEDECO, tip BX30), vključno s potrebnimi cevovodi, hidravličnimi zapornimi elementi (ventili, zasuni), elektrotehničnimi deli, stroški montaže in zagona naprave ter projektno in tehnično dokumentacijo, bi znašala okoli 12.000 €. Na drugi strani bi investicija v dozirno postajo za doziranje natrijevega hipoklorita (npr. MAK CMC, tip PRODOS 7) stala okoli 3.000 €, vključno z montažo, prišteti pa moramo še stroške merilno regulacijske opreme (analizator prostega klora cca. 2500 €). Predpostavimo, da doziramo cca. $0,5 - 1 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ NaOCl}$, ki stane $0,4 \text{ €/kg}$, torej bi stroški kemikalije znašali okoli $0,002 - 0,004 \text{ €/m}^3$. Pri doziranju NaOCl dozirna črpalka porabi največ okoli 50 W moči, to je okoli $0,0014 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Poraba električne energije UV sistema bi znašala $0,01 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Pri ceni električne energije $0,1 \text{ €/kWh}$ bi stroški energije dozirne črpalke znašali $0,00014 \text{ €/m}^3$, pri UV sistemu pa $0,001 \text{ €/m}^3$. Če upoštevamo, da UV sistemi zahtevajo še relativno drago menjavo svetil, cenejše tehnologije v tem primeru ni težko določiti, tudi ob enkratni ali dvakratni menjavi dozirne črpalke in analizatorja prostega klora v amortizacijski dobi (15 let).

Pri večjih nazivnih pretokih čistilne naprave bi pri uporabi natrijevega hipoklorita postalo vprašanje njegovo skladiščenje (zaradi disociacije in počasnega razpada se zmanjša učinkovitost ter poveča poraba). Sistemi za proizvodnjo natrijevega hipoklorita z elektrolizo na licu mesta bi zato postajali tržno vedno bolj zanimivi. Pri pretokih okoli $500 \text{ m}^3/\text{h}$ bi investicija (skupaj z predelavami, montažo,...) v takšen sistem bila okoli 30.000 € (npr. GRUNDFOS ALLDOS, tip SELCOPERM 1000), v UV sistem z nizkotlačnimi svetili pa okoli 42.000 € (ITT WEDECO, tip BX80). Sistemi za elektrolitsko proizvodnjo hipoklorita porabijo okoli 4,5 kW električna energije na kg proizvedenega NaOCl, kar bi pri dozi $1 \text{ g}/\text{m}^3$ znašalo $0,0045 \text{ kWh}/\text{m}^3$. UV sistem te velikosti porabi okoli $0,004 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

Posebnih zaključkov iz te primerjave sicer ne moremo delati, vidimo pa lahko, da vsaj s stališča investicije in stroškov energije, konkurenčnost UV sistemov proti kloriranju narašča z naraščanjem pretokov. Neposredne primerjave med stroški dezinfekcije s sredstvi na osnovi klora in UV svetlobo, razen v strogem ekonomskem pomenu, niso najbolj smiselne. Če gledamo zgolj skozi prizmo stroškov opreme, energije in porabljenega materiala, potem lahko brez daljše razprave odločimo zmagovalca – to je klor v eni od oblik. Vprašanje na drugi strani je, kako oz. s kakšno utežjo [$\text{€}\mu\text{g}$] ovrednotiti možno nastajanje stranskih produktov dezinfekcije in vplive na zdravje, ki jih imajo kemična oksidacijska sredstva, da bi primerjava postala bolj "poštena".

Klor tudi ni pretirano uspešen pri boju proti parazitom (*Cryptosporidium*, *Giardia*), oz. so potrebne doze za njihovo onesposabljanje tolikšne, da bi mogle vplivati na tvorjenje stranskih produktov.

10.3.2 DEZINFEKCIJA Z OZONOM

Ozon se večinoma na čistilnih napravah za pitno vodo uporablja kot oksidacijsko sredstvo (pri koagulaciji, flokulaciji, usedanju, filtraciji) in redkeje kot primarno dezinfekcijsko sredstvo. Kot dezinfekcijsko sredstvo je sicer izjemno učinkovit in atraktiven, ker tvori malo škodljivih stranskih produktov (razen v primeru prisotnosti bromidnega iona). Ozon v vodi zaradi svoje reaktivnosti nima dolgotrajnega rezidualnega učinka, zaradi njegovih strupenih lastnosti pa se po zaključku čiščenja v vodi niti ne sme pojavljati. V primerjavi z UV svetlobo torej tudi dezinfekcija z ozonom potrebuje (minimalno) doziranje sredstev na osnovi klora za sekundarno dezinfekcijo.

Proizvodnja ozona je relativno drag postopek, saj poteka v močnem električnem polju znotraj generatorja. Zrak, iz katerega nastaja ozon mora biti ustrezno pripravljen oz. suh, ali pa je potrebno uporabljati tekoči kisik. Generatorji ozona se močno segrevajo, zato potrebujejo vodo za hlajenje. Vse naštetu zahteva velike vložke energije in sredstev.

Nadalje je ekonomika delovanja generatorjev ozona močno odvisna od želene koncentracije ozona v izstopni mešanici zraka in temperature hladilne vode (hladnejša kot je hladilna voda, boljši je izkoristek). Relativni stroški investicije, energije, priprave zraka (oz. strošek kisika), stroški energije, hladilne vode in vzdrževanja padajo z naraščajočo proizvodno ozona oz. nazivnim pretokom čistilne naprave. Za primerjavo vzemimo, da bi ozon na čistilni napravi z pitno vodo uporabljali zgolj za dezinfekcijo. Običajne koncentracije za dezinfekcijo z ozonom znašajo med $0,5 \text{ g/m}^3$ in 5 g/m^3 , izberemo npr. 2 g/m^3 . Vzemimo, da je nazivni pretok skozi čistilno napravo $500 \text{ m}^3/\text{h}$, torej potrebujemo okoli 1 kg/h ozona. Po podatki proizvajalca sistemov za ozoniranje, ITT WEDECO, znašajo specifični stroški ozona (upoštevaje investicijo, energijo, pripravo zraka oz. kisika, hladilno vodo in vzdrževanje) pri navedenih predpostavkah okoli $3,2 \text{ €/kg}$. Prevedeno na m^3 vode, znašajo stroški dezinfekcije z ozonom pod takšnimi pogoji okoli $0,0064 \text{ €/m}^3$, stroški UV sistema pa okoli $0,0017 \text{ €/m}^3$. Šele, ko bi ozon uporabljali za oksidacijo organskih snovi v predhodnih enotnih postopkih na ČN in bi proizvajali večje količine ozona ter bi manjši del porabili za dezinfekcijo, bi stroški ozona za dezinfekcijo postali sorazmerno nižji.

Dezinfekcija z ozonom je zelo učinkovit postopek. Tudi za oksidacijo v postopkih priprave vode je ozon "idealno" sredstvo zaradi svojega visokega oksidacijskega potenciala in ker tvori relativno zelo malo nevarnih stranskih produktov. Zaradi uporabljene drage tehnološke opreme in obratovalnih stroškov, predvsem energije, se ozon redko uporablja. Še posebej to velja v slovenskem prostoru, kjer povečini relativno zelo dobra kvaliteta surove vode ne zahteva posebnega čiščenja s tako močnimi sredstvi, oz. z drugimi sredstvi dosežemo dovolj dobre učinke, da ozona ne potrebujemo.

10.3.3 ODSTRANJEVANJE MIKROORGANIZMOV Z ULTRAFILTRACIJO

Ultrafiltracija (UF) je metoda fizikalne obdelave vode, pri kateri, poleg skoraj popolnega odstranjevanja suspendiranih snovi, iz vode odstranimo mikroorganizme do zelo visoke stopnje, med drugim 6 log bakterij ali več ter 4 log virusov ali več, kar z UV svetlobo zelo težko ali sploh ne moremo doseči. Voda po ultrafiltraciji ima motnost pod $0,1 \text{ NTU}$ in tako rekoč ne vsebuje patogenih mikroorganizmov in sicer pri popolnoma fizikalnem postopku – odstranjevanju, brez vpletanja kemičnih sredstev v sam postopek precejjanja.

V zadnjem desetletju in pol je privlačnost te tehnologije naraščala, saj so se razvili in preizkusili tržni sistemi in je tehnologija postala širše dostopna. Po začetnem navdušenju in nekritičnem vzpostavljanju te tehnologije kjerkoli je bilo možno (četudi ne potrebno), so izkušnje pokazale, da tudi ta postopek ni čudežen. UF namreč zahteva visoke investicije v opremo, ki je potrebna za njeno učinkovito obratovanje. Porozne membrane oz. votle cevčice, ki sestavljajo medij, preko katerega se voda preceja, je potrebno zaradi zastajanja snovi redno čistiti (cca. vsakih 30 min s čisto vodo in na določeno število takšnih čiščenj tudi čiščenje s kemikalijami – NaOCl in HCl) in dezinficirati. Pri tem nastajajo odpadne vode, ki jih je potrebno nevtralizirati. Da sistem deluje avtomatsko, potrebuje relativno zahtevno in drago merilno-regulacijsko opremo. Pojavlja se tudi vprašanje nadzora nad procesom, saj v primeru poškodbe ene ali več membranskih cevčic v sistem uide koncentrirana nesnaga, vključno z mikroorganizmi.

Poleg tega postopek UF zahteva maksimalne vstopne tlake vode med 1,5 bar in 2 bar s čim manjšimi nihanji. Večji tlaki in/ali njihovo nihanje lahko povzročijo poškodbe UF membran in uhajanje koncentrirane nesnage nadalje v vodooskrbni sistem. S tega stališča UF ne more biti linijski ("in-line") postopek čiščenja. To pomeni, da voda v sistem ne more iti neposredno iz črpališča (zajetja, vodnjaka) preko enotnih postopkov čiščenja, kot je to lahko v primeru filtracije s tlačnimi filtri in večstopenjsko dezinfekcijo (npr. s kemičnimi sredstvi in UV svetlobo). Stroški prečrpavanja vode na ustrezno višino čistilne naprave in zagotavljanje ustreznih tlakov na membranah postopka UF ter nadaljnji dvig tlaka v omrežju (v kolikor sistem ni gravitacijski), skupaj s potrebno opremo, lahko bistveno podražijo obdelavo m³ vode. Nasprotno lahko standardni UV reaktorji obratujejo pri tlakih do 10 bar, manjši sistemi in posebne izvedbe pa celo do 16 bar.

Analiza, ki jo je v svojem Diplomskem delu opravil P. Stopar (2007) je pokazala, da je na realnem primeru čistilne naprave za pitno vodo pri pretokih do 30 m³/h, ki je obremenjena s koliformnimi mikroorganizmi, UF s primarno dezinfekcijo z UV svetlobo in rezidualno dezinfekcijo s klor dioksidom s stališča investicije 3,2-krat dražja, kot filtracija s tlačnimi filtri ter primarno dezinfekcijo z UV svetlobo in rezidualno dezinfekcijo s klor dioksidom.

Nadalje so bili v danem primeru stroški vzdrževanja 7,8-krat nižji ter predvideni letni stroški 3-krat nižji v prid tlačnim filtrom z večstopenjsko dezinfekcijo. Izsledkov te analize ne moremo ekstrapolirati na vse primere, lahko pa ocenimo, da pri takšnih faktorjih med cenami, ekonomsko upravičimo še tako potraten UV sistem za doseganje istih ciljev.

Ultrafiltracija je vsekakor odlična in ustrezna metoda čiščenja vode in odstranjevanja mikroorganizmov povsod tam, kjer parametri vstopne vode in zahteve za izstopno vodo, poleg presoje stroškov in koristi v amortizacijski dobi, izkazujejo njeno upravičenost.

10.3.4 KOMENTAR PRIMERJAVE RAZLIČNIH METOD DEZINFEKCIJE

Neposredne primerjave naštetih tehnologij niso najbolj posrečene, saj denimo ozon ali ultrafiltracija v osnovi nista mišljena kot primarni dezinfekcijski sredstvi, pri kloru pa težko ovrednotimo potencialne vplive na zdravje zaradi tvorjenja stranskih produktov (to bi morali storiti na konkretnem primeru). Zavedati se moramo, da so tehnološka izhodišča pri zasnovi določenih postopkov povsem drugačna. UV svetlobo (največkrat) uporabljamo izključno za dezinfekcijo, medtem ko npr. ultrafiltracija ali ozonacija vršita ostale prvenstvene funkcije. Prvenstvena "konkurenca" ultrafiltraciji ni dezinfekcija z UV svetlobo, pač pa filtracija na zrnatih medijih (peščenih filtrih). Ozon s tega stališča prvenstveno "tekmuje" s sredstvi za oksidacijo, koagulacijo in flokulacijo. Tudi trditve, da UV svetloba v primerjavi z ostalimi postopki potrebuje posebno (pred)čiščenje vode, lahko ob poznavanju robnih pogojev za uspešno vodenje drugih postopkov čiščenja vode in dezinfekcije, zavrremo kot neutemeljene.

Za celokupen pregled nad ekonomiko neke čistilne naprave moramo zato obravnavati njeno celotno tehnološko zasnovu in ne obravnavati postopkov parcialno, saj v tem primeru niso medsebojno neposredno primerljivi. Dejansko je najbolj primerno, da na posameznem realnem primeru z različnimi tehnološkimi rešitvami, glede na dane vstopne in želene izstopne parametre, določimo kaj želimo čistiti in do kakšne mere. Analize stroškov in koristi v amortizacijski dobi po eni izmed metod vrednotenja investicij, bi nato v vsakem posameznem primeru ocenile optimalno rešitev.

11. OPERATIVNI VIDIKI DEZINFEKCIJE Z UV SVETLOBO

11.1 PRIPOROČILA ZA VGRADNJO IN OBRATOVANJE

Umestitev UV reaktorja v sistem čistilne naprave mora biti ustrezno po tehnološki, funkcionalni in dimenzijski plati. Vedno je potrebno upoštevati, da UV sistem sestavljajo še nekateri drugi deli, ki prav tako potrebujejo ustrezen prostor za vgradnjo, posege med obratovanjem in servisiranje. Pomemben del UV sistemov predstavljajo elektrooomare z napajanjem in krmiljenjem. Pri manjših sistemih (do nekaj 10 m³/h) zaradi svoje majhnosti, kompaktnosti in nezahtevnosti ne zahtevajo velike pozornosti (napajanje možno neposredno iz omrežja 230 V/50 Hz). Večji sistemi v tem smislu zahtevajo več prostorskih in tehničnih kapacitet ter prilagojeno napajanje (3 x 400/230 V/ 50–60 Hz). Elektrooomare se morajo nahajati v neposredni bližini UV reaktorjev, da morebitna potrebna dolžina kablov za napajanje UV svetil ni prevelika (vplivi električnega upora v vodniku in vplivi na napajanje omejujejo dolžino kablov). Ob tem se morajo nahajati v takšnem prostoru, da je zagotovljen dovolj velik pretok zraka za njihovo hlajenje ter niso v stiku s preveliko vsebnostjo vlage in agresivnih snovi v zraku. Če se elektrooomare ne morejo nahajati v istem prostoru kot UV reaktor ali v dovolj malo oddaljenem prostoru, se običajno postavijo v manjši montažni ali zidani objekt ali kontejner. Proizvajalci proizvajajo tudi sisteme za vgradnjo na prostem, vendar se iz stroškovnega in praktičnega vidika redkeje uporabljajo.

UV reaktorji naj bodo vgrajeni tako, da je ob njih zagotovljen dovolj velik prostor, ki omogoča izvajanje posegov na napravah. V primeru menjave UV svetil ali čiščenja steklene cevi okoli UV svetil je potrebno navedene dele izvleči iz reaktorja. S tem namenom je potrebno ob vgradnji zagotoviti dovolj velik prostor med UV reaktorjem in steno prostora, kjer se nahaja ali med UV reaktorjem in drugimi napravami.

V primeru, ko vzporedno obratuje več reaktorjev je potrebno zagotoviti hidravlično čim bolj enakomerno porazdelitev toka voda, da je v vseh reaktorjih dosežena primerna in čim bolj enaka doza. V fazi obratovanja je potrebno skrbeti za ustrezen pretok (ali nivo vode v reaktorju v primeru toka s prosto gladino) oz. z drugimi besedami – potrebno je preprečiti suhi tek. Potrebno je preprečiti, da bi se UV svetila vključila, v kolikor v reaktorju niso vzpostavljeni ustrezeni hidravlični pogoji. Pri opravljanju posegov na UV reaktorjih je potrebno preprečiti pretok vode skozi UV reaktor. To storimo z izvedbo obtočnih cevi ali kanalov (by-pass) ter z uporabo ustreznih hidravličnih zapornih elementov.

UV svetila so v fazi delovanja vroča (še posebej srednjetlačna). Zato je možno pregrevanje svetil in reaktorja pri nizkih pretokih vode ali prenehanju pretoka. V takšnih primerih je potrebno zagotoviti, da se bo sistem v primeru pregrevanja avtomatsko izklopil. Pri ponovnem zagonu UV sistema ogrevanje elektrod, vžig svetila in doseganje polne izhodne moči UV svetil traja nekaj minut. Ker morajo običajno ob nastopu pretoka svetila že delovati s polnim dezinfekcijskim učinkom, je potrebno pred začetkom pretoka dovolj zgodaj vklopiti UV sistem ali pri kratkotrajnih prekinitvah pretoka zagotoviti minimalni pretok vode skozi reaktor pri vklopljenih UV svetilih, da ne pride do pregrevanja.

Optimalen način delovanja UV sistemov je neprekinjeno obratovanje s čim manj vklopi/izklopi UV svetil. Ponekod predhodne tehnologije obdelave vode ali lastnosti sistemov narekujejo prekinjen, diskontinuiran iztok – npr. SBR tehnologija z dvema reaktorjema na ČN za odpadno vodo, šaržni postopki pri tehnološki in procesni vodi ipd. V takšnem primeru je, kjer je to mogoče in smiselno, bolje pred UV reaktorjem predvideti nek izravnalni rezervoar, iz katerega stalno izteka približno enaka količina vode ali so prekinitve med iztoki tako kratke, da UV naprave ni potrebno izključiti. Takšna naprava je lahko bistveno manjša, obratuje pod pretežno konstantnimi pogoji in za doseganje zaželenih učinkov porabi bistveno manj energije.

11.2 VAROVANJE ZDRAVJA IN VARNOST PRI DELU

Pri delu z UV sistemi obstaja nekaj nevarnosti, ki se jih je potrebno zavedati. Še posebej skrbno morajo navodila za varovanje zdravja in varnost pri delu upoštevati upravljavci oz. končni uporabniki takšnih sistemov. Najpogostejše nevarnosti, na katere naletimo pri delu z UV sistemi so:

- Daljša, nenadzorovana izpostavljenost UV-C svetlobi lahko v končni fazi privede do rakavih sprememb na koži in očeh ter povzroči slepoto. V primeru posegov na delujočem UV sistemu je obvezno potrebno uporabljati osebna zaščitna očala, ki ne prepuščajo UV-C svetlobe ter zaščitno obleko, ki popolnoma prekrije kožo. UV reaktorji v odprtih kanalih morajo biti vedno zaščiteni oz. pokriti tako, da UV svetloba ne uhaja iz območja reaktorja.
- Pri vsakem poseganju v elektronske komponente UV sistema med obratovanjem obstaja možnost električnega udara.
- Zaradi nevarnosti loma steklenih cevi UV svetil ali UV svetil samih obstoja nevarnost poškodb, ureznin in odrgnin s steklom. Pri tem obstoja nevarnost izpostavljenosti živemu srebru.
- UV svetila se lahko segrejejo nad 100 °C (nizkotlačna) ter celo 400–900 °C (srednjetlačna). Pred rokovanjem s svetili je potrebno počakati, da se ohladijo. Enako velja v primeru posegov v elektronske komponente v elektroarmaricah, ki se lahko močno segrejejo.
- Posegi v UV reaktorje, predvsem v primeru odpadne vode, zahtevajo posebno previdnost zaradi možne okužbe s patogenimi mikroorganizmi, ki so tam prisotni. Še posebej so nevarne razne poškodbe ali ureznine na koži, preko katerih bi lahko prišlo do okužbe.



Slika 41:
Nevarnost
optičnega sevanja
(DIN 4844-2)



Slika 42:
Nevarnost
električnega
udara
(DIN 4844-2)



Slika 43:
Nevarnost vroče
površine
(DIN 4884-2)



Slika 44:
Biološka
nevarnost
(DIN 4884-2)

12. PREDSTAVITEV PRAKTIČNIH PRIMEROV

V tem poglavju sta predstavljena praktična primera dezinfekcije z UV svetlobo. V obeh sem avtor Diplomske naloge imel priložnost sodelovati na strani izvajalca del v različnih fazah projekta, od priprave dokumentacije, vgradnje, zagona sistema do spremljanja obratovanja.

12.1 ČISTILNA NAPRAVA RADOVLJICA – DEZINFEKCIJA KOMUNALNE ODPADNE VODE

12.1.1 O ČISTILNI NAPRAVI RADOVLJICA

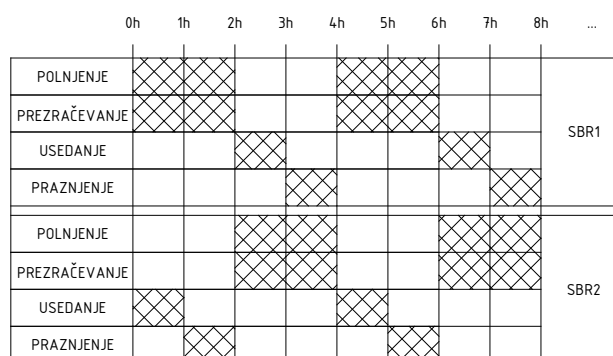
Januarja 2006 je bila ob Savi pod Radovljico dograjena Centralna čistilna naprava Radovljica. Čistilna naprava je bila zgrajena z namenom čiščenja komunalne odpadne vode z območja Radovljice in okolice, ki so se po kanalizaciji predhodno iztekale v reko Savo. Velikost čistilne naprave je 17.320 populacijskih enot. Gre za sodobno biološko čistilno napravo s primarnim, sekundarnim in terciarnim čiščenjem. Dotok komunalne odpadne vode na čistilno napravo je zvezen, medtem ko je odtok očiščene vode občasen – ko se prazni eden od obeh reaktorjev. Voda najprej priteče na mehansko stopnjo čiščenja, kjer se očisti večjih delcev na grabljah. Pesek, ki se v tej enoti useda na dno, se izčrpava s posebno črpalko ter nato pere v pralniku peska, maščoba pa se plavi na površino in odstranjuje s posebnim strgalom. Voda nato doteka v kontaktni bazen ter naprej izmenično v enega od dveh šaržnih reaktorjev (SBR) z delovno prostornino $V = 900 \text{ m}^3$ (Komunala Radovljica, 2009). Iz biološke stopnje, po fazi usedanja, voda teče v kineto, kjer naj bi se izvajala dezinfekcija z UV svetlobo. Voda se nato preko merilnika pretoka izteka v reko Savo.

Po tedaj in sedaj veljavni zakonodaji, dezinfekcija odpadne vode na ČN Radovljica ni predpisana. Ker se je ČN gradila tudi s sredstvi Evropske skupnosti, so bili projektanti "dolžni" v sklop naprave vključiti tudi UV sistem.

Druga in tretja stopnja čiščenja odpadne vode na ČN Radovljica v posameznem SBR reaktorju poteka v 4-urnih ciklih, ki vključujejo:

- polnjenje in sočasno prezračevanje (aeracija) s kroženjem vode po reaktorjih in izmenjavanjem oksične/anoksične cone – 2h,
- usedanje – 1h in
- praznjenje – do 1h, odvisno od količine vode v reaktorju.

Shematsko so cikli delovanja SBR reaktorjev predstavljeni na Sliki 45. Iz podatkov je razvidno, da se iztok iz ČN izvaja le vsako drugo uro. Pri tem je v iztočni kineti, kjer se nahaja tudi dezinfekcija z UV svetlobo, nazivni pretok $Q = 900 \text{ m}^3/\text{h}$. V odvisnosti od dotoka odpadne vode na ČN je trajanje iztočne faze lahko sorazmerno kratko. Dekanterji v SBR bazenih namreč tu nimajo linearnega spuščanja temveč se spuščajo po korakih, pri katerih povprečni pretok znaša $900 \text{ m}^3/\text{h}$. Le v primeru, ko se SBR reaktor napolni do polne delovne prostornine (900 m^3), iztok traja celo uro, v vseh ostali primerih sorazmerno manj.



Slika 45: Shema delovanja SBR reaktorjev na ČN Radovljica

12.1.2 ZASNOVA SISTEMA ZA UV DEZINFEKCIJO NA ČN RADOVLJICA

Prvič sem se avtor z dezinfekcijo na ČN Radovljica srečal v novembru 2005, ko so stekli dogovori za izvedbo projekta. Nato sem bil prisoten pri vgradnji strojne opreme, priključitvi električnih povezav in signalov, testiranju in zagonu opreme, odpravi napak in pomanjkljivosti, predaji opreme in vse do monitoringa odpadne vode, ki se je izvajal v maju in juniju 2007, ko se je projekt zaključil.

Za dezinfekcijo pred iztokom odpadne vode v reko Savo je bil izbran UV sistem s tokom s prosto gladino proizvajalca ITT WEDECO, tip TAK 55 HP. Investicijska vrednost v tehnološko opremo, skupaj z montažnim in pomožnim materialom, elektrotehničnimi deli, delovno silo (tehnični in inženirski kader), predelavami in nadgradnjami obstoječih sistemov za napajanje, regulacijo in nadzor, projektno in tehnično dokumentacijo, zagonom in testiranjem naprave ter monitoringom obratovanja, je znašala 180.000 € V to ceno niso zajeta zemeljska in gradbena dela za izkop in izgradnjo kinete za dezinfekcijo. V dobrih 3 letih, ki so minila od tedaj, je tehnologija toliko napredovala, sistemi pa so tržno toliko razširili, da za primerljive pretoke danes tehnološka oprema stane 20–25 % manj (kar gre verjetno pripisati tudi trenutni gospodarski oz. ekonomski situaciji).

Projektna vrednost UV prepustnosti je znašala $T_{1cm} > 55$ %. Projektna UV doza je znašala $D = 36$ mJ/cm² ob koncu življenjske dobe UV svetil. Preračun slednje je izhajal iz danih hidravličnih in kakovostnih pogojev za odpadno vodo: geometrije UV reaktorja (kinete) in zadrževalnega časa ($t_z = 3$ s), vsebnost suspendiranih snovi (35 mg/L) ter UV prepustnosti. Doza je bila določena na podlagi pričakovane relativno visoke vsebnosti suspendiranih snovi, ki bi lahko vplivala na dezinfekcijski učinek. Kasneje se je izkazalo, da je bil ta parameter precenjen in je bilo suspendiranih snovi bistveno manj, razen v primeru plavajočega blata, ki se je občasno pojavljalo v začetnih fazah obratovanja, T_{1cm} pa podcenjena, zato bi za doseganje predpisanih učinkov dezinfekcije zadostovala že nižja doza od projektne. Zaradi računalniškega krmiljenja sistema je možno vrednost minimalne UV doze naknadno spreminjati (znižati) in posledično znižati vložke energije.

Sistem je avtomatiziran in pri delovanju avtonomen. Edini zunanji signal, ki ga potrebuje, je 10 min pred spuščanjem dekanterja za zagon in ogrevanje svetil. Izhodni signali na centralni nadzorni sistem ČN upravljavcu nudijo indikacijo običajnega obratovanja, opozorila na napako in alarma pri vsaki od okvar. Sistem ima vgrajen programsko-logični krmilnik (PLC), ki v odvisnosti od pretoka, stanja UV svetil in obsevanosti v vodi, merjene s senzorjem, prilagaja izhodno moč napajalnih enot UV svetil med 50 % in 100 % ter na ta način zmanjšuje porabo energije. Pretok sistem meri samostojno na podlagi merjene višine vode in položaja krone zapornice (pravokotni ostrorobi popolni preliv), ki je regulirana preko PLC.

PLC omogoča telemetrijo, saj v realnem času prikazuje vse pomembne parametre dezinfekcije: pretok skozi sistem, obsevanost, dozo, trenutno porabo energije, nivo vode, položaj in stanje zapornice, obratovalne ure sistema, število vklopov/izklopov naprave, stanje vsakega UV svetila (deluje/ne deluje), stanje sistema za avtomatsko čiščenje, interval avtomatskega čiščenja,... Sistem spremlja, prikazuje, javlja in beleži napake. Te so lahko npr.: eno ali več svetil ne deluje, projektna doza ni dosežena, previsok ali prenizek pretok, previsoka temperatura svetil, previsoka temperatura v elektroomarah z napajanjem, preobremenitev napajanja, okvara zapornice, zapornica ni v položaju avtomatskega obratovanja, izpad kateregakoli signala, okvara sistema za čiščenje,... PLC ima vgrajen spominski modul in izhodni terminal, ki omogočata prikaz in shranjevanje podatkov v arhiv upravljalca ČN (ta del nadgradnje se v Radovljici ni izvedel).

Preglednica 14: Projektni parametri naprave za UV dezinfekcijo na ČN Radovljica

Parameter	Enota	Vrednost
Nazivni pretok	m ³ /h	900 (1.630 po nadgradnji)
Minimalna UV doza	mJ/cm ²	36
Minimalna UV prepustnost (T_{1cm}) pri 254 nm	%	55
Maks. vsebnost suspendiranih snovi	mg/L	35
Maks. velikost suspendiranih delcev	mm	30
Temperatura vode	°c	5–30
Maks. število vseh koliformnih bakterij na vstopu	/ 100 ml	1.000.000
Maks. število fekalnih koliformnih bakterij na vstopu	/ 100 ml	100.000
Konfiguracija naprave		3 vzporedni moduli s po 16 svetili, možna nadgradnja z dvema dodatnima moduloma
Vrsta UV svetil	/	Nizkotlačna, monokromatska UV svetila z visoko intenziteto
Skupno število UV svetil	kos	48 (80 po nadgradnji)
Nazivna moč posameznega svetila	W	360
Efektivna moč posameznega UV svetila pri 254 nm ter 100 % moči	W	150
Skupna moč UV svetil pri 100 % moči	kW	17,3
Pričakovana življenjska doba UV svetil	h	12.000

Elektrostikalni blok za napajanje, vključno z vso avtomatiko za krmiljenje sistema in kompresorjem za napajanje avtomatskega sistema za čiščenje UV svetil, se je postavil v 5-metrski kontejner. Zaradi toplote, ki jo oddajajo elektronske komponente, je bilo potrebno zagotoviti minimalno ventilacijo. Proizvajalec je, na podlagi predhodnih izkušenj predlagal celo vgradnjo klimatske naprave. Izkazalo se je, da v večini primerov zadostuje "naravna" ventilacija skozi rešetko v vratih in priprto okno. V najbolj vročih in sončnih dneh se je učinek prezračevanja izboljšal z vgrajenim ventilatorjem.

Na vstopu v UV reaktor je vgrajena umirjevalna rešetka (glej Slika 32). UV moduli so montirani v pravokoten betonski kanal dolžine 755 cm, širine 120 cm in višine 185 cm. Nazivna globina vode v kanalu je 95 cm. UV sistem je bil projektiran na nazivni pretok $Q = 900 \text{ m}^3/\text{h}$, pri čemer vsi sestavni deli sistema omogočajo nadgradnjo na $1630 \text{ m}^3/\text{h}$ v bodoče, kar je bilo zahtevano s strani projektantov pri razširitvi ČN. Iztočna kineta je že bila prilagojena tem vrednostim, zato je bilo potrebno v predelu UV reaktorja (UV modulov s svetili) vgraditi zožitev, ki je pri $900 \text{ m}^3/\text{h}$ omogočala vgradnjo UV modulov po celotnem prečnem preseku. Risbe naprave in kinete z dimenzijami so priložene (Priloge A do D).



Slika 46: ČN Radovljica – pogled na kineto z UV dezinfekcijo pred začetkom del (MAK CMC, 2006)

Model obsevanosti v UV reaktorju je izvedel proizvajalec sistema po metodi *MPSS* (vsota točkovnih virov). Hidravlični profil in zadrževalni časi so bili določeni s pomočjo CFD – računalniških simulacij. Upoštevanje parametrov odpadne vode, je bila na ta način določena projektna UV doza.

UV reaktor sestavljajo trije moduli, nameščeni drug ob drugem. Vsak modul vsebuje 16 UV svetil, nameščenih v 8 vrst s po dvema svetiloma. V bodoče je, ob morebitni razširitvi, mogoče dodati še dva UV modula. Na iztoku iz UV kanala je nameščena električno gnana tablasta zapornica, ki s pomočjo ultrazvočnega senzorja za merjenje višine vodne gladine, nadzira globino vode v kanalu.

12.1.3 *HIDRAVLIČNI PROFIL KINETE ZA DEZINFEKCIJO*

Kineta za dezinfekcijo z UV svetlobo narekuje določen padec gladine vode ter na dolvodni strani, pri prelivanju preko prelivnega žlebu ali zapornice, določeno višinsko razliko v kotah vode. Vedeti moramo, da pred iztokom v odvodnik UV sistemu sledi še objekt za merjenje pretoka, ki ravno tako zahteva nek padec gladine. Zaradi mikrolokacije ČN Radovljica padci gladine zaradi hidravličnih izgub v kineti za dezinfekcijo niso bili problematični. V primerih, ko na voljo nimamo veliko manevrskega prostora (nižine, morje), vsak dodatni centimeter izgub lahko pomeni, da bomo slabo vplivali na pretočne sposobnosti čistilne naprave oz. bomo potrebovali črpanje vode na višjo koto in drugačno nivelacijo posameznih objektov. Zato sem izvedel hidravlični preračun vzdolžnega profila UV reaktorja. Tega se lahko, z večjo natančnostjo, lotimo z računalniškimi orodji. Lahko pa privzamemo, da pri nazivnem pretoku skozi UV reaktor veljajo pogoji stalnega (enakomerne) toka in izvedemo preračun, ki naj bi veljal v okviru inženirske natančnosti.



Slika 47: ČN Radovljica – UV reaktor
(MAK CMC, 2006)

Predpostavimo, da je dno kanala ravno. Potreben potencial za tok vode narekuje zapornica, ki preko signala ultrazvočnega senzorja z ustreznim prilagajanjem prelivne višine "lovi" nazivno koto gladine v reaktorju. Ta znaša 950 mm nad dnom kanala na mestu meritve nivoja (ultrazvočna sonda). Nazivni pretok znaša 900 m³/h. Pri toku vode od umirjevalne rešetke, preko zožitve in UV svetil, razširitve in do preliva čez zapornico, nastajajo hidravlične izgube, ki jih "kompenzira" dvig gladine gorvodno od mesta nastanka. Izračun sem izvajal proti smeri toka, od zapornice do umirjevalne rešetke. Pri tem sem po celotni dolžini kanala privzel gladino vode 950 mm, saj bi napaka pri iterativnem popravljanju kote vode na vstopu v reaktor (cca. 1 cm) znašala okoli 1%, kar lahko zanemarimo.

Za preračun preliva sem izbral enačbo za količino pretoka čez pravokotni preliv (Steinman, F., 1999):

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_p^{2/3}, \quad (50)$$

kjer je Q pretok [m³/s], μ koeficient preliva (za katerega sem privzel vrednost 0,64), g težni pospešek (9,81 m/s²), b [m] širina krone preliva (enaka širini kanala in znaša 1,2 m) in h_p [m] prelivna višina. Neznanka v zgornji enačbi je prelivna višina, ki sem jo izračunal in znaša 0,23 m. Račun smo imeli možnost preveriti v praksi, saj je imela zapornica sistema v Radovljici vgrajeno položajno stikalo, ki je pokazalo enake vrednosti. Poleg tega je računalnik UV sistema preko ultrazvočne sonde stalno meril gladino vode in preko prelivne višine zapornice računal pretok v sistemu, ki sem ga lahko primerjal z vrednostmi umerjenega merilnika pretoka (Venturi) dolvodno od UV sistema. Primerjave so pokazale, da se vrednosti razlikujeta kvečjemu za 2 %.

Gorvodno od zapornice je voda cca. 1,4 m tekla po polnem profilu kanala. Hitrost toka na tem odseku znaša $v = Q/S = 0,22$ m/s. Pri znani geometriji kanala, pretok določimo z Manningovo enačbo:

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot R^{2/3} \cdot S = \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot \frac{S^{5/3}}{O^{2/3}}, \quad (51)$$

kjer je I padeč energijske črte in gladine (stalni enakomerni tok), n_g Manningov koeficient hrapavosti (0,016 za betonska korita), R [m] hidravlični radij, S [m²] presek kanala in O [m] omočeni obod. Pri danem pretoku in geometriji kanala lahko določimo edino neznanko, padeč energijske črte oz. gladine, ki znaša 0,05 ‰, kar načeloma lahko na tako kratkem odseku (cca. 1,6 m) tudi zanemarimo.

Analogno sem postopal pri izračunih padca in hidravličnih izgub na drugih pododsekih.

Nadalje gorvodno moramo obravnavati zožitev. V smeri toka se prosti profil kanala najprej zoži, nato sledi tok skozi reaktor z UV svetili in nato še razširitev nazaj na polni profil kanala. V tem primeru gre za stalni neenakomerni tok, ki sem ga obravnaval po segmentih in privzel stalni enakomerni tok na mestih z nespremenljivo širino kanala. Ker je zožitev izdelana iz nerjavnega jekla, se v delu omočenega oboda spremeni hrapavost. To sem upošteval z ekvivalentnim koeficientom hrapavosti po Manningu (Steinman, F., 1999):

$$n_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N O_i \cdot n_{gi}^{3/2}}{O_{cel}} \right)^{2/3}, \quad (52)$$

kjer je O_i omočeni obod i -tega pododseka, n_{gi} Manningov koeficient hrapavosti i -tega pododseka in O_{cel} skupni omočeni obod. Za nerjavno jeklo sem upošteval $n_{gi} = 0,015$, ekvivalentni koeficient hrapavosti pa je znašal $n_{ez} = 0,0156$.

Na mestih zožitve in razširitve sem za linijske izgube upoštevali "srednjo" širino med polnim in zoženim presekom kanala in računal po enačbi za stalni enakomerni tok. Hidravlične izgube zaradi razširitve in zožitve ocenimo z enačbo, ki jo v izračunih uporablja program HEC-RAS:

$$\Delta H_z = C \cdot \left| \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right|, \quad (53)$$

kjer je C koeficient hidravličnih izgub, v_1 hitrost toka pred zožitvijo/razširitvijo in v_2 hitrost po zožitvi/razširitvi. Za koeficient C smo privzeli vrednosti med tistimi, ki naj bi veljale za postopno zožitev/razširitev (0,1/0,3) in hipno zožitev/razširitev (0,3/0,5), to je 0,2 za zožitev in 0,4 za razširitev (mirni tok, $Fr < 1$). Izračun po Enačbi 53 je pokazal, da zožitev povzroči padec okoli 1 mm, razširitev pa okoli 2 mm.

Vprašanje je bilo, kako se lotiti reaktorja. V njem prečni profil "prebada" 48 UV svetil, ki stojijo na okvirjih. Ocenil sem kolikšen del prostega preseka zavzamejo stekla svetil premera 60 mm z dodanimi preseki nosilnih okvirjev in sistema za čiščenje. Izbral sem ekvivalentni premer svetil 70 mm, ki zajema našete vplive. Nadalje sem po Enačbi 52 določil ekvivalentno hrapavost ($n_{er} = 0,0143$) znotraj reaktorja, kjer sem upošteval parcialne omočene obode in koeficiente hrapavosti kanala ($n_{gk} = 0,016$), svetil ($n_{gs} = 0,014$) in nerjavnega jekla ($n_{gi} = 0,015$). Ker omočeni obod stekel prevladuje, je sorazmerno nižji koeficient hrapavosti. Vpliv svetil na prečni presek se najbolje vidi v zmanjšanem hidravličnem radiju. Če je ta na zoženem delu znašal 0,26 m, se je v območju UV svetil zmanjšal na 0,038 m, kar za seboj prinese večje hidravlične izgube. Na ta način izračunane izgube znotraj reaktorja so na računski dolžini 1,6 m znašale 7 mm (zaokroženo), kar je v okviru pričakovanih hidravličnih izgub za takšne elemente (do okoli 1 cm).

Največjo hidravlično izgubo v kineti z UV dezinfekcijo predstavlja naluknjana umirjevalna rešetka. Za njeno hidravlično analizo bi potrebovali zahtevnejši matematični pristop, zato privzemimo podatek proizvajalca, da znašajo izgube na čisti rešetki (brez naplavin, ki bi zmanjševale njeno pretočnost) 50 mm.

Skupaj z izračunanimi celotnimi linijskimi in lokalnimi izgubami znotraj UV kanala, to je 10 mm, pričakujemo padec energijske črte in gladine za okoli 60 mm. Temu moramo prišteti še razliko v gladinah med UV reaktorjem in dolvodno v kineti po prelivu, ki je znašala 650 mm oz. 65 cm. Skupni padec gladine v primeru UV reaktorja na ČN Radovljica torej znaša okoli 70 cm. Na ta način smo okvirno določili vzdolžni hidravlični profil "našega" reaktorja.

12.1.4 OBRAOVANJE UV NAPRAVE NA ČN RADOVLJICA

Montaža opreme je potekala v marcu in aprilu 2006, ko se je opravil tudi prvi (preizkusni) zagon naprave in testiranje vodotesnosti zapornice. Montaža strojne opreme je potekala relativno hitro (3 delovne dni). Več časa so vzele električne povezave, saj je bilo potrebno med elektrooomarami in priključno enoto nad UV reaktorjem (pravilno) priključiti okoli 65 različnih vodnikov za napajanje in signale (vključno z vodenjem kablov in s testiranjem rezultatov okoli 7 delovnih dni). Naprava je bila, po preizkusih, umerjanju in nastavitvah v obratovanje uspešno spuščena 10.08.2006.



Slika 48: ČN Radovljica – UV reaktor v obratovanju
(MAK CMC, 2006)

Tehnologija čiščenja odpadne vode na ČN Radovljica (SBR) z dvema reaktorjema pomeni diskontinuiran iztok. Za vrsto naprave, kot je UV sistem, takšen način obratovanja ni zaželen zaradi obremenitev napajalnih enot in UV svetil (predvsem elektrod) pri vsakokratnem vključevanju. Naprava sicer med obratovanjem nemoteno deluje, vendar se nekateri njeni deli, zaradi prevelikega števila vklopov/izklopov, obrabljajo bistveno hitreje od pričakovanj. To velja neodvisno od izbire proizvajalca in tipa naprave. Poleg tega je potrebno pred vsakim naslednjim izpustom vode skozi UV reaktor dovolj zgodaj vključiti UV svetila, ki potrebujejo do 10 minut, da delujejo s polno zmogljivostjo. Za to smo poskrbeli s signalom iz centralnega nadzornega sistema ČN, ki je 10 min pred začetkom spuščanja dekanterja vključil svetila. Pri vsakem zagonu svetila najprej porabljajo 100 % moči, šele po vzpostavitvi delovne temperature se njihova moč lahko zmanjša do 50 %.

Z namenom, da bi se izboljšalo razmerje med številom vklopov/izklopov na število obratovalnih ur UV sistema, so se izvedli poizkusi prilagoditve posameznih parametrov. Ugotovljeno je bilo, da se tudi v primeru, ko skozi reaktor ni pretoka, UV svetila ne pregrevajo med enim in drugim iztokom iz SBR. Takrat je programsko-logični krmilnik zmanjšal moč napajalnih enot UV svetil na 50 %, naprava pa je vključena čakala na naslednji iztok odpadne vode. Ta možnost je pomenila, da se UV sistem ni ugašal več kot 4 krat dnevno, a je ob tem porabljal električno energijo tudi v času, ko skozi reaktor ni bilo pretoka. Ocenjeno je namreč bilo, da so stroški menjave UV svetil in napajalnih enot večje, kot stroški električne energije, zato se je predlagal takšen način "optimizacije". Meritve porabe električne energije na UV sistemu so pokazale, da pri takšnem režimu obratovanja porabi okoli 9,5–10,5 kW električne energije. Če za izračun vzamemo vrednost 10 kW in ceno električne energije 0,1 €/kWh, potem je sistem porabil za 24 €elektrike dnevno, kar bi na letnem nivoju znašalo med 8.500–9.000 €ali okoli 0,5 €na populacijski ekvivalent (PE).

Upravljavec ČN Radovljica po trenutno veljavni zakonodaji ni zavezan zagotavljati dezinfekcije odpadne vode na iztoku. Zaradi stroškov obratovanja se je upravljavec odločil, da UV sistem izključi in se le-ta trenutno ne uporablja. V praksi zato nismo mogli preveriti dejanskega obnašanja različnih komponent sistema in določiti, kakšen vpliv ima režim obratovanja na življenjsko dobo UV svetil in napajalnih enot, na dezinfekcijski učinek,...

12.1.5 MONITORING DEZINFEKCIJSKIH UČINKOV NA ČN RADOVLJICA

Po veljavni zakonodaji iz leta 2005 in 2006, so bili mikrobiološki parametri odpadne vode po dezinfekciji nekoliko manj strogi od danes veljavnih. 30-dnevna geometrična sredina skupne vsebnosti koliformnih bakterij je morala biti manjša od 20.000/100 mL, fekalnih koliformnih bakterij pa manjša od 12.000/100 mL.

Monitoring, ki ga je v mesecu maju in juniju 2007 opravljala Zavod za zdravstveno varstvo Kranj, je pokazal, da so bili izpolnjeni in celo preseženi vsi zahtevani dezinfekcijski parametri (glej Preglednico 15 in 16). Pri enem od vzorčenj je prišlo do uhajanja plavajočega blata iz SBR reaktorja, kar je pomenilo neobičajno veliko število koliformnih mikroorganizmov v vodi, vendar je bila tudi v tem primeru dezinfekcija dovolj učinkovita.

Poleg tega so bili dvakrat preseženi nazivni pretoki (zaradi koračnega spuščanja dekanterja), a je bila kljub temu dosežena dovolj visoka doza, da ni vplivala na uspešnost dezinfekcije.

Dejansko je UV naprava na ČN Radovljica dosegala vse potrebne parametre za izstopno vodo tudi po novejši, sedaj veljavni (strožji) zakonodaji. Projektna vrednost doze je bila, zaradi precejšnje vsebnosti suspendiranih snovi, ali po drugi strani zaradi dobrega usedanja v SBR bazenih, zadosti velika, da bi brez težav zagotavljala ustrezne parametre po sedanji (strožji) zakonodaji, ki za skupne koliformne bakterije predpisuje vsebnost do 10.000/100 mL, za fekalne koliformne bakterije pa do 2.000/100 mL. Monitoring je prav tako pokazal, da je bila projektna vrednost UV prepustnosti T_{1cm} resnično določena na način, da smo z rezultati vedno "na varni strani".

Preglednica 15: Povzetki monitoringa dezinfekcije odpadne vode na ČN Radovljica
– geometrijska sredina merjenih vrednosti
(MAK CMC, 2007)

Parameter	Vstop v UV reaktor	Izstop iz UV reaktorja	Stopnja dezinfekcije	Dopustna vrednost (izstop)
Skupne koliformne bakterije	700.000/100 mL	2.070/ 100 mL	2,5 log 99,7 %	20.000/100 mL
Fekalne koliformne bakterije	220.000/100 mL	1.100/100 mL	2,3 log 99,5 %	12.000/100 mL

12.1.6 KAJ STORITI Z UV DEZINFEKCIJO NA ČN RADOVLJICA?

Trenutni položaj je takšen, da UV naprava v Radovljici stoji "na suhem" v skladišču. Voda sedaj odteka brez dezinfekcije v reko Savo. Upravljavec se je tako ognil stroškom energije in vzdrževanja, še vedno pa morajo za investicijo v objekt in opremo za UV dezinfekcijo obračunavati stroške amortizacije. Tudi nedelujoča naprava torej stane. Do uvedbe predpisov, ki bodo tudi ČN Radovljica zavezovale k dezinfekciji, oprema torej ne bo v funkciji. Vprašanje je, ali bo po toliko letih, ko bo (če bo?) dezinfekcija postala obvezna, sistem zaživel brez velikih posegov in stroškov.

Odločitve upravljavca so z vidika ekonomike vsekakor razumljive in upravičene. Postavlja se vprašanje, zakaj se neke investicije v "okoljski standard" izvajajo, če nato v praksi nimajo stabilne finančne podpore. Odgovor na to vprašanje je morda naslednji: dezinfekcija komunalne odpadne vode je nepotreben nadstandard. Ali morda: pomena dezinfekcije komunalne odpadne vode širša strokovna in laična javnost še ne razume dovolj podrobno in se, za sedaj, na to problematiko gleda le z vidika stroškov (ni še pravi čas)...

Preglednica 16: Rezultati vzorčenj pri monitoringu dezinfekcije odpadne vode na ČN Radovljica (MAK CMC, 2007)

Parameter	Enota	Vzorec	Skupni parametri	Vstop v UV reaktor	Izstop iz UV reaktorja	Dopustna vrednost (izstop)
Pretok	m ³ /h	1	892			
		2	930			
		3	943			
Temperatura	°C	1	16			
		2	17,6			
		3	19,1			
Suspendirane snovi	mg/l	1	15			35
		2	6,7			
		3	< 5			
<i>T</i> _{1cm} pri 254 nm – nefiltriran vzorec	%	1	43,2*			> 55
		2	55,6			
		3	58,2			
<i>T</i> _{1cm} pri 254 nm – filtriran vzorec	%	1	56,8*			> 55
		2	73,6			
		3	74,4			
Skupne koliformne bakterije	/100 mL	1		2.900.000*	14.000	< 20.000
		2		400.000	300	
		3		300.000	2.100	
Fekalne koliformne bakterije	/100 mL	1		1.400.000*	8.000	< 12.000
		2		38.000	100	
		3		200.000	1.700	

* uhajanje plavajočega blata

12.2 VODARNA VIPAVA

12.2.1 O VODARNI VIPAVA

Leta 2004 se je nad vasjo Gradišče pri Vipavi obnovila in razširila obstoječa manjša vodarna, ki vključevala filtracijo in dezinfekcijo. Z vodarno upravlja Komunalno stanovanjska družba Ajdovščina. Vodarno sestavljata dva dela – čistilna naprava s koagulacijo/flokulacijo, filtracijo in dezinfekcijo vode ter obstoječi in nov vodohran. Vodohrana sta v funkciji skozi celotno leto, čistilna naprava za pripravo vode, vključno z UV dezinfekcijo, pa le v poletnih oz. bolj sušnih delih leta, ko se iz drugih virov ne da zagotoviti dovolj velikih količin vode, to je največ do 6 mesecev na leto – vendar tudi takrat ČN ne obratuje s polno kapaciteto. Kadar priprava vode ne deluje, se v vodohrana steka voda iz drugih čistilnih naprav na vodovodnem sistemu. Tehnološka shema ČN je priložena (glej Priloga F). Pri obratovanju čistilne naprave s filtri, se surova voda črpa iz kraškega izvira reke Vipave (vir Podlipa) do vodarne. V vodarni so postavljeni štiri večslojni peščeni filtri z nazivnim pretokom $54 \text{ m}^3/\text{h}$ na posamezni filter, skupno torej $216 \text{ m}^3/\text{h}$, pri čemer znaša hitrost filtracije 15 m/h . Filtrsko plast predstavlja kremenčev pesek granulacije $0,4\text{--}0,8 \text{ mm}$. Posamezni filter je premera 220 cm in skupne višine 430 cm , pri čemer cilindrična višina filtra znaša 200 cm .



Slika 49: Vodarna Vipava – tlačni filtri
(MAK CMC, 2005)

Filtracija je avtomatizirana, to pomeni, da je pranje filtrov samodejno, ko je dosežen predvideni padec tlaka skozi filter. Učinki filtracije se izboljšujejo s proporcionalnim doziranjem koagulanta poli-hidroksi-aluminijevega klorida (PAC). PAC nevtralizira negativno nabite koloidne delce in druge v vodi raztopljene snovi in povzroča obarjanje le-teh. Rezultat obarjanja je nastanek netopnih delcev – flokul, ki se lažje odstranijo med procesom filtracije. V primeru povišane motnosti (kalnosti) vode, običajno ob močnem deževju, se za izboljšanje učinka filtracije pred vstop na filtre proporcionalno dozira še flokulant – polielektrolit (PE). Namen doziranja polielektrolita je povezovanje nastalih flokul in manjših delcev v večje skupke, ki se na filtrih lažje odstranijo. Filtrirana voda se po filtraciji zbira v dveh vodohranih, od koder se, preko merilnika motnosti, primarne UV dezinfekcije in rezidualne dezinfekcije z natrijevim hipokloritom, steka k porabnikom.

12.2.2 ZASNOVA SISTEMA ZA DEZINFEKCIJO Z UV SVETLOBO NA ČN VIPAVA

Pri zasnovi projekta primarne dezinfekcije smo izhajali iz predpostavke, da je po zaključeni filtraciji motnost < 1 NTU. Na podlagi meritev je bila določena projektna vrednost UV prepustnosti $T_{1cm} = 94$ %. Za zagotavljanje 4 log stopnje onesposabljanja bakterij in praživali, ki jih najpogosteje lahko pričakujemo v vodi iz kraškega izvira, je bila določena projektna UV doza $D = 400 \text{ J/m}^2 = 40 \text{ mJ/cm}^2$ ob koncu življenjske dobe svetil. Iz takratnega proizvodnega nabora UV naprav proizvajalca ITT WEDECO, je bila izbrana naprava tip B220, ki je imela pri danih pogojih nazivni pretok $224 \text{ m}^3/\text{h}$. Pri nazivnem pretoku na ČN Vipava ($216 \text{ m}^3/\text{h}$), minimalna računsko doza torej znaša 415 J/m^2 .

Valjasti reaktor premera 340 mm, skupne dolžine 1300 mm in prostornine 106 L je izdelan iz nerjavnega jekla. Omogoča delovne tlake do 10 bar, kar na ČN Vipava ni nikoli doseženo, saj je iztok iz vodohranov težnostni. Tlačne izgube v UV reaktorju pri nazivnem pretoku znašajo 0,1 bar. Znotraj reaktorja se nahaja 9 nizkotlačnih UV svetil z visoko intenziteto, od katerih ima vsaka nazivni moč 170 W in izhodno moč 63 W pri 254 nm, pri čemer izkoristek znaša 37 %. Priključna moč UV svetil znaša 1,53 kW, celotnega sistema pa 1,71 kW. Tehnične lastnosti sistema so podane v Preglednici 17.

Preglednica 17: Vodarna Vipava – tehnične lastnosti UV sistema

Parameter	Enota	Vrednost
Nazivni pretok	m ³ /h	216
Minimalna UV doza	J/m ²	415
Minimalna UV prepustnost (T_{1cm}) pri 254 nm	%	94
Motnost	NTU	< 1
Temperatura vode	°C	5–60
Konfiguracija naprave	Tlačni reaktor s hidravličnimi priključki DN 250	
Tlačne izgube pri nazivnem pretoku	bar	0,1
Vrsta UV svetil	/	Nizkotlačna, monokromatska UV svetila z visoko intenziteto
Skupno število UV svetil	kos	9
Nazivna moč posameznega svetila	W	170
Efektivna moč posameznega UV svetila pri 254 nm	W	63
Skupna moč UV svetil	kW	1,53
Priključna moč UV sistema	kW	1,71
Specifična moč pri nazivnem pretoku	kW/m ³	0,0079
Pričakovana življenjska doba UV svetil	h	10.000

12.2.3 MODEL OBSEVANOSTI

Za primerjavo s podatki proizvajalca sem izvedel poenostavljen model obsevanosti znotraj UV reaktorja na ČN Vipava. Najprej sem izračunal povprečni hidravlični zadrževalni čas t_z znotraj UV reaktorja, ki znaša okoli 1,8 s. Iz podatka o projektni UV dozi sem določil potrebno povprečno obsevanost UV reaktorja:

$$\overline{E_0} = \frac{D}{t_z}, \quad (54)$$

ki znaša 235 W/m². Nadalje sem določil efektivno moč svetila na enoto dolžine P' , ki znaša 63 W/m' (obločna dolžina 1000 mm). UV prepustnost znaša $T_{1cm} = 0,94$, absorpcijski koeficient $\alpha = 2,69$ [m⁻¹].

Premer reaktorja znaša 0,34 m, površina njegovega prečnega preseka $S_r = 0,091 \text{ m}^2$. Upošteval sem, da polmer steklene cevi, ki obdaja UV svetilo znaša $x = 25 \text{ mm}$ in zmanjšal prečni presek reaktorja za presek 9 svetil. Predpostavimo, da ima vsako od 9 svetil enako vplivno območje obsevanosti. Znotraj vsakega od teh območij naj bo povprečna obsevanost enaka. Delec, ki po reaktorju potuje naključno, bo torej prejel enako povprečno dozo, ne glede na pot (seveda velja zgolj kot približek). Prostornino reaktorja sem zato razdelil na 9 neodvisnih "podreaktorjev". Zaradi prekrivanja vplivnih območij oz. polj obsevanosti med svetili in vpliva odboja UV svetlobe od ostenja reaktorja, sem iz razporeditve svetil znotraj reaktorja ocenil, da se ne glede na položaj svetila, povprečna obsevanost vsakega "podreaktorja" poveča za okoli 25 %. Za računsko vrednost polmera "podreaktorja" sem vzela polmer prispevnega območja enega svetila $R' = 5,1 \text{ cm}$. Dejanska obsevanost se seveda širi tudi izven tega območja. Povprečno modelirano obsevanost znotraj vsakega "podreaktorja" sem izračunal s pomočjo preurejene Enačbe 47:

$$\overline{E_{0m}} = \frac{P' \cdot (T^{\alpha \cdot (R'-x)} - 1)}{\alpha \cdot \pi \cdot \ln(T) \cdot (R'^2 - x^2)}. \quad (55)$$

Povprečna modelirana obsevanost je znašala 364 W/m^2 . Enačba 55 velja ne upošteva vplivov loma in odboja svetlobe pri prehodu od svetila skozi stekleno cev v vodo ter ne upošteva vplivov staranja svetila na upad UV doze. Povprečno UV dozo sem zato "popravlil" s faktorji 0,8 za vpliv odboja in loma svetlobe, 0,8 za vpliv staranja UV svetil in dodal 25 % povprečne obsevanosti zaradi prekrivanja vplivnih območij UV svetil. Na ta način izračunana povprečna modelirana obsevanost je znašala 211 W/m^2 . Pri modelu smo torej naredili okoli 10 % napako, ki je dovolj velika, da se na rezultate tako poenostavljenega modela ne moremo zanašati, lahko pa nam služi za grobo oceno. Enačba 55 namreč približno velja v primeru valjastega reaktorja z enim vzdolžnim UV svetilom, ki oddaja fotone le v radialni smeri, kar dejansko ne drži, jaz pa sem računal približek reaktorja z 9 svetili. Le natančnejša analiza prekrivanja polj obsevanosti bi dala točnejše rezultate. Izračun poenostavljenega modela obsevanosti je podan v Prilogi G. Dejanski model reaktorja je izveden po metodi *MPSS* (vsota točkovnih virov) s strani proizvajalca.

12.2.4 OBRATOVANJE UV NAPRAVE NA ČN VIPAVA

UV naprava se je na cevovod priključila v aprilu leta 2005, zagon je sledil v naslednjem mesecu. Glede na opažanja upravljavca, UV sistem zagotavlja ustrezne dezinfekcijske učinke. Rezultati rednih vzorčenj pristojnih služb za nadzor kakovosti pitne vode so do sedaj pokazali ustreznost dezinfekcije. O učinkovitosti samega UV sistema na tem mestu ne moremo govoriti, saj analize niso zasledovale prisotnosti mikroorganizmov na vstopu v UV reaktor in na izstopu iz njega. Poleg tega sta čistilna naprava in UV dezinfekcija v funkciji le nekaj mesecev na leto. UV dezinfekcija deluje le takrat, ko obratuje tudi filtracija. Ko obratujeta le vodohrana, se UV reaktor izloči iz omrežja in voda teče mimo skozi obvod. Smatra se namreč, da je v vodi, ki v vodohrana priteka iz omrežja, že zagotovljena tudi rezidualna dezinfekcija in dodatna UV dezinfekcija ni potrebna.



Slika 50: Vodarna Vipava – UV reaktor
(MAK CMC, 2005)

Delovanje UV sistema je (ko deluje) avtomatizirano. V primeru okvare ali padca obsevanosti v reaktorju, sistem sporoči alarm v oddaljeno centralo upravljavca. Poleg merjenja obsevanosti v UV reaktorju se tik za reaktorjem redno zvezno meri tudi motnost, ki kaže na učinkovitost delovanja filtrov in v primeru presežene vrednosti 1 NTU opozori upravljavca.

Predhodni vplivi postopkov čiščenja (koagulacije/flokulacije in filtracije) pomenijo, da se iz vode pred dezinfekcijo že odstrani določen del mikroorganizmov. Visoka doza UV svetlobe in na koncu še rezidualna dezinfekcija z natrijevim hipokloritom pomenita, da se dezinfekcija na ČN Vipava resnično izvaja večstopenjsko. V vsakem trenutku zato pričakujemo zelo dobre dezinfekcijske učinke in visoko stopnjo zaščite. Vendar mora na dolvodni strani ČN tudi ves vodooskrbni sistem z dobrim stanjem ohranjati kvaliteto vode. Šele podrobnejša raziskava stanja vodooskrbnega sistema in spremljanje obratovanja ČN pri pretokih, blizu nazivnih, bi prikazali celovitejšo sliko.

S stališča ekonomike je zaradi nerednega obratovanja težko govoriti o dejanski ceni dezinfekcije z UV svetlobo. Investicija v UV sistem na ČN Vipava, vključno z vsemi stroški vzpostavitve sistema, je znašala 25.000 €. Prevedeno na m^3 vode v 15-letni amortizacijski dobi, bi pri nazivnem pretoku stroški investicije znašali 0,0009 €/m³. Specifična poraba električne energije znaša okoli 0,008 kWh/m³. Pri ceni električne energije 0,1 €/kWh, to pomeni 0,0008 €/m³. Zaradi nizkega števila obratovalnih ur so se svetila, po avtorju dostopnih podatkih, do sedaj menjala zgolj enkrat. Ocenjujem pa, da bi stroški menjave svetil, servisa in vzdrževanja pri obratovanju z nazivnimi pretoki znašali okoli 0,0007 €/m³. Skupaj bi torej stroški UV dezinfekcije znašali okoli 0,0025 €/m³. Če privzamemo, da ČN Vipava stalno obratuje le okoli 4 mesece letno in še to le s četrtino kapacitete, potem strošek dezinfekcije ocenimo na 0,03 €/m³.

ČN Vipava je bila razširjena in dograjena v okviru izgradnje hitre ceste Razdrto – Vrtojba in projekta zaščite vodnih virov zgornje Vipavske doline. Načrtovana je bila za bistveno večje porabe, kot se trenutno izkazujejo. Zgleda, da priključitev gospodarskih porabnikov vode in širitev vodooskrbne mreže na do sedaj neoskrbovana območja še niso toliko povečala porabe vode, da bi bila nova vodarna boljše izkoriščena. Izkoriščenost je zato nizka, stroški m^3 vode relativno zelo visoki. V tehnološkem in tehničnem smislu je vodarna primerna za mnogo večje obremenitve. Šele, ko bodo na vodovodni sistem priključeni vsi predvideni porabniki, bo ekonomika naprave lahko bistveno boljša.

13. RAZPRAVA IN IZSLEDKI

V tem poglavju komentiramo nekaj dejavnikov, ki lahko vplivajo na učinkovitost, ekonomičnost in konkurenčnost dezinfekcije z UV. Poleg tega natančneje komentiramo dezinfekcijo pitne in komunalne odpadne vode s stališča veljavnega zakonodajnega okvirja.

13.1 O UV SVETILIH

V znanstvenih in strokovnih krogih obstajajo polemike, kateri tip UV svetil, nizkotlačne ali srednjetačne, je primernejši in uspešnejši v boju proti patogenim mikroorganizmom. Raziskave kažejo, da so nekatere vrste virusov (Adenovirus, Rotavirus, Calicivirus bovine,...), bakteriofagov (virusi, ki okužijo bakterije – npr. MS2,...), bakterij (*Escherichia coli*,...) in praživali (*Cryptosporidium parvum*,...), bolj občutljive na srednjetačna, polikromatska UV svetila (Giese, N., Darby, J., 2000). To lahko pripišemo dejstvu, da polikromatska svetila oddajajo svetlobo različnih valovnih dolžin v celotnem UV spektru in znotraj UV-C spektra, ki razen DNK poškoduje tudi druge vitalne celične snovi in strukture. Nizkotlačna, monokromatska svetila oddajajo več kot 85% UV svetlobe pri 253,7 nm, kar ustreza lokalnemu višku spektralne absorpcijske krivulje DNK, zato takšna svetila največ škode povzročijo na dednem materialu. Mikroorganizmi, ki nimajo DNK (običajno virusi vsebujejo RNK) ali imajo DNK dobro zaščiten z ostalimi celičnimi strukturami, so zato nekoliko bolj odporni na monokromatska svetila. Sklepati, da je zato uporaba srednjetačnih, polikromatskih UV svetil bolj primerna, ni pravilno zmeraj in povsod. Zaradi narave srednjetačnih UV svetil, da oddajajo EMV v zelo širokem spektru, je delež valovne dolžine z dezinfekcijskim učinkom v UV-C spektru (med 200 nm in 300 nm) relativno majhen. Za doseganje iste intenzitete svetlobe v UV-C spektru porabijo bistveno več energije, s čemer se povečajo stroški obratovanja. Zato je v gotovih primerih bolje za isti dezinfekcijski učinek uporabiti nizkotlačna svetila in povečati obsevanost z UV svetlobo pri 254 nm.

Dodati je potrebno, da je zaradi večje intenzitete sevanja UV svetlobe pri srednjetačnih sistemih potrebnih manj UV svetil. Po drugi strani so zaradi večje moči napajanja bolj obremenjene elektronske komponente, svetilo se bistveno bolj segreva, zato se na steklih hitreje nabirajo mineralne obloge, zaradi možnega pregrevanja so takšna svetila bolj občutljiva na nihanja pretoka in je potrebno zagotavljati minimalni pretok za njihovo hlajenje,... Srednjetačna svetila zaradi narave EMV, ki ga oddajajo, lahko hitreje povzročijo reakcije z nekaterimi snovmi v vodi. Takšen je primer nitrata (NO_3^-), ki močno vpija UV svetlobo pod 250 nm. Nizkotlačna UV svetila nanj praktično nič ne vplivajo, pri uporabi srednjetačnih svetil pa se nitrat lahko reducira v nitrit (NO_2^-) (Sharpless, C.M., et al., 2003).

Enoznačnega odgovora, katera svetila oz. tehnologijo uporabiti, torej ni. V posameznih situacijah je potrebno vedno pretehtati, katere vrste mikroorganizmov so najbolj problematične, na katero vrsto tehnologije so ti mikroorganizmi najbolj občutljivi, preveriti ali določena vrsta mikroorganizmov zaradi svoje specifičnosti opravičuje izbiro posamezne tehnologije, preveriti ali katera metoda na daljši rok izkazuje nižje stroške za doseganje enakih učinkov in na podlagi takšne ali podobne analize določiti optimalno rešitev. Upoštevati je potrebno tudi, kakšne vplive na druge parametre ima izbrana tehnologija. Te vrste presoje so pomembne predvsem pri dezinfekciji pitne vode. V primeru odpadne vode se, zaradi bolj grobo postavljenih meril in ker se običajno ne osredotočamo na posamezne vrste mikroorganizmov, v večini primerov odločimo za rešitev, ki na daljši rok izkazuje najnižje stroške.

Pri fotolitskih postopkih ter pri postopkih pospešene oksidacije denimo širši spekter izstopne svetlobe srednjetačnih svetil pomeni, da obstaja večja možnost skladanja s spektralno absorpcijsko krivuljo neke snovi oz. sočasno več snovi. To lahko vodi do povišane stopnje reakcij, hitrejše in/ali boljše oksidacije snovi. Za postopke fotolize in AOP je zato prav tako pomembno, da natančno določimo fizikalno-kemijsko sestavo vode, ciljne snovi, kombinacijo sredstev, ki jih pri postopku uporabljamo, zaželeno učinke, opravimo ekonomsko analizo ter na podlagi teh podatkov izberemo optimalno tehnologijo.

Tehnologija UV svetil stalno napreduje. V zadnjem desetletju je prišlo do bistvenih izboljšav na področju porabe energije in življenjske dobe. S spreminjanjem sestave plina znotraj svetil in izboljšavami sestavnih delov, predvsem elektronskih komponent, se je učinkovitost porabe električne energije izboljševala, življenjska doba svetil pa se je praktično podvojila.

Med seboj se UV svetila istega tipa razlikujejo od proizvajalca do proizvajalca glede posameznih karakteristik. Razlike v samih svetilih so običajno reda velikosti 10 %. Lastnosti UV sistema pogojujejo tudi drugi pomembni sestavni deli, med njimi vrsta in oblika reaktorja, število in razporeditev UV svetil, hidravlični pogoji itd. Za optimalno delovanje UV sistema, tako s stališča dezinfekcije in ekonomike, morajo različne komponente medsebojno delovati v "sozvočju". UV svetila v smislu dezinfekcije k dozi prispevajo samo en del produkta – obsevanost z UV svetlobo. Samo z "boljšimi" UV svetili ne moremo npr. odpraviti morebitnih pomanjkljivosti v zgradbi UV reaktorja, ki so za dozo prav tako pomembni.

Izrabljena UV svetila sodijo med nevarne odpadke, saj vsebujejo živo srebro in jih je zato potrebno odlagati enako, kot razelektrivne žarnice ("neonke"). Zanje so primerna namenska odlagalna mesta v zbiralnicah odpadkov ali centrih za ravnanje z odpadki, od koder se jih odpelje na predelavo. Izrabljena UV svetila se v predelavo običajno lahko vrača kar proizvajalcu.

13.2 O FOTOREAKTIVACIJI IN OBNOVI V TEMI

Našteta mehanizma obnove dednega materiala se v praksi mnogokdaj pojavljata kot argumenta, zakaj naj UV svetloba ne bi bila primerno dezinfekcijsko sredstvo. Popravilo dednega materiala je, poleg izpolnjenih pogojev zanj, odvisno predvsem od vrste MO, uporabljene doze in vrste UV svetila. Ta dva mehanizma sta bila do sedaj raziskana v kontroliranih laboratorijskih pogojih. Fotoreaktivacija mikroorganizmov je možna le ob daljši izpostavljenosti vidni svetlobi. Raziskave, ki so ta pojav zasledile, so povečini uporabljale CB aparate z nizkimi dozami in idealnimi pogoji zanj – tanko plast vode v petrijevki.

Ugotovljeno je bilo, da nekatere vrste MO, npr. *E. coli* niso sposobne fotoreaktivacije po obsevanju s srednjetačnimi UV svetili, verjetno zaradi poškodb obnovitvenih encimov. Nasprotno je bilo prikazano v primeru cist *Giardia lamblia*, ki so se obnovile kljub uporabi te tehnologije. Vendar je v primeru teh MO popravilo dednega materiala zaslediti tudi ob uporabi nizkotlačnih UV svetil. Argumenti, ki jih v praksi lahko zasledimo, da imajo srednjetačna UV svetila s tega stališča prednost pred nizkotlačnimi, verjetno ne zdržijo kritične presoje.

Fotoreaktivacija in obnova v temi sta se izkazala v primeru praživali *Cryptosporidium parvum*, vendar kljub temu, da so se uspešno izlegle iz ciste, praživali niso več uspele okužiti testnih organizmov. Obsežna raziskave na praživalih so pokazale, da škode na dednem materialu *Cryptosporidium parvum*, ki jo povzroči dezinfekcija z UV svetlobo v pitni vodi, ti MO s svojimi mehanizmi zelo verjetno niso sposobni popraviti.

Doze, ki se običajno uporabljajo pri dezinfekciji pitne vode znašajo 40 mJ/cm^2 , kar zmanjšuje verjetnost uspešno zaključenega popravila dednega materiala. Poleg tega fotoreaktivacijo učinkovito preprečimo že s tem, da vode po dezinfekciji z UV svetlobo ne izpostavimo zunanjim virom svetlobe oz. naravni svetlobi.

UV svetloba kot dezinfekcijsko sredstvo deluje kontaktno in nima rezidualnih (naknadnih) dezinfekcijskih učinkov. V primerih, ko je to zaželeno ali zahtevano (običajno pri dezinfekciji pitne vode), je potrebno (dodatno) uporabiti oksidacijsko sredstvo s takšnimi učinki, običajno enega od klornih pripravkov. S tem uspešno preprečimo obnovo v temi.

V pravilno zasnovanih ter dobro vzdrževanih in delujočih vodooskrbnih sistemih z UV dezinfekcijo, kjer so doseženi vsi projektni parametri, pogoji za fotoreaktivacijo in obnovo v temi običajno niso izpolnjeni. Na podlagi dostopnih virov lahko zaključimo, da še ni bilo dokazano, da bi se fotoreaktivacija in obnova v temi zgodili v vodooskrbnem sistemu v polnem merilu.

13.3 DEZINFEKCIJA PITNE VODE Z UV SVETLOBO

13.3.1 ZAKONODAJNI OKVIR

Po veljavni zakonodaji v Republiki Sloveniji, kvaliteto pitne vode določa Pravilnik o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/2004). V 3. členu Pravilnik navaja zahteve za zdravstveno ustreznost vode, kamor spada tudi mikrobiološka neoporečnost in stabilnost. Pitna voda je zdravstveno ustrezna, kadar ne vsebuje mikroorganizmov, parazitov in njihovih razvojnih oblik v številu, ki lahko predstavlja nevarnost za zdravje ljudi ter ne vsebuje snovi v koncentracijah, ki same ali skupaj z drugimi snovmi lahko predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi.

S stališča dezinfekcije z UV svetlobo velja na tem mestu opozoriti na sledeče:

- Pri dezinfekciji z UV svetlobo mikroorganizmov iz vode ne odstranjujemo, temveč jih onesposabljam. Pri tem mikroorganizmi niso sposobni uspešno zaključiti življenjskega cikla oz. se razmnoževati, lahko pa so še živi.
- Navedbe, da voda ne sme vsebovati MO v nekem številu, dobesedno pomeni, da jih je iz vode potrebno odstraniti s fizikalnimi postopki.
- Pri interpretaciji 3. člena Pravilnika moramo zato uporabljati terminologijo, ki kot dezinfekcijo dopušča tako odstranjevanje kot onesposabljanje MO, ne glede na dezinfekcijsko sredstvo.

Pitna voda, ki izpolnjuje predpisane fizikalno-kemijske kriterije po Pravilniku o pitni vodi, je brez dodatne obdelave primerna za dezinfekcijo z UV svetlobo. V splošnem je za dezinfekcijo pitne vode prepustnost za UV svetlobo pri 254 nm $T_{1\text{cm}} > 80 \%$, motnost < 1 NTU in vsebnost suspendiranih snovi < 10 mg/L. Dejansko ima večina pitne vode v slovenskem prostoru $T_{1\text{cm}} > 90 \%$. Pri tem imajo vode iz površinskih virov in kraških vodonosnikov zaradi sestave občasno lahko tudi nižjo vrednost $T_{1\text{cm}}$, vendar ob pravilni pripravi le redko. Vode iz vodonosnikov z medzrnsko poroznostjo, to je iz vodnjakov na peščeni ali prodnati podlagi, imajo lahko $T_{1\text{cm}} > 95 \%$. Tudi vrednosti $> 98 \%$ ali $> 99 \%$ niso nič nenavadnega, ko gre za vodo z nizko vsebnostjo raztopljenih organskih snovi ter železa in mangana.

Slovenska zakonodaja pogojev za izvajanje dezinfekcije z UV svetlobo ne predpisuje. Nemški standard DVGW W 294 ter avstrijski standard ÖNORM M 5873-1 predstavljata v svetovnem merilu merodajne tehnične normative za dezinfekcijo z UV svetlobo. Smernice teh dveh standardov se uporabljajo tudi v naši inženirski praksi. Za doseganje 4 log onesposobljenja vseh bistvenih patogenih mikroorganizmov se uporablja standardna projektna doza 40 mJ/cm^2 .

V primerih, ko je na podlagi ukrepov za zaščito vode (pasivna in aktivna zaščita na vodovarstvenih in prispevnih območjih ter vodnih virih) in mikrobioloških analiz vode v daljšem časovnem obdobju izkazano, da za doseganje ustreznih dezinfekcijskih učinkov zadostujejo že nižje doze, se lahko poslužujemo tudi teh. Priporoča se, da v takšnih primerih UV doza vedno znaša najmanj 25 mJ/cm^2 . Naloga strokovnjakov (projektantov, svetovalcev, izvedencev,...) je, da v fazi projektiranja čistilnih naprav in vodooskrbnih sistemov predvidijo možne vplive in izberejo takšno tehnološko rešitev, ki zagotavlja varno dezinfekcijo.

13.3.2 VPLIV PREDHODNE OBDELAVE VODE IN VRSTNI RED POSTOPKOV

V vrsti enotnih postopkov na ČN za pitno vodo je potrebno doseči takšne fizikalno-kemijske parametre, da je vodo mogoče varno dezinficirati. S tega stališča ni samo dezinfekcija z UV svetlobo tista, ki zahteva dobro kakovost vode. Ugotovimo lahko, da prisotnost organskih in suspendiranih snovi ($\text{TOC} > 2 \text{ mg/L}$ in $\text{TSS} > 10 \text{ mg/L}$), zaradi nevarnosti tvorjenja škodljivih stranskih produktov, prav tako omejuje uporabo sredstev na osnovi klora, še posebej prostega klora ter nekoliko manj klordioksida in kloraminov. Tudi uporabo ozona zaradi možnega tvorjenja bromatov omejuje kakovost vode ($\text{Br}^{-1} < 1 \text{ mg/L}$). Dobro delujoči enotni postopki priprave vode, to so grobo in fino precejanje ali filtracija, koagulacija, flokulacija, usedanje, plavljenje, oksidacija, odstranjevanje železa in mangana ter drugi (v smiselnem zaporedju), so bistvena podlaga za varnost dezinfekcije in doseganje dobrih dezinfekcijskih učinkov, ne glede na izbiro dezinfekcijskega sredstva.

Tehnološko gledano je dezinfekcija z UV svetlobo na čistilni napravi za pitno vodo vedno (pred)zadnja v vrsti enotnih postopkov, če gre voda nadalje neposredno v vodooskrbni sistem. Na ta način preprečimo, da bi se v nekem naslednjem postopku poslabšala mikrobiološka kvaliteta. Drugače je pravilno, da se UV dezinfekcija izvaja tik pred samo distribucijo, torej po iztoku iz vodohrana. V obeh primerih se, razen če vodooskrbni sistem izkazuje odlične lastnosti in se dokazano ohranja mikrobiološka stabilnost vode, zagotovi še vsaj minimalna naknadna oz. rezidualna dezinfekcija. V individualnih objektih s potrebo po dezinfekciji se UV naprava namesti na vstopu vodovodne vode v objekt.

13.4 DEZINFEKCIJA KOMUNALNE ODPADNE VODE

13.4.1 ZAKONODAJNI OKVIR

Glede na veljavno zakonodajo primere, v katerih je potrebna dezinfekcija komunalne odpadne vode, določa "Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav" (Uradni list RS št.45/2007). Dezinfekcija končnega efluenta je zahtevana povsod, kjer so definirana t.i. občutljiva območja. Tam morajo končni efluenti izpolnjevati mikrobiološke parametre, kot jih podajamo v Preglednici 14.

Preglednica 18: Mejne vrednosti za mikrobiološke parametre pri odvajanju končnih efluentov iz komunalnih čistilnih naprav v občutljiva vodna telesa

Parameter	Enota	Majna vrednost emisije	
		Vodotoki	Morje
Skupne koliformne bakterije	Število v 100 ml	10.000	2.000
Koliformne bakterije fekalnega izvora	Število v 100 ml	2.000	500
Streptokoki fekalnega izvora	Število v 100 ml	400	200

Ob obravnavi pitne vode brez izjeme obravnavamo vse vrste patogenih mikroorganizmov, pri izpustih odpadnih voda v vodotoke ali morja pa se običajno osredotočamo na indikatorske mikroorganizme: koliformne bakterije, koliformne bakterije fekalnega izvora ter streptokoke fekalnega izvora.

Koliformne bakterije so bacili – bakterije paličaste oblike. Najdemo jih v vodi, v zemlji in na rastlinah ter v prebavilih toplokrvnih živali in človeka. Sem prištevamo naslednje vrste bakterij: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Klebsiella*, *Serratia* in *Yersinia*. Večina vrst ni patogenih oziroma so patogeni samo nekateri genetski tipi teh bakterij. Šele ob povečanem številu lahko postanejo nevarne za zdravje, poleg tega pa s svojim številom nakazujejo na prisotnost številnih drugih patogenih mikroorganizmov – virusov, bakterij in praživali, ki so prisotni v manjšem številu. Ker bi bilo analiziranje na takšne patogene zamudno in drago, običajno njihovo številčnost posredno izražamo s številom koliformnih bakterij. Koliformne bakterije fekalnega izvora so tista podskupina koliformnih bakterij, ki se množično pojavljajo v iztrebkih oz. izločkih toplokrvnih živali in človeka. Za streptokoke fekalnega izvora prav tako velja, da s svojo številčnostjo nakazujejo na prisotnost ostalih patogenih mikroorganizmov.

Zakonodaja v primeru odpadne vode prev tako nikjer ne določa potrebnih doz za doseganje ustrezne stopnje dezinfekcije. Standardne UV doze glede na ciljne mikroorganizme (koliformne bakterije) običajno znašajo 25 mJ/cm^2 . Ker prepustnost za UV svetlobo v odpadni vodi običajno znaša $45 \% < T_{1\text{cm}} < 65 \%$ je za doseganje enake UV doze kot v primeru pitne vode potreben bistveno večji vložek energije. Končni efluenti lahko vsebujejo večje količine suspendiranih delcev ($> 30 \text{ mg/L}$). Zaradi vplivov le-teh na UV svetlobo in posledično dezinfekcijsko učinkovitost se zato tedaj uporabljajo višje računске oz. modelirane UV doze, to je tudi do 70 mJ/cm^2 . Dejanska UV doza, ki jo prejmejo ciljni mikroorganizmi ob veliki vsebnosti suspendiranih snovi je nižja in v končni fazi lahko znaša le 25 mJ/cm^2 , kar je ciljna doza za onesposabljanje koliformnih bakterij. Dobro usedanje po biološki stopnji čiščenja je zato pomembno tako z vidika dezinfekcijskih učinkov kot z vidika ekonomike sistema (manjša potrebna doza – manjša naprava – manjši stroški).

13.4.2 VPLIV PREDHODNIH STOPENJ ČIŠČENJA

V primeru dezinfekcije končnega efluenta na biološki čistilni napravi je predvsem pomembno, da vse ostale stopnje čiščenja (mehanska, biološka, odstranjevanje hranil) učinkovito delujejo. Posebej pomembno je dobro delovanje biološke stopnje in učinkovito usedanje po biološki stopnji. Na ta način je doseženo ustrezno zmanjšanje količine raztopljenih organskih snovi, do velike mere se že odstranijo mikroorganizmi, prepreči se pojavljanje plavajočega blata in ostalih suspendiranih snovi v reaktorju, kjer se izvaja dezinfekcija z UV svetlobo. Pozorni moramo biti tudi na tretjo stopnjo čiščenja, pri kateri se kot pomožno sredstvo večkrat uporablja npr. železov triklorid. Visoke koncentracije železa lahko namreč negativno vplivajo na prepustnost UV svetlobe v vodi in zmanjšujejo dezinfekcijske učinke.

13.4.3 DEZINFEKCIJA ODPADNE VODE – DA ALI NE?

V Republiki Sloveniji se (skorajda) brez izjem končni efluenti stekajo v vodotoke ali v morje. Kjer so definirana občutljiva območja, je dezinfekcija končnega efluenta nujna. Tako kot je bilo še pred desetletjem ali dvema prej izjema kot pravilo, da se je izvajala tretja stopnja čiščenja odpadne vode, danes brez tega praktično ne gre. V naslednjih letih lahko pričakujemo, tudi z administracijskimi ukrepi na nivoju Evropske skupnosti, da se dezinfekcija končnih efluentov ne bo izvajala le na občutljivih območjih. Že sedaj smo večkrat lahko pričali situaciji, ko izgradnjo neke čistilne naprave sofinancira Evropska skupnost in je med ostalim pogojena tudi dezinfekcija končnega efluenta, čeprav v trenutno veljavnem zakonodajnem okviru ni zahtevana (npr. ČN, Radovljica, Trbovlje, Hrastnik, Tržič in gotovo še druge).

Postavlja se vprašanje, katero sredstvo je najprimernejše za dezinfekcijo komunalne odpadne vode. V strokovni javnosti obstajajo polemike o smotrnosti dezinfekcije odpadne vode in vrsti uporabljenih sredstev. Z naraščanjem zavedanja o pomembnosti dobrega stanja vodnih teles in okolja nasploh, lahko prenehamo s tehtanjem, ali je komunalno odpadno vodo smiselno dezinficirati, sploh če poznamo njeno sestavo in potencialne vplive na okolje. Ker snovi v živi in neživi naravi krožijo, smo prej ali slej soočeni s posledicami svojega ravnanja z okoljem.

Čistiti oz. dezinficirati ali ne torej že dolgo ne sme biti več vprašanje. Vprašanje je, ali smo na drugi strani pripravljeni višji standard okolja tudi podpreti s stabilnim ekonomskim okvirjem. Večkrat namreč naletimo na primere, ko se nek postopek čiščenja, ki ni predpisan oz. izvajalca gospodarske javne službe oskrbe in odvajanja vode ne zavezuje, ne izvaja zaradi povečanja stroškov. Z razpravo na to temo bi posegli na področje ekonomike javnih gospodarskih služb ter na področje stopnje ozaveščenosti in odgovornosti pri skrbi za okolje strokovne in laične javnosti, kar pa ni namen tega pisanja.

O izbiri dezinfekcijskega sredstva, poleg ekonomike in učinkovitost, lahko razpravljamo tudi z naslednjega zornega kota. Skozi postopke čiščenja se trudimo iz vode odstraniti nezaželene, nevarne in škodljive snovi. Komunalno odpadno vodo praviloma očistimo mehansko, odstranimo čim več raztopljenih organskih snovi, prav tako želimo odstraniti čim več hranil. Za izboljšanje kakovosti vode smo vanjo vložili določeno količino dela, energije in sredstev. Vprašanje je, ali želimo takšno vodo po končanem čiščenju za namene dezinfekcije ponovno (dodatno) obremeniti s kemičnimi snovmi z nezaželenimi učinki na okolje, ali uporabimo metodo, ki neposredno ne vpliva na fizikalno-kemijsko kakovost vode, na okolje pa vpliva v obliki emisij za proizvodnjo električne energije, npr. dezinfekcijo z UV svetlobo ali celo kakšno membransko tehnologijo. Menim, da je to tema, o kateri bi veljalo v prihodnje odpreti marsikatero strokovno debato, ne samo s stališča ekonomike, tudi s stališča ravnanja z okoljem.

Prav tako pomembno je vprašanje, do katerih pretokov skozi ČN za komunalno odpadno vodo dimenzionirati UV dezinfekcijo? V primeru, ko imamo opraviti z ločenim fekalnim in meteorim sistemom kanalizacije, dezinfekcijo dimenzioniramo na maksimalni pretok ČN za fekalno vodo. Običajno velja, da je v primeru mešane fekalne in meteorne kanalizacije dezinfekcija dimenzionirana na maksimalni padavinski pretok skozi ČN. Ali je to res potrebno? Pri takšnih pretokih se običajno pred ČN v odvodnik razbremenjuje del odpadne vode. V primeru padavin so odvodniki že po "naravni" poti obremenjeni s povečano vsebnostjo suspendiranih snovi in plavja. Vanje se z zaledja spirajo tudi "naravni" mikroorganizmi. Poleg tega se pri razbremenjevanju mešane kanalizacije v odvodnike vnaša tam prisotne mikroorganizme.

Vprašanje torej je, ali je smiselno dezinficirati odpadno vodo iz mešanega kanalizacijskega sistema na ČN in jo potem spustiti v odvodnik, ki je v primeru padavin obremenjen z zaledno vodo in "razbremenjeno" vodo pred ČN? V primeru, ko se na ČN čisti vsa odpadna voda, ki se zbira v kanalizacijskem sistemu, je smiselno dezinfekcijo dimenzionirati na maksimalni pretok ČN. V primeru razbremenjevanja pred ČN menim, da je bolj smiselno dezinfekcijo zasnovati na sušne pretoke. Pri sušnih pretokih so vodostaji odvodnikov nižji, pretoki manjši, odvodniki pa bolj občutljivi na vnose snovi in mikroorganizmov, še posebej pri relativno majhni vodnatosti odvodnikov v primerjavi z dotoki vanje iz ČN. Pri sušnih pretokih se v mešanih kanalizacijskih sistemih voda ne razbremenjuje pred ČN, zato se obdela (teoretično) vsa voda fekalnega izvora, ki je za dezinfekcijo kritična. Po mnenju avtorja takšni pogoji zahtevajo bistveno manjši in bolj ekonomičen UV sistem, ki zagotavlja dezinfekcijske učinke pri sušnih pretokih, pri padavinskih pretokih pa zgolj hidravlično prepustnost. Kako takšno interpretacijo uveljaviti v skladu z ohlapno napisanimi predpisi, zakoreninjenimi praksami in vidikom, da je dezinfekcija odpadne vode (z UV svetlobo) nekaj kar ni potrebno oz. nas k temu nihče ne zavezuje, je že drugo vprašanje...

13.4.4 ODPADNE VODE IZ DRUGIH VIROV

Opadna voda lahko prihaja iz virov, ki so posebni po vrsti in izvoru mikrobiološkega onesnaženja. Sem lahko prištevamo npr. biomedicinske odpadke v tekoči obliki, to so odpadne vode, ki so lahko zelo obremenjene s še posebej nevarnimi patogenimi MO. Predvsem so to odpadne vode iz bolnišnic, kirurških centrov, negovalnih domov, klinik, sodnomedicinskih in pogrebnih zavodov, odpadne vode iz raziskovalnih laboratorijev, veterinarskih ambulant,... Zaradi posebnih nevarnosti, ki jih takšne vode lahko predstavljajo, je v danih primerih namesto UV svetlobe bolj smiselno uporabiti eno od naslednjih metod sterilizacije oz. dezinfekcije:

- uporaba kemičnih sredstev z zelo visokimi dozami, kot npr. hiperkloriranje – izpostavljanje izredno visokim koncentracijam klora z daljšim kontaktnim časom ali
- mokra oksidacija – izpostavljanje temperaturam nad vreliščem vode pri povešanem tlaku.

14. ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO

Prvi del naloge smo posvetili razlagi teoretičnih pojmov, ki vplivajo na uporabo UV svetlobe v zdravstveni hidrotehniki. Pojasnili smo, katere spremenljivke najbolj vplivajo na uspešnost in ekonomičnost dezinfekcije. Na podlagi izvedenih raziskav smo podali, kakšne doze UV svetlobe so potrebne za onesposobljenje posameznih vrst mikroorganizmov. Prisotnost posameznih mikroorganizmov in potrebne doze za uspešno dezinfekcijo so temeljna podlaga, na kateri se odločimo za enega od postopkov dezinfekcije ter posredno določajo ekonomičnost tehnologije. Na kratko smo se dotaknili postopkov pospešene oksidacije, ki se ravno tako lahko izvajajo z UV svetlobo. Predstavili smo tehnične lastnosti UV reaktorjev in svetil ter metodi za matematično modeliranje. Dezinfekcijo z UV svetlobo smo primerjali z ostalimi postopki dezinfekcije, obravnavali ekonomiko UV dezinfekcije pitne in odpadne vode, komentirali bistvene operativne vidike in prikazali dva praktična primera.

Na podlagi pridobljenega znanja lahko trdimo, je za učinkovito in ekonomično dezinfekcijo z UV svetlobo potrebno poznati in upoštevati mnoge vplive, ki so na prvi pogled očem skrite. Ni vedno dovolj poznati le hidravlične obtežbe in okvirne fizikalno-kemijske parametre ter zahteve za dezinfekcijo in na podlagi njih iz prospektov proizvajalcev izbrati "ustrezno" napravo. Prav tako ne velja, da je vsak tlačni reaktor iz nerjavnega jekla, ki ima nameščeno UV svetilo, učinkovit in ekonomičen sistem za dezinfekcijo vode. Spremenljivk je namreč toliko, da mora biti izbira in izvedba UV sistemov optimalna za dobre rezultate.

Navedli smo vse bistvene prednosti in pomanjkljivost UV tehnologije. Primerjava z drugimi metodami dezinfekcije je pokazala, da konkurenčnost UV svetlobe v ekonomskem smislu narašča z naraščanjem pretokov. Zaradi različnih tehnoloških izhodišč, iz katerih izhaja uporaba določene metode ali sredstva, ne moremo povsem enoznačno primerjati UV svetlobe in ostalih postopkov. Če smo pripravljene prednosti in pomanjkljivosti, ki jih prinaša določena tehnologija, sprejeti in jih kritično vrednotiti ter ekonomsko upravičiti, je dezinfekcija z UV svetlobo lahko varna, učinkovita in glede na prednosti, ki jih prinaša, ekonomična alternativna metoda dezinfekcije pitne in odpadne vode.

Bistveno je, da pri vrednotenju kateregakoli postopka čiščenja vode najprej jasno določimo cilje in izhodišča. Ti so za uporabo membranskih tehnologij ali ozoniranja vode denimo povsem drugačni kot za uporabo UV tehnologije, zato neposredne primerjave učinkovitosti in ekonomičnosti niso najbolj na mestu.

V sklopu diplomske naloge nismo mogli enakovredno zajeti vseh vplivov, ki jih v dejanskih primerih moramo upoštevati za določitev optimalne tehnologije. V bodoče bi zato morda veljalo na konkretnih primerih surove vode iz različno fizikalno-kemijsko in mikrobiološko obremenjenih virov, pri različnih pretokih primerjati učinkovitost in ekonomičnost posameznih tehnologij za doseganje istih učinkov. Filtracija in večstopenjska dezinfekcija, membranske tehnologije, uporaba ozona, UV tehnologija itd., predvsem pa njihove kombinacije, imajo vse neko "kritično velikost", pod ali nad katero bi iste učinke z manjšimi vložki sredstev in energije lahko dosegli z uporabo alternativnih tehnologij in/ali njihovih kombinacij.

Nadalje bi veljalo spremljati razvoj UV tehnologije, tehnične izboljšave in povečevanje dezinfekcijske in ekonomske učinkovitosti. Pričakujemo lahko, da bodo z vse večjo razširjenostjo tehnologije stroški, ki so največkrat (in večkrat neupravičeno) pripisani minus, v naslednjih letih padali, zavedanje dobrih lastnosti pa naraščalo. Obstoječe znanje s tega področja bi zato veljalo nadgraditi in ga podpreti s še več praktičnimi izkušnjami.

VIRI

Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, 1999. Washington, Washington DC, ZDA. United States Environmental Protection Agency, Office of Water: 346 str.

Belosevic, M., Craik, S.A., Stafford, J.L., Neumann, N.F., Kruithof, J., Smith, D.W., 2001. Studies on the resistance/reactivation of *Giardia muris* cysts and *Cryptosporidium parvum* oocysts exposed to medium-pressure ultraviolet radiation. FEMS Microbiology Letters 204 (2001): 197–203.

Beneson, W. (ur.), Harris, J.W. (ur.), Stocker, H. (ur.), Lutz, H. (ur.), 2002. Handbook of Physics. New York, Springer: 1181 str.

Blatchley, E. R., Hunt, B. A., Duggirala, R., Thompson, J.E., Zhao, J., Halaby, T., Cowger, R. L., Straub, C. M., Alleman, J. E., 1997. Effects of disinfectants on wastewater effluent toxicity. Water research, 31, 7: 1581–1588.

Bolton, J. R., 2000. Calculations of Ultraviolet Fluence Rate Distributions in an Annular Reactor: Significance of Refraction and Reflection. Water Research 34, 13: 3315–3324.

Campbell, A.T., Wallis, P., 2002. The effect of UV irradiation on human-derived *Giardia lamblia* cysts. Water research 36 (2002): 963–969.

Chin, A., Berube, P.R., 2005. Removal of Disinfection By-Product Precursors with Ozone-UV Advanced Oxidation Process. Water Research 39 (2005): 2136–2144.

Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual, 2005. Winnipeg, Manitoba, Kanada. Manitoba Water Stewardship, Office of drinking water: 117 str.

Clauss, M., Mannesmann, R., Kolch, A., 2005. Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Yersinia enterocolytica* after irradiation with a 222 nm excimer lamp compared to a 254 nm low-pressure mercury lamp. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 33 (2005): 579–584.

Craik, S.A., Finch, G.R., Bolton, J.R., Belosevic, M., 2000. Inactivation of *Giardia muris* cysts using medium-pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water. *Water Research* 34, 18: 4325–4332.

Craik, S.A., Weldon, D., Finch, G.R., Bolton, J.R., Belosevic, M., 2001. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts Using Medium- and Low- Pressure Ultraviolet Radiation. *Water Research* 35, 6: 1387–1398.

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

Downey, D., Giles, D. K., Delwiche, M. J., 1998. Finite element analysis of particle and liquid flow through an ultraviolet reactor. *Computers and Electronics in Agriculture* 21 (1998): 81–105.

Finch, G. R., Belosevic, M., 2000. Controlling *Giardia* spp. and *Cryptosporidium* spp. in drinking water by microbial reduction processes. *Canadian Journal of Civil Engineers* 28 (2001): 67–80.

Giese, N., Darby, J., 2000. Sensitivity of Microorganisms to Different Wavelengths of UV Light: Implications on Modelling of Medium Pressure UV Systems. *Water Research* 34, 16: 4007–4013.

Hijnen, W.A.M., Beerendonk, E.F., Medema, G.J., 2006. Inactivation Credit of UV Radiation for Viruses, Bacteria and Protozoan (Oo)Cysts in Water: A review. *Water Research* 40: 3–22.

Hockberger, P. E., 2002. A History of Ultraviolet Photobiology for Humans, Animals and Microorganisms. American Society of Photobiology.

http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3931/is_200212/ai_n9156750/pg_42?tag=artBody:coll

(10.06.2008)

Hugo, W.B., 1995. A Brief History of Heat, Chemical and Radiation Preservation and Disinfection. *International Biodeterioration and Biodegradation* (1995): 197–217.

ITT WEDECO – slikovno gradivo, projektna in tehnična dokumentacija.

Jin, S., Linden, K.G., Ducoste, J., Liu, D., 2005. Impact of lamp shadowing and reflection on the fluence rate distribution in a multiple low-pressure UV lamp array. *Water research* 39 (2005): 2711–2721.

Kladnik, R., 1989. *Visokošolska fizika 3. del – Valovni pojavi – Akustika in optika*. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 189 str.

Koivunen, J., Heinonen-Tanski, H., 2005. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV radiation and combined chemical/UV treatments. *Water research* 39 (2005): 1519–1526.

LeChevallier, M.W., Au, K.-K., 2002. Impact of treatment on Microbial Water Quality: A Review Document on Treatment Efficiency to Remove Pathogens. World Health Organization: 86 str.

Lin, L.-S., Johnston, C.T., Blatchley, E.R., 1999. Inorganic Fouling at Quartz: Water Interfaces in Ultraviolet Photoreactors. *Water Research* 33, 15: 3321–3338.

Liu, W. et al., 2002. Comparison Of Disinfection Byproduct (DBP) Formation From Different UV Technologies at Bench Scale. *Water science & technology : Water supply* 2, 5-6: 515–521.

MAK CMC tehnologija vode d.o.o. – slikovno gradivo, projektna in tehnična dokumentacija.

Marinšek Logar, R., Zrimec, A., Berden Zrimec, M., Čepeljnik, T., Tišler, T., 2006. Ugotavljanje strupenosti in genotoksičnosti pitnih vod. Zbornik referatov – Vodni dnevi 2006. Portorož, Grand hotel Bernardin, 18.–19. Oktober 2006. Ljubljana, Slovensko društvo za zaščito voda: http://www.sdzv-drustvo.si/si/VD-06_Referati/Vodni%20dnevi%202006-referati.htm (15.6.2008).

Monarca, S., Feretti, D., Collivignarelli, C., Guzzella, L., Zerbini, I., Bertanza, G., Pedrazzini, R., 2000. The influence of different disinfectants on mutagenicity and toxicity of urban wastewater. *Water research* 34, 17: 4261–4269.

Muelemans, C. C. E., 1986. The basic principles of UV-sterilization of water. Zbornik referatov – Simpozij v okviru sejma Aquatech Amsterdam 1986. Amsterdam, RAI – osrednje razstavišče, 16.–18. september 1986. International Ozone Association: str. B.1.1–B.1.13.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) – Državna vesoljska agencija ZDA.
<http://www.nasa.gov>.

National Institute of Allergy and Infectious Diseases (NIAID) – Državni inštitut ZDA za alergije in nalezljive bolezni. <http://www3.niaid.nih.gov/>.

Norman, A.W., 1998. Sunlight, Season, Skin Pigmentation, Vitamin D, and 25-Hydroxyvitamin D: Integral Components of The Vitamin D Endocrine System. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 67: 1108–1110.

Oguma, K., Katayama, H., Ohgaki, S., 2004. Photoreactivation of *Legionella pneumophila* after inactivation by low- or medium-pressure ultraviolet lamp. *Water research* 38 (2004): 2757–2763.

Oregon Medical Laser Center (OMLC) – Raziskovalni inštitut za biomedicinsko optiko, Portland, Oregon, ZDA. <http://omlc.ogi.edu/>.

Peak, M., Peak, J., 1991. Effects of Solar Ultraviolet Photons on Mammalian Cell DNA. Biological and Medical Research Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, ZDA: 6 str.

Pravilnik o pitni vodi. UL RS št. 19/2004: 2155–2166

Ravnikar, J., 2004. Odstranjevanje parazitov v kraških pitnih vodah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Univerzitetni študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 138 str.

Schroeter, W., Lautenschlaeger, K. H., Bibrack, H., Schnabel, A., 1993. Kemija - splošni priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 712 str.

Sellami, H.M., Hassen, A., Sifaoui, M.S., 2003. Modelling of UV radiation field inside a photoreactor designed for wastewater disinfection – Experimental validation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 78 (2003): 269–287

Sharpless, C.M., Page, M.A., Linden, K.G., 2003. Impact of hydrogen peroxide on nitrite formation during UV disinfection. *Water research* 37 (2003): 4730–4736.

Standard:

DIN 4844-2. 2001. Safety marking – Part 2: Overview of safety signs

Standard:

ISO 21348. 2005. Process for determining solar irradiances: 16 str.

Steinman, F., 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 109–119, 156.

Stopar, P., 2007. Priprava pitne vode na zajetju Jama. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Komunalna smer: 68 str.

Summerfelt, S.T., 2003. Ozonation and UV irradiation – an introduction and examples of current applications. *Aquacultural engineering* 28 (2003): 21–36.

Taghipour, F., 2004. Ultraviolet and Ionizing Radiation for Microorganism Inactivation. *Water Research* 38 (2004): 3940–3948.

Taghipour, F., Sozzi, A., 2005. Modeling And Design of Ultraviolet Reactors for Disinfection by-Product Precursor Removal. *Desalination* 176 (2005): 71–80

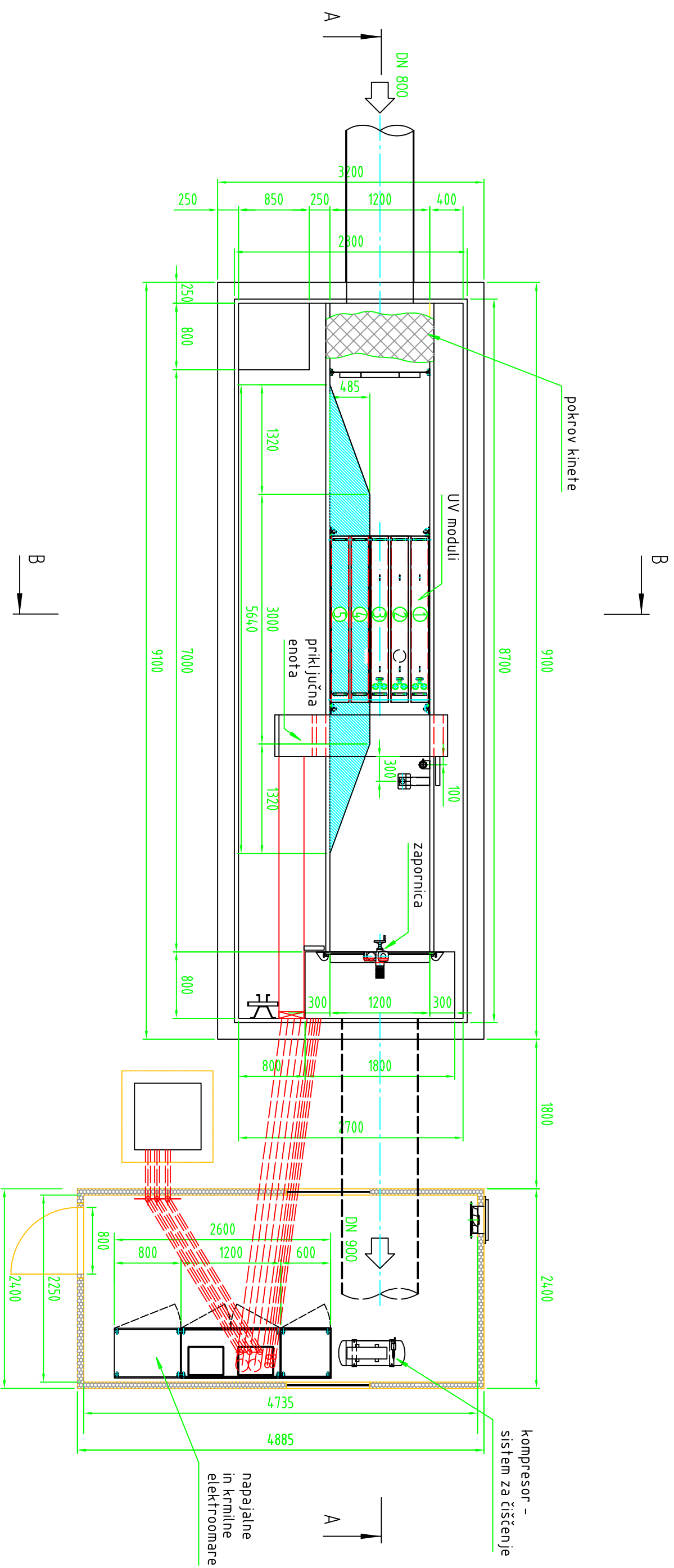
Tempelton, M.R., Andrews, R.C., Hofmann, R., 2005. Inactivation of Particle-Associated Viral Surrogates by Ultraviolet Light. *Water Research* 39 (2005): 3487–3500.

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav. UL RS št. 45/2007: 6170–6181.

Villarino, A., Bouvet, O., Regnault, B., Delautre, S., Grimont, P.A.D., 2000. Cellular Activities in Ultraviolet Killed Escherichia Coli. *International Journal of Food Microbiology* 55 (2000): 245–247.

**PRILOGA A: ČN RADOVLJICA – TLORIS KINETE ZA
DEZINFEKCIJO**

TLORIS



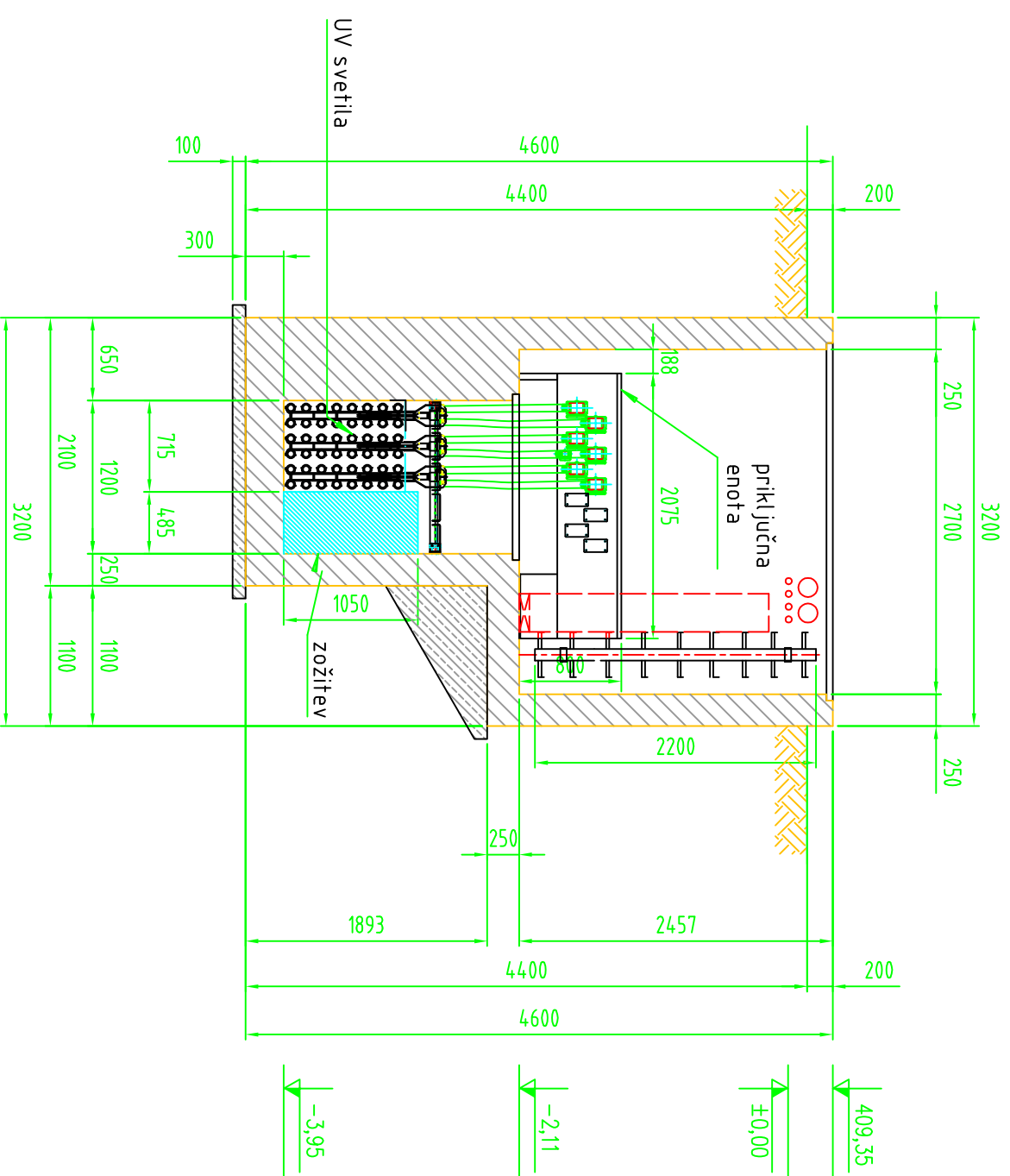
OPOMBA: dimenzije v [mm]

Objekt/Lokacija	ČISTILNA NAPRAVA RADOVLJICA
Vsebina/Naslov risbe	TLORIS KINETE ZA UV DEZINFEKCIJO
Datum	juni 2009
Prilavil	MATEJ ČEHOVIN
Oznaka	PRILOGA A

**PRILOGA B: ČN RADOVLJICA – VZDOLŽNI PREREZ
KINETE ZA DEZINFEKCIJO**

**PRILOGA C: ČN RADOVLJICA – PREČNI PREREZ
KINETE ZA DEZINFEKCIJO**

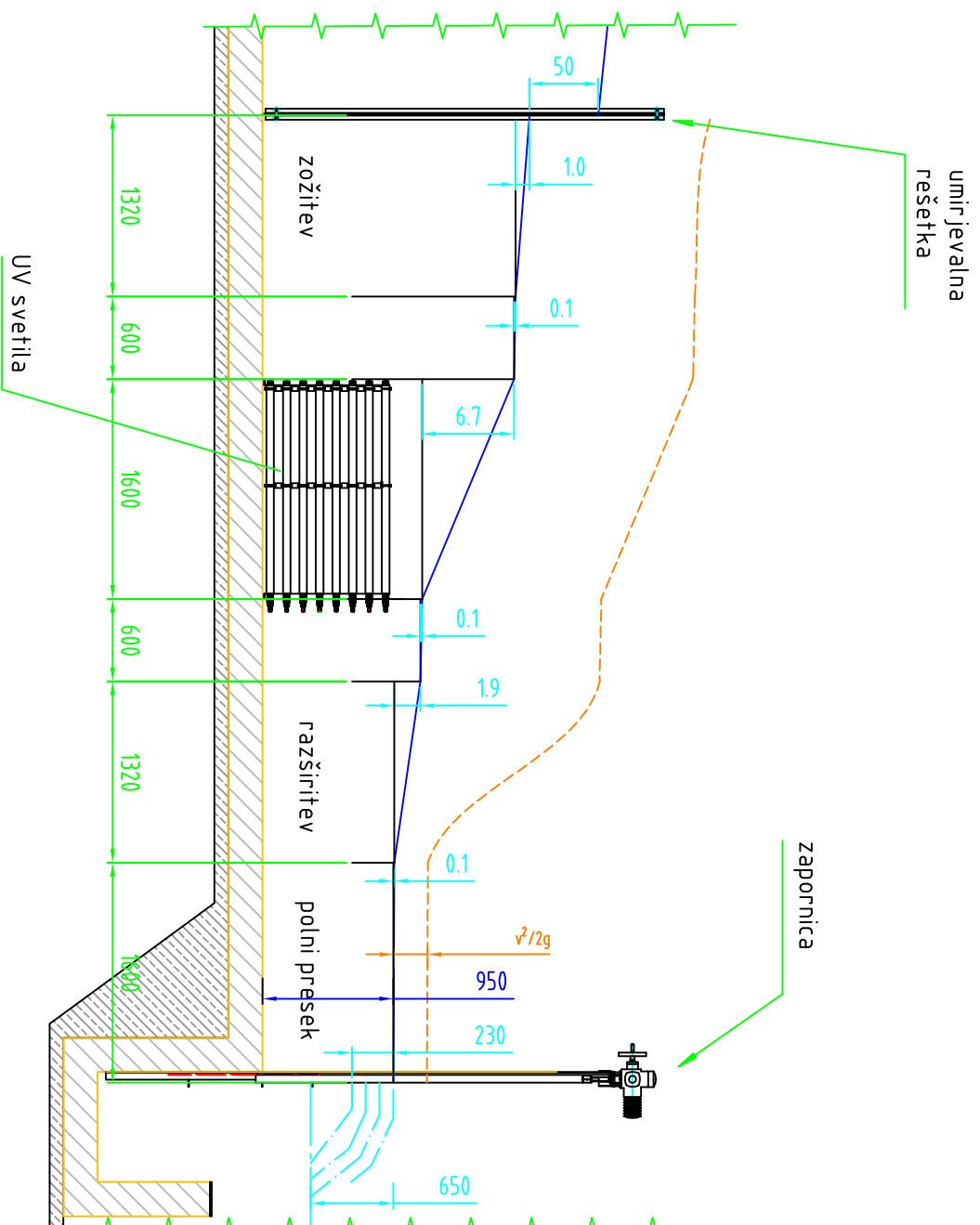
PREREZ B-B



OPOMBA: dimenzije v [mm], kote terena v [m]

Objekt/Lokacija	ČISTILNA NAPRAVA RADOVLJICA
Vsebina/Nastor risbe	KINETA ZA UV DEZINFEKCIJO – PREREZ B-B
Datum	junij 2009
Priloga	MATEJ ČEHOVIN
Oznaka	PRILOGA C

**PRILOGA D: ČN RADOVLJICA – HIDRAVLIČNI PROFIL
KINETE ZA DEZINFEKCIJO**



OPOMBE:

— POTEK GLADINE

— PRIBLIŽEN POTEK ENERGIJSKE ČRTE

MERE SO V [mm]

VERTIKALNA OS NI RISANA V MERILU!

Objekt/Lokacija	ČISTILNA NAPRAVA RADOVLJICA
Vsebina/Nastov risbe	HIDRAVLIČNI PROFIL UV REAKTORJA
Datum	junij 2009
Priloval	MATEJ ČEHOVIN
Oznaka	PRILOGA D

PRILOGA E: ČN RADOVLJICA – MODEL HIDRAVLIČNEGA PROFILA KINETE ZA DEZINFEKCIJO

RADOVLJICA - HIDRAVLIKA

KANAL - ZOŽITEV

ng = 0,0156	=	0,20 ‰
l0 = 0,0002		
š _z = 0,715 m		
h = 0,95 m		
S = 0,679 m ²		
O = 2,615 m		
R = 0,260 m		

Q = 0,2500 m ³ /s	v = 0,37 m/s
Q = 900 m ³ /h	v ² /2g = 6,9 mm

OMOČENI OBOD

KANAL	O _k = 1,665 m	ng = 0,016
INOX	O _i = 0,95 m	ng = 0,015

n_e = 0,0156

$$n_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N O_i \cdot n_i^{3/2}}{O_{cel}} \right)^{2/3}$$

$$Q = \frac{\sqrt{I_0}}{n_g} \cdot R^{2/3} \cdot S = \frac{\sqrt{I_0}}{n_g} \cdot \frac{S^{5/3}}{O^{2/3}}$$

LINIJSKE IZGUBE NA ZOŽANEM DELU:

L1 = 0,6	pred reaktorjem	UPOŠTEVATI NA GORVODNI IN DOLVODNI STRANI REAKTORJA !!!
L2 = 0,6	za reaktorjem	
DH _{1,2} = 0,0001	m = 0,1	mm

LOKALNE IZGUBE

zožitev	C = 0,2
razširitev	C = 0,4

$$\Delta H_c = C \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

DH _{z1} = 0,000891	m = 0,9	mm	zožitev
DH _{z2} = 0,001781	m = 1,8	mm	razširitev

Fr = 0,12

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

LINIJSKE IZGUBE NA NEPRIZMATIČNEM DELU

polna širina	1,2	ZOŽITEV APROKSIMIRAMO
širina v zožitvi	0,715	S SREDNJO ŠIRINO
srednja širina š _s	0,958	

ng = 0,0156	=	0,09 ‰
l0 = 0,0001		
š _s = 0,958 m		
h = 0,95 m		
S = 0,910 m ²		
O = 2,858 m		
R = 0,318 m		

Q = 0,2500 m ³ /s	v = 0,27 m/s
Q = 900 m ³ /h	v ² /2g = 3,8 mm

IZGUBE:

L _{odseka} = 1,3	m	UPOŠTEVATI NA GORVODNI IN DOLVODNI STRANI REAKTORJA !!!
DH = 1,1E-04	m = 0,1	

Fr = 0,09

REAKTOR

OMOČENI OBOD

KANAL	O _k = 1,665 m	n _{sk} = 0,016
INOX	O _i = 0,95 m	n _{gi} = 0,015
STEKLA	O _s = 10,56 m	n _{gs} = 0,014
SKUPAJ	O _{cel} = 13,17 m	

ne = 0,0143

$$n_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N O_i \cdot n_i^{3/2}}{O_{cel}} \right)^{2/3}$$

SVETILO

d _s = 70	mm = 0,07	m	premer svetila
S _s = 3848	mm ² = 0,0038	m ²	površina svetila
S ₄₈ = 0,1847	m ²		površina 48 svetil

O _s = 0,220	m	omočeni obod svetila
O _{s48} = 10,556	m	omočeni obod 48 svetil

ng = 0,0143	=	4,18 ‰
l0 = 0,0042		
š = 0,715 m		
h = 0,95 m		
S _e = 0,495 m ²		
O = 13,171 m		
R = 0,038 m		

Q = 0,2500 m ³ /s	v = 0,51 m/s
Q = 900 m ³ /h	v ² /2g = 13,0 mm

$$Q = \frac{\sqrt{I_0}}{n_g} \cdot R^{2/3} \cdot S = \frac{\sqrt{I_0}}{n_g} \cdot \frac{S^{5/3}}{O^{2/3}}$$

REDUKCIJA POLNEGA PRESEKA ZARADI SVETIL

$$S_e = S_s - S_{48}$$

IZGUBE:

L _{odseka} = 1,6	m
DH = 6,7E-03	m = 6,7
	mm

Fr = 0,17

V _R = 0,707	m ³	prostornina reaktorja (pri obločni dolžini svetil)
t _r = 2,8	s	računski zadrževalni čas

KANAL - POLNI PRESEK

ng = 0,016	=	0,05 ‰
l0 = 0,00005		
š = 1,2 m		
h = 0,95 m		
S = 1,140 m ²		
O = 3,100 m		
R = 0,368 m		

Q = 0,2500 m ³ /s	v = 0,22 m/s
Q = 900 m ³ /h	v ² /2g = 2,5 mm

IZGUBE:

L _{odseka} = 1,6	m
DH = 7,5E-05	m = 0,1
	mm

Fr = 0,07

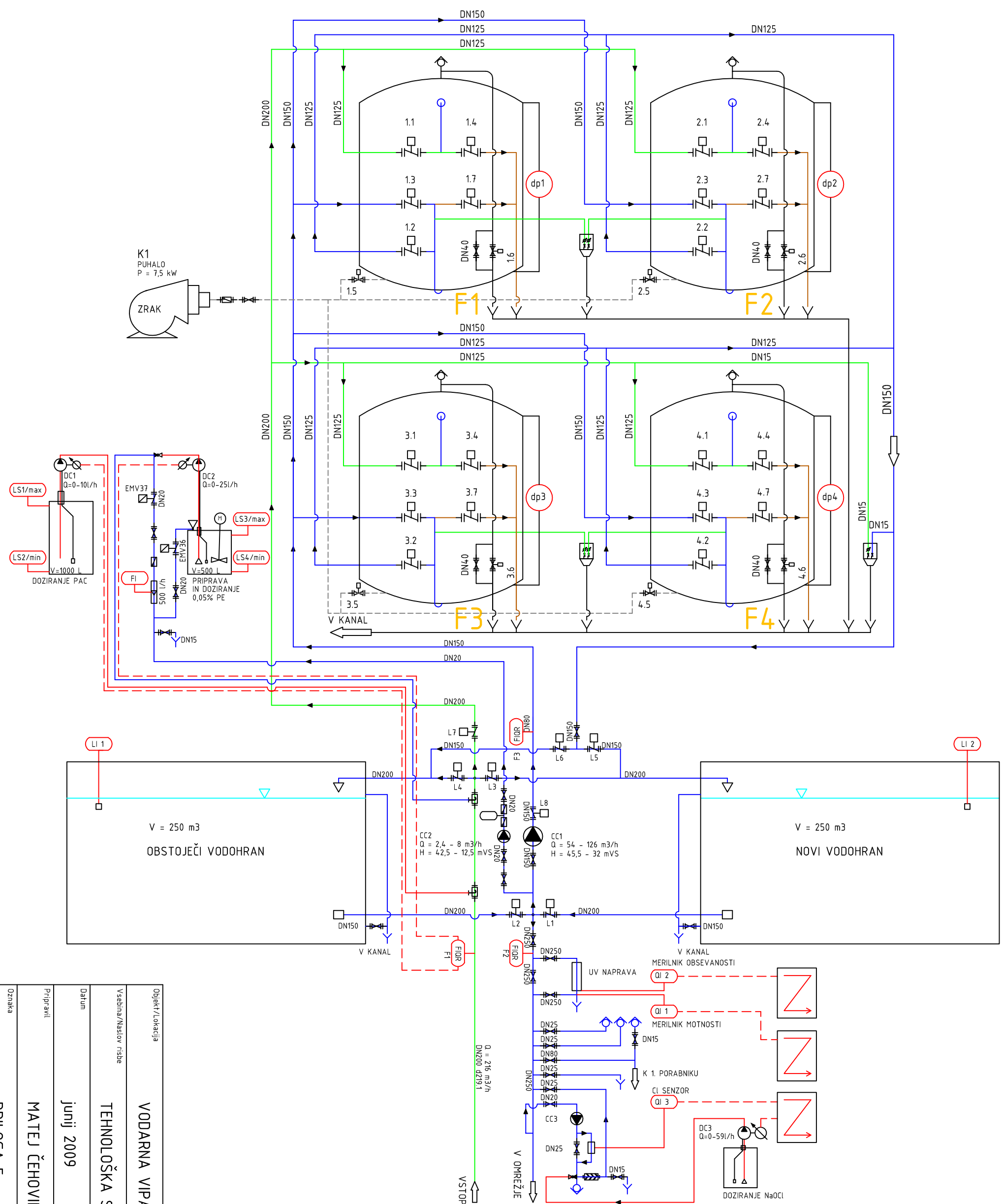
VSOTA HIDRAVLIČNIH IZGUB = 9,9 mm

OSTROROBI PRELIV - ZAPORNICA

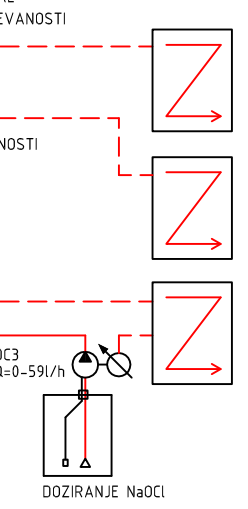
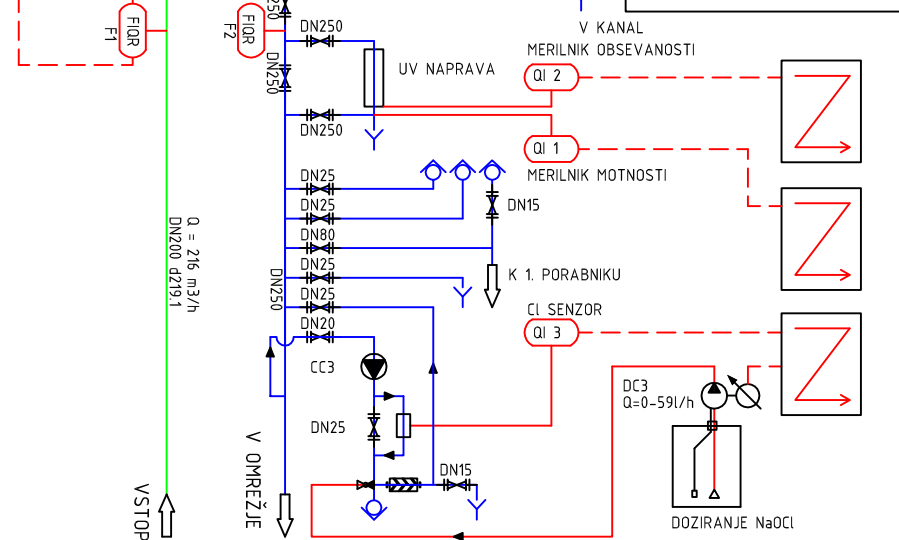
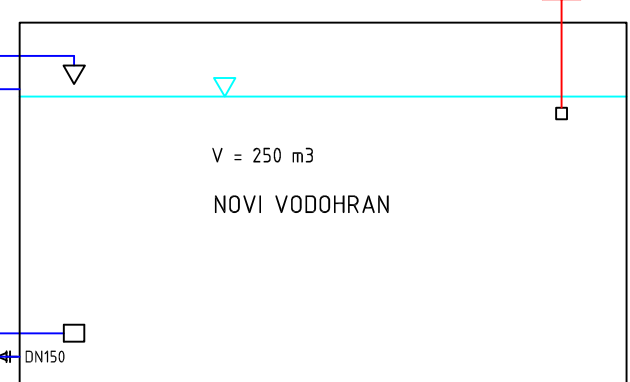
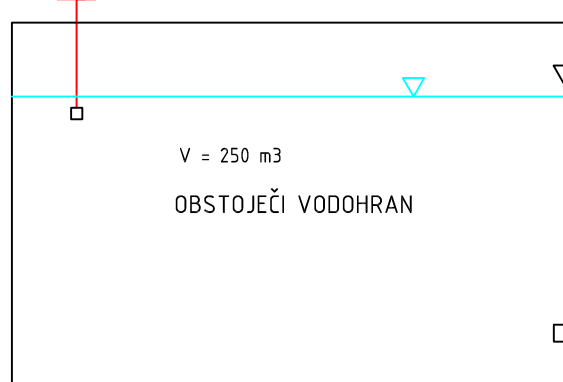
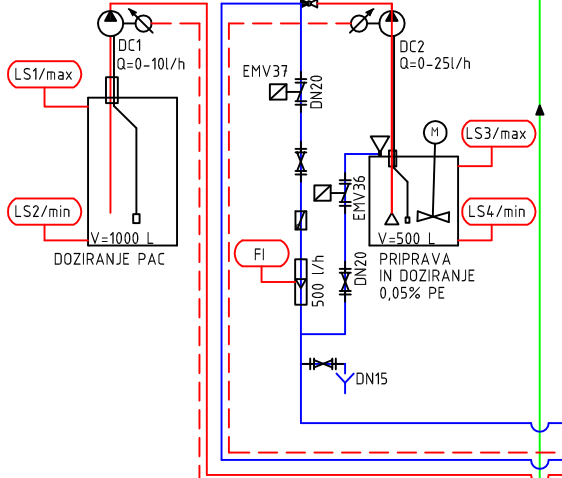
μ = 0,64
b = 1,2 m
g = 9,81 m/s ²
h = 0,23 m
Q = 0,2500 m ³ /s
Q = 900 m ³ /h

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

PRILOGA F: VODARNA VIPAVA – TEHNOLOŠKA SHEMA FILTRACIJE IN DEZINFEKCIJE



K1
PUHALO
P = 7,5 kW
ZRAK



Objekt/Lokacija	VODARNA VIPAVA
Vsebina/Nastav risbe	TEHNOLOŠKA SCHEMA ČISTILNE NAPRAVE
Datum	junij 2009
Priloga	MATEJ ČEHOVIN
Oznaka	PRILOGA F

PRILOGA G: VODARNA VIPAVA – POENOSTAVLJENI MODEL OBSEVANOSTI REAKTORJA

VIPAVA - B220

D = 415 J/m²
 Q = 216 m³/h
 Q = 0,060 m³/s
 V = 0,106 m³

$$E_0(r) = \frac{P' \cdot T^{\alpha(r-x)}}{2\pi \cdot r}$$

t_z = 1,8 s

$$\overline{E_0} = \frac{P' \cdot (T^{\alpha \cdot (R-x)} - 1)}{\alpha \cdot \pi \cdot \ln(T) \cdot (R^2 - x^2)}$$

E_{0d} = 235 W/m²

R = 0,17 m

premer dejanskega reaktorja D = 0,34 m

r' = 0,051 m

računska radialna oddaljenost od svetila

L_s = 1 m

R' = 0,051 m

računski polmer reaktorja

P = 63 W

x = 0,025 m

polmer steklene cevi

P' = 63 W/m

T_{1cm} = 0,94

α = 2,69

S_r = 0,09079 m²

površina celotnega preseka reaktorja

S_s = 0,00196 m²

površina preseka 1 svetila

S_{s9} = 0,01767 m²

površina preseka 9 svetil

S_{efekt} = 0,07312 m²

efektivna površina reaktorja

S_o = 0,09140 m²

računska obsevana površina zaradi prekrivanja vplivnih območij

S₁ = 0,0081 m²

površina nadomestnega podreaktorja = S_{efekt}/9

R₁ = 0,051 m

premer nadomestnega podreaktorja

E_r = 196,3 W/m²

obsevanost na oddaljenosti r'

E_{0m} = 264 W/m²

modelirana povprečna obsevanost

E_{0p} = 211 W/m²

upoštevano 20% zmanjšanje zaradi vplivov odboja in loma svetlobe

upoštevano 20% zmanjšanje zaradi staranja svetil

upoštevano, da 1/4 obsevanosti prihaja iz "sosednjih" virov

PRILOGA H: PRERAČUN EKONOMIKE UV REAKTORJEV

PITNA VODA - $T_{1cm} = 96 \%$; $D = 40 \text{ mJ/cm}^2$; osnovni sistem brez avtomatskega čiščenja**HIDRAVLIKA**

NAZIVNI PRETOK Q_n [m^3/h]	11,8	24,2	50	103	148	379	850	1037	1357	2120
NAZIVNI PRETOK Q_n [l/s]	3,3	6,7	13,9	28,6	41,1	105,3	236,1	288,1	376,9	588,9
KOLIČINA VODE V 15 LETIH pri Q_n [m^3]	1550520	3179880	6570000	13534200	19447200	49800600	111690000	136261800	178309800	278568000

UV SVETILA

ŠT. UV SVETIL	1	2	2	2	2	4	8	10	18	32
MOČ ENEGA SVETILA [kW]	0,135	0,08	0,165	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
PRIKLJUČNA MOČ [kW]	0,17	0,23	0,47	0,80	0,80	1,5	3,0	3,7	6,7	11,6
ŽIVLJENJSKA DOBA [h]	10000	8760	10000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000

INVESTICIJA V OPREMO, VKLJUČNO S CEVOVODI, ARMATURAMI, ELEKTROTEHNIČNIMI DELI IN STROŠKI DELA

INVESTICIJA/ m^3 v 15 LETIH [EUR/ m^3]	0,00348	0,00283	0,00221	0,00132	0,00113	0,00070	0,00047	0,00045	0,00047	0,00041
---	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

STROŠKI ENERGIJE pri ceni 0,1 €/kWh

PORABA ENERGIJE PRI Q_n [kWh/ m^3]	0,0144	0,0095	0,0094	0,0078	0,0054	0,0040	0,0035	0,0036	0,0049	0,0055
STROŠKI ENERGIJE PRI Q_n [EUR/ m^3]	0,00144	0,00095	0,00094	0,00078	0,00054	0,00040	0,00035	0,00036	0,00049	0,00055

STROŠKI MENJAVE SVETIL IN ČIŠČENJA STEKEL -pri vsaki menjavi upoštevano tudi čiščenje stekel

MENJAVA SVETIL [n/15 let]	12	14	12	10	10	10	10	10	10	10
STROŠKI SVETIL PRI Q_n [EUR/ m^3]	0,00360	0,00314	0,00227	0,00129	0,00090	0,00070	0,00063	0,00064	0,00088	0,00100

VSOTA PREDVIDENIH STROŠKOV V 15 LETIH

EUR/ m^3 pri Q_n	0,0085	0,0069	0,0054	0,0034	0,0026	0,0018	0,0015	0,0014	0,0019	0,0020
-----------------------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

ODPADNA VODA; T_{1cm} = 55 %; D = 25 mJ/cm²; z avtomatskim čiščenjem**HIDRAVLIKA**

NAZIVNI PRETOK Q _n [m ³ /h]	36,2	55,2	95,1	145	242	390	598	798	1006
NAZIVNI PRETOK Q _n [l/s]	10,1	15,3	26,4	40,3	67,2	108,3	166,1	221,7	279,4
KOLIČINA VODE V 15 LETIH pri Q _n [m ³]	4756680	7253280	12496140	19053000	31798800	51246000	78577200	1,05E+08	1,32E+08

UV SVETILA

ŠT. UV SVETIL	8	12	4	6	10	16	24	32	40
MOČ ENEGA SVETILA [kW]	0,08	0,08	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
PRIKLJUČNA MOČ [kW]	0,73	1,1	1,5	2,3	3,7	5,9	8,8	11,6	14,5
ŽIVLJENJSKA DOBA [h]	8760	8760	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000

INVESTICIJA V OPREMO, VKLJUČNO S CEVOVODI, ARMATURAMI, ELEKTROTEHNIČNIMI DELI IN STROŠKI DELA

INVESTICIJA/m ³ v 15 LETIH [EUR/m ³]	0,00538	0,00444	0,00357	0,00263	0,00212	0,00165	0,00134	0,00119	0,00120
---	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

STROŠKI ENERGIJE pri ceni 0,1 €/kWh

PORABA ENERGIJE PRI Q _n [kWh/m ³]	0,0202	0,0199	0,0158	0,0159	0,0153	0,0151	0,0147	0,0145	0,0144
STROŠKI ENERGIJE PRI Q _n [EUR/m ³]	0,00202	0,00199	0,00158	0,00159	0,00153	0,00151	0,00147	0,00145	0,00144

STROŠKI MENJAVE SVETIL IN ČIŠČENJA STEKEL -pri vsaki menjavi upoštevano tudi čiščenje stekel

MENJAVA SVETIL [n/15 let]	14	14	10	10	10	10	10	10	10
STROŠKI SVETIL PRI Q _n [EUR/m ³]	0,00839	0,00825	0,00280	0,00275	0,00275	0,00273	0,00267	0,00267	0,00265

VSOTA PREDVIDENIH STROŠKOV V 15 LETIH

EUR/m ³ pri Q _n	0,0158	0,0147	0,0079	0,0070	0,0064	0,0059	0,0055	0,0053	0,0053
---------------------------------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------