

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Sonja DRAVEC

**KONDITIONIRANJE MIKROBIOLOŠKO
ONESNAŽENEGA VODNEGA VIRA V GERLINCIH
S POMOČJO RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

Ljubljana, 2007

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Sonja DRAVEC

**KONDITIONIRANJE MIKROBIOLOŠKO ONESNAŽENEGA VODNEGA VIRA
V GERLINCIH S POMOČJO RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**CONDITIONING OF MICROBIOLOGICALLY POLLUTED DRINKING WATER
SOURCE IN GERLINCI WITH CONSTRUCTED WETLAND (CW)**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2007

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija biologije. Opravljeno je bilo na Oddelku za biologijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, v podjetju Limnos d.o.o., vzorčenje je bilo narejeno na RČN Gerlinci, v laboratoriju Zavoda za zdravstveno varstvo Murska Sobota pa so pripravili kulturo ter naredili mikrobiološke analize.

Študijska komisija Oddelka za biologijo je za mentorja diplomskega dela imenovala prof. dr. Danijela Vrhovška.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Alenka GABERŠČIK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Član: prof. dr. Mihael J. TOMAN
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Član: prof. dr. Danijel VRHOVŠEK
Limnos d.o.o., Podjetje za aplikativno ekologijo

Datum zagovora:

Podpisana se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddala v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Sonja Dravec

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 628.35:579.26(497.4 Gerlinci)(043.2)=863
KG	pitna voda/mikrobiološko onesnaženje/kondicioniranje/rastlinska čistilna naprava (RČN)/dezinfekcija pitne vode
AV	DRAVEC, Sonja
SA	VRHOVŠEK, Danijel (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
LI	2007
IN	KONDICIONIRANJE MIKROBIOLOŠKO ONESNAŽENEGA VODNEGA VIRA V GERLINCIH S POMOČJO RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	XIII, 65 str., 8 pregl., 10 sl., 4 pril., 51 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Vodo, ki ne ustreza zakonskim zahtevam o kakovosti pitne vode, moramo pred distribucijo v vodovodni sistem dodatno obdelati. Na razpolago imamo širok spekter sodobnih postopkov čiščenja in priprave ter dezinfekcije vode, a so ti načini dragi in prebivalcem na malih oskrbovalnih območjih nedostopni. In prav na teh območjih je mikrobiološko onesnaženje glavni vzrok neskladnosti vzorcev pitne vode. Kot alternativa konvencionalnemu čiščenju predstavljajo rastlinske čistilne naprave (RČN) optimalno rešitev za kondicioniranje mikrobiološko onesnažene pitne vode. V njihovo prid govorijo nizki stroški izgradnje in vzdrževanja, nezahtevnost za upravljanje, ne nastajajo zdravju škodljivi stranski produkti, dobro prenašajo nihanja onesnaženosti itn. Pilotna RČN je priključena na vodovodni sistem Gerlinci, kjer se v pitni vodi pojavljajo indikatorski mikroorganizmi. Namen naloge je bil teoretično opredeliti način in materiale, za uspešno odstranitev mikroorganizmov iz vode, zbrati začetne podatke o delovanju in učinkovitosti RČN pri kondicioniranju mikrobiološko onesnažene pitne vode ter z regulacijo pretoka določiti zadrževalni čas, ki zagotavlja zadostno oskrbo s pitno vodo, hkrati pa se odstrani največje možno število mikroorganizmov. Z dodajanjem kulture <i>E. coli</i> smo spremljali odstranjevanje bakterij iz vode. Dosegli smo 99 % učinkovitost pri odstranitvi bakterij iz vode pri vseh preizkušanih pretokih. A namena, določiti zadrževalni čas za optimalno odstranjevanje mikroorganizmov, nismo dosegli, ker je najvišji pretok, ki ga dopušča vodovodni sistem, 18,8 L/min.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 628.35:579.26(497.4 Gerlinci)(043.2)=863
CX drinking water/microbiological pollution/conditioning process/constructed wetland (CW)/drinking water disinfection
AU DRAVEC, Sonja
AA VRHOVŠEK, Danijel (supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology
PY 2007
TI CONDITIONING OF MICROBIOLOGICALLY POLLUTED DRINKING WATER SOURCE IN GERLINCI WITH CONSTRUCTED WETLAND (CW)
DT Graduation Thesis (University studies)
NO XIII, 65 p., 8 tab., 10 fig., 4 ann., 51 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Drinking water that does not meet the legal requirements of drinking water, has to undergo additional treatment, before it can be distributed into the water network. There is a range of new methods for treatment, preparation and disinfection of drinking water, but they are expensive and for people in small supplied areas not accessible. In this area, the main reason for anomalies in drinking water samples is microbiological pollution. As an alternative technique to traditional methods, presents the use of constructed wetland systems (CWS) an optimal solution for conditioning of microbiologically polluted drinking water. In their favour speak also low construction and upkeeping costs, easy management, no harmful by-products, it stands well even if the range of pollution varies, etc. The pilot CWS is connected to the water network in Gerlinci, where in drinking water indicator micro-organisms were recorded. The purpose of my task was to theoretically set methods and materials, for successful elimination of the micro-organisms from the drinking water, to collect first data of functioning and performance of CWS by conditioning drinking water, being polluted by micro-organism, and by regulation of flow rate, set the retention time, which enables the sufficient water supply, and at the same time eliminates as many micro-organisms as possible. And by adding culture *E. coli*, we were monitoring the elimination of bacteria from drinking water. The rate of efficiency was 99% by all tested flow rates. However, we did not achieve the goal, to set the retention time for optimal estimation of micro-organism, because the highest flow rate, the water supply system allows, is 18,8 L/min.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija	III
Key word documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	IX
Kazalo prilog.....	X
Okrajšave in simboli.....	XI
Slovarček.....	XII
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 NAMEN IN CILJ	3
1.3 HIPOTEZA	4
2 TEORETIČNE OSNOVE IN PREGLED OBJAV.....	5
2.1 VIRI PITNE VODE	5
2.1.1 Podzemna voda	5
2.1.2 Površinska voda	5
2.1.3 Padavinska voda	6
2.2 ONESNAŽENOST PITNE VODE.....	6
2.2.1 Viri onesnaženja virov pitne vode	6
2.2.2 Mikrobiološko onesnažena pitna voda.....	7
2.2.2.1 Indikatorji mikrobiološkega onesnaženja pitne vode	11
2.2.2.1.1 Skupne koliformne bakterije.....	12
2.2.2.1.2 <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	12
2.2.2.1.3 Enterokoki (fekalni streptokoki).....	13
2.2.2.1.4 Skupno število mikroorganizmov	13
2.3 POSTOPKI PRIPRAVE IN ČIŠČENJA PITNE VODE.....	14
2.3.1 Splošno	14
2.3.2 Opis nekaterih postopkov čiščenja vode.....	14
2.3.3 Fizikalni postopki.....	14
2.3.3.1 Sedimentacija.....	15

2.3.3.2	Filtracija	15
2.3.3.3	Membranske tehnike	16
2.3.3.4	Flotacija	16
2.3.4	Fizikalno – kemijski postopki	17
2.3.4.1	Mehčanje vode	17
2.3.4.2	Koagulacija s flokulacijo	17
2.3.4.3	Adsorpcija	18
2.3.4.4	Ionska izmenjava	18
2.3.5	Biološko čiščenje	20
2.3.6	Dezinfekcija	20
2.3.6.1	Dezinfekcija s klorom in klorovimi spojinami	22
2.3.6.2	Dezinfekcija z ozonom	23
2.3.6.3	Dezinfekcija z UV-sevanjem	23
2.4	KONDICIONIRANJE PITNE VODE S POMOČJO RČN	24
2.4.1	Oblike RČN	25
2.4.1.1	Sistemi s horizontalnim podpovršinskim tokom vode	25
2.4.1.2	Sistemi z vertikalnim podpovršinskim tokom vode	26
2.4.1.3	Mešani sistemi	27
2.4.2	Nosilci čiščenja v RČN	27
2.4.2.1	Substrat	28
2.4.2.2	Makrofiti	28
2.4.2.3	Mikroorganizmi	30
2.4.3	Odstranjevanje mikroorganizmov v RČN	31
2.4.4	Oblikovanje RČN	38
3	MATERIALI IN METODE	43
3.1	LOKACIJA	43
3.2	PODATKI O RČN	43
3.3	METODE DELA	44
3.3.1	Zaledje	44
3.3.2	Določevanja zadrževalnega časa	44
3.3.3	Vzorčenje in mikrobiološke analize	45
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	48

4.1	ZALEDJE	48
4.2	ZADRŽEVALNI ČAS.....	48
4.3	MIKROBIOLOŠKE ANALIZE	51
5	SKLEPI.....	56
6	POVZETEK.....	58
7	VIRI.....	61
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Število obolelih in število hidričnih epidemij v Sloveniji v letih 1998 – 2005	8
Preglednica 2: Najpogostejši mikroorganizmi, ki se prenašajo s pitno vodo	9
Preglednica 3: Preživetje patogenih mikroorganizmov v pitni vodi.....	10
Preglednica 4: Stopnja zmanjšanja bakterij, virusov in praživali z nekaterimi postopki obdelave pitne vode	21
Preglednica 5: CT ₉₉ vrednosti za posamezne postopke dezinfekcije.....	21
Preglednica 6: Velikost, poroznost in hidravlična prepustnost različnih vrst materiala, ki ga uporabljamo kot substrat v RČN	41
Preglednica 7: Zadrževalni časi v RČN glede na pretoke, pri katerih smo opravljali meritve.	50
Preglednica 8: Rezultati mikrobioloških analiz.	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Dinamične zaloge podzemnih voda v odstotnih deležih po vodnih območjih.....	1
Slika 2: Shema najpogosteje uporabljenih kombinacij postopkov čiščenja in priprave pitne vode.....	20
Slika 3: RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom vode	25
Slika 4: RČN z vertikalnim podpovršinskim tokom vode	27
Slika 5: Zmanjšanje števila fekalnih koliformnih bakterij kot funkcija zadrževalnega časa in substrata	33
Slika 6: Prikaz preferenčnega toka skozi sistem.....	40
Slika 7: Merjenje zadrževalnega časa v prvem bazenu pri pretoku 10L/min.	49
Slika 8: Merjenje zadrževalnega časa v drugem bazenu (22.10.2006) pri pretoku 10L/min.	49
Slika 9: Koncentracija <i>E. coli</i> na dotoku v RČN in izoku iz bazena 1 in 2 pri različnih pretokih.	52
Slika 10: Učinkovitost RČN pri odstranjevanju bakterij <i>E. coli</i> iz vode pri različnih pretokih.	53

KAZALO PRILOG

Priloga A: Lokacija pilotne RČN Gerlinci in izvira Lapoši ter oznaka prispevnega območja.

Priloga B: Raba zemljišč na prispevnem območju.

Priloga C: Shema pilotne RČN Gerlinci.

Priloga D: Rezultati informativnih vzorčenj.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

RČN	rastlinska čistilna naprava
FFS	fitofarmacevtska sredstva
BPK ₅	biokemijska poraba kisika v petih dneh
KPK	kemijska poraba kisika
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>

SLOVARČEK

- ADSORPCIJA** – fizikalno-kemijski proces kopičenja in oprijemanja adsorbata (plina, tekočine ali raztopljene snovi) na površino trdne snovi – adsorbenta.
- BPK₅** – biokemijska poraba kisika v petih dneh. Merilo za potrebno količino raztopljenega kisika za biokemijsko razgradnjo organskih in/ali anorganskih snovi v vodi in merilo za določanje stopnje onesnaženosti voda.
- BIOFILM** – plast mikroorganizmov na površini nosilnega materiala.
- DEZINFEKCIJA** – razkuževanje. Postopek uničenja patogenih in zmanjšanja števila ostalih (nepatogenih) mikroorganizmov s fizikalnimi in kemičnimi postopki oz. sredstvi. Namen dezinfekcije je preprečiti prenos povzročiteljev bolezni.
- EFLUENT** – voda ali druga tekočina, ki je delno ali popolnoma obdelana in ki teče iz rezervoarja, bazena, čistilnega procesa ali čistilne naprave.
- EKOREMEDIACIJA** – uporaba ekosistemov oz. naravnih procesov za obnovo degradiranega okolja in zaščito ekosistemov. Sonaravno zaščito dosežemo z rastlinskimi čistilnimi napravami (RČN), sonaravnimi močvirji, vegetacijskimi pasovi, revitalizacijami vodotokov ipd.
- ESCHERICHIA COLI** (*E. coli*) – termotolerantna koliformna bakterija iz družine Enterobacteriaceae. Vedno je prisotna v iztrebkih ljudi, sesalcev in ptičev in je skoraj nikoli ne najdemo v vodi ali tleh, ki niso fekalno onesnažena. Uporablja se kot indikator fekalnega onesnaženja.
- ENTEROKOKI** – skupina fekalnih streptokokov. So Gram pozitivne, fakultativno anaerobne bakterije, ki se pojavljajo posamezno, v paru ali krajših verigah. So značilni za fekalno onesnaženost.
- FEKALIJE** – človeški in živalski iztrebki.
- FFS** – fitofarmacevtsko sredstvo. Kemikalije za varstvo rastlin pred škodljivci.
- HIDRIČNE EPIDEMIJE** – povzročijo jih mikroorganizmi, ki se prenašajo s pitno vodo. Pojavijo se nenadoma, eksplozivno, prizadenejo prebivalstvo, ki uživa oporečno pitno vodo iz istega vira; bolezen je prisotna pri vseh starostnih skupinah in se kaže s podobnimi kliničnimi znaki.
- KOLIFORMNE BAKTERIJE** – skupina nekaterih rodov iz družine Enterobacteriaceae. So Gram negativni, nesporogeni, oksidaza negativni bacili, ki imajo sposobnost fermentacije laktoze v 24–48 urah pri 35–37°C in pri tem proizvajajo kislino, plin in aldehyd.
- KONDICIONIRANJE** – tehnološki postopek priprave ali obdelave določene snovi, da ustreza normativom ali zahtevani kakovosti in namenu (po)rabe. V primeru pitne vode obsega pripravo s čiščenjem in dezinekcijo.
- KONTAMINACIJA** – onesnaženje oz. okužba (lahko s klicami, kemikalijami, radioaktivnimi snovmi).
- MAKROFITI** – višje vodne rastline, ki so značilno prilagojene na življenje v vodnem okolju.
- MONITORING** – spremljanje stanja okolja; opazovanje pojavov, merjenje kakovosti okolja s standardnimi metodami, zbiranje in obdelava podatkov.
- OSKRBOVALNO OBMOČJE** – zemljepisno določeno območje, ki se oskrbuje iz enega ali več vodnih virov in so vrednosti preskušanih parametrov v pitni vodi približno

enake. Ločimo mala (oskrbujejo 50–1000 prebivalcev), srednja (oskrbujejo 1001–10 000 prebivalcev) in velika oskrbovalna območja (oskrbuje več kot 10 000 prebivalcev).

PESTICIDI – strupene kemične spojine namenjene zatiranju bolezni, plevelov in škodljivcev, ki so nevarna tudi za druge organizme. Ločimo insekticide, fungicide, rodenticide in herbicide.

PITNA VODA – voda, ki se v prvotnem stanju ali po pripravi uporablja za pitje, kuhanje, pripravi hrane ali za druge gospodinjske namene ter za proizvodno in promet živil. Biti mora zdravstveno neoporečna. Kemične spojine in mikroorganizmi ne smejo presegati zakonsko predpisanih mejnih vrednosti, ki jih za posamezne fizikalne, kemijske in biološke parametre predpisuje Pravilnik o pitni vodi (2004).

PRISPEVNO OBMOČJE – prispevno območje vodnega vira je določeno geografsko območje/površina, iz katerega voda doteka/se steka v izbrani vir in ki vpliva na kvaliteto oz. onesnaženost tega vira. Lahko je večje od orografske razvodnice, če je voda pod ali nad zemljo napeljana iz sosednjih območij.

POLUTANT – onesnaževalo. Snov, sredstvo, ki poslabša kakovost okolja (odlake, odpadki in kemikalije).

RIZODEPOZICIJA – proces sproščanja organskih snovi skozi korenine v rizosfero z namenom mobilizacije za rast potrebnih snovi ter stimuliranja in/ali zaviranja rasti določenih mikroorganizmov.

RIZOSFERA – prst/substrat, ki obdaja korenine in kjer poteka izmenjava snovi ter plinov med koreninami, prstjo in mikroorganizmi.

SUBSTRAT – material, s katerim polnimo grede rastlinskih čistilnih naprav (prod, pesek, mivka, zemlja, umetni materiali).

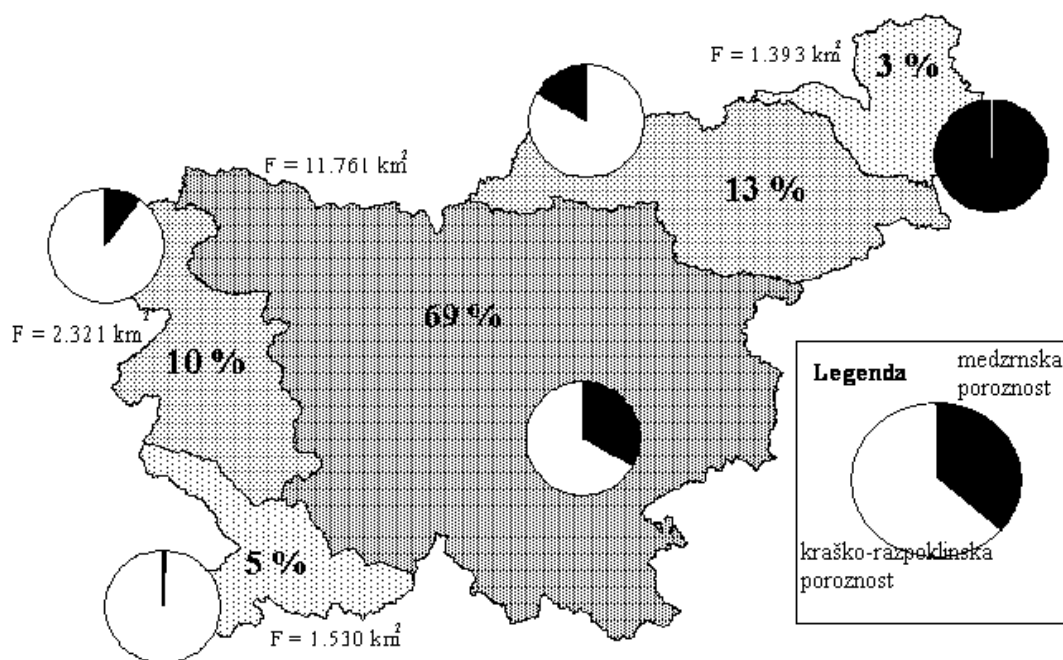
VODONOSNIK – porozna plast kamenin ali drugih geoloških plasti, ki akumulirajo in prevajajo večje količine vode ter tako omogočajo njeno izkoriščanje. Glede na obliko por jih delimo na medzrnske, kraško razpoklinske in terciarne.

VODOVARSTVENO OBMOČJE – zaščiteno območje okrog zajetih vodnih virov in na poljih s podtalnico z omejitvijo dejavnosti, da se prepreči morebitno onesnaževanje.

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Območje Slovenije je bogato z vodami, a je njihova časovna in prostorska razporeditev neugodna. Predvsem zaloge podzemnih voda, ki so poglavitni vir pitne vode v Sloveniji, so zelo neenakomerno razporejene. Skoraj dve tretjini zalog sta v osrednjem delu Slovenije, v porečju Save, najmanjše zaloge pa so na skrajnem severovzhodu države (porečje Mure) s pretežno medzrnsko vodonosnostjo in skrajnem jugozahodu države (obalno območje) s pretežno kraško razpoklinsko poroznostjo (slika 1) (Poročilo o stanju okolja 2002).



Slika 1: Dinamične zaloge podzemnih voda v odstotnih deležih po vodnih območjih
(vir: Poročilo o stanju okolja 2002).

Poleg neenakomerne razporeditve vodnih virov in občasnega pomanjkanja pitne vode na določenih območjih, se v Sloveniji veliko območij srečuje tudi s problemom onesnaženosti. Redna preizkušanja kakovosti pitne vode v letu 2005 so pokazala, da je bil

glavni vzrok neskladnosti vzorcev skoraj v celoti v mikrobioloških parametrih (35 % vzorcev je bilo mikrobiološko neustreznih). Predvsem v severovzhodni Sloveniji, na območjih z intenzivnim kmetijstvom, pa so bile presežene še mejne vrednosti nitratov in pesticidov. Največji delež mikrobiološko neustreznih vzorcev so imela mala oskrbovalna območja, ki oskrbujejo 50–1000 prebivalcev s pitno vodo (Monitoring pitne vode 2005).

Večje število malih oskrbovalnih območij, ki oskrbujejo s pitno vodo manj kot tisoč prebivalcev, je značilnost Slovenije. Pojavljajo se na podeželju, kjer tudi največkrat prihaja do prekomerne onesnaženosti. Podatki namreč kažejo, da se z večanjem oskrbovalnega območja manjša delež neskladnih vzorcev. Vzroki so v urejenosti (določena vodovarstvena območja in izvajanje režima v njih), kakovosti vira pitne vode, učinkoviti pripravi vode, izvajanju stalnega nadzora, profesionalnem upravljanju itd. (Monitoring pitne vode 2005). Za večino malih oskrbovalnih območij oz. sistemov je po drugi strani značilno, da praviloma nimajo vgrajenega sistema za pripravo pitne vode (Eržen s sod., 2001). Pojavljajo se na podeželju – na področjih z intenzivnim kmetijstvom in slabše varovanimi vodovarstvenimi območji, zaradi česar so prav ti najpogostejše onesnaženi s pesticidi, nitrati in mikroorganizmi. Sistemi, ki oskrbujejo manj kot 50 prebivalcev, niso vključeni v redni monitoring kakovosti pitne vode. Tako se je leta 2005 8 % slovenskega prebivalstva oskrbovalo s pitno vodo, ki ni bila vključena v monitoring (Monitoring pitne vode 2005). Problemi lokalnih zajetij so še nezanesljivost izdatnosti vodnega vira, slabša strokovna usposobljenost upravljalcev takih sistemov ter ponekod dotrajanost in zastarelost (Eržen s sod., 2001).

Prebivalci, ki se oskrbujejo s pitno vodo na malih oskrbovalnih območjih, so najbolj ogroženi zaradi onesnažene pitne vode, zlasti zaradi fekalne onesnaženosti (Monitoring pitne vode 2005). Čeprav poznamo mnogo metod, ki omogočajo čiščenje in dezinfekcijo pitne vode, pa so ti načini priprave vode dragi in lokalnemu prebivalstvu večinoma nedostopni. Kot alternativa klasičnemu in dragemu obstoječemu načinu čiščenja pitne vode se lahko uporabljajo rastlinske čistilne naprave (RČN). RČN se že dolgo uporabljajo za čiščenje komunalnih odpadnih in izcednih voda. Iz strokovne literature je razvidno, da uspešno odstranjujejo (patogene) mikroorganizme iz vode, vežejo hranila v biomaso,

odstranjujejo pa tudi pesticide in težke kovine, ki so lahko pomemben onesnaževalec pitne vode.

Uporaba RČN za kondicioniranje pitne vode je zaradi nizkih stroškov izgradnje in vzdrževanja idealna rešitev na malih oskrbovalnih območjih. Prav tako so nezahtevne za upravljanje in ni bojazni nastanka zdravju škodljivih stranskih produktov kot rezultat dodajanja kemikalij za čiščenje ali dezinfekcijo vode. Na območjih z intenzivnim kmetijstvom je onesnaženost vodnega vira lahko vezana na kmetijsko dejavnost in padavine, lahko pa se spreminja tudi vrsta onesnaženosti (mikrobiološka, onesnaženost z nitrati, pesticidi). Tudi ti razlogi govorijo v prid uporabi RČN na teh območjih, saj RČN dobro prenašajo nihanja onesnaženosti, ni potrebno stalno spremljanje kakovosti dotočne vode. RČN lahko tako omogoči izrabo dodatnih izvirov kot vire pitne vode, kar je pomembno zlasti za območja, kjer pitne vode primanjkuje.

1.2 NAMEN IN CILJ

Uporaba RČN za kondicioniranje mikrobiološke onesnažene pitne vode je novost, tako v Sloveniji kot tudi drugod po svetu, zato je tovrstnih izkušenj in podatkov malo.

Namen naloge je:

- teoretično opredeliti način in materiale, ki bi uspešno odstranili indikatorske mikroorganizme iz pitne vode;
- z regulacijo pretoka določiti optimalni zadrževalni čas za ekonomsko še sprejemljivo stopnjo zmanjšanja mikroorganizmov v pitni vodi.

V literaturi najdemo predvsem podatke o učinkovitosti RČN pri odstranjevanju mikroorganizmov iz odpadne vode, kjer so njihove koncentracije zelo visoke. V vodi, ki jo uporabljamo kot pitno vodo, je mikroorganizmov precej manj, poleg tega pa njihova koncentracije običajno ni stalna. Cilja naloge je zato zbrati začetne podatke o delovanju in učinkovitosti RČN pri kondicioniranju mikrobiološko onesnažene pitne vode, ki bodo potrdili smiselnost uporabe RČN v ta namen, hkrati pa bodo služili kot izhodišče za nadaljnjo raziskovalno delo na RČN Gerlinci. Zbrane izkušnje bodo služile za odpravo morebitnih pomanjkljivosti in težav, ki bi se utegnile pojaviti pri tem delu in/ali na RČN.

1.3 HIPOTEZA

Glede na podatke o zmanjševanju mikroorganizmov iz odpadne vode s pomočjo RČN in na podlagi teoretičnih predpostavk o vplivu hidravlike, substrata, rastlin in drugih organizmov na odstranjevanje mikroorganizmov, pričakujemo optimalno učinkovitost pilotne RČN pri kondicioniranju pitne vode. Glede na izkušnje pri odstranjevanju mikroorganizmov iz odpadne vode (Garcia s sod., 2003; Decamp in Warren, 2000; Nokes s sod., 2003; Thurston s sod., 2001) pričakujemo 90–99 % učinkovitost pri zmanjšanju števila mikroorganizmov iz pitne vode pri zadrževalnih časih krajših od tri dni.

2 TEORETIČNE OSNOVE IN PREGLED OBJAV

2.1 VIRI PITNE VODE

2.1.1 Podzemna voda

Podzemna voda zajema vodo, ki se zadržuje pod površjem tal ne glede na njen izvor ali različne pojavne oblike. Za potrebe pitne vode, tehnološke vode ali drugih potreb črpamo vodo, ki se nahaja v vodonosnikih. V Sloveniji je podzemna voda poglavitni vir pitne vode, zajemamo pa jo preko izvirov ali preko bolj ali manj globokih vrtin in vodnjakov (Brenčič s sod., 1998).

Zakon o vodah (2002) definira vodonosnik kot plast ali več plasti kamenin ali drugih geoloških plasti pod površjem tal, dovolj velike poroznosti in prepustnosti, da je omogočen znatnejši tok podzemne vode ali odvzem znatnejših količin podzemne vode. Narava kamnine ali sedimenta določa izdatnost in prepustnost vodonosnikov. Glede na obliko por, v katerih se nahaja voda, jih delimo na medzrnske, kraško razpoklinske in na terciarne vodonosnike (Brenčič s sod., 1998).

Razpoložljivost vode v vodonosniku je določena z zalogo in obnavljanjem vode. Po podatkih iz leta 1995 znašajo dinamične zaloge podzemne vode v Sloveniji 50,4 m³/s (Poročilo o stanju okolja 2002). Te zaloge se obnavljajo z napajanjem vodonosnika. S preobsežnim črpanjem presežemo dinamične zaloge in začnemo izkoriščati statične (geološke) zaloge, kar vodi v siromašenje vodonosnika (Brenčič). Po podatkih Agencije RS za okolje večina 41 % vodomernih mest kaže statistično značilno upadanje gladin podzemnih voda, zviševanje je značilno za manjši del analiziranih vodomernih postaj (20 %), na preostalih (39 %) pa trend ni statistično značilen (Poročilo o stanju okolja 2002).

2.1.2 Površinska voda

Površinske vode, kamor spadajo potoki, reke, jezera, umetne akumulacije in pa tudi morja, so v primerjavi s podtalno vodo navadno bogatejše z mikroorganizmi in suspendiranimi

snovmi. Podvržene so večjim trenutnim in sezonskim nihanjem kakovosti, ki so posledica meteoroloških in antropogenih dejavnosti (Brenčič). V Sloveniji se površinske vode redkeje uporabljajo kot vir pitne vode, pogosteje jih uporabljajo za tehnološke vode, kjer so zahteve po kvaliteti manjše.

2.1.3 Padavinska voda

Med padavinsko vodo štejemo zajete padavine (deževnica, sneg, led). Padavinske vode so mehke in manj mineralizirane. Vsebujejo raztopljene pline (O_2 , CO_2 , SO_2 , NO_2^- , NO_3^- , O_3) in prah. Padavinsko vodo uporabljamo neposredno redko, le pri posameznih zgradbah.

2.2 ONESNAŽENOST PITNE VODE

Dostop do kvalitetne zdravstveno neoporečne pitne vode je nujen za zdravje ljudi in je ena od osnovnih človekovih pravic. Posledice uživanja oporečne vode so lahko akutne in kronične. O akutnem tveganju govorimo, ko se zdravstvene težave pojavijo v kratkem času po uživanju oporečne vode. V takih primerih gre večinoma za vodo onesnaženo s patogenimi mikroorganizmi. Pri kroničnih tveganjih pa se bolezen pojavi šele po dolgotrajnem uživanju onesnažene vode (WHO, 2004).

2.2.1 Viri onesnaženja virov pitne vode

Več kot 90 % prebivalstva v Sloveniji kot vir pitne vode uporablja podzemno vodo. Velik del te oskrbe v severovzhodnem in osrednjem delu je vezan na plitve vodonosnike, ki se nahajajo v gosto naseljenih rečnih dolinah in nižinskih predelih, kjer je tudi zgostitev industrije in obrti, intenzivnega kmetijstva ter prometne infrastrukture (Kranjc in Krsnik). Zaradi plitkosti in nezaščitenosti so zelo ranljivi in ogroženi. Ponekod je gladina podtalnice le nekaj metrov pod zemeljskim površjem, zato jo onesnaženje zlahka doseže. Pomembno pri vdoru in širjenju onesnaženja v vodonosnik je razporeditev vodoprepustnih in vododržnih plasti ter njegova samočistilna sposobnost. Samočistilna sposobnost je odvisna od prsti in rastja nad vodonosnikom, kamninske sestave vodonosnika in iz tega sledeče sposobnosti adsorbiranja ter absorbiranja onesnaževal, hidroloških lastnosti podtalnice, organizmov v vodi ter od stopnje obremenitve okolja (Brnot, 2000; Brenčič).

Vire onesnaženja razdelimo na točkovne in razpršene, podzemne vode pa ogroža še prekomerno črpanje podtalnice, ki poruši hidravlično ravnotežje v vodonosniku.

Med glavne točkovne vire onesnaženja prištevamo industrijo in obrtno dejavnost, skladiščenje nevarnih snovi, deponije odpadkov, opuščene in skrite deponije odpadkov, odkope gramoza ter gradnje. Industrija in obrtna dejavnost sta vir onesnaževanja s fenoli, mineralnimi olji, polikloriranimi bifenili, organskimi kloriranimi topili, fosfornimi in kositrovimi spojinami, živim srebrom ter drugimi težkimi kovinami pa tudi mikrobiološkega onesnaženja (Brnot 2000; Kranjc in Krsnik). Med točkovne vire onesnaženja pitne vode lahko štejemo tudi pripravo vode, kjer zlasti med dezinfekcijskimi postopki nastajajo številni stranski produkti (WHO, 2004).

Viri razpršenega onesnaženja pa so zlasti kmetijska dejavnosti, urbana naselja ter prometna infrastruktura. Kmetijstvo je, zaradi uporabe fitofarmaceutskih sredstev (FFS), mineralnih gnojil in gnojenja z gnojevko ter gnojem, vir pesticidov, nitratov, nitritov, amonija, fosfatov, nekaterih težkih kovin ter mikroorganizmov fekalnega izvora. Vir onesnaženja s pesticidi pa so poleg kmetijstva še njihova pretirana uporaba v parkih, igriščih, cestah in železnicah (Program razvoja podeželja 2004). Urbana naselja z neurejeno kanalizacijo so vir mikrobiološkega onesnaženja in onesnaženja s kemičnimi snovmi (nitrati, ortofosfati, amonij, kalij ipd.). Ob padavinah se s cestnih površin spirajo težke kovine in razne organske snovi, nevarnost pa predstavlja tudi možnost razlitja pri prevozu nevarnih snovi (Brnot, 2000; Kranjc in Krsnik).

2.2.2 Mikrobiološko onesnažena pitna voda

Najvišje tveganje za zdravje ljudi predstavlja pitna voda, ki je onesnažena s človeškimi ali z živalskimi iztrebki. V svetovnem merilu predstavljajo bolezni, katerih povzročitelji se prenašajo s pitno vodo, še vedno vodilni vzrok obolevanja in umrljivosti prebivalstva (WHO, 2004). V Sloveniji so take bolezni redke, še redkeje pa ljudje zaradi njih umirajo. Kar pa ne pomeni, da je v Sloveniji pitna voda mikrobiološko popolnoma neoporečna. Redna preizkušanja kakovosti pitne vode v letu 2005 so pokazala, da je bil glavni vzrok neskladnosti vzorcev skoraj v celoti v mikrobioloških parametrih (Monitoring pitne vode

2005). 35 % vzorcev je bilo mikrobiološko neustreznih, največkrat pa so bile presežene koliformne bakterije in *E. coli*. Največji delež mikrobiološko neustreznih vzorcev so imela mala oskrbovalna območja, ki oskrbujejo 50–1000 prebivalcev s pitno vodo – na teh območjih so prebivalci ogroženi zlasti zaradi fekalne onesnaženosti (Monitoring pitne vode 2005).

Število epidemij, povezanih z mikrobiološko onesnaženo pitno vodo, se v zadnjem desetletju giblje med 2 in 3 na leto (preglednica 1). Povzročitelj v večini primerov ni bil znan, pri nekaterih epidemijah so bili izolirani: *Shigella sonnei*, *Lambliia intestinalis*, rotavirusi, adenovirusi itd. (Monitoring pitne vode 2005).

Preglednica 1: Število obolelih in število hidričnih epidemij v Sloveniji v letih 1998 – 2005
(vir: Monitoring pitne vode 2005).

Leto	Št. epidemij	Št. obolelih
1998	3	497
1999	2	40
2000	2	209
2001	2	114
2002	3	169
2003	1	22
2004	1	80
2005	3	165

Mikroorganizme, ki se prenašajo s pitno vodo, lahko v grobem razdelimo v dve skupini: patogeni in drugi (oportunistični) organizmi. Najpogostejši patogeni organizmi, ki se prenašajo s pitno vodo, so prikazani v preglednici 2. Resno nevarnost predstavljajo predvsem bakterije in virusi. Parazitska obolenja, ki se prenašajo preko pitne vode, so v Sloveniji zelo redka. Bolezni, ki jih povzročajo patogeni organizmi, segajo od blagega gastroenteritisa do hude, včasih smrtne dizenterije, hepatitisa ali trebušnega tifusa (Rupel, 2002).

Preglednica 2: Najpogostejši mikroorganizmi, ki se prenašajo s pitno vodo

(vir: WHO, 2004)

VRSTA PATOGENEGA MIKROORGANIZMA	POMEN ZA ZDRAVJE	OBSTOJNOST V OMREŽJU	ODPORNOST NA KLOR
BAKTERIJE			
<i>Campilobakter jejuni</i> , <i>C. coli</i>	Velik	1 teden -1 mesec	Nizka
patogeni sevi <i>Esherie coli</i>	Velik	1 teden -1 mesec	Nizka
<i>Salmonella spp</i>	Velik	1 teden-1 mesec, nekatere vrste se lahko razmnožujejo	Nizka
<i>Shigella spp</i>	Velik	Do 1 teden	Nizka
<i>Vibrio cholerae</i>	Velik	Do 1 teden	Nizka
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Velik	> 1 mesec	Nizka
<i>Legionella spp.</i>	Velik	Se lahko razmnožuje	Nizka
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Srednji	Se lahko razmnožuje	Srednja
VIRUSI			
Adenovirusi	Velik	> 1 mesec	Srednja
Enterovirusi	Velik	> 1 mesec	Srednja
Hepatitis A	Velik	> 1 mesec	Srednja
Norwalk virus	Velik	> 1 mesec	Srednja
Rotavirus	Velik	> 1 mesec	Srednja
PRAŽIVALI			
<i>Entamoeba histolytica</i>	Velik	1 teden - 1 mesec	Velika
<i>Giardia intestinalis</i>	Velik	1 teden - 1 mesec	Velika
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Velik	> 1 mesec	Velika

Oportunistični mikroorganizmi so naravno prisotni v okolju in jih formalno ne prištevamo med patogene mikroorganizme. So manj infektivni ter povzročajo težave le pri ljudeh, ki imajo zmanjšano odpornost organizma, kot npr. *Pseudomonas aeruginosa*. Poleg

Pseudomonas aeruginosa med oportunistični mikroorganizme spadajo še flavobakterije, acinetobakterije, *Klebsiella*, *Serratia*, *Aeromonas* in nekatere počasi rastoče mikobakterije (WHO, 2004). Med oportunistične mikroorganizme štejemo še tiste mikroorganizme, ki sicer povzročajo resna obolenja, a poteka vnos v človeka običajno po drugi poti – npr. stik z okuženim človekom ali preko vdihovanja. Primer bolezni, ki se lahko pojavi kot posledica vdihovanja aerosola, nastalega iz mikrobiološko oporečne vode, je legionarska bolezen, ki jo povzroča *Legionella spp.* (WHO, 2004; Eržen 1998).

Patogeni mikroorganizmi zunaj gostitelja hitro izgubljajo vitalnost in sposobnost okužbe novega gostitelja. Preživetje je odvisno od veliko dejavnikov, najpomembnejši pa so temperatura, sevanje, prisotnost organskih snovi in rezidualnega klora, zato se podatki tudi razlikujejo pri različnih avtorjih (preglednica 2 in 3).

Preglednica 3: Preživetje patogenih mikroorganizmov v pitni vodi

(vir: Rupel, 2002)

Vrsta mikroorganizma	Preživetje v pitni vodi [število dni]
<i>Vibrio cholerae</i>	30
<i>Salmonella spp</i>	60-90
<i>Shigella spp</i>	30
patogeni sevi <i>Escherichie coli</i>	90
<i>Campilobakter spp.</i>	7
<i>Yersinia enterocolitica</i>	90
<i>Legionella pneumophila</i>	Dolgo
<i>Giardia spp.</i>	25
<i>Entamoeba histolytica</i>	25

V vodi pride tudi do razredčitve, zmanjša se število mikroorganizmov na količinsko enoto vode, zaradi česar se uspešnost okužbe še zmanjša, ker je redkeje dosežena infektivna doza (Eržen, 1998). Okužbe v večji meri povzročajo organizmi, ki so bolj infektivni ter tisti, ki so se sposobni razmnoževati v zunanjem okolju ali pa so sposobni dlje časa preživeti zunaj telesa.

Večina patogenih bakterij ter virusi in mirujoče razvojne faze parazitov se ne morejo razmnoževati zunaj telesa gostitelja. Nekatere bakterije, predvsem oportunistične, pa se ob ugodnih pogojih lahko razmnožujejo v vodi. Tak primer je *Legionella*, ki se lahko razvija in razmnožuje ob povišani temperaturi vode, prisotnosti organskih snovi in nizki koncentraciji rezidualnega klora. V vodi se lahko razmnožujejo še *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas spp.* idr. (Eržen, 1998; WHO, 2004).

2.2.2.1 Indikatorji mikrobiološkega onesnaženja pitne vode

Potencialne posledice mikrobiološkega onesnaženja so tako pomembne, da je potrebno zagotoviti stalen nadzor nad mikrobiološko kvaliteto pitne vode. Pravilnik o pitni vodi (2004) določa kriterije, s katerimi ocenjujemo mikrobiološko kvaliteto pitne vode. Ker največje tveganje predstavlja voda onesnažena z živalskimi in s človeškimi fekalijami, ocenjujemo mikrobiološko tveganje s prisotnostjo/odsotnostjo indikatorjev fekalnega onesnaženja (Eržen, 1998; Gregorič s sod., 2002). Iz njihove prisotnosti sklepamo, da je voda fekalno onesnažena in da so lahko prisotni tudi drugi patogeni, ki jih z iztrebki izločajo ljudje in živali. In obratno, če v vodi ni indikatorjev fekalnega onesnaženja, sklepamo, da verjetno tudi drugih patogenov ni (Eržen, 1998). Čeprav poznamo metode za ugotavljanje prisotnosti teh patogenov, jih v rednih preiskavah ne uporabljamo, ker so predrage in prezahtevne.

Kot glavni indikator fekalnega onesnaženja uporabljamo bakterijo *Escherichia coli* (*E. coli*) zaradi njenih lastnosti (Gregorič s sod., 2002; Eržen 1998):

- Vedno je prisotna v fecesu ljudi in živali v velikem številu.
- Ni prisotna v vodi in tleh, ki niso fekalno onesnažena.
- Laboratorijske metode za njeno dokazovanje so relativno preproste in enostavne.
- Je indikator prisotnosti najrazličnejših povzročiteljev okužb.
- Je indikator učinkovitosti postopkov čiščenja in dezinfekcije pitne vode, saj je občutljiva na postopke in sredstva za pripravo pitne vode.

Indikatorji fekalnega onesnaženja so še streptokoki fekalnega izvora, spore sulfit reducirajočega klostridija in termorezistentne koliformne bakterije (Eržen, 1998).

Odsotnost *E. coli* pa ne zagotavlja, da je voda neoporečna, saj so v vodi lahko patogeni, ki so bolj odporni na postopke čiščenja in dezinfekcije pitne vode. Posebej praživali in virusi so bolj odporni, zato jih v določenih primerih vključimo v analizo.

Pravilnik o pitnih vodah (2004) določa redno in občasno dodatno preverjanje pitne vode z namenom zagotavljanja osnovnih informacij o pitni vodi in informacij o učinkovitosti priprave pitne vode, zlasti dezinfekcije. Poleg *E. coli* moramo redno spremljati skupne koliformne bakterije, enterokoke ter število kolonij pri temperaturi 22°C in 37°C. Če je voda po poreklu površinskega izvora ali ta nanjo vpliva, moramo vključiti še *Clostridium perfringens* (vključno s sporami).

2.2.2.1.1 Skupne koliformne bakterije

Izraz skupne koliformne bakterije se uporablja za skupino nekaterih rodov iz družine Enterobacteriaceae. Posamezni viri navajajo različne rodove, ki spadajo v to skupino, vendar naša zakonodaja povzema opis koliformnih bakterij po priporočilih WHO.

Skupne koliformne bakterije so po Gramu negativni, nesporogeni, oksidaza negativni bacili, ki imajo sposobnost fermentacije laktoze v 24–48 urah pri 35–37°C in pri tem proizvajajo kislino, plin in aldehyd (Rupel, 2002; WHO, 2004). V to skupino spadajo rodovi *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* ter nekatere druge bakterije, ki jih redko najdemo v fecesu ljudi in živali (*Serratia*, *Hafnia*). Prisotnost koliformnih bakterij ni nujno povezana s fekalnim onesnaženjem, saj so se nekateri predstavniki te skupine sposobni razmnoževati zunaj gostitelja. Kljub temu pa je test uporaben za monitoring mikrobiološke kvalitete pitne vode. Pravilnik o pitni vodi (2004) določa, da v pitni vodi ne sme biti prisotnih koliformnih bakterij.

2.2.2.1.2 *Escherichia coli* (*E. coli*)

Vrsta *Escherichia coli* spada v družino Enterobacteriaceae. Uvrščamo jo med termotolerantne koliformne bakterije. Gre za podskupino koliformnih bakterij, ki so sposobni fermentacije laktoze pri 44–45°C v 24–48 urah. *E. coli* je vedno prisotna v

iztrebkih ljudi, sesalcev in ptičev in je skoraj nikoli ne najdemo v vodi ali tleh, ki ni fekalno onesnažena. Uporablja se kot indikator fekalnega onesnaženja iz razlogov naštetih zgoraj. Njena prisotnost nakazuje novejšo fekalno onesnaženje, saj je manj odporna na zunanje vplive kot ostali mikroorganizmi (WHO, 2004; Rupel, 2002). V stari onesnaženi vodi je praviloma ni. Pravilnik o pitni vodi (2004) določa, da v pitni vodi *E. coli* ne sme biti prisotna.

E. coli je normalni predstavnik črevesne flore in v prebavilih običajno ne povzroča težav, v drugih delih telesa pa lahko povzroči resne okužbe. Znani so patogeni sevi, ki izločajo enterotoksine, kar vodi do resnih črevesnih težav. Najbolj znan primer je *E. coli* O157:H7, ki povzroči krvavo diarejo, pri manjšem številu okuženih pa pride do odpovedi ledvic. Prenašajo se s fekalno onesnaženo pitno vodo, s kontaminirano hrano ter s tesnimi stiki med ljudmi (WHO, 2004).

2.2.2.1.3 Enterokoki (fekalni streptokoki)

Enterokoki so skupina fekalnih streptokokov. So Gram pozitivne, fakultativno anaerobne bakterije, ki se pojavljajo posamezno, v paru ali krajših verigah. So značilni za fekalno onesnaženje, a novejše raziskave kažejo njihovo prisotnost tudi tam, kjer ni drugih znakov fekalnega onesnaženja (WHO, 2004). V vodi se navadno nahajajo skupaj z *E. coli*, a v manjšem številu. V okolju preživijo dlje od *E. coli*, zato so indikatorji starejšega fekalnega onesnaženja. So tudi bolj tolerantni na izsuševanje ter kloriranje, zato se uporabljajo za analizo vode po popravilu vodovodnega sistema (WHO, 2004; Rupel, 2002). Pravilnik o pitni vodi (2004) določa, da v pitni vodi ne sme biti prisotnih enterokokov.

2.2.2.1.4 Skupno število mikroorganizmov

Ugotavljanje skupnega števila mikroorganizmov nima velikega indikatorskega pomena pri ugotavljanju prisotnosti patogenih mikroorganizmov. Uporabljamo pa ga za kontroliranje prečiščevanja vode, saj je vsako nenavadno povečanje skupnega števila zgodnji pokazatelj npr. sprememb v omrežnem sistemu pitne vode ali okvar naprav za dezinfekcijo (Rupel,

2002). Pravilnik o pitni vodi (2004) določa, da število kolonij pri 37°C ne presega 100 kolonij/ml, pri temperaturi 22°C pa ne sme biti neobičajnih sprememb.

2.3 POSTOPKI PRIPRAVE IN ČIŠČENJA PITNE VODE

2.3.1 Splošno

Pitna voda je voda, ki se v prvotnem stanju ali po pripravi uporablja za pitje, kuhanje, pripravo hrane ali za druge gospodinjske namene, ne glede na poreklo ali način dobave. Pitna voda je tudi vsa voda, ki se uporablja za proizvodnjo in promet živil. Voda mora biti zdravstveno neoporečna: ne sme vsebovati mikroorganizmov, parazitov in njihovih razvojnih oblik v takem številu, ki bi lahko predstavljalo nevarnost za zdravje ljudi. Prav tako pa ne sme vsebovati snovi v koncentracijah, ki same ali skupaj z drugimi snovmi predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi (Pravilnik o pitni vodi, 2004). Mejne vrednosti parametrov določa Pravilnik o pitni vodi (2004).

Priprava vode je obdelava vode, s katero se zagotovi njena skladnost in zdravstvena ustreznost (Pravilnik o pitni vodi, 2004).

2.3.2 Opis nekaterih postopkov čiščenja vode.

Univerzalnega postopka za čiščenje in pripravo pitne vode ni. Vsi postopki in tehnike, ki jih danes uporabljamo, imajo svoje prednosti in pomanjkljivosti. Izbor tehnoloških postopkov je zato odvisen od količine in sestave pitne vode, krajevnih okoliščin, ekonomike itd. in se razlikuje od primera do primera. Zaradi množice tehnik za čiščenje in pripravo pitne vode, so v nadaljevanju predstavljene le najpogostejše uporabljene.

2.3.3 Fizikalni postopki

Pri fizikalnih (mehanskih) postopkih priprave in čiščenja pitne vode gre za procese mehanskega odstranjevanja grobih in finih netopnih delcev iz vode, pri čemer ne uporabljamo kemijskih reagentov. Za odstranjevanje delcev uporabljamo različna sita in filtre, sisteme za sedimentacijo (usedalnice) ter sisteme za prepihanje.

2.3.3.1 Sedimentacija

Sedimentacija je postopek fizikalnega odstranjevanja netopnih trdnih delcev, katerih gostota je večja od gostote vode. Gre za spontani proces, saj se delci usedejo na dno zaradi sile teže. Na hitrost usedanja vpliva velikost oz. premer samega delca. Odstranjevanje suspendiranih delcev iz vode z usedanjem je ekonomično ugodno, saj zahteva malo ali nič energije.

2.3.3.2 Filtracija

Filtracija je postopek ločevanja suspendiranih delcev od medija, tekočine ali plina, v katerem so delci suspendirani. Filtrirni sloj prepušča medij, zadrži pa suspendirane delce, ki se akumulirajo na površini ali v notranjosti filtra. Filtri so lahko porozni elementi (sita, mreže, razne membrane itd.) ali pa v obliki granul (peščeni filtri). Hitrost in uspešnost filtriranja je odvisna od vrste filtrirnega materiala, od vrste suspenzije, viskoznosti medija, koncentracije suspenzije, temperature med filtracijo in tlaka pri filtriranju (Drev, 1998; Roš s sod., 2005).

Filtracija je postopek, ki se najpogosteje uporablja pri pripravi pitne vode (poleg dezinfekcije), pri tem se največkrat uporabljajo peščeni filtri. Peščeni filter je tipični filter, ki delce zadržuje po površini. Granulacija je odvisna od velikosti filtra ter od suspendiranih delcev, ki jih želimo filtrirati. Filtrirni učinek je odvisen od prostih odprtin, ki nastanejo med posameznimi zrni filtrirnega materiala in od možnih adsorpcijskih sil, ki lahko delujejo med zrni peska ter suspendiranimi delci (Roš s sod., 2005).

Glede na filtrirno hitrost ločimo hitre filtre, kjer znaša hitrost 2-10 m/s, ter počasne filtre s filtrirno hitrostjo 0,05-0,2 m/s. Počasno filtriranje posnema naravno filtriranje skozi prst (Roš s sod., 2005). Voda se čisti s fizikalno-kemičnimi in biološkimi procesi. Odstranitev suspendiranih delcev in mikroorganizmov poteče v zgornjih nekaj centimetrih filtra, kjer se zaradi razvoja biofilma vrši tudi mikrobna razgradnja (Wotton, 2002).

2.3.3.3 Membranske tehnike

Pri membranskih tehnikah govorimo o vrsti površinske filtracije, kjer membrana zadržuje delce le fizično, brez adsorbcije ali kemisorbcije. Edina izjema je elektrodializa, kjer so prisotne še elektro – privlačne sile (Drev, 1998).

Membrana je selektivna meja med dvema fazama. Njena učinkovitost je določena s selektivnostjo in pretokom skozi membrano. Membrane so izdelane iz različnih organskih in anorganskih materialov. Glede na velikosti por in velikost delcev, ki jih zadržujejo, ločimo mikrofiltracijo, ultrafiltracijo in nanofiltracijo. Membranske tehnike se za prečiščevanje vode in sterilizacijo uporabljajo predvsem v prehrambeni in farmacevtski industriji (Drev, 1998).

Elektrodializa je elektromembranski proces, pri katerem uporabljamo električni tok za transport ionov skozi selektivno permeabilno membrano. Med dve katodi vstavimo membrane, in sicer kationske, ki prepuščajo le katione, ter anionske, ki prepuščajo le anione. Elektrodializo se uporablja za razsoljevanje morske vode, za denitrifikacijo pitne vode ter za odstranjevanje drugih ionov iz vode (Černe, 2005).

2.3.3.4 Flotacija

Flotacija je postopek čiščenja vode z ločevanjem trdne in tekoče faze z naplavljanjem trdne faze na gladino vode. Hidrofobni delci se prilepijo na površino mehurčka zraka in se skupaj z njim dvignejo na površino. Na površini se tvori penasta snov (flotat), ki jo periodično odstranjujemo. Z dodajanjem kemikalij povečamo hidrofobnost delcev in s tem uspešnost samega postopka. Flotacijo uporabljamo predvsem za separacijo olj, masti in proteinov. Uporablja se predvsem pri čiščenju odpadnih voda, za pripravo pitne vode jo uporabimo takrat, ko je surova voda močno onesnažena (npr. če uporabimo kot vir pitne vode onesnaženo površinsko vodo) in filtracija ne bi bila dovolj hitra ali uspešna (Roš s sod., 2005).

2.3.4 Fizikalno – kemijski postopki

Pri fizikalno-kemijskih postopkih z dodajanjem različnih kemikalij dosežemo boljše odstranjevanje v vodi raztopljenih snovi in ionov. Dodani reagenti vežejo snovi iz vode, povečajo njihovo usedanje ali pa jim zmanjšajo topnost zaradi česar jih lažje mehansko odstranimo.

2.3.4.1 Mehčanje vode

Z mehčanjem vode hočemo zmanjšati ali odstraniti trdoto vode. Namen mehčanja je preprečitev nalaganja vodnega kamna na stene cevi, grelcev in sanitarnih armatur. Nalaganje vodnega kamna vodi v mašenje cevi, večjo porabo energije in v okvare sanitarnih armatur. Vodo lahko mehčamo na več načinov: z dodajanjem polifosfatov, ki ovirajo rast kristalov kalcijevega karbonata, hkrati pa na stenah cevi ustvari zaščitni sloj proti koroziji, z ionskimi mehčalci vode ali z magnetno nevtralizacijo vodnega kamna (Roš s sod., 2005).

2.3.4.2 Koagulacija s flokulacijo

Pri koagulaciji in flokulaciji gre za procesa, s katerima odstranjujemo iz vode suspendirane in koloidne delce, ki se zaradi majhnosti ne usedejo v ekonomsko sprejemljivem času. Pri pripravi pitne vode jo uporabimo pri vodi, ki vsebuje manjšo količino koloidnih delcev (ki jih ne moremo odstraniti s filtracijo) ali ima izraziti barvni odtenek.

Koagulacija (izkosmičenje) je fizikalno-kemijski postopek, pri katerem s pomočjo koagulantov destabiliziramo koloidne delce z nevtralizacijo negativnega naboja na njihovi površini (Roš s sod., 2005). Koagulantni so anorganski (železovih in aluminijevih soli) in organski (različni polimeri).

Flokulacija (kosmičenje) pa je proces aglomeracije destabiliziranih delcev v mikroflokule in nadalje v večje flokule, ki se hitreje in boljše usedajo. To dosežemo z dodajanjem sredstva za flokulacijo (flokulantov), ki so neionski, anionski ali kationski (Roš s sod., 2005).

2.3.4.3 Adsorpcija

Adsorpcija je fizikalno-kemijski proces kopičenja in oprijemanja adsorbata (plina, tekočine ali raztopljene snovi) na površino trdne snovi – adsorbenta (Drev, 1998). Adsorpcijska kapaciteta snovi je odvisna od specifične površine adsorbenta, razporeditve in velikosti por, narave vezi med adsorbentom in adsorbatom ter kontaktnega časa. Na adsorpcijo pa vpliva še topnost snovi (adsorbata) v vodi ter prisotnost anorganskih snovi, ki lahko zamašijo pore in s tem zmanjšajo adsorpcijo (Roš s sod., 2005). Pri izbiri adsorbenta moramo biti pozorni na njegovo selektivnost, saj so posamezni materiali bolj učinkoviti za določeno vrsto nečistoč kot drugi.

Najbolj razširjeno adsorpcijsko sredstvo za odstranjevanje nečistoč iz vode je aktivno oglje. Njegova velika specifična površina ($600\text{--}1200\text{ m}^2/\text{g}$) je glavni vzrok za dobro adsorpcijo (Roš s sod., 2005; WHO, 2004). Na aktivno oglje se adsorbirajo praktično vse v vodi raztopljene organske molekule, pa tudi neraztopljene snovi (npr. oljne kapljice) in določene anorganske substance. Ne adsorbira kovinskih ionov, adsorbira pa njihove organske komplekse. Aktivno oglje se običajno uporablja za vode z nižjo vsebnostjo nečistoč (npr. pri terciarnem čiščenju). Ko se aktivno oglje zasiti, ga moramo regenerirati ali zamenjati (Roš s sod., 2005).

Drugi znani površinsko aktivni materiali so še diatomejska zemlja, azbest ter razni tipi polisilicijevih kislin ipd. (Drev, 1998).

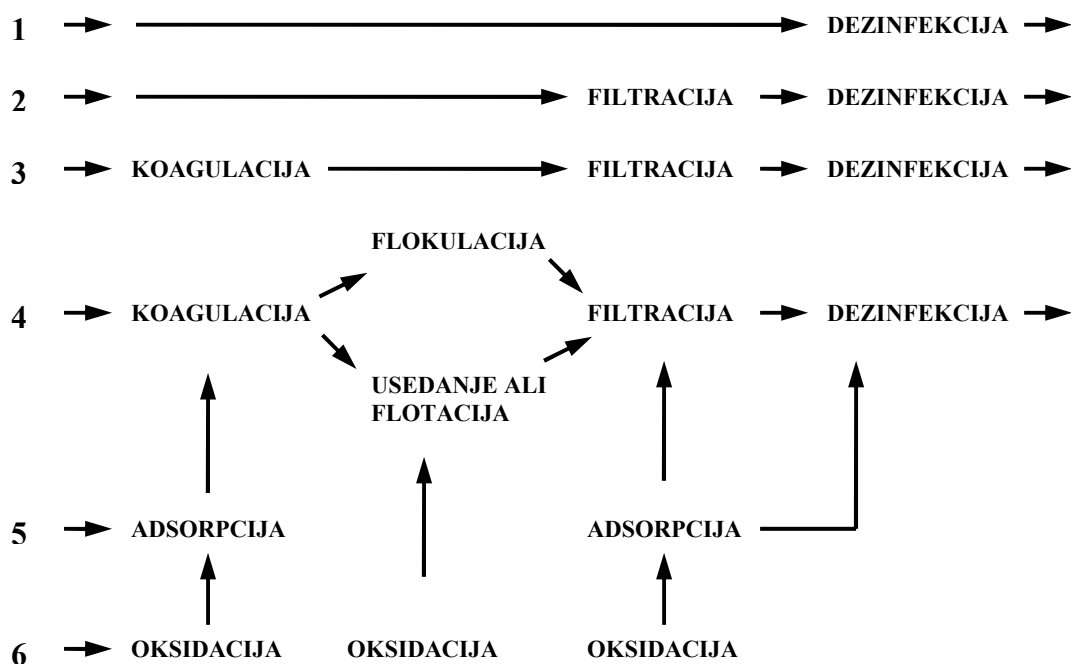
2.3.4.4 Ionska izmenjava

Ionska izmenjava je fizikalno-kemijski proces izmenjave ionov med tekočo fazo (vodo) in ionskim izmenjevalcem. Z njo odstranjujemo posamezne ali skupine ionov iz vode.

Ionski izmenjevalci so netopne organske ali anorganske snovi, ki imajo v svoji molekularni strukturi veliko število kislih oz. kationskih (R-H) ali bazičnih oz. anionskih (R-OH) skupin. Ionski izmenjevalec veže anion ali kation, hkrati pa odda v raztopino ekvivalentno količino ionov enakega naboja, pri čemer se spremeni sestava vode. Z ionsko izmenjavo lahko odstranjujemo nitrate, ione težkih kovin ter druge ione. Pred tem moramo iz vode s

filtracijo in adsorpcijo odstraniti suspendirane delce, da ne zamašijo sloja izmenjevalca. Za izmenjevalce so škodljiva olja, bakterije in alge (Roš s sod., 2005).

Na sliki 2 so prikazane kombinacije postopkov čiščenja in priprave pitne vode, ki se v praksi najpogosteje uporabljajo. Izbira postopka oz. njihove kombinacije je v prvi vrsti odvisna od kvalitete surove vode. Čista, neonesnažena surova voda potrebuje le dezinfekcijo (postopek 1), ki zagotavlja mikrobiološko neoporečnost. Taka je podzemna voda, posebej tista, ki jo črpamo iz globljih plasti. Že pri črpanju moramo poskrbeti za pravilno in čim bolj neoporečno izvedbo, ki zmanjša možnost vnosa zemlje, peska ali mikroorganizmov v vodo. V primeru, da surova voda vsebuje neraztopljene snovi, pred dezinfekcijo izvedemo filtracijo (postopek 2). Uporabljajo se peščeni ali membranski filtri, pri manjših sistemih pa lahko uporabimo snovi, ki imajo tudi adsorpcijske in/ali ionsko-izmenjevalne lastnosti (npr. aktivno oglje). Pri surovi vodi, ki vsebuje manjše količine koloidnih substanc ali je motnost večja kot jo lahko odstranimo s filtrirnimi postopki, izvedemo koagulacijo in nato s filtracijo odstranimo flokule (postopek 3). Kjer je vsebnost koloidnih delcev večja, izvedemo flotacijo ali usedanje za odstranitev flokulov, saj bi drugače prišlo do zamašitve filtrirnega medija (postopek 4). Postopka 5 in 6 uporabljamo, ko je koncentracija onesnaževal previsoka in koagulacija in flokulacija nista zadostni. V tem primeru uvedemo dodatne postopke, odvisno od vrste onesnaženosti. Za oksidacijo se lahko uporabijo klorove spojine, ozon ali drugi oksidanti, ki oksidirajo organske snovi in nekatere kemične spojine. Zadnji trije postopki se uporabljajo za bolj onesnažene vire pitne vode, kot je površinska in pa tudi izvirna voda (Hegeduš, 1999; cit. po Černe, 2005).



Slika 2: Shema najpogostejše uporabljenih kombinacij postopkov čiščenja in priprave pitne vode
(vir: Hegeduš, 1999, cit. po Černe, 2005)

2.3.5 Biološko čiščenje

Pri biološkem čiščenju uporabljamo mikroorganizme (biomaso) za razgradnjo v vodi raztopljenih snovi. Razgradnja je lahko aerobna ali anaerobna. Na učinkovitost postopka vpliva kontaktni čas mikroorganizmov z onesnaženo vodo ter drugi parametri (npr. temperatura). Uporaba bioloških postopkov pri čiščenju in pripravi pitne vode je redka. Največkrat se uporabljajo za denitrifikacijo pitne vode. Biološka razgradnja pa je del procesov, ki poteka pri počasnem filtriranju skozi peščen filter (Roš s sod., 2005; Wotton, 2002).

2.3.6 Dezinfekcija

Zgoraj opisani postopki obdelave vode že odstranijo mnogo mikroorganizmov iz vode, tudi patogenih (preglednica 4). Tiste, ki ostanejo, pa odstranimo z dezinfekcijo. Dezinfekcija (razkuževanje) je postopek uničenja patogenih in zmanjšanja števila ostalih (nepatogenih) mikroorganizmov s fizikalnimi in kemičnimi postopki oz. sredstvi. Predstavlja zadnjo stopnjo priprave vode pred njeno distribucijo v vodovodni sistem.

Preglednica 4: Stopnja zmanjšanja bakterij, virusov in praživali z nekaterimi postopki obdelave pitne vode (vir: WHO, 2004).

	Bakterije	Virusi	Praživali
Hitra peščena filtracija	Ni podatkov	Ni podatkov	70%
Počasna peščena filtracija	50% (99,5%) ¹	20% (99,99%)	50% (99%)
Mikrofiltracija	99.9-99.99%	<90%	99.9-99.99%
Ultrafiltracija, nanofiltracija, reverzna osmoza	Popolna odstranitev	Popolna odstranitev	Popolna odstranitev
flotacija	Ni podatkov	Ni podatkov	95% (99,99%)
Koagulacija/flokulacija/sedimentacija	30 % (90%)	30 % (70%)	30 % (90%)

Učinkovitost dezinfekcije je odvisna od vrste in količine uporabljenega dezinfekcijskega sredstva, kontaktnega časa, hidravličnih razmer, temperature, pH-ja, odpornosti mikroorganizmov ter od prisotnosti in koncentracije suspendiranih snovi – le-te nižajo učinkovitost dezinfekcije (Roš s sod., 2005). Mnogi dezinfektanti cepijo v vodi prisotne organske snovi v snovi, ki jih bakterije lažje asimilirajo, zaradi česar se njihovo število lahko poveča, zlasti če ni rezidualne zaščite. Zaradi tega je izredno pomembno, da dezinficiramo predhodno primerno očiščeno in pripravljeno vodo ter da izberemo najustreznejšo vrsto in količino dezinfekcijskega sredstva (Radonjič, 1994).

Preglednica 5: CT₉₉ vrednosti² za posamezne postopke dezinfekcije (vir: Gordon in Bubnis, 2000).

Mikroorganizmi	Cl ₂	ClO ₂	O ₃
<i>E. coli</i>	0.03-0.05	0.4-0.8	0.02
Rotavirus	0.01-0.05	0.2-2	0.01-0.06
<i>Giardia lamblia</i>	47 ->150	26	0.5-0.6
<i>Cryptosporidium</i>	7200	78	5-10

¹ Število izven oklepaja pove osnovno stopnjo odstranjevanja, v oklepaju pa pod določenimi (optimalnimi) pogoji.

² CT₉₉ vrednost je produkt C (koncentracija) × T (kontakti čas), ki je potreben, da inaktivira 99% mikroorganizmov. Nanj vpliva vrsta mikroorganizma, temperatura in pH vode

Metode dezinfekcije temeljijo na oksidacijsko-redukcijskih reakcijah, ki jih v splošnem lahko razdelimo v dve skupini: fizikalni in kemijski postopki. Pri fizikalnih postopkih uporabljamo UV-sevanje, gama radiacijo ipd. Ko pa uporabimo kemijski reagent za oksidacijo oz. dezinfekcijo, pa govorimo o kemijskih postopkih (kloriranje, ozoniranje itd.). Postopki dezinfekcije, ki ne temeljijo na oksidaciji, se uporabljajo redko. Pri njih gre za mehansko odstranjevanje mikroorganizmov iz vode (membranske tehnike).

2.3.6.1 Dezinfekcija s klorom in klorovimi spojinami

Klor in klorove spojine se najpogosteje uporabljajo za dezinfekcijo, lahko pa jih uporabimo tudi kot oksidant za odstranjevanje nekaterih kemičnih spojin.

Kloriranje z aktivnim klorom je še vedno najpogostejša oblika dezinfekcije vode. Klor se v vodi raztopi in hidrolizira v hipoklorasto kislino ($\text{HClO} \leftrightarrow \text{ClO}^- + \text{H}^+$), ki je aktiven oksidant za pripravo pitne vode (Roš s sod., 2005).

Prednost klora je izrazit rezidualni učinek, saj za razliko od ostalih dezinfekcijskih sredstev ostane v vodi in omogoča dezinfekcijo še v distribucijskem sistemu. Slabosti pa so njegova strupenost, zaradi česar je izredno pomembno natančno doziranje, ter nastajanje kloriranih ogljikovodikov. Če so v vodi prisotne organske spojine, se del klora porabi za kloriranje teh snovi, del pa za njihovo oksidacijo, pri čemer nastanejo različni produkti delne razgradnje (aldehidi, organske kisline itd.). Mnogi nastali klorirani ogljikovodiki so karcinogeni, zato je pomembno, da pred kloriranjem odstranimo iz vode organske spojine (Roš s sod., 2005). Njegova uporaba tudi ni priporočljiva, če je v vodi prisoten bromid, saj le-ta oksidira v toksični bromat (Radonjič, 1994). Učinkovitost dezinfekcije s klorom je različna pri različnih mikroorganizmih. Klor je praktično neučinkovit pri uničevanju praživali (preglednica 5).

Klorove spojine: gre za tekoče reagente, kamor spadajo klorov dioksid (ClO_2), natrijev hipoklorit (NaClO), redko pa tudi kloramini.

Klorov dioksid je močan oksidant in reagira podobno kot klor, zato se vse pogosteje uporablja kot njegovo nadomestilo – tudi zato, ker je bolj učinkovit proti protozojskim patogenom (preglednica 5). Richardson s sod. (2000) v svoji raziskavi ugotavlja, da klorov dioksid tvori relativno malo stranskih produktov, med njimi je našel le dve halogenirani spojini. Njegova glavna slabost je, da je njegov transport in skladiščenje v primerjavi s klorom dražje. Natrijev hipoklorit (varikina) deluje podobno kot klor, le da je rokovanje z njim lažje. Kloramini so sicer zelo učinkoviti bakteriocidi, vendar so manj učinkoviti proti virusom in praživalim. Zahtevajo pa tudi daljši reakcijski čas, zato so uporabni predvsem za preprečevanje rasti bakterij v vodovodnih sistemih. Kloramini tvorijo isto vrsto halogeniranih stranskih produktov kot klor, le da je njihova koncentracija manjša (Richardson s sod., 2000).

2.3.6.2 Dezinfekcija z ozonom

Ozon je reaktivna in nestabilna kisikova spojina. Zaradi kratke razpolovne dobe ga ne moremo skladiščiti, ampak ga moramo sproti proizvajati na mestu porabe. Proizvajamo ga iz zraka ali čistega kisika z razelektritvijo ($3\text{O}_2 + \text{energija} \rightarrow 2\text{O}_3$). Ozon je zelo močan oksidant (močnejši kot klor), zaradi česar je zelo učinkovito dezinfekcijsko sredstvo, uporablja pa se tudi za razbarvanje vode, odstranjevanje okusa in vonja ter za oksidacijsko razgradnjo organskih spojin.

Prednost njegove uporabe je hitrost delovanja ter njegova večja učinkovitost pri uničenju praživali napram kloru (preglednica 5). Pri njegovi uporabi tudi ne nastajajo halogenirane spojine, razen če je v vodi prisoten bromid. V tem primeru tvori največ toksičnega bromata od vseh dezinfekcijskih sredstev (Radonjič, 1994). Ostale slabosti so še veliki stroški gradnje in vzdrževanje naprav za njegovo pridobivanje, njegova nestabilnost in posledičen hiter razpad, zaradi česar nima rezidualnega učinka, slabša topnost v primerjavi s klorom ter strupenost, zaradi česar morajo ozonatorji delovati pri podtlaku.

2.3.6.3 Dezinfekcija z UV-sevanjem

UV sevanje je učinkovito pri deaktivaciji bakterij in virusov. UV sistemi so zaprte posode z vgrajenimi UV svetilkami skozi katere teče voda. Vodo moramo predhodno filtrirati, saj

suspendirani delci zmanjšujejo učinkovitost dezinfekcije (Roš s sod., 2005; Medic, 1998). UV sevanje absorbira genski material, zaradi česar se tvorijo timinski dimeri, kar onemogoča pravilno replikacijo DNK molekule (Medic, 1998).

Prednosti UV dezinfekcije so, da ne spreminja fizikalnih in kemijskih lastnosti vode, prav tako pa ne pušča zdravju škodljivih stranskih produktov. Za delovanje je potreben krajši kontaktni čas (v primerjavi s kemičnimi sredstvi) ter ni bojazni predoziranja. Ne potrebujemo prostora za hranjenje kemikalij, pa tudi sama naprava ne potrebuje veliko prostora (Medic, 1998). Pri UV dezinfekciji ni rezidualnega učinka, kar je njena glavna slabost.

2.4 KONDICIONIRANJE PITNE VODE S POMOČJO RČN

Za kondicioniranje pitne vode in kot preventivna zaščita na vodozbirnih področjih se kaže možnost uporabe ekoremediacijskih (ERM) metod. V Sloveniji se ERM metode za ta namen še ne uporabljajo.

Ekoremediacija je uporaba ekosistemov oz. naravnih procesov za obnovo degradiranega okolja in zaščito ekosistemov. Namen ERM je zmanjšati in odpraviti posledice onesnaževanja okolja, zaščita in obnova habitatov ter izboljšanje kakovosti bivanja. Med ekoremediacijske metode štejemo rastlinske čistilne naprave (RČN), sonaravna močvirja, vegetacijske pasove in revitalizacije.

RČN se danes večinoma uporabljajo za čiščenje različnih odpadnih voda. Ideja RČN je prenos značilnosti in procesov iz močvirnega ekosistema v kontrolirane pogoje. Prednosti RČN pred konvencionalnimi napravami so nižji stroški izgradnje in vzdrževanja sistema, nezahtevnost za upravljanje in vzdrževanje ter da ne zahtevajo zahtevne tehnologije, niti ne potrebujejo električne energije. Dobro prenašajo nihanja v obremenitvah in omogočajo enostavno širjenje sistema, ko se pojavijo večje potrebe, estetsko se lepo vključujejo v okolje, predstavljajo pa tudi habitat za različne organizme. Primerne so kot samostojni čistilni sistemi ali pa kot zadnja (terciarna) stopnja v sklopu večje čistilne naprave (Shutes, 2001; Tanner s sod., 1995). Pomanjkljivost je relativno počasno delovanje v primerjavi s

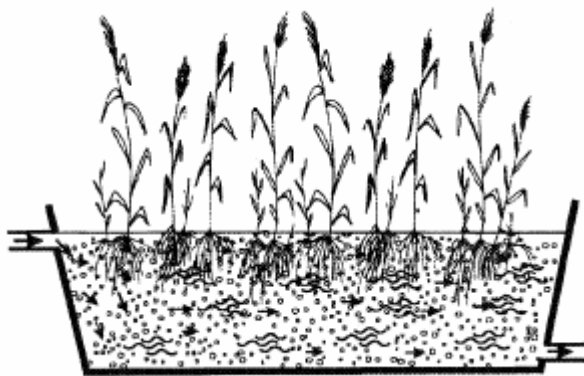
konvencionalnim čistilnimi napravami ter zahteva po večji površini (Shutes, 2001). RČN se uporabljajo za čiščenje komunalnih in industrijskih odpadnih voda, izcednih vod iz rudnikov in odlagališč odpadkov, vod, ki se spirajo s cest in z letališč, za čiščenje iztoka iz greznic in farm. Zlasti primerna so za manjša stanovanjska naselja ter za rekreacijska območja, kjer se količina odpadne vode močno poveča predvsem v poletnem času (Shutes, 2001; Verhoeven in Meuleman, 1999).

2.4.1 Oblike RČN

RČN delimo glede na tip rasti dominantnih makrofitov (prostoplavajoči, potopljeni, emergentni) in glede na način pretakanja vode (prosta vodna površina, horizontalni ali vertikalni podpovršinski tok). V Slovenji prevladujejo sistemi s horizontalnim in vertikalnim podpovršinskim tokom ter mešani sistemi, zato so v nadaljevanju predstavljeni le-ti.

2.4.1.1 Sistemi s horizontalnim podpovršinskim tokom vode.

Pri RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom poteka polnjenje bazena neprekinjeno. Voda počasi teče horizontalno skozi substrat in se na koncu zbere ter izteče skozi iztok (slika 3). Substrat največkrat sestavljajo zemlja, pesek, prod ali umetni materiali (Shutes, 2001; Verhoeven in Meuleman, 1999).



Slika 3: RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom vode

(vir: Stottmeister s sod., 2003).

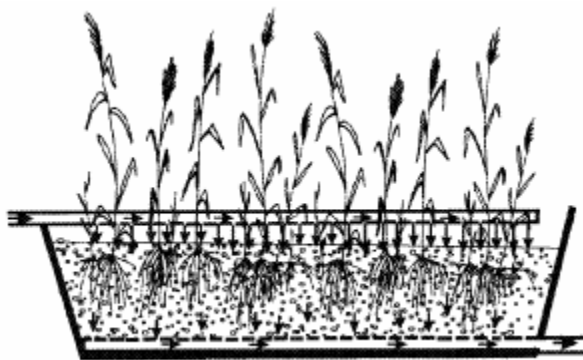
V postopek čiščenja vode so vključeni fizikalni (sedimentacija in filtracija), fizikalni-kemijski procesi (adsorpcija, oksidacija, precipitacija ipd.) ter mikrobna razgradnja (Stottmeister s sod., 2003; Verhoeven in Meuleman, 1999). Najpogosteje uporabljene rastline so *Phragmites australis*, *Scirpus lacustris*, *Typha latifolia* in *Carex spp.*, redkeje se uporabljajo tudi druge rastline kot so *Iris pseudacorus*, *Sparganium erectum*, *Phalaris arundinacea* (Žvokelj, 2003).

Sistem s horizontalnim tokom vode je učinkovit pri odstranjevanju neraztopljenih snovi, BPK₅, KPK, težkih kovin, fekalnih bakterij in uravnavanju pH-ja. Pomanjkljivost je slabša prezračenost sistema, zaradi česar nastajajo anaerobne plasti predvsem pri dnu bazena, kar se odraža v manjšem odstranjevanju dušika in fosforja (Žvokelj, 2003).

2.4.1.2 Sistemi z vertikalnim podpovršinskim tokom vode.

Principi čiščenja so enaki kot pri sistemih s horizontalnim podpovršinskim tokom, drugačna pa je zgradba in način polnjenja gred. Pri RČN z vertikalnim podpovršinskim tokom preplavimo bazen z večjo količino odpadne vode in nato pustimo, da počasi ponikne proti dnu (slika 4). Pred naslednjim polnjenjem pustimo bazen nekaj časa suh, saj taki cikli močno povečajo kapaciteto sistema za čiščenje odpadne vode, ker se substrat prezračuje in se mineralizirajo neraztopljeni delci (Verhoeven, 1999). Grede so običajno zasajene z navadnim trstom (*Phragmites australis*), ker ima najgloblji koreninski sistem (Žvokelj, 2003).

Sistem z vertikalnim podpovršinskim pretokom je v primerjavi s horizontalnim bolj prezračen in zato bolj učinkovit pri odstranjevanju dušika in fosforja ter nižanju BPK₅. Manjšo učinkovitost pa kaže pri odstranjevanju neraztopljenih snovi (Žvokelj, 2003).



Slika 4: RČN z vertikalnim podpovršinskim tokom vode
(vir: Stottmeister s sod., 2003).

2.4.1.3 Mešani sistemi

O mešanih sistemih govorimo, ko kombiniramo različne sisteme. Najpogostejše kombinacije vključujejo vertikalni in horizontalni tok vode. Tako izkoristimo prednosti vsakega sistema in se hkrati izognemo njunim pomanjkljivostim. Horizontalni sistemi učinkovito odstranjujejo suspendirane snovi, dobre rezultate pa kažejo tudi pri odstranjevanju BPK₅. V vertikalnih gredah, ki so bolj aerobne, pa se odstrani več dušika ter BPK₅. Prednost mešanih sistemov je večje odstranjevanje dušika, medtem ko učinkovitost odstranjevanja fosforja ostaja nizka (Vymazal, 2005).

2.4.2 Nosilci čiščenja v RČN

Aktivna cona v RČN je področje rizosfere, kjer prihaja do interakcij med rastlinami, mikroorganizmi, substratom in polutanti v vodi, in kjer poteka glavno čiščenje s fizikalno-kemijskimi in biološkimi procesi (Stottmeister s sod., 2003). Na uspešno odstranitev oz. zmanjšanje polutantov v vodi s pomočjo RČN vpliva več dejavnikov: fizične značilnosti sistema, lastnosti substrata, izbira rastlin, kvaliteta vode na vtoku, hidrološke značilnosti, podnebne razmere itd.

2.4.2.1 Substrat

Substrat nudi oporo rastlinam, predstavlja osnovno površino, na kateri se razvije mikrobni biofilm ter vpliva na hidravlične procese v RČN. Predvsem velikost in razporejenost delcev vplivata na hidravlične lastnosti ter s tem na tok vode skozi čistilno napravo ter posledično na odstranjevanje polutantov (Stottmeister s sod., 2003; Tanner s sod., 1995). Substrat sodeluje v procesu čiščenja tudi neposredno, in sicer s filtracijo, adsorpcijo ter kemijskim vezanjem nečistoč (ionska izmenjava in kemijske reakcije). S filtracijo in sedimentacijo se odstranjujejo suspendirani in koloidni delci ter tudi mikroorganizmi. Filtracijska sposobnost sistema se z razvojem biofilma, rastjo korenin in odlaganjem delcev spreminja. Adsorpcija in kemijsko vezanje sta pomembna za odstranjevanje fosforja ter težkih kovin.

Substrat pomembno vpliva na razvoj in aktivnost mikrobnega biofilma. Bakterije se pritrdijo na površino delcev substrata in tvorijo biofilm. Ena najpomembnejših lastnosti substrata je zato velika površina, kamor se lahko pritrdijo mikroorganizmi. Velikost te površine je odvisna od velikosti delcev in od njihove poroznosti, pomembna pa je tudi kemična sestava, saj se na vseh snoveh biofilm ne razvije enako uspešno. Tako je Zupančičeva (2001) prišla do zaključka, da je najbolj uspešen substrat za razvoj mikrobnega biofilma steklo, sledi mu agrogel, pesek, keramika in šota. Oglje se je izkazalo kot povsem neprimeren substrat za razvoj biomase. Ob prisotnosti istih rastlin se na peščenem substratu pojavljajo drugačne združbe kot na glinenem substratu, kar nakazuje, da tip substrata določa zgradbo mikrobnih združb in s tem tudi posredno vpliva na čiščenje vode (Vacca s sod., 2005).

2.4.2.2 Makrofiti

Rastline kot sestavni del RČN vplivajo na hidrološke, kemijske ter mikroklimatske značilnosti sistema, omogočajo učinkovitejšo filtracijo, privzemajo hranila, težke kovine in druge polutante, pospešujejo mikrobno razgradnjo s sproščanjem kisika v rizosfero in z odvajanjem nastalih plinov, predstavljajo sekundarni habitat za naselitev različnih organizmov ipd. Nepomembna pa ni niti njihova estetska vrednost, sploh če zasadimo lepo

cvetoče rastline kot so vrste *Iris pseudoacorus*, *Canna spp.*, *Eichhornia crassipes* (Tanner s sod., 1995; Žvokelj, 2003).

Makrofiti vplivajo na hidravlične lastnosti substrata. Korenine in bakterije lahko zamašijo pore med delci substrata, vendar pa po drugi strani mikrobní razkroj odmrlih korenin vodi v formacijo novih, sekundarnih prostorčkov, kar prispeva k povečanju pornega volumna in s tem k stabilnosti hidravlične prevodnosti (Stottmeister s sod., 2003). Odmrli rastlinski material in koreninski sistem predstavljajo ogromno površino za pritrjevanje mikroorganizmov. Pomen rastlin pri tvorbi mikrobne združbe kaže podatek, da je število bakterij v rizosferi v primerjavi z ostalimi deli višje za najmanj faktor 2 in to ne glede na tip substrata (Vacca s sod., 2005).

Vezava hranil v rastlinsko biomaso je eden od mehanizmov njihovega odstranjevanja iz odpadne vode, ni pa glaven. Rastline privzamejo povprečno 21 % fosforja ter 22 % dušika iz odpadne vode, a dejansko so te številke nižje, saj na privzem vplivajo vrsta rastline, koncentracija hranil, zadrževalni čas, obdobje rasti, temperatura ipd. Za učinkovitejše odstranjevanje hranil je potrebna košnja in odstranitev rastlin, sicer se velik del hranilnih snovi vrne nazaj v sistem (Tanner, 1996; Verhoeven in Meuleman, 1999). Rastlin so s svojim privzemom tudi pomemben nosilec čiščenja težkih kovin in nekaterih organskih onesnaževalcev (npr. fenolne spojine) iz odpadne vode.

Razpoložljivost kisika je pomembna za respiracijo korenin, mikrobno respiracijo in kemične oksidacijske procese. V močvirski prsti so pore napolnjene z vodo, zato je difuzija skozi tako prst izredno majhna in hitro postane anoksična oz. anaerobna. Na take razmere so se rastline prilagodile z razvojem sistemov, ki omogočajo dovajanje kisika podzemnim delom rastlin: notranji lakunarni sistemi (aerenhim), adventivne korenine in lenticеле (Žvokelj, 2003). Rastline tudi stalno sproščajo kisik v okolico korenin, kar je pomembno za rast aerobnih mikroorganizmov, oksidativna plast pa je tudi zaščita korenin pred toksičnimi spojinami, ki nastajajo v anoksični okolici. Kapaciteta prezračevanja rizosfere je vrstno specifična in močno odvisna od redoks potenciala rizosfere. Največjo kapaciteto za sproščanje kisika sta pokazala vrsta *Typha latifolia* (širokolistni rogoz) in vrsta

Phragmites australis (navadni trst) (Wießner s sod., 2002). Rastline pa ne dovajajo le kisik, ampak odvajajo tudi metabolne pline (CO_2 , CH_4 idr.).

Poleg kisika rastline sproščajo v rizosfero še organske snovi, kot so sladkorji, vitamini (tiamini, riboflavini itd.), organske kisline (malat, citrat, amino kisline itd.) ter druge organske snovi. Namen je mobilizacija nekaterih za rast potrebnih snovi (npr. z eksudati lahko povečajo topnost fosfatov in železa) ter stimuliranje rasti specifičnih mikroorganizmov (Stottmeister s sod., 2003). Vacca s sod. (2005) poroča, da se v rizosferi pojavljajo mikrobne združbe, ki jih drugje v substratu ni, kar kaže na to, da rastline specifično stimulirajo razvoj določenih združb. Med snovmi, ki jih izločajo rastline, pa so tudi spojine, ki zavirajo rast določenih bakterij. Za *Sc. Lacustris* so ugotovili, da izloča različne derivate benzena, ki imajo baktericidni efekt (Stottmeister s sod., 2003). V RČN je rizodepozicija organskih snovi pomembna le, če je v vodi izjemno malo ogljikovih hidratov (Stottmeister s sod., 2003), kot npr. pri pitni vodi.

2.4.2.3 Mikroorganizmi

Mikroorganizmi so najpomembnejši nosilci čiščenja odpadne vode. So glavni nosilci transformacije in mineralizacije organskih snovi, pomembni pa so še za odstranjevanje dušika, pretvorbo potencialno toksičnih snovi v netoksične in akumulacijo različnih snovi, npr. težke kovine.

Glede na prisotnost receptorjev elektronov in količine kisika, poteka metabolizem polutantov po različnih poteh. V RČN s podpovršinskim tokom aerobni procesi potekajo blizu korenin rastlin, v rizosferi. V vmesnih območjih brez kisika potekajo anaerobni procesi kot so denitrifikacija, redukcija sulfata in metanogeneza (Stottmeister s sod., 2003). Na kemijske pretvorbe poleg vsebnosti raztopljenega kisika vplivajo še drugi zunanji dejavniki, kot so temperatura, pH in prisotnost kemijskih snovi. Mikrobi pa z svojim metabolizmom tudi vplivajo na kemizem v RČN in s tem določajo nadaljnjo pot večine polutantov. Mikroorganizmi so nepogrešljivi še pri odstranjevanju težkih kovin iz odpadne vode. Sposobni so biosorpcije težkih kovin z vezavo na celično površino, s privzemom v

celično steno ali pa jih akumulirajo neposredno v celico z aktivnim ali pasivnim privzemom (Adriano s sod., 2004; Zupančič, 2001).

Mikrobi pa ne razgrajujejo le polutantov, ampak vgrajujejo hranila tudi v svojo biomaso, od koder se počasi sproščajo. Na ta način jih odstranijo iz odpadne vode in jih zadržijo v RČN (Verhoeven in Meuleman, 1999).

2.4.3 Odstranjevanje mikroorganizmov v RČN

Narejenih je bilo že več raziskav, ki ugotavljajo uporabnost RČN za odstranjevanje oz. zmanjšanje koncentracije patogenih mikroorganizmov v odpadni vodi. Manj pa je raziskano kateri procesi vplivajo na odstranjevanje mikroorganizmov, v kakšnem obsegu in pod katerimi pogoji. Študije so narejene na odpadnih vodah, raziskave, ki bi se osredotočile na uporabo RČN za kondicioniranje mikrobiološko onesnažene pitne vode, nismo našli. Niti nimamo podatkov, da se v ta namen RČN uporabljajo.

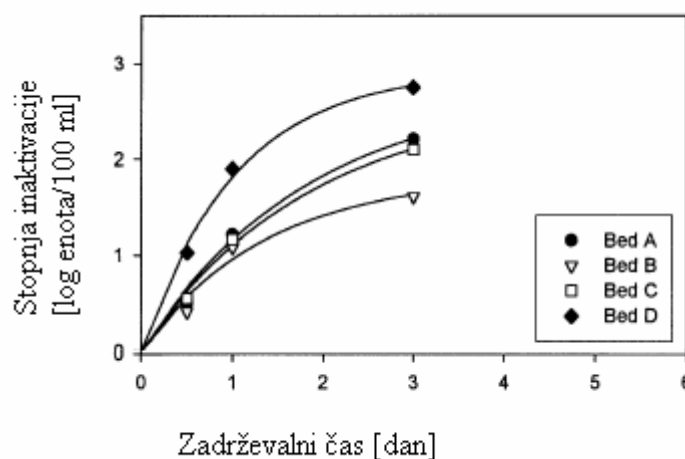
V literaturi zasledimo podatke, da je učinkovitost odstranjevanja koliformnih bakterij iz odpadnih voda v RČN s podpovršinski horizontalnim tokom >99 % (Vacca s sod., 2005), fekalnih koliformnih bakterij 94–97 % (Karathanasis s sod., 2003), 90–99 % (Tanner s sod., 1995), 98,2 % (Thurston s sod., 2001), povprečni delež odstranjevanja *E. coli* v pilotni RČN 96,6–98,9 % (Decamp in Warren, 2000). Učinkovitost pri odstranjevanju cist in spor *Giardia* in *Cryptosporidium* je v povprečju 87,8–64,2 % za kolifage pa 95,2 % (Thurston s sod., 2001) oz. 97,1 % (Nokes s sod., 2003). Čez 90 % odstranjenih vseh mikroorganizmov pa je rezultat iz RČN s prosto vodno površino (Quiñónez Diaz s sod., 2001).

Učinkovitost odstranjevanja mikroorganizmov je odvisna od substrata, oblike RČN in pogojev delovanja, kot so zadrževalni čas, stopnja obremenitve, temperatura (Vacca s sod., 2005; Karathanasis s sod., 2003). Vplivu prisotnosti rastlin dajejo različni avtorji različen pomen.

Tanner s sod. (1995) ni ugotovil pomembne razlike pri odstranjevanju fekalnih koliformnih bakterij iz odpadne vode med zasajenim in nezasajenim horizontalnim sistemom. Vpliv gostote vegetacije na odstranjevanje mikroorganizmov iz RČN je raziskoval tudi Nokes s sod. (2003) in ugotovil, da prisotnost ali gostota rastlin nima pomembnega vpliva na zmanjšanje oz. odstranjevanje koliformnih in fekalnih koliformnih bakterij ter praživali *Giardia* in *Cryptosporidium*, pomembno pa vplivata na odstranjevanje kolifagov. Večje odstranjevanje virusov iz zasajene grede je ugotovil tudi Gersberg s sod. (1987). Možni vzroki naj bi bili povečana filtracija in absorpcija na koreninski sistem in pa antagonistični vplivi v rizosferi, ki zmanjšajo preživetje virusov (Nokes s sod., 2003; Gersberg s sod., 1987). Vacca s sod. (2005) ugotavlja, da je učinkovitost odstranjevanja bakterij pri zasajenih in nezasajenih gredah podobna, če gledamo le število bakterij. Razlike pa se pojavijo v mikrobnih sestavi, saj ugotavlja, da enterične bakterije verjetno tvorijo del rizosferne združbe in da izločki navadnega trsta ter kompeticija drugih bakterij ne povzroča bistvenega zmanjšanja te skupine. Celo nasprotno, v rizosferi naj bi te bakterije aktivno rasle.

Medtem pa Decamp in Warren (2000) poročata, da je delež odstranjenih *E. coli* v nezasajenih gredah nižji kot v zasajenih. O podobnih rezultatih glede fekalnih bakterij poroča še Karathanasis s sod. (2003), vendar hkrati ugotavlja pomembno razliko pri odstranjevanju bakterij v odvisnosti od sezone. Sistem z rastlinami je pokazal boljše rezultate med toplejšimi meseci (maj–september), sistem brez rastlin pa pozimi in v zgodnji pomladi (december–april). Vzroke za slabše rezultate pri zasajenih gredah med zimskimi meseci pripisuje manjši metabolni aktivnosti in zmanjšanju števila predatorjev zaradi nizkih temperatur ter zmanjšanju biomase korenin, zaradi česar se zmanjša površina na katero se lahko pritrdijo mikroorganizmi, zmanjša pa se tudi filtracijska kapaciteta samega sistema. Vzroki za boljše rezultate pri nezasajenih gredah med zimo pa naj bi bili redukcija mikrobne populacije zaradi nizkih temperatur ter značilnosti same RČN. Pri napravi, ki ni bila zasajena, je bil namreč uporabljen večji rezervoar za predčiščenje ter bolj drobnozrnat substrat, ki zagotavlja večjo filtrirno kapaciteto ter večjo možnost razvoja biofilma (Karathanasis s sod., 2003).

Na zmanjšanje oz. odstranitev fekalnih mikroorganizmov močno vplivata zadrževalni čas in substrat. Garcia s sod. (2003) je ugotovil pozitiven odnos med zmanjšanjem koncentracije mikroorganizmov in zadrževalnim časom. Z daljšanjem zadrževalnega časa se je večala stopnja odstranjevanje mikroorganizmov, vendar le do določene meje. Raziskava na primeru fekalnih koliformnih bakterij je namreč pokazala, da zmanjšanje doseže saturacijski nivo pri zadrževalnem času treh dni. To pa pomeni, da večanje zadrževalnega časa ne bi imelo bistvenega vpliva na zmanjšanje koncentracije mikroorganizmov v efluentu (slika 5).



Slika 5: Zmanjšanje števila fekalnih koliformnih bakterij kot funkcija zadrževalnega časa in substrata (vir: Garcia s sod., 2003).

Bed A – granitni prod, premer delcev 5-13 mm, homogen, brez finih delcev, poroznost 45,4 %; Bed B – granitni prod, premer delcev 5-25 mm, homogen, brez finih delcev, poroznost 45,5 %; Bed C – rečni pod, premer delcev 5-20 mm, homogen, majhna količina finih delcev, poroznost 38,4 %; Bed D – mešanica rečnega peska in proda, premer delcev 3-13 mm, nehomogen, velika količina finih delcev, poroznost 29,4 %

Pomemben vpliv ima tudi izbrani filtrirni material. Lastnosti substrata, kot so sestava, velikost delcev in poroznost, vplivajo na transport bakterij in na formacijo biofilma. V substratu z manjšimi porami so bakterije pred bakterivori bolj zaščitene, ker je veliko predatorjev prevelikih, da bi jih dosegli (Decamp in Warren, 2000). Manjši delci nudijo tudi večjo površino kamor se adsorbirajo mikroorganizmi. Glede na rezultate (Garcia s sod., 2003) daje najboljše rezultate mešanica rečnega peska in proda, najslabši rezultati pa so bili v gredi z debelejším homogenim substratom iz granitnega proda. Vpliv substrata je

tudi posreden, saj vpliva na parametre kot so rast rastlin in prenos kisika v vodo, ki so prav tako pomembni za zmanjševanje koncentracije mikroorganizmov v RČN.

Na uspešnost odstranjevanja bakterij iz RČN pa naj bi vplivala tudi sestava bakterijske združbe in stanje samih bakterij. Bakterije fekalnega izvora RČN odstrani bolj učinkovito kot druge bakterije, ki so očitno bolj prilagojene na pogoje, ki se pojavljajo v RČN (Decamp in Warren, 2001). Rezultati raziskave (Decamp in Warren, 2001) kažejo, da so bakterije iz predhodnega tretiranja bolj verjetno poškodovane in bodo zato z večjo verjetnostjo odstranjene iz odpadne vode v RČN. Večina bakterij, ki je zapustila RČN, je bila namreč nepoškodovana, torej verjetno viabilna, medtem ko se je delež poškodovanih precej zmanjšal.

Mehanizme, ki vplivajo na zmanjševanje oz. odstranjevanje mikroorganizmov v RČN, lahko razdelimo v tri skupine: fizikalni, kemijski in biološki procesi. Med fizikalne štejemo filtracijo, sedimentacijo, adsorpcijo in agregacijo. Kemijska procesa sta oksidacija ter izpostavljenost biocidom in drugim toksinom, ki jih izločajo rastline in drugi mikroorganizmi. Med biološke procese pa štejemo predacijo protozojev in nematod, delovanje litičnih bakterij in virusov, naravno odmiranje, zadrževanje v biofilmih, kompeticija za nutriende in izločanje antimikrobnih substanc drugih mikroorganizmov (Stottmeister s sod., 2003; Decamp in Warren 1998; Vacca s sod., 2005).

Preživetje oz. stopnja odmiranja mikroorganizmov je odvisno od pogojev v okolju (temperature, UV sevanja, prisotnosti organskih snovi, dostopnosti hranil), kompeticije za hranila, prisotnost toksičnih in antimikrobnih spojin, prisotnosti predatorjev in litičnih agensov ipd. Naravno odmiranje je lahko mehanizem zmanjševanja števila patogenih mikroorganizmov v odpadni vode, a pogoji v RČN lahko povzročijo, da ti preživijo dlje kot bi sicer. Patogene bakterije preživijo v sedimentih dlje kot v prosti vodi. Adsorbirane na delce substrata so bolj zaščitene pred sončnim sevanjem, toksičnimi substancami, napadi bakteriofagov in drugimi okoljskimi faktorji, ki pospešujejo umrljivost. Na njihovo preživetje v substratu vpliva tudi velikost delcev. Umrljivost fekalnih bakterij je manjša v sedimentih z večjim deležem gline. Daljše preživetje bakterij v substratu omogočajo še organske snovi in anaerobne razmere. V sedimentih prihaja zaradi sedimentacije, filtracije

in adsorpcije do koncentriranja indikatorskih in patogenih bakterij, zato so lahko rezervoar patogenih mikroorganizmov ter tako predstavljajo potencialno nevarnost za zdravje ljudi (Burton s sod., 1987, Karim s sod., 2004). Po drugi strani kompeticija za hranila in mesto pritrditve poveča odmiranje mikroorganizmov. V vodi z nizkimi koncentracijami nutrientov in malo organskih snovi so bakterije fekalnega izvora slabši kompetitorji.

Od okoljskih dejavnikov najbolj vplivata na preživetje oz. odmiranje bakterij temperatura in sončno sevanje. Zdragas s sod. (2002) ugotavlja, da ima sončno sevanje pri nižjih temperaturah večji vpliv na odmiranje koliformnih bakterij kot pri višjih temperaturah. Pri višjih temperaturah je učinek sevanja zmanjšan, verjetno zaradi povečane stopnje razmnoževanja bakterij. Temperatura vpliva predvsem na aktivnost in na razmnoževanje bakterij. Po drugi strani pa rastline s senčenjem preprečujejo izpostavljenost sevanju in pregrevanje, zaradi česar je vpliv sončnega sevanja na zmanjševanje koncentracije patogenih bakterij zmanjšan.

Učinkovitost filtracije pri odstranjevanju mikroorganizmov je odvisna od velikosti por, njihove razporeditve in velikosti celic. Vezava bakterij na suspendirane delce ali njihova agregacija omogočata učinkovitejše filtriranje. Filtracijske sposobnosti pa se še povečajo po nekaj mesecih delovanja sistema. Sedimentacija suspendiranih delcev in organskih snovi ter razvoj biofilma in koreninskega sistema zmanjšajo pore in mikroorganizmi težje prehajajo skozi. Zaradi večje površine, pa se poveča tudi adsorpcijska sposobnost sistema. Sedimentacija, kot mehanizem odstranjevanja mikroorganizmov iz odpadne vode, je pomembnejša pri sistemih s prosto vodno površino. Mikroorganizmi se vežejo na delce in skupaj z njimi potonejo na dno, kjer se koncentrirajo. Posledica take koncentracije je, da ti sedimenti lahko predstavljajo rezervoar patogenih organizmov, ki se sprostijo v vodni stolpec pri spremenjenih pogojih, npr. med nevihto (Karim s sod., 2004). Prisotnost rastlin lahko zmanjša sedimentacijo mikroorganizmov, ker se le-ti pritrdijo nanje, stabilizirajo pa tudi sedimente in vodno površino ter tako zmanjšujejo sproščanje mikroorganizmov. Sedimentacija poteka tudi v sistemih s podpovršinskim tokom. Tudi tu se bakterije pritrdijo na delce ali se združijo v agregate ter se zaradi zmanjšanja hitrosti toka usedejo v prostorčke med zrnca substrata.

Adsorpcija in tvorba biofilma naj bi bila pomembnejša mehanizma zadrževanja mikroorganizmov v sedimentih in s tem njihovega odstranjevanja iz odpadne vode. Predpogoj za tvorbo biofilma je pritrditev bakterij na podlago (delce substrata, odmrli organski material, korenine rastlin). Faktorji, ki kontrolirajo začetno vezavo celic na površino, so elektrostatični naboj na bakterijski celici in površini delca, Van der Waalsove sile, hidrofobnost oz. hidrofilnost bakterijske celice in delca, kemična sestava delca, površinska napetost in velikost ter hrapavost površine delcev (Yee s sod., 2000). Adsorpcija zadrži bakterije v RČN, vendar pa ima substrat omejeno površino in s tem omejeno adsorpcijsko kapaciteto. Pritrditev celic ni nujno stalna, kar je odvisno od temperature, pH, ionske moči, dostopnosti nutrientov in organskih snovi ter od prisotnosti oz. odsotnosti določenih elementov, npr. Ca in Mg. Tako lahko sprememba sestave odpadne vode povzroči desorpcijo bakterij, kar poveča njihovo število na iztoku (Yee s sod., 2000). Po začetni pritrditvi lahko metabolni procesi kot so formacija biofilma in produkcija ter izločanje različnih eksudatov spremenijo obseg nadaljnje bakterijske adsorpcije, vendar pa je razvoj biofilma mogoč šele po adsorpciji. V nadaljnje oprijemanje so lahko vključene specifične celične strukture, npr. fibrile ali polisaharidi.

Kakšen je obseg adsorpcije *E. coli* na zrnca peska je raziskoval Wand s sod. (2006). Uporabil je sterilni vertikalni peščen filter. Pokrivnost je bila precej nižja, kot bi teoretično lahko bila. Poskus je pokazal, da adsorpcija ne igra dominantne vloge pri odstranjevanju *E. coli* iz suspenzije ali odpadne vode (Wand s sod., 2006). Adsorpcijski procesi pa naj bi bili glavni mehanizmi odstranjevanja virusov, ki naj bi se v glavnem adsorbirali na korenine rastlin in mikrobní biofilm (Gersberg s sod., 1987).

Znano je, da imajo ciliati glavno vlogo pri odstranjevanju dispergiranih bakterij v aerobnih bioloških čistilnih sistemih, glavno vlogo pa naj bi imeli tudi pri zmanjševanju oz. odstranjevanju bakterij iz odpadne vode v RČN (Decamp in Warren, 1998). Da je predacija protozojev glavni mehanizem odstranjevanja bakterij tako iz zasajene kot tudi nezasajene RČN, ugotavlja tudi Wand s sod. (2006), ki še poroča, da so dominantni flagelati, našli pa so tudi ciliate. Poleg protozojev so v predacijo bakterij vključeni še nematodi in rotiferi, vendar njihova vloga pri odstranjevanju bakterij iz odpadne vode v RČN še ni znana.

Predacija je odvisna od več dejavnikov: koncentracija in pritrjenost oz. razpršenost bakterij, morfologija, fiziologija in strategije prehranjevanje predatorjev ter fizikalno-kemijski dejavniki okolja: temperatura, prezračenost, redoks potencial (Decamp in Warren, 1998). Mnoge bakterije se pritrdijo na substrat in so tako nedostopne za prostoplavajoče in pritrjene filtratorje, vendar pa se z njimi lahko hranijo plazeči protozoji. Pomembna je še velikost predatorja, saj male pore znotraj delcev substrata nudijo zaščito bakterijam, ki so zato za velike predatorje nedosegljive. Dosežejo pa jih lahko manjši ciliati in amebe, ki naj bi imeli glavno vlogo pri predaciji teh bakterij (Decamp in Warren, 1998). Na zmanjšanje števila bakterij v RČN vpliva koncentracija plena in predatorja ter kontaktni čas med njim. Raziskava je pokazala, da je najvišja abundanca ciliatov v prvi tretjini bazena (Decamp in Warren, 1998).

Pomemben vpliv na predacijo imajo tudi pogoji v okolju. Koncentracija kisika vpliva na prisotnost oz. odsotnost posameznih vrst ciliatov, pa tudi bakterij. Temperatura vpliva na metabolno aktivnost in s tem na stopnjo predacije. Hidravlične lastnosti in stopnja obremenjevanja pa določajo, koliko časa so bakterije in predatorji v stiku (Decamp in Warren, 1998).

Poleg predacije naj bi imeli pomembno vlogo pri odstranjevanju bakterij iz odpadne vode tudi biolitični organizmi, kot je npr. bakterija *Bdellovibrio bacteriovorus*. A kakšen je obseg in vloga litičnih bakterij in virusov pri zmanjševanju mikroorganizmov v RČN še ni ovrednoteno (Wand s sod., 2006). Prav tako še ni znano, če in v kolikšni meri biolitični agensi predstavljajo kompetitorje predatorjem in kako se to odraža v delovanju sistema. Wand s sod. (2006) poroča o soobstoju protozojev in *Bdellovibrio* v RČN – koncentracija je odvisna od koncentracije bakterij. *Bdellovibrio* bi naj bil pomemben faktor pri odstranjevanju enteričnih bakterij, saj napada le Gram negativne bakterije, medtem ko protozoji napadajo tako Gram negativne kot tudi Gram pozitivne bakterije (Wand s sod., 2006).

K odstranjevanju mikroorganizmov iz odpadne vode prispevajo tudi rastline. Koreninski sistem predstavlja podlago za njihovo adsorpcijo, kisik, ki ga sproščajo rastline v rizosfero, povzroča oksidacijo bakterij (anaerobne razmere celo podaljšujejo preživetje koliformnih

bakterij v okolju) in rastline izločajo antimikrobne substance v svoje okolje (Decamp in Warren, 2000). Baktericidni efekt rastlinskih izločkov je odvisen od vrste uporabljenih rastlin ter vrste bakterij. Eksudati korenin tako po eni strani stimulirajo rast mikroorganizmov v rizosferi, po drugi strani pa jo inhibirajo ter tako vplivajo na sestavo mikrobne združbe (Stottmeister s sod., 2003). Rezultati raziskave, ki jo je opravil Vacca s sod. (2005), so pokazali, da enterične bakterije tvorijo v RČN del združbe rizosfere in da eksudati trsta in drugih mikroorganizmov ne povzročajo pomembne eliminacije te skupine. Decamp in Warren (2000) pa navajata, da so eksudati nekaterih rastlin, tudi navadnega trsta, toksični za vrsto bakterij, tudi za *E. coli*. Antimikrobno aktivni snovi naj bi bili tanična in galična kislina. Pomen toksinov in antimikrobnih substanc makrofitov pri odstranjevanju mikroorganizmov iz RČN zaenkrat še ni znano. Prav tako ni znano, če in v kolikšni meri pripomorejo k zmanjševanju števila bakterij antimikrobne substance, ki jih izločajo drugi organizmi (npr. glive in bakterije), ki so del združbe v RČN.

2.4.4 Oblikovanje RČN

RČN posnema naravna močvirja in pri načrtovanju moramo to upoštevati ter se truditi posnemati predvsem tiste procese, ki bi kar najbolj izboljšali kvaliteto vode. Upoštevati moramo s kakšno odpadno vodo imamo opravka in kakšni so naši cilji. Na podlagi hidroloških spremenljivk in kvalitete vtočne vode lahko predvidimo učinkovitost delovanja RČN. Parametri, kot so pretok, zadrževalni čas in globina grede, odločilno vplivajo na procese čiščenja, zato zahtevajo posebno pozornost pri načrtovanju sistema. Poznati pa moramo še druge parametre, ki vplivajo na delovanje sistema, npr. mehanizme odstranjevanja različnih onesnaževal, značilnosti močvirskih rastlin, podnebne razmere, značilnosti substrata ipd.

Pretok vode skozi RČN naj bo takšen, da omogoča zadosten kontaktni čas med onesnaževali ter substratom, mikroorganizmi in rastlinami. Tok vode (pretok) skozi porozni material opisuje naslednja enačba (Brown s sod., 2000; Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, 1993):

$$Q = k_s A S \quad \dots(1)$$

Q = tok na enoto časa – pretok (m^3/d)

K_s = hidravlična prepustnost medija (m/d)

A = površina RČN (m^2)

S = hidravlični gradient (m/m)

Enačba 1 ne podaja dejanskega stanja zaradi fizikalnih omejitev samega sistema. Predpostavlja namreč laminarni tok skozi sistem, a zaradi različno velikih delcev substrata in neenakomerne poroznosti lahko prihaja do turbulentnih tokov. Predpostavlja tudi, da je tok vode v sistem konstanten in nespremenljiv, a dejansko se lahko vrednosti pretoka na vtoku in tiste na iztoku razlikujejo zaradi precipitacije, evapotranspiracije in pronicanja vode iz sistema (Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, 1993). Padavine razredčijo koncentracijo polutantov in povečajo trenutni nivo vode, s čimer povečajo tok ter tako zmanjšajo zadrževalni čas (Brown s sod., 2000). Evapotranspiracija koncentrira polutante, znižuje vodno gladino, zmanjša tok in povečuje zadrževalni čas. Evapotranspiracija je odvisna predvsem od vrste rastlin in njihove gostote ter od podnebnih razmer (Brown s sod., 2000).

Pretok najbolj vpliva na zadrževalni čas. Zadrževalni čas nam pove koliko časa voda ostaja v sistemu (od trenutka uvedbe surove vode do odtoka obdelane vode), torej koliko časa je izpostavljena fizikalnim, kemijskim in biološkim procesom čiščenja. Kolikšen zadrževalni čas načrtujemo je odvisno od vrste polutanta ter od rezultatov, ki jih hočemo doseči (Brown s sod., 2000; Černe, 2005).

$$t = V/Q = \varepsilon h A / Q \quad \dots(2)$$

t = zadrževalni čas (h, dan)

V = celoten volumen vode v RČN (m^3)

Q = tok na enoto časa – pretok (m^3/d)

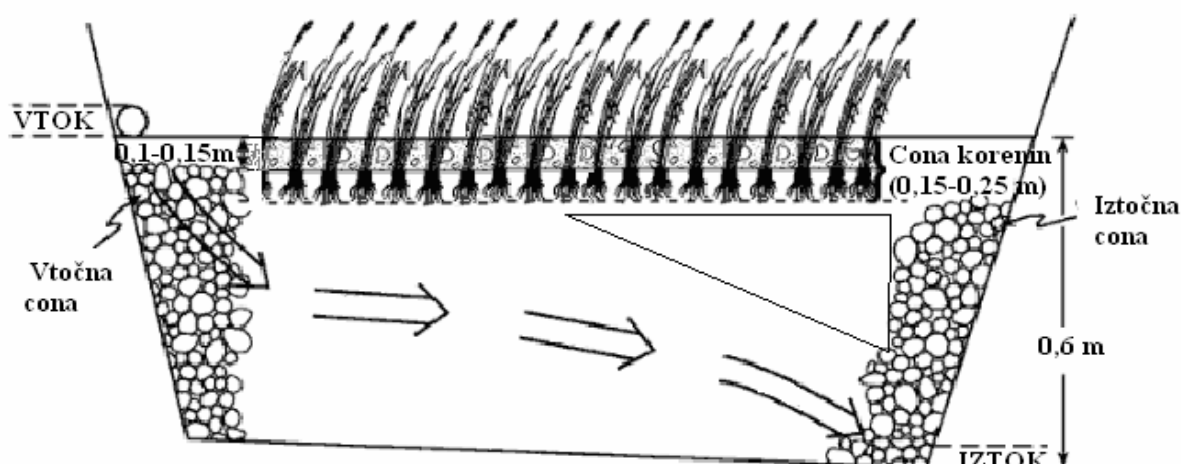
ε = poroznost substrata (%)

h = globina vode (m)

A = površina RČN (m^2)

Enačba 2 ne podaja dejanskega stanja, saj predpostavlja, da se enakomerno izmenjuje celoten volumen vode ter da se poroznost ne spreminja. Dejanski hidravlični zadrževalni čas je 40–80 % manjši od teoretičnega (Brown s sod., 2000). Vzroki so manjši dejanski porni volumen (vpliv korenin, količina biofilma in usedanje sedimentov med delce substrata) in preferenčni tok skozi sistem, vplivajo pa tudi padavine in evapotranspiracija. Najučinkovitejši način določitve dejanskega zadrževalnega časa je uporaba tracer-jev (Brown s sod., 2000).

Slika 6 kaže, da v sistemu obstajajo območja, ki niso vključena v redno izmenjavo vode, hkrati pa je v coni pod koreninskim sistemom nastane t.i. preferenčni tok (Brown s sod., 2000).



Slika 6: Prikaz preferenčnega toka skozi sistem

(vir: Brown s sod., 2000)

— območja, ki niso vključena v redni izmenjavo vode.

Zmanjšanje oz. odstranjevanje onesnaženja (tudi mikroorganizmov) kaže naslednja enačba (Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, 1993; Garcia s sod., 2003):

$$C_e/C_o = e^{(-K_T t)} \quad \dots(3)$$

C_e = koncentracija onesnaževala na iztoku (mg/L)

C_o = koncentracija onesnaževala na vtoku (mg/L)

K_T = reakcijska konstanta (1/h)

t = zadrževalni čas (h)

Z večanjem zadrževalnega časa se večja učinkovitost čiščenja odpadne vode, a kot je prikazal Garcia s sod. (2003) na primeru koliformnih bakterij, to velja le do določene mere. Začetno povečevanje zadrževalnega časa je vodilo v večjo mikrobo inaktivacijo, pri zadrževalnem času nad tri dni pa se koncentracija fekalnih bakterij na iztoku ni več zmanjševala, ampak je dosegla saturacijski nivo (slika 5). Pri načrtovanju RČN moramo zato poznati s katerimi onesnaževali imamo opravka in kako zadrževalni čas vpliva na njihovo odstranjevanje.

Kot je razvidno iz enačbe 2, na zadrževalni čas vpliva poroznost substrata – najpogosteje uporabljeni materiali so prikazani v preglednici 6.

Preglednica 6: Velikost, poroznost in hidravlična prepustnost različnih vrst materiala, ki ga uporabljamo kot substrat v RČN

(vir: Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, 1993).

Substrat	Velikost delcev (mm)	Poroznost ϵ (%)	Hidravlična prevodnost K_s (m/d)
Mivka	2	32	1000
Pesek	8	35	5000
Prod	16-32	38-40	7500-10 000
Kamenje	128	45	100 000

Priporočljivo je, da v vtočni in iztočni coni grede uporabimo bolj grob material (prod), saj s tem preprečimo mašenje in poplavljanje, ki zmanjšuje učinkovitost RČN. V osrednjem delu uporabimo finejši substrat (pesek), ki bolj vpliva na zmanjšanje onesnaženje (Brown s

sod., 2000). Raziskava (Garcia s sod., 2005) je namreč pokazala, da grede z manjšimi delci dajejo boljše rezultate v primerjavi z gredami z debelejším prodom. Finejši material nudi večjo površino za tvorbo biofilma, opazili pa so tudi, da so rastline bolje rasle v gredi z bolj drobnim materialom. Boljša rast rastlin vodi v večji privzem hranil ter večje sproščanje kisika in s tem v večjo učinkovitost čiščenja vode (Garcia s sod., 2005).

Globina je prav tako pomembna, zato je pomembno, da ta parameter upoštevamo pri načrtovanju in oblikovanju sistema. Pri globoki gredi korenine rastlin ne segajo do dna, zato se pod njimi ustvari preferenčni tok (slika 6), kar lahko vodi do nastanka mrtvih con v substratu. Da zmanjšamo učinek preferenčnega toka moramo povečati razmerje substrata s koreninami v primerjavi s substratom brez korenin, pri čemer je pomembna vrsta izbrane rastline in primerna globina substrata (Brown s sod., 2000).

Ta priporočila temeljijo na podlagi izkušenj delovanja RČN za odpadne vode, vendar si lahko z njimi pomagamo tudi pri načrtovanju čistilne naprave za pitno vodo. Zbiranje podatkov glede delovanja slednjih pa bo omogočilo njihovo optimizacijo ter boljše razumevanje njihove specifičnosti.

3 MATERIALI IN METODE

3.1 LOKACIJA

Pilotna RČN je priključena na vodovodni sistem Gerlinci (občina Cankova), ki se oskrbuje iz izvira (izvir Lapoši), ki zajema vodo iz plitvega vodonosnika. Za izbiro te lokacije smo se odločili zaradi bolj ali manj stalne prisotnosti indikatorskih mikroorganizmov v vodi.

Vodovodni sistem Gerlinci

Sistem je bil zgrajen v letih 1970/71. Sestavljata ga dva bazena: prvi, manjši pri samem zajetju, ki je velik 10 000 L, ter večji 20 000 L, glavni bazen v vasi. Iz izvira se s pitno vodo oskrbuje 22 hiš, ki porabijo med 6000 in 7000 L vode na dan. Če je čez leto dovolj padavin, poteka oskrba s pitno vodo nemoteno. Ko so okoliški kmetje še imeli veliko živine, je med sušnimi obdobji primanjkovalo vode in so jo morali dovažati s cisternami. Vendar pa zaradi opuščanja živinoreje danes redko prihaja do pomanjkanja vode. Morebitne težave z oskrbo s pitno vodo nastopijo zaradi dotrajanosti sistema.

3.2 PODATKI O RČN

Pilotna RČN je sestavljena iz treh delov:

- Manjši bazen velikosti 2,5 x 2,5 x 0,5 m.
- Večji bazen velikosti 7,5 x 2,5 x 0,5 m.
- Polirni sistem, sestavljen iz štirih ločenih prekatov, vsak velikosti 0,56 x 0,75 x 0,5 m, z odvodno cevjo speljano v jarek.

Pred prvim bazenom sta dva jaška. V prvem je nameščen sistem za dodajanje kulture, v drugem pa je merilec količine porabljene vode in ventil za uravnavanje pretoka.

Za substrat smo uporabili kremenov pesek (96–99 % SiO₂). Pesek je dvakrat pran, zaradi česar ne vsebuje organskih nečistoč in je biološko neoporečen. Uporabili smo pesek

različnih zrnatosti, ki smo jih zmešali tako, da v prvem bazenu prevladuje debelejši material, v drugem pa bolj drobnozrnat.

Velik bazen smo zasadili z navadnim trstom (*Phragmites australis*), dne 13. 11. 2005, malega pa šele 19. 05. 2006, ker smo prej morali popraviti še iztok. V prvem bazenu so se vse, razen ene rastline posušile, zato smo ga zasadili še enkrat 29. 07. 2006. Ker so rastline rasle zelo slabo, smo jih dvakrat pognojili z umetnim gnojilom NPK (3 kg), enkrat pa poškropili z insekticidom Kenyatox verde zaradi listnih uši. Po dodatku mineralnega gnojila smo pustili RČN stati 1–2 tedna brez da bi spuščali vodo skozi, da ne bi gnojilo takoj sprali.

3.3 METODE DELA

3.3.1 Zaledje

Teoretično prispevno območje, površino s katerega se voda steka v izvir in ki vpliva na kvaliteto oz. onesnaženost, smo določili s pomočjo ga. Jane Meljo z Inštituta za vode RS (Priloga A). Za območje, ki nam ga je zarisala, smo s pomočjo baze GERK določili rabo zemljišč v zaledju vira (Priloga B).

3.3.2 Določevanja zadrževalnega časa

Pred zagonom RČN smo izmerili efektivni volumen posameznega bazena, izračunali poroznost substrata ter izmerili zadrževalni čas.

Zadrževalni čas v obeh bazenih smo izmerili z merjenjem električne prevodnosti pri pretoku 10 L/min. Dodali smo 10 L 40 % raztopine kuhinjske soli in merili električno prevodnost na vsakih 5 min s konduktometrom WTW LF 340. Meritve so potekale 5. 10. 2005 v prvem bazenu in 22. 10. 2005 v drugem bazenu. V prvem bazenu smo meritev še enkrat ponovili 26. 05. 2006. Na podlagi dobljenih podatkov smo izračunali zadrževalne čase še za druge pretoke, pri katerih smo izvajali meritve.

3.3.3 Vzorčenje in mikrobiološke analize

Prvi dve vzorčenji, ki smo ju opravili 28. 9. 2005 in 18. 10. 2005, sta služili kot pokazatelj stanja vode in spoznavanju metode dela. Vzorčili smo istočasno na vtoku in iztoku iz RČN. Pri naslednjih dveh vzorčenjih (22. 11. 2005 in 23. 11. 2005) pa smo že upoštevali zadrževalni čas – vzorčili smo pri pretoku 10 L/min in 5 L/min in sicer na vtoku in iztoku iz RČN. Na podlagi teh rezultatov in ker voda ne presega mejnih vrednosti mikrobioloških parametrov cel čas poskusa, smo se odločili, da bomo kulturo dodajali v dotočno vodo.

V laboratoriju ZZV Murska Sobota so ugotovili in izolirali bakterijo *Citrobacter freundii* iz vzorca vode po standardni metodi opisani v nadaljevanju (glej Ugotavljanje *E. coli* v vzorcu pitne vode iz zajetja Gerlinci). Vzorec za izolacijo bakterije smo odvzeli 10. 04. 2006 na vtoku v RČN. Pripravljeno bakterijsko kulturo (koncentracija $1,5 \times 10^7$ bakterij/ml) smo dodajali v vodo pred dotokom v RČN.

Dodajanje kulture v RČN in vzorčenje

Kulturo *C. freundii*, ki so jo pripravili v laboratoriju ZZV Murska Sobota, smo najprej razredčili v 5 litrih pitne vode iz zajetja Gerlinci. S tako razredčeno kulturo smo kontaminirali vodo pred dotokom v RČN: razredčeno kulturo smo preko gumijaste cevi priključili na dovodno cev, po kateri teče voda na RČN. Dotok na RČN smo povsem odprli, tako da je podtlak, ki je nastal, posrkal naš vzorec. V tem času je na RČN steklo približno 100 L vode. Ko je v RČN steklo nekaj več kot polovica razredčene kulture, smo na vtoku v RČN vzeli vzorec, ki je služil kot vhodni vzorec. Ko je stekel ves vzorec v RČN, pa smo s pomočjo ventila nastavili želeni pretok. Po preteku določenega časa smo vzorčili na iztoku iz bazena 1 ter na iztoku iz RČN (iztok iz bazena 2).

Vzeli smo 0,3 L vzorca v sterilne plastične posode za vzorčenje pitne vode. Vzorec smo odpeljali na analizo v laboratorij ZZV Murska Sobota, kjer so opravili analize. Od odvzeta do oddaje vzorca ni poteklo več kot 6 ur, vzorec pa je bil ves čas shranjen v hladilni torbi (kot določa standard). Dneve vzorčenja smo določali sproti, največji vpliv pa je imelo vreme. Odločili smo se, da bomo vzorčili v dnevih, ko ne bo deževalo, saj bi padavine

vplivale na pretok. Na ta način smo *C. freundii* vzorčili trikrat pri pretokih 2 L/min (20. 04. 2006), 10 L/min (09. 05. 2006) in 5 L/min (10. 05. 2006).

Kvantitativno in kvalitativno potrditev *C. freundii* v vzorcu vode so opravili v laboratoriju ZZV Murska Sobota po standardni metodi, opisani v nadaljevanju (glej Kvantitativna in kvalitativna potrditev *E. coli* v vzorcu vode iz RČN).

Bakterija *C. freundii* se je izkazala za neprimerno, zato smo se odločili, da jo zamenjamo z *E. coli*. Glavni problem je izviral iz metode za določanje in potrditve *C. freundii* v odvzetem vzorcu: druge koliformne bakterije namreč lahko motijo postopek, poleg tega pa ni nujno, da *C. freundii* fermentira laktozo, zaradi česar njihove kolonije niso razločno drugačne od drugih laktoza negativnih bakterij. Zaradi teh razlogov je lahko prišlo do napak pri kvalitativnih in kvantitativnih določitvah *C. freundii* in do napak pri rezultatih.

Ugotavljanje prisotnosti *E. coli* v vzorcu pitne vode iz zajetja Gerlinci

V laboratoriju ZZV Murska Sobota so ugotovili in izolirali bakterijo *E. coli* iz vzorca pitne vode iz vodnega zajetja Gerlinci – vzorec je bil odvzet 09. 05. 2006. Za ugotavljanje *E. coli* v vzorcu vode so uporabili standardno metodo, ki jo prepisuje Pravilnik o pitni vodi (2004): SIST EN ISO 9308-1:2001 Kakovost vode – Ugotavljanje prisotnosti in števila *Escherichia coli* in koliformnih bakterij – 1.del: Metoda membranske filtracije (ISO 9308-1:200).

Na osnovi potrditvenih testov so bakterijsko kulturo *E. coli* shranili na stalnem gojišču. Omenjena kultura je služila za pripravo inokuluma dogovorjene koncentracije, ki smo ga dodajali v vodo pred dotokom v čistilno napravo. V laboratoriju ZZV Murska Sobota so pripravili 2 ml kulture *E. coli* s koncentracijo $1,5 \times 10^7$ bakterij/ml. Omenjeno koncentracijo bakterij v 1 ml so potrdili s postopkom titracije.

Kulturo *E. coli* smo razredčili, dodali v RČN ter vzorčili na enak način kot *C. freundii* (opis glej pri Dodajanje kulture v RČN in vzorčenje).

Kvantitativna in kvalitativna potrditev *E. coli* v vzorcu vode iz RČN

Kvantitativno in kvalitativno potrditev *E. coli* v vzorcu vode so v laboratoriju ZZV Murska Sobota opravili po predpisani standardni metodi ISO 16649-1:2001/E Microbiology of food and animal feedings stufts – Horizontal method for the enumeration of β -glucuronidase-positive *Escherichia coli* – Part 1: Colony-count technique at 44°C using membranes and 5-bromo-4-chloro-3-indolyl β -D-glucuronide.

100 ml neredčenega vzorca in njegove decimalne razredčine 10^{-1} in 10^{-2} so prefiltrirali skozi filtre s porami $\varnothing$ 0,45 μm . Filtre so položili na selektivni medij: Tryptone-bile-glucuronic medium (TBX) in jih inkubirali 18–24 ur pri temperaturi 44°C. Po preteku inkubacije so na podlagi značilnih modrih kolonij določili število *E. coli* v 100 ml vzorca.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 ZALEDJE

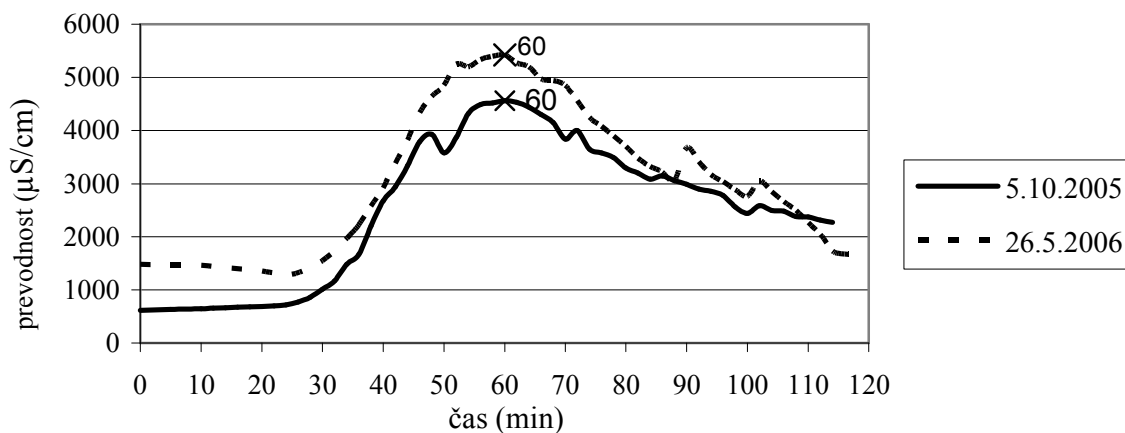
Prispevno območje je veliko 103817 m² (Priloga A). Prispevno območje vodnega vira je geografsko območje oz. površina, s katerega voda doteka v izbrani vir. Raba prostora in dejavnosti na tem območju vplivajo na kvaliteto oz. onesnaženost vode na izviru.

Izvir pitne vode se nahaja v dolini, obdan z gozdom. Višje na pobočju so kmetijske obdelovalne površine ter stanovanjska in gospodarska poslopja. Gozd predstavlja slabo petino območja (19,4 %), ostalo so njive (22,6 % površine), ekstenzivni travniki (20,1 %) ter trajni travniki in pašniki (19 %). Pozidana površina, kamor spadajo hiše, gospodarska poslopja, ceste ipd., predstavljajo 16,2 % celotne površine. Manj kot 1 % predstavlja vinograd in manj kot 2 % območje, zaraslo z grmičevjem.

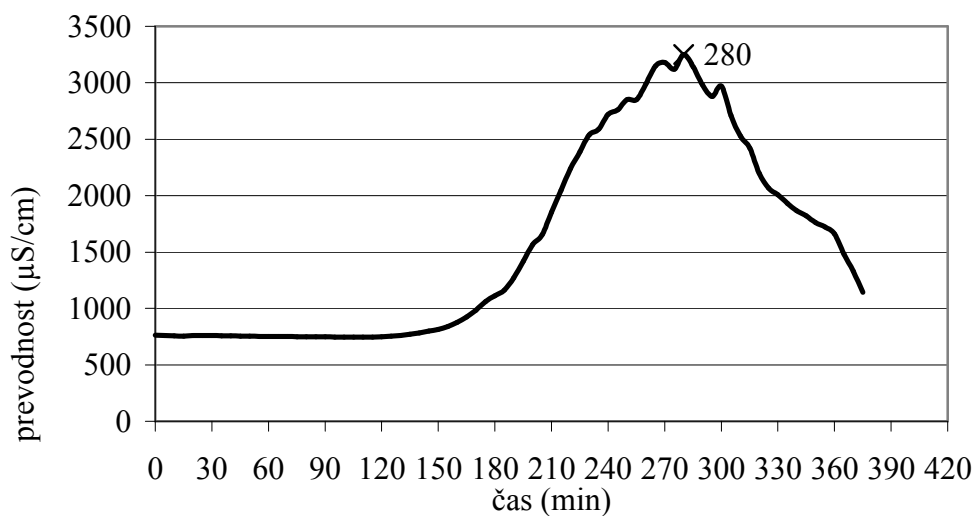
4.2 ZADRŽEVALNI ČAS

Efektivni volumen prvega bazena je 0,556 m³, poroznost 22,8 %, volumen vode v drugem bazenu pa je 2,203 m³, poroznost 30,1 %.

Za zadrževalni čas smo upoštevali čas, pri katerem smo izmerili najvišjo prevodnost. Zadrževalni čas pri pretoku 10L/min je v prvem bazenu 60 min, v drugem pa 280 min, skupni zadrževalni čas v RČN je 340 min (slika 7 in 8).



Slika 7: Merjenje zadrževalnega časa v prvem bazenu pri pretoku 10L/min.



Slika 8: Merjenje zadrževalnega časa v drugem bazenu (22.10.2006) pri pretoku 10L/min.

Iz vrednosti, ki smo jih izmerili pri pretoku 10 L/min, smo izračunali še zadrževalne čase pri ostalih pretokih (preglednica 7). Maksimalen pretok skozi RČN, ki smo ga lahko dosegli, je znašal 18,8 L/min.

Preglednica 7: Zadrževalni časi v RČN glede na pretoke, pri katerih smo opravljali meritve.

Pretok skozi RČN	Zadrževalni čas v prvem bazenu	Zadrževalni čas v drugem bazenu	skupaj
1 L/min	600 min	2800 min	3400 min
2 L/min	300 min	1400 min	1700 min
5 L/min	120 min	560 min	680 min
10 L/min	60 min	280 min	340 min
18,8 L/min	32 min	149 min	181 min

Zadrževalne čase, navedene v preglednici 7, smo uporabljali pri naših meritvah. Sklepali smo, da pretok, ko ga enkrat nastavimo, ostane konstanten, a se je kasneje izkazalo, da tekom dneva lahko prihaja do manjših nihanj. Različna poraba vode v gospodinjstvih, ki so priključena na isto vejo vodovodnega sistema kot RČN, povzroča manjša nihanja pretoka tekom dneva. Ta nihanja smo opazili le pri najnižjem pretoku (1L/min), zato sklepamo, da niso vplivala na naše meritve.

Zaradi relativno redke zasaditve in slabe rasti rastlin predvidevamo, da rastline niso bistveno vplivale na pretok in s tem na zadrževalne čase. Zaradi visokih pretokov in kratkih zadrževalnih časov ter ker je gladina vode 10 cm pod površino substrata, je izguba vode zaradi evapotranspiracije minimalna. Na velikost evapotranspiracije poleg vremena vpliva predvsem vrsta in gostota rastlin. Močvirne rastline tvorijo zelo goste sestoje in imajo visoko transpiracijo, ki lahko znaša do 7,5 L/m²/dan (Žvokelj, 2003).

4.3 MIKROBIOLOŠKE ANALIZE

Preglednica 8: Rezultati mikrobioloških analiz.

Pretok [L/min]	Datum	DOTOK [bakterij/ 100 ml]	IZTOK 1 [bakterij/ 100 ml]	IZTOK 2 [bakterij/ 100 ml]	čiščenje v 1. bazenu [%]	čiščenje v 2. bazenu ³ [%]	čiščenje skupaj ⁴ [%]	
18,8	11.7.2006	17000	1600	13	90,59	99,19	99,92	<i>E. coli</i>
18,8	23.8.2006	35000	2300	39	93,43	98,3	99,89	<i>E. coli</i>
10	10.4.2006	/	290	10	-	96,55	-	<i>C.freundii</i>
10	9.5.2006	0	290	9	-	96,90	-	<i>C.freundii</i>
10	10.7.2006	3000 ⁵	300	0	90,00	100,00	100,00	<i>E. coli</i>
10	24.8.2006	53000	1600	13	96,98	99,16	99,98	<i>E. coli</i>
10	4.9.2006	55000	2700	29	95,09	98,93	99,95	<i>E. coli</i>
5	11.4.2006	/	60	10	-	83,33	-	<i>C.freundii</i>
5	10.5.2006	<10	120	13	-	89,17	-	<i>C.freundii</i>
5	7.- 8.6.2006	51000	1500	2	97,06	99,87	100,00	<i>E. coli</i>
2	20.4.2006	30	8	220	73,33	-	-	<i>C.freundii</i>
2	8.- 9.6.2006	41400	470	0	98,86	100,00	100,00	<i>E. coli</i>
1	19.- 21.6.2006	34000	160	0	99,53	100,00	100,00	<i>E. coli</i>

V začetku (10.4.2006 in 11.4.2006) smo 2 ml kulture *C. freundii* s koncentracijo $1,5 \times 10^7$ bakterij/ml dodali z injekcijo v vodo pred dotokom v RČN. Ta metoda se je hitro pokazala za neprimerno, saj bi lahko z vzorčenjem na dotoku zajeli vso kulturo, ker je bil kontaminiran val tako ozek, ali pa bi val popolnoma zgrešili. Zaradi tega vzorčenje na dotoku ni bilo smiselno. Obstaja tudi možnost, da zaradi izredno ozkega vala kontaminirane vode nismo ujeli pravega časa za odvzem vzorca na iztoku iz prvega in drugega bazena. Zaradi teh razlogov smo se odločili, da spremenimo način dodajanja kulture: bakterijsko kulturo smo pred dodajanjem razredčili v večji količini vode (5 L) in jo

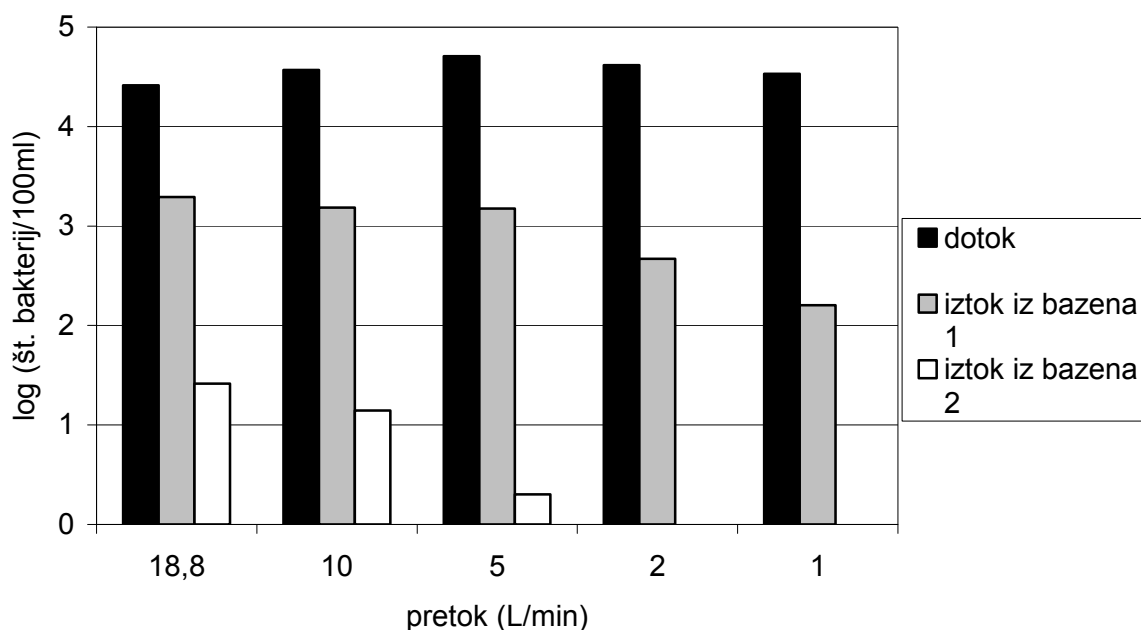
³ Glede na 1. bazen.

⁴ Glede na dotok v RČN.

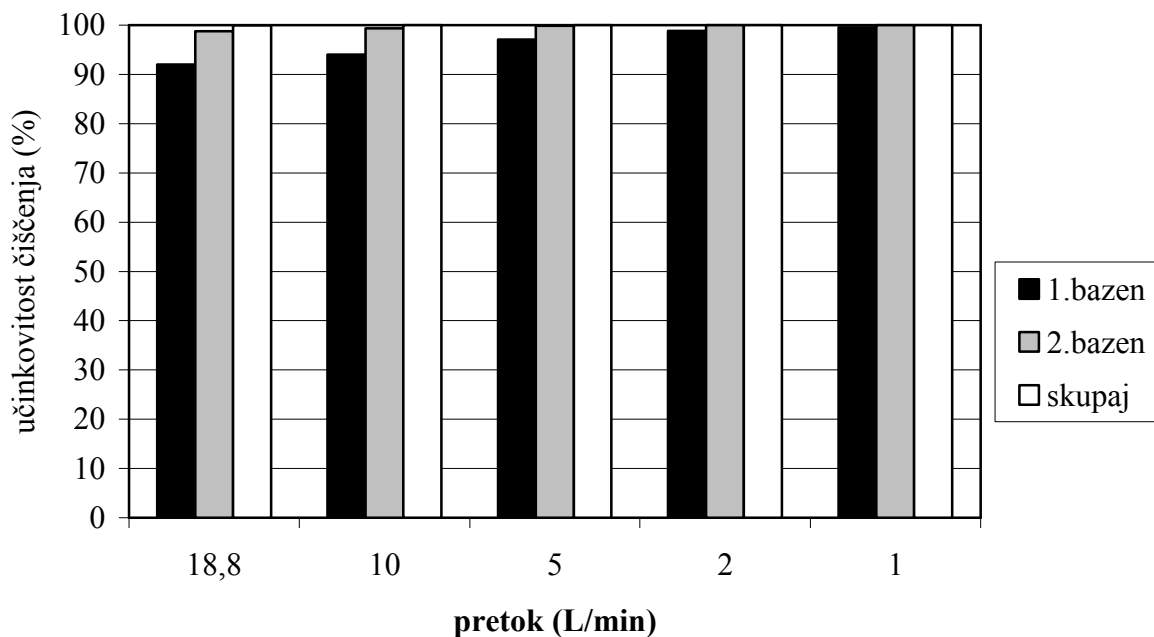
⁵ V tem primeru je bila koncentracija kulture, ki smo jo dodali $1,5 \times 10^6$ bakterij/ml, zaradi napake ZZV Murska Sobota pri redčenju.

dodajali pred dotokom v RČN. Na ta način smo dosegli, da je kontaminirana voda dlje časa tekla v RČN. Tako se je kultura enakomerno porazdelila vzdolž širine grede in podaljšali smo val kontaminirane vode, zaradi česar se je zmanjšala verjetnost, da bi pri vzorčenju zgrešili vrh vala. S takim načinom dela pa smo tudi brez težav odvzeli vzorec vode na dotoku. Na ta način smo *C. freundii* vzorčili trikrat (20.4.2006, 9.5.2006 in 10.5.2006).

Rezultati, ki smo jih dobili, niso bili v skladu s pričakovanji. Koncentracije na iztoku iz bazena 1 in/ali bazena 2 so bile višje od koncentracij na dotoku. Vzrok najverjetneje izvira iz metode za določanje: druge koliformne bakterije namreč lahko motijo postopek, poleg tega pa ni nujno, da *C. freundii* fermentira laktozo, zaradi česar njihove kolonije niso razločno drugačne od drugih laktoza negativnih bakterij. Zaradi teh razlogov je lahko prišlo do napak pri kvalitativnih in kvantitativnih določitvah *C. freundii*. Na podlagi teh informacij smo se odločili, da *C. freundii* zamenjamo z *E. coli*. Kulturo *E. coli* smo dodajali na popolnoma enak način kot prej *C. freundii* in dobili smo uporabne podatke.



Slika 9: Koncentracija *E. coli* na dotoku v RČN in izoku iz bazena 1 in 2 pri različnih pretokih.



Slika 10: Učinkovitost RČN pri odstranjevanju bakterij *E. coli* iz vode pri različnih pretokih.

Koncentracija *E. coli* se je zmanjšala za več 90 % že v prvem bazenu pri vseh pretokih, skozi celotno RČN pa za več kot 99 % (preglednica 8, slika 10). Dotočna koncentracija bakterij je bila dokaj visoka ($3,4-5,5 \times 10^4$ bakterij/100ml), a se je že v prvem bazenu zmanjšala za okoli 10-krat (pri pretokih 18,8, 10 in 5 L/min) oz. 100-krat (pri pretokih 2 in 1 L/min), na iztoku iz bazena 2 pa je bila nižja za faktor 10^4 glede na dotok (preglednica 8, slika 9).

Večina bakterij se je odstranila v prvi gredi, kar se sklada s podatki iz literature. Decamp in Warren (2000) sta namreč ugotovila, da koncentracija *E. coli* v RČN eksponentno pada vzdolž dolžine grede in da največje zmanjšanje koncentracije poteče v prvi tretjini grede. Tudi Garcia s sod. (2003) je poročal, da je bilo najhitrejše znižanje koncentracije fekalnih bakterij v prvi polovici grede in to ne glede na izbrani substrat. V našem primeru prva greda sicer predstavlja manj kot tretjino celotnega sistema, a je vseeno očitno, da se večina bakterij odstrani v tem, začetnem delu čistilnega sistema.

Najvišji pretok, ki ga dopušča dani vodovodni sistem je 18,8 L/min in pri tem pretoku je bila učinkovitost RČN pri odstranjevanju *E. coli* še vedno visoka. Zaradi tega nismo dosegli zadanega cilja z regulacijo pretoka določiti zadrževalni čas, pri katerem bi se odstranilo največje možno število bakterij, hkrati pa bi še bila zagotovljena zadostna oskrba s pitno vodo. Glavni namen namreč ni, da bi se v obeh gredah odstranili vsi patogeni in indikatorski mikroorganizmi, ampak da najdemo ravnovesje med potrebo po zadostni oskrbi s pitno vodo in sprejemljivo stopnjo zmanjšanja števila mikroorganizmov v vodi. Tako bomo z RČN odstranili večino patogenih in indikatorskih mikroorganizmov, preostale pa bodo odstranili dodani substrati (npr. šota) v polirnih prekatih. Kako se obnesejo določeni substrati in kombinacija substratov bo predmet nadaljnjih raziskav. Ker obstaja možnost, da kljub temu posamezni patogeni mikroorganizmi preidejo skozi celoten sistem, je na koncu smiselna uporaba dezinfekcijskega sredstva, npr vgradnja UV luči ali dodajanja majhnih količin klora za doseg rezidualnega učinka.

Mehanizmi, ki vplivajo na zmanjševanje števila patogenih mikroorganizmov v RČN, so filtracija, sedimentacija, adsorpcija, oksidacija, predacija, kompeticija, izpostavljenost toksinom ter antimikrobnim substancam (Stottmeister s sod., 2003; Decamp in Warren 1998; Vacca s sod., 2005). Težko je reči, kateri mehanizmi so v našem primeru najbolj vplivali na odstranitev bakterij iz vode. Verjetno so prevladali fizikalni procesi (filtracija, sedimentacija v prostorčke med delci, adsorpcija) in pa predacija. Decamp in Warren (2000) ugotavljata, da pristnost rastlin poveča učinkovitost odstranjevanja *E. coli* iz vode. Vzrok naj bi bil izločanje antimikrobnih snovi iz korenin ter razvoj mikrobnih združb v rizosferi, ki lahko vplivajo na odstranjevanje *E. coli*. Vendar pa v našem primeru lahko predpostavljamo, da je vpliv rastlin zaradi nerazvitosti zelo majhen. Sklepamo lahko tudi, da pogoji v RČN onemogočajo dolgo preživetje bakterijam. Organske snovi in anaerobne razmere lahko podaljšujejo preživetje koliformnih bakterij v substratu (Decamp in Warren, 2000; Eržen, 1998; WHO, 2004). A v RČN za kondicioniranje pitne vode primanjkuje organskih snovi in sistem je bolj aeroben. Potrebne so še nadaljnje raziskave, ki bi pokazale, kaj se dogaja s patogenimi bakterijami v RČN, kakšna je njihova sposobnost transporta skozi substrat in stopnja preživetja v substratu. Postavlja se namreč vprašanje ali ob stalnem toku pride do spiranja bakterij iz RČN in v kolikšni meri.

Vzorčenja so bila raztresena tekom celega leta. Vzroki so naslednji: za vzorčenje smo izbirali dneve brez padavin, da le-te ne bi vplivale na spreminjanje pretokov, po dognojevanju najmanj dva tedna nismo spuščali vode, da se gnojilo ne bi takoj spralo, za namen dodajanja kulture smo morali RČN nadgraditi in bili smo vezani na delovni čas laboratorija ZZV Murska Sobota, kjer so nam pripravljali kulturo in opravljali analizo vzorcev. Tak časovni razpored je vplival tudi na to, da med posameznimi vzorčenji RČN ni delovala in je voda v njej stala. Kako in ali je to vplivalo na naše rezultate ne moremo zagotovo reči, saj nimamo podatkov kaj se je v tem času dogajalo z *E. coli* v RČN. Sklepamo lahko, da se verjetno niso razmnoževali, saj za to potrebujejo organske snovi (Eržen, 1998; WHO, 2004), ki pa jih v pitni vodi ni. To težavo bi lahko odpravili s stalnim in enakomernim dodajanjem kulture v dotočno vodo, za kar bi dosegli z uporabo injektorja. Na ta način bi bila voda stalno enakomerno onesnažena, kar bi močno podaljšalo kontaminirani val vode, zaradi česar bi bili manj vezani na točne čase vzorčenja. Stalen tok vode skozi RČN pa bi tudi bolj ponazarjal razmere, ko bo naprava dejansko vključena v pripravo pitne vode.

Kot največja težava se je na RČN Gerlinci pokazala slaba rast rastlin, kar je posledica pomanjkanja hranil v vodi. Dodajanje dušikovih in fosforjevih gnojil bi vplivalo na vrednosti teh parametrov v pitni vodi, zato njihovo dodajanje ni mogoče, ampak je potrebno poiskati druge rešitve. Problemi pa se lahko pojavijo tudi zaradi neomejenega dostopa do RČN. RČN namreč ni ograjena, zato imajo do nje prost dostop živali (mačke, ptice idr.), ki lahko z iztrebki (dodatno) kontaminirajo vodo ter tako vplivajo na rezultate meritev in kvaliteto iztočne vode. Thurston s sod. (2001) poroča, da so pri RČN, kamor so dovajali disinficirano pitno vodo, v efluentu dobili od $1 - 7,5 \times 10^3$ skupnih koliformnih bakterij/100 ml in $0 - 2,8 \times 10^3$ fekalnih koliformnih bakterij/100 ml. Niso pa našli praživali ali njihovih razvojnih stadijev. Raziskava je pokazala, da je RČN lahko tudi vir vnosa patogenih mikroorganizmov v vodo, zato je potrebno omejiti prost dostop živalim do nje. Odprtost omogoča tudi potencialni vnos težkih kovin s cest ter gnojila in pesticidov s kmetij in kmetijskih površin preko zraka.

5 SKLEPI

- Objavljenih člankov na temo uporabe RČN za kondicioniranje mikrobiološko onesnažene pitne vode nismo našli. Večina literature zajema čiščenje odpadne vode s pomočjo RČN. Osredotočajo se na odstranjevanja organskih snovi, nitratov in fosfatov, pesticidov in težkih kovin pa tudi patogenih organizmov. Mehanizmi odstranjevanja mikroorganizmov se intenzivno preučujejo šele zadnjih nekaj let. Na podlagi rezultatov dobljenih pri čiščenju odpadne vode, lahko določimo smernice za oblikovanje in vzdrževanje RČN, ki bi dosegale visoko učinkovitost pri kondicioniranju mikrobiološko onesnažene pitne vode. Z ustrezno izbiro substratov in rastlin, predvsem pa z ustreznimi metodami končne dezinfekcije, bi pripomogli k uspešni odstranitvi mikroorganizmov iz pitne vode brez velikih stroškov in brez tveganja nastanka zdravju škodljivih stranskih produktov, ki pogosto nastanejo pri konvencionalnih dezinfekcijskih postopkih.
- Pri odstranjevanju mikroorganizmov sodelujejo različni procesi: sedimentacija, filtracija, adsorpcija, agregacija, predacija protozojev in nematod, delovanje litičnih bakterij in virusov, naravno odmiranje, zadrževanje v biofilmih, kompeticija za nutrienste, oksidacija ter izpostavljenost biocidom in drugim toksinom, ki jih izločajo rastline in drugi mikroorganizmi.
- Učinkovitost delovanja pilotne RČN Gerlinci pri odstranjevanju *E. coli* je pri vseh preizkušanih pretokih nad 99 %, kar se tudi sklada s podatki iz literature za odpadno vodo. Koncentracije so se znižale od 10^5 bakterij/100 ml v dotočni vodi na 0-39 bakterij/100 ml na iztoku iz RČN. Ker je najvišji možni pretok, ki ga dopušča vodovodni sistem, 18,8 L/min, nismo dosegli zadanega cilja določiti pretok, ki zagotavlja učinkovito oskrbo s pitno vodo, hkrati pa odstrani največjo možno število mikroorganizmov. Mikroorganizme, ki preidejo skozi celotno RČN bodo odstranili dodatni substrati v polirnih gredah.

- Zbrani podatki nakazujejo veliko uporabnost RČN za kondicioniranje mikrobiološko onesnaženega vodnega vira. Za popolnoma reprezentativne podatke o učinkovitosti sistema pa bo potreben še večletni kontinuirani monitoring. Za RČN namreč velja, da polno učinkovitost dosežejo po nekaj letih delovanja, kar je povezano s polnim razvojem uporabljenih rastlin.
- Glavni problem take RČN je slaba rast rastlin zaradi pomanjkanja hranil v vodi. To težavo je težje odpraviti, saj dodajanje dušikovih in fosforjevih gnojil lahko vodi v povečanje teh snovi v pitni vodi. Zaradi redke in slabe rasti rastline verjetno niso vplivale na naše rezultate. Pomanjkljivost RČN Gerlinci se lahko izkaže tudi njena odprtost in dostopnost. Zaradi odprtosti imajo do nje dostop živali, ki lahko z iztrebki dodatno kontaminirajo vodo, možen pa je tudi vnos težkih kovin s cest in pesticidov ter nitratov s kmetijskih površin preko zraka.

6 POVZETEK

Pitna voda je voda, ki ustreza mikrobiološkim, fizikalnim in kemijskim predpisom, ki jih predpisuje Pravilnik o pitni vodi (2004) in se uporablja za gospodinjske namene ter za proizvodnjo in promet živil. Poreklo vode, ki se uporablja z pitno vodo ni bistveno, vendar ima pri izbiri vodnega vira prednost voda, ki ne potrebuje priprave oz. je priprava minimalna. Surova voda, ki ustreza zakonskim predpisom o kvaliteti, ne potrebuje dodatnega čiščenja, ampak se tako vodo le dezinficira. Če kvaliteta vode ni v predpisanih mejah, jo moramo pred distribucijo v vodovodni sistem dodatno obdelati. Na razpolago imamo širok spekter metod, procesov in tehnoloških rešitev, ki jih lahko kombiniramo in prilagodimo onesnaženosti vode, vendar pa so take rešitve drage, tehnološko zahtevne in zahtevajo strokovno usposobljen kader in zato niso dosegljive na malih oskrbovalnih območjih. Veliko število malih oskrbovalnih območij, ki oskrbujejo s pitno vodo manj kot 1000 prebivalcev, je značilno za Slovenijo in prav ti so najbolj onesnaženi, zlasti preseženi so mikrobiološki parametri. Kot alternativa konvencionalnim načinom čiščenja pitne vode se na teh območjih kaže potencialna možnost uporabe RČN za kondicioniranje pitne vode.

Uporaba RČN za kondicioniranje pitne vode, še posebej pa mikrobiološko onesnažene pitne vode, je v Sloveniji in drugod po svetu novost, zato je podatkov in objavljenih člankov malo. RČN se sicer že dolgo uspešno uporabljajo za čiščenje odpadnih voda, kjer dosegajo zelo dobre rezultate, zato je možna njihova aplikacija za kondicioniranje pitne vode. Vendar pa so potrebne še nadaljnje raziskave, ki bodo potrdile njihovo uspešnost in pojasnile mehanizme, ki so vključeni v odstranjevanje posameznih vrst onesnaževal, kar bo vodilo v boljšo prilagoditev in optimizacijo RČN ter s tem v večjo učinkovitost.

RČN kažejo dobre rezultate pri odstranjevanju patogenih in indikatorskih mikroorganizmov iz odpadnih voda, iz česar sklepamo, da podobne rezultate lahko pričakujemo tudi pri kondicioniranju pitne vode. Na odstranitev oz. zmanjšanje koncentracije mikroorganizmov vplivajo izbira substrata, rastline, tip RČN glede

pretakanja vode, hidrološke značilnosti sistema, pogoji delovanja itd. Mehanizmi, ki sodelujejo pri odstranjevanju mikroorganizmov, pa so sedimentacija, filtracija, adsorpcija, agregacija, predacija protozojev in nematod, delovanje litičnih bakterij in virusov, naravno odmiranje, zadrževanje v biofilmih, kompeticija za nutrienste, oksidacija ter izpostavljenost biocidom in drugim toksinom, ki jih izločajo rastline in drugi mikroorganizmi. Prevladujoči mehanizmi naj bi bili predacija, adsorpcija in tvorba biofilma ter filtracija in sedimentacija (Gersberg s sod., 1987; Yee s sod., 2000; Wand s sod., 2007; Dacemp in Warren, 1998). To velja za odpadno vodo, za pitno vodo teh raziskav še ni.

Pilotna RČN Gerlinci je priključena na vodovodni sistem Gerlinci. Vodni vir (izvir Lapoši) zajema vodo iz plitvega vodonosnika in oskrbuje s pitno vodo 22 hiš. Kmetijska dejavnost v zaledju vira je glavni vzrok prisotnosti indikatorskih mikroorganizmov v vodi.

Vzorčenje je potekalo med septembrom 2005 in septembrom 2006. Ker v dotočni vodi niso dovolj oz. konstantno dovolj presežene mejne vrednosti mikrobioloških parametrov, ampak so ta nihanja vezana na kmetijsko dejavnost in padavine, smo kulturo v vodo na dotoku v RČN dodajali. V začetku so dodajali bakterijo *Citrobacter freundii*, ki pa se je izkazala za neprimerno, predvsem zaradi nezanesljivosti metode za njeno določitev in potrditev v vzorcu. Zato smo jo zamenjali z *E. coli* in dosegli 99 % učinkovitost pri odstranitvi iz vode pri vseh preizkušenih pretokih. Najvišji možni pretok je bil 18,8 L/min, zato nismo dosegli namena določiti optimalni zadrževalni čas, ki bi omogočal ekonomsko še sprejemljivo stopnjo zmanjšanja števila mikroorganizmov v vodi.

Kateri mehanizmi so sodelovali pri odstranjevanju bakterij iz vode, ne moremo reči, sklepamo pa lahko, da je bil vpliv rastlin minimalen. Zaradi pomanjkanja hranilnih snovi so rastline (navadni trst) slabo rasle, v prvem bazenu so se nam po prvi zasaditvi celo popolnoma posušile. Prav tako je bilo premalo vzorčenj in prekratko obdobje vzorčenja, da bi lahko dobili popolnoma reprezentativne podatke o učinkovitosti sistema, zlasti zaradi tega, ker RČN dosežejo optimalno rezultate po nekaj letih delovanja in ker se kvaliteta vode na izviru spreminja od dejavnosti na prispevnem območju ter od količine, intenzitete ter trajanja padavin.

Izkušnje z odpadno vodo in ti začetni podatki iz RČN Gerlinci nakazujejo možnost uspešne, predvsem pa upravičene in cenovno ugodne uporabe RČN za odstranjevanje patogenih mikroorganizmov iz pitne vode. Na ta način bi predvsem na malih oskrbovalnih območjih prebivalci dobili dostop do čiste in zdravstveno neoporečne pitne vode.

7 VIRI

- Adriano D.C., Wenzel W.W., Vangronsveld J., Bolan N.S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122, 2–4: 121–142
- Brenčič M. Ranljivost in ogroženost podzemnih virov pitne vode – odprta vprašanja in problemi. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije, Inštitut za sanitarno inženirstvo.
http://www.zzv-ce.si/raziskave_clanki/raziskujemo_clanki/podzemna_voda.php (april 2006)
- Brenčič M., Drobne F., Kranjc S. 1998. Podzemne vode v Sloveniji. V: Kakovost pitne vode in varstvo vodnih virov (zbornik predavanj), Otočec, 26. in 27. marca 1998. Komac M. (ur.). Ljubljana, ZTI – Zavod za tehnično izobraževanje: Zbornica sanitarnih tehnikov in inženirjev Slovenije: 7–12
- Brnot M. 2000. Odvisnost kakovosti podtalnice od njene dinamične izdatnosti in globine. *Geografski vestnik*, 72, 2: 23–31
- Brown D.S., Kreissl J.F., Gearheart R.A., Kruzic A.P., Boyle W.C., Otis R.J. 2000. Constructed wetlands, treatment of municipal wastewater. Cincinnati, National Risk Management Research Laboratory: Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency: 165 str.
- Bulc T. 1998. Uspešnost čiščenja izcednih voda z različnimi tipi rastlinskih čistilnih naprav. Doktorska dizertacija. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- Burton G.A., Gunnison D., Lanzal G.R. 1987. Survival of pathogenic bacteria in various freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 4: 633–638
- Černe B. 2005. Kondicioniranje pitne vode s pomočjo Rastlinske čistilne naprave. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- Decamp O., Warren A. 1998. Bacterivory in ciliates isolates from constructed wetlands (reed beds) used for wastewater treatment. *Water Research*, 32, 7: 1989–1996
- Decamp O., Warren A. 2000. Investigation of *Escherichia coli* removal in various designs of subsurface flow wetlands used for wastewater treatment. *Ecological engineering*, 14: 293–299

- Decamp O., Warren A. 2001. Abundance, biomass and viability of bacteria in wastewater: impact of treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, 35, 14: 3496–3501
- Drev D. 1998. Filtracija pitne vode. V: *Kakovost pitne vode in varstvo vodnih virov* (zbornik predavanj), Otočec, 26. in 27. marca 1998. Komac M. (ur.). Ljubljana, ZTI – Zavod za tehnično izobraževanje: Zbornica sanitarnih tehnikov in inženirjev Slovenije: 57–72
- Eržen I. 1998. Vrste nevarnosti za zdravje zaradi uživanja zdravstveno oporečne pitne vode. V: *Kakovost pitne vode in varstvo vodnih virov* (zbornik predavanj), Otočec, 26. in 27. marca 1998. Komac M. (ur.). Ljubljana, ZTI – Zavod za tehnično izobraževanje: Zbornica sanitarnih tehnikov in inženirjev Slovenije: 101–109
- Eržen I., Kandorfer J., Pražnikar Š. 2001. Zagotavljanje zdravstvene ustreznosti pitne vode v Sloveniji. V: *Zdravstvena ustreznost pitne vode in varnost oskrbe* (zbornik predavanj), Otočec ob Krki, 3. 4. 2001. Ljubljana, Inštitut za sanitarno inženirstvo: 3–9
- Garcia J., Vivar J., Aromir M., Mujeriego R. 2003. Role of hydraulic retention time and granular medium in microbial removal in tertiary treatment reed beds. *Water Research*, 37: 2645–2653
- Garcia J., Aguirre P., Barragán J., Mujeriego R., Matamoros V., Bayona J.M. 2005. Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 25: 405–418
- Gersberg R.M., Lyon S.R., Brenner R., Elkins B.V. 1987. Fate of viruses in artificial wetlands. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 4: 731–736
- Gordon G., Bubnis B. 2000. Environmentally friendly methods of water disinfection: the chemistry of alternative disinfectants. *Progress in Nuclear Energy*, 37, 1–4: 37–40
- Gregorič M., Jevšnik M., Likar K. 2002. Obvladovanje tveganj v javni oskrbi s pitno vodo na osnovah sistema HACCP. V: *Varstvo in kvaliteta pitne vode* (zbornik seminarja), Terme Olimia, 18. 4. 2002. Gregorič M., Krulec A., Holobar A. (ur.). Ljubljana, Inštitut za sanitarno inženirstvo: 40–52
- Karathanasis A.D., Potter C.L., Coyne M.S. 2003. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological engineering*, 20: 157–169

- Karim M.R., Manshadi F.D., Karpiscak M.M., Gerba C.P. 2004. The persistence and removal of enteric pathogens in constructed wetlands. *Water Research*, 38: 1831–1837
- Kranjc M., Krsnik P. Zaščita pitne vode v Sloveniji. Ljubljana, Agencija RS za okolje.
http://www.arso.gov.si/podrocja/vode/porocila_in_publikacije/clanek_SAD.pdf (5. 8. 2006)
- Medic A. 1998. UV dezinfekcija vode. V: *Kakovost pitne vode in varstvo vodnih virov* (zbornik predavanj), Otočec, 26. in 27. marca 1998. Komac M. (ur.). Ljubljana, ZTI – Zavod za tehnično izobraževanje: Zbornica sanitarnih tehnikov in inženirjev Slovenije: 73–79
- Monitoring pitne vode 2005: poročilo o pitni vodi v Republiki Sloveniji. 2006. Ljubljana, Center za zdravstveno ekologijo: 71 str.
http://www.gov.si/pitna-voda/reports/Porocilo_2005.pdf (oktober, 2006)
- Nokes R.L., Gerba C.P., Karpiscak M.M. 2003. Microbial water quality improvement by small scale on-site subsurface wetland treatment. *Journal of Environmental Science and Health, part A*, 38, 9: 1849–1855
- Poročilo o stanju okolja 2002. Agencija Republike Slovenije za okolje.
http://www.arso.gov.si/porocila/Porocila_o_stanju_okolja_v_Sloveniji/ (april 2006)
- Pravilnik o pitni vodi. Ur. l. RS št. 19/2004
- Program razvoja podeželja za Republiko Slovenijo 2004–2006. Ur. l. RS št. 116/04
- Quiñónez Diaz M.J., Karpiscak M.M., Ellman E.D. Gerba C.P. 2001. Removal of pathogen and indicator microorganisms by a constructed wetland receiving untreated domestic wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, part A*, 36, 7: 1311–1320
- Radonjič N. 1994. Problemi in dileme pri dezinfekciji pitne vode. V: *Problematika kakovosti pitne in odpadne vode* (zbornik referatov), Rogaška Slatina, 27-28. 10. 1994. Petrešin E. (ur.). Ljubljana, Društvo za zaščito voda Slovenije: 135–141
- Richardson S.D., Thruston JR., Caughran T.V., Chen P.H., Collette T.W., Schenck K.M., Lykins B.W., Rav Acha JR. C., Glezer V. 2000. Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramine and chlorine. *Water, Soil and Air Pollution*, 123: 95–102
- Roš M., Simonič M., Šoštar Turk S. 2005. Priprava in čiščenje vod. Maribor, Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilstvo: 169 str.

- Rupel, T. 2002. Nadzor nad boleznimi, ki se prenašajo z vodo. V: Varstvo in kvaliteta pitne vode (zbornik seminarja), Terme Olimia, 18. 4. 2002. Gregorič M., Krulec A., Holobar A. (ur.). Ljubljana, inštitut za sanitarni inženirstvo: 21–26
- Shutes R.B.E. 2001. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environmet international*, 26: 441–447
- Stottmeister U., Wießner A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O., Müller R.A., Moormann H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology advances* 22: 93–117
- Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment. 1993. United States Environmental Protection Agency, Office Of Water.
www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/sub.pdf (oktober 2006)
- Tanner C.C., Clayton J.S., Upsdell M.P. 1995. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands – I. removal of oxygen demand, suspended solids and faecal coliforms. *Water Research*, 29: 17–26
- Tanner C.C. 1996. Plants for constructed wetland treatment systems – A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 7: 59–83
- Thurston J.A., Gerba C.P., Foster K.E., Karpiscak M.M. 2001. Fate of indicator microorganisms, *Giardia* and *Cryptosporidium* in subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, 35, 6: 1547–1551
- Vacca G., Wand H., Nikolausz M., Kusch P., Kästner M. 2005. Effect of plants and filter materials on bacterial removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water Research*, 39: 1361–1373.
- Verhoeven J.T.A., Meuleman A.F.M. 1999. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological engineering*, 12: 5–12
- Vymazal J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25: 478–490
- Yee N., Fein B.J., Daughney C.J. 2000. Experimental study of the pH, ionic strength, and reversibility behavior of bacteria-mineral adsorption. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 4: 609–617
- Wand H., Vacca G., Kusch P., Krüger M., Kästner M. 2007. Removal of bacteria by filtration in planted and non-planted sand columns. *Water Research*, 41, 1: 159–167

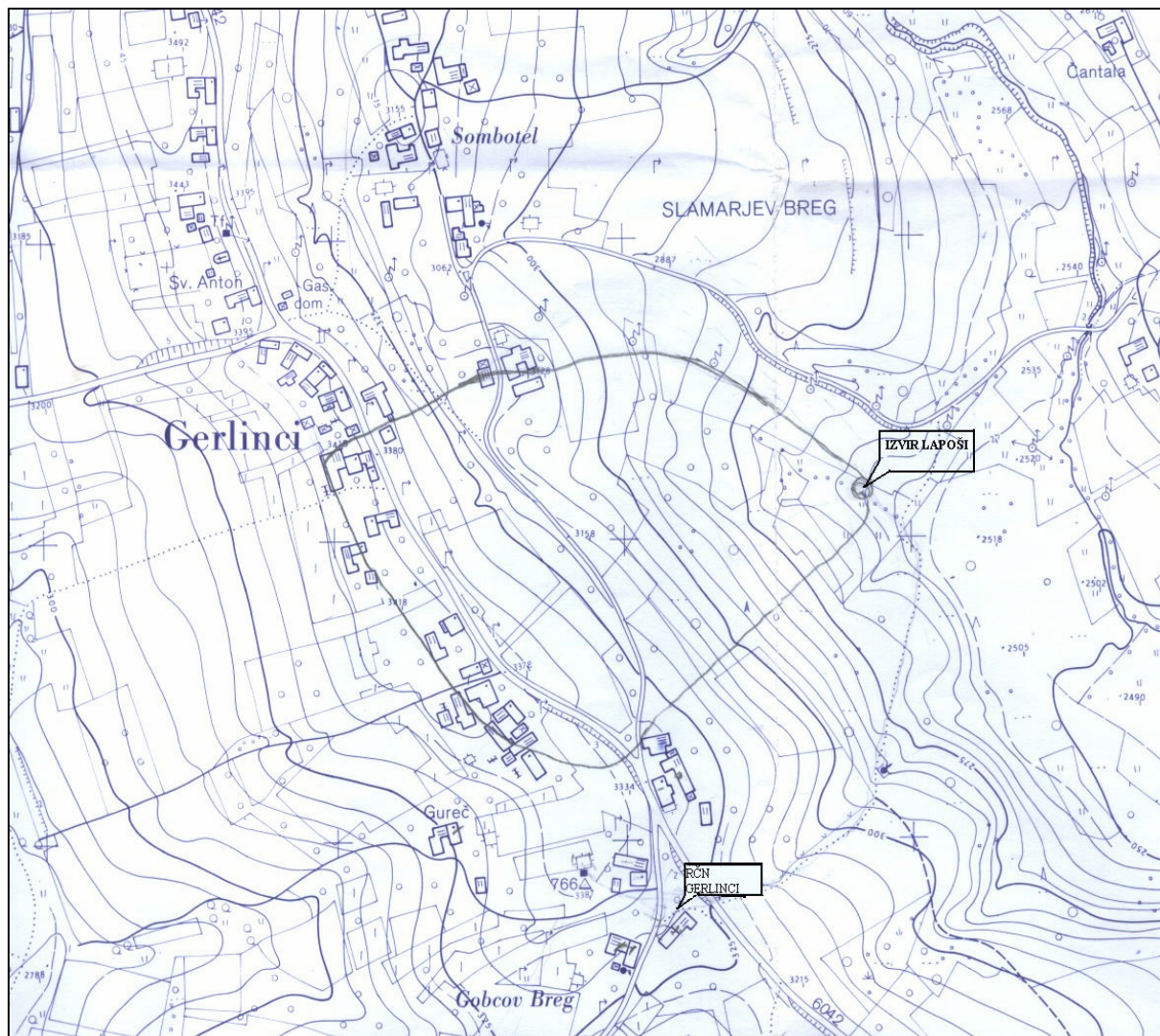
- Wießner A., Kusch P, Kästner M, Stottmeister U. 2002. Abilities of helophyte species to release oxygen into rhizospheres with varying redox conditions in laboratory-scale hydroponic system. *International Journal of Phytoremediation*, 4, 1: 1–15
- WHO. 2004. Guidelines for drinking-water quality. Volume 1. 3rd edition. Geneva, WHO: 515 str.
- http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf (avgust 2006)
- Wotton R. S. 2002. Water purification using sand. *Hydrobiologia*, 469: 193–201
- Zakon o vodah. Ur. l. RS št. 67/2002
- Zdragas A., Zalidis G.C., Takavakoglou V., Katsavouni S., Anastasiadis E.T., Eskridge K., Panoras A. 2002. The effect of environmental conditions on the ability of a constructed wetland to disinfect municipal wastewaters. *Environmental Management*, 29, 4: 510–515
- Zupančič M. 2001. Vloga substrata pri odstranjevanju kovinskih ionov v modelu RČN. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, biotehniška fakulteta.
- Žvokelj M. 2003. Vrednotenje delovanja rastlinskih čistilnih naprav z biološkimi pokazatelji. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, biotehniška fakulteta.

ZAHVALA

Ob koncu bi se rada zahvalila mentorju prof. dr. Danijelu Vrhovšku za nasvete pri izdelavi diplomske naloge, prof. dr. Mihaelu J. Tomanu in prof. dr. Alenki Gaberščik za mnenja in popravke. Hvala tudi ga. Mariji Maučec in zaposlenim v laboratorijih ZZV Murska Sobota za pomoč pri analizi vzorcev.

Hvala Darji in Iztoku za nasvete in pomoč. Hvala tudi domačim za potrpežljivost in spodbudo.

PRILOGA A: Lokacija pilotne RČN Gerlinci in izvira Lapoši ter oznaka prispevnega območja.
(vir: Geodetska uprava RS)



1:5000

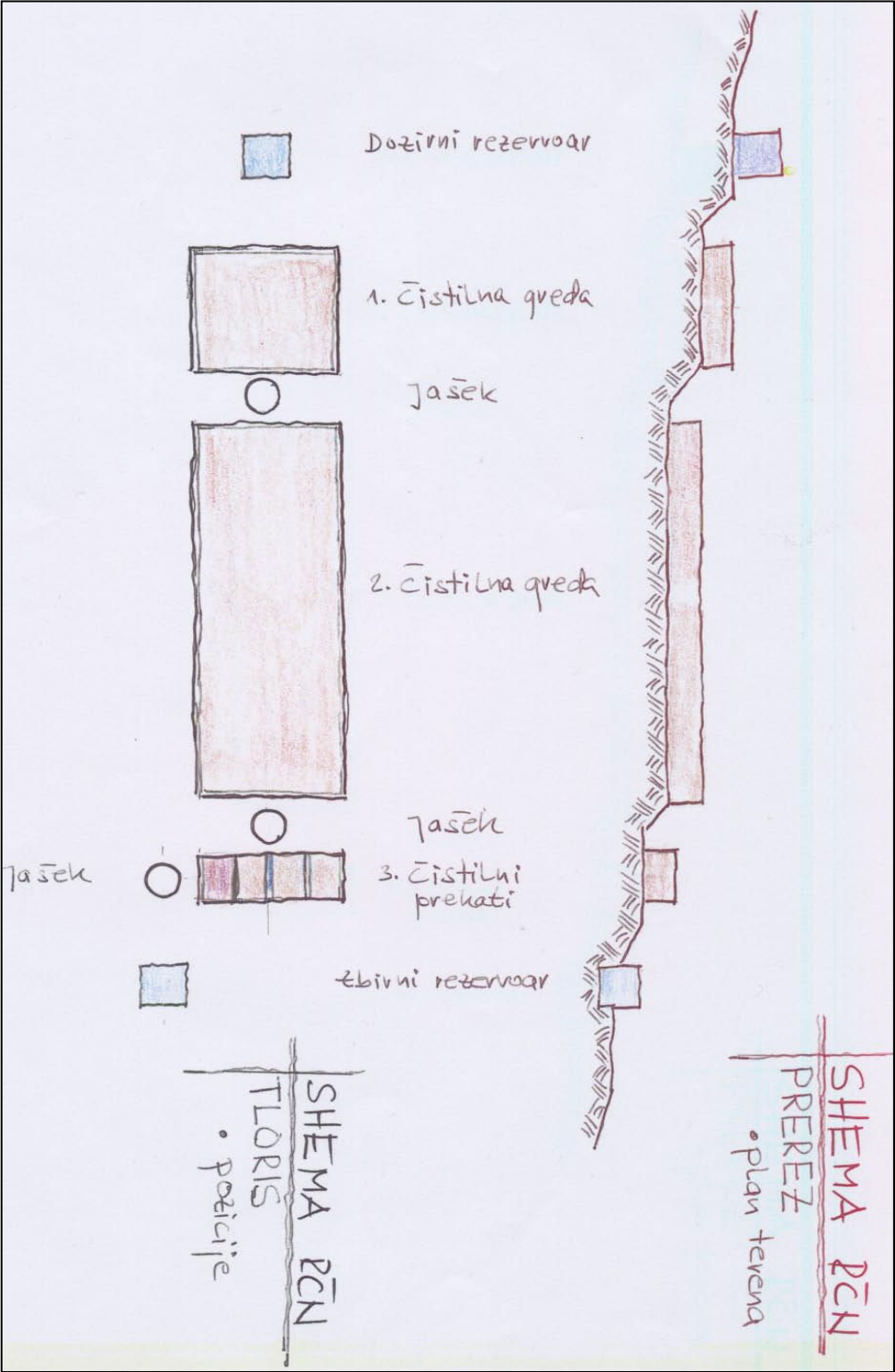
PRILOGA B: Raba zemljišč na prispevnem območju.
(vir: Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano)



Legenda:

- 1100 – njive in vrtovi
- 1211 – vinogradi
- 1222 – ekstenzivni travniki
- 1300 – trajni travniki in pašniki
- 1500 – grmičevje in drevje
- 2000 – gozd
- 3000 – pozidana in sorodna zemljišča

PRILOGA C: Shema pilotne RČN Gerlinci



PRILOGA D: Rezultati informativnih vzorčenj.

DATUM	PRETOK	KULTURA	SD1 (vtok v 1. bazen)	SD2 (iztok iz bazena)	SD3 (iztok iz 2.bazena)
28.9.2005	SOČASNO	<i>E.coli</i>	0	2	0
		Koliformne	0	3	300
		Enterokoki	0	0	240
		<i>Clostridium perfringens</i>	0	0	1
		Št. kolonij pri 22C	186	>300	>300
		Št. kolonij pri 37C	41	>300	>300
18.10.2005	SOČASNO	<i>E.coli</i>	5		7
		Koliformne	>100		9
		Enterokoki	5		12
		<i>Clostridium perfringens</i>	12		6
		Št. kolonij pri 22C	>300		>300
		Št. kolonij pri 37C	19		>300
22.11.2005	10 L/min	<i>E.coli</i>	2		5
		Koliformne	3		7
		Enterokoki	0		2
		<i>Clostridium perfringens</i>	0		18
		Št. kolonij pri 22C	120		>300
		Št. kolonij pri 37C	74		>300
23.11.2005	5 L/min	<i>E.coli</i>	1		0
		Koliformne	2		2
		Enterokoki	1		0
		<i>Clostridium perfringens</i>	3		2
		Št. kolonij pri 22C	250		>300
		Št. kolonij pri 37C	107		228