

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Tomaž Ileršič

**NARAVNE DANOSTI ZA POSTAVITEV VODNIH  
EKOREMEDIACIJSKIH SISTEMOV**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2007

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Tomaž Ileršič

**NARAVNE DANOSTI ZA POSTAVITEV VODNIH  
EKOREMEDIACIJSKIH SISTEMOV**

DIPLOMSKO DELO  
Univerzitetni študij

**NATURAL CONDITIONS FOR CONSTRUCTION OF WATER  
ECOREMEDIATION SYSTEMS**

GRADUATION THESIS  
University studies

Ljubljana, 2007

**"Tisto, kar je v meni, je voda, ki deluje in govori."**  
*(Ignacij Teoforski, 3. stoletje pred Kristusom)*

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija agronomije. Opravljeno je bilo na katedri za urejanje kmetijskega prostora in agrohidrologijo oddelka za agronomijo Biotehniške fakultete univerze v Ljubljani. V sodelovanju s podjetjem za aplikativno biologijo LIMNOS d.o.o.. Kemijske analize so bile izvedene v laboratorijih Inštituta za celulozo in papir v Ljubljani in laboratorijih katedre za pedologijo na Biotehniški fakulteti, oddelek za agronomijo. Vzorčenje je bilo izvedeno na iztoku meteornih in komunalnih voda v kraško ponikalnico na Rakovško-Unškemu polju.

Komisija za študijska in študentska vprašanja Oddelka za agronomijo BF je dne 25.8.2005 sprejela temo in za mentorico diplomskega dela imenovala izr. prof. dr. Marino Pintar ter za somentorico dr. Tjašo Griessler Bulc.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Ivan Kreft  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Članica: izr.prof. dr. Marina Pintar  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Članica: dr. Tjaša Griessler Bulc  
LIMNOS d.o.o., podjetje za aplikativno biologijo

Član: prof. dr. Franc Lobnik  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 21. december 2007

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške Fakultete, Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki identična tiskani verziji.

Tomaž Ileršič

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn  
DK UDK 502.51:628.112:504.:628.3(043.2)  
KG rastlinske čistilne naprave/čiščenje odpadnih vod/odpadne vode /fitoremediacija/  
ekoremediacija /talna voda/*Phragmites australis*  
KG AGRIS P01/T01  
AV ILERŠIČ, Tomaž  
SA PINTAR, Marina (mentorica)/ BULC GRIESSLER, Tjaša (somentorica)  
KZ SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo  
LI 2007  
IN NARAVNE DANOSTI ZA POSTAVITEV VODNIH EKOREMEDIACIJSKIH  
SISTEMOV  
TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)  
OP XI, 39 str., 4 pregl., 22 sl., 41 vir.  
IJ sl  
JI sl/en  
AI Ekoremediacijski (ERM) sistemi so nadgradnja že znanih rastlinskih čistilnih naprav (RČN) in so namenjeni izboljšanju kakovosti vode z upoštevanjem vseh naravnih danosti. Primer je ponikalnica, ki se nahaja v vrtači, na robu Rakovško Unškega polja. Polje je tipično kraško polje. V ponikalnico so se prvotno stekale po vkopanem cevnem sistemu izključno meteorne vode. Na ta sistem se je kasneje samovoljno priklopilo veliko število gospodinjstev s svojimi odpadnimi vodami. V vrtači so se samoniklo naselile nekatere močvirske rastline kot so rogoz (*Typha* spp.) in žlezava nedotika (*Impatiens glandulifera*). Voda se pretaka po vrtači večinoma površinsko, saj se je dno s časoma zamuljilo. Celotna vrtača na prvi pogled sicer deluje kot čistilni sistem, vendar je njena čistilna sposobnost majhna. Z rednimi meritvami so izmerili pretoke ob različnih časovnih obdobjih v sušnem delu leta ter opravil analizo odpadne vode. Na podlagi vhodnih podatkov so želeli na nivoju idejne zasnove vrtačo, z upoštevanjem naravnih danosti spremeniti, v dobro delujoči ERM sistem. Z minimalnimi gradbenimi posegi in izkopavanji so želeli izkoristiti naravni relief, ki ga vrtača ponuja in vanjo vgraditi ERM sistem. Dosedanja praksa pri izdelavi RČN je izkop več lagun pravilnih geometrijskih oblik brez upoštevanja značilnosti naravnega reliefa ter drugih okoljskih značilnosti pokrajine v katero je postavljena. Izbrana rešitev daje tudi možnost izkoriščanja naravne ponikalnice za izpust viškov očiščene vode, ki se ne bi porabila za namakanje okoliških kmetijskih površin ali kot rezerva za požarno vodo. Z izgradnjo ERM sistema, bi bila ohranjena narava, biodiverziteteta, naravni viri, videz krajine ter prihranjen denar zaradi cenejše izgradnje ERM sistema ob upoštevanju naravnih danosti, ki jih nudi opisana lokacija.

## KEY WORD DOCUMENTATION

DN Dn  
DC UDC 502.51:628.112:504.:628.3(043.2)  
CX constructed wetlands/wastewater treatment/wastewater/ phytoremediation/  
ecoremediation /soil water/*Phragmites australis*  
CC AGRIS P01/T01  
AU ILERŠIČ, Tomaž  
AA PINTAR, Marina (supervisor)/ BULC GRIESSLER, Tjaša (co-supervisor)  
PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy  
PY 2007  
TI NATURAL CONDITIONS FOR CONSTRUCTION OF WATER  
ECOREMEDIATION SYSTEMS  
DT Graduation Thesis (University studies)  
NO XI, 39 p., 4 tab., 22 fig., 41 ref.  
LA sl  
AL sl/en  
AB Ecoremediation (ERM) systems are the upgrade of the existing constructed wetlands and are designed for improving the water quality, considering all natural conditions. As an example the a sinkhole is presented at the end of the field Rakovško-Unško polje, which is a typical field of the Karst region, At first, only the storm run off flew into the underground stream via an underground pipe system. Later, a large number of households with their wastewaters were connected arbitrary to the system. The sinkhole was originally vegetated by several marsh plants, such as cattail (*Typha* spp.) and policeman's helmet (*Impatiens glandulifera*). The water runs mainly superficially into the sinkhole, because the bottom was gradually silted. At first sight the sinkhole acts as a cleaning system, however, its cleaning abilities are fairly limited. The flows at different periods in the dry time of the year were determined by regular measuring. An analysis of wastewater was conducted. Based on input data we wanted to design a plan for the usage of the sinkhole as a well-operating ERM system, considering existing natural conditions, The aim was to use the natural relief of the sinkhole to install an ERM system with minimal excavation and construction works. The usual practice of installing constructed wetlands so far is to excavate several beds of correct geometrical shape, regardless of the natural relief or environmental characteristics of the landscape. The selected solution enables the use of the existing sinkhole stream to drainage overflows of treated water, which has not been used for irrigation of neighbouring agricultural areas or as fire water. By constructing such an ERM system, with consideration of all the environmental predispositions of the location, the nature, biodiversity, natural resources, landscape appearance, as well as the financial means would be saved.

## KAZALO VSEBINE

	Ključna dokumentacijska informacija	III
	Key word documentation	IV
	Kazalo vsebine	V
	Kazalo preglednic	VII
	Kazalo slik	VIII
	Kratice, okrajšave in simboli	IX
	Slovarček	X
<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2	OPIS PROBLEMATIKE NA IZBRANEM OBMOČJU KRASA	2
1.3	CILJ RAZISKOVANJA	3
1.4	DELOVNA HIPOTEZA	3
<b>2</b>	<b>PREGLED OBJAV</b>	<b>4</b>
2.1	ZNAČILNOSTI ERM SISTEMOV IN NJIHOVE PREDNOSTI	4
2.2	OBLIKOVANJE ERM SISTEMA IN NAČINI UPORABE	5
2.3	DELITEV ERM SISTEMOV	6
<b>2.3.1</b>	<b>ERM Sistemi s prosto plavajočimi makrofiti</b>	<b>6</b>
<b>2.3.2</b>	<b>ERM sistemi s potopljenimi makrofiti</b>	<b>7</b>
2.3.2.1	ERM sistemi s površinskim tokom vode	7
2.3.2.2	ERM sistemi s tokom vode pod površino	8
2.3.2.2.1	Sistemi s horizontalnim tokom vode pod površino	8
2.3.2.2.2	Sistemi z vertikalnim tokom vode pod površino	9
2.3.2.2.3	Hibridni sistemi	10
<b>2.3.3</b>	<b>Sistemi za čiščenje in zadrževanje meteornih vod</b>	<b>10</b>
2.4	GLAVNI DEJAVNIKI ČIŠČENJA PRI SISTEMIH S TOKOM VODE POD POVRŠINO	10
<b>2.4.1</b>	<b>Substrat</b>	<b>11</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Pomen makrofitov in značilnosti najpogosteje uporabljenih vrst</b>	<b>11</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Mikroorganizmi</b>	<b>13</b>
2.5	KROŽENJE SNOVI IN ODSTRANJEVANJE SNOVI IZ ČIŠČENE VODE V ERM SISTEM S TOKOM VODE POD POVRŠINO	14
<b>2.5.1</b>	<b>Organske snovi</b>	<b>15</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Mineralne snovi</b>	<b>15</b>
2.5.2.1	Dušik	15
2.5.2.2	Fosfor	16
2.5.2.3	Kovine	17
2.5.2.4	Anionski tenzidi	18
<b>2.5.3</b>	<b>Patogeni mikroorganizmi</b>	<b>18</b>

<b>3</b>	<b>MATERIAL IN METODE DELA</b>	19
3.1	ZNAČILNOSTI OBMOČJA	19
3.2	OPIS PONIKALNICE	20
3.3	FIZIKALNO KEMIJSKE ANALIZE	21
<b>3.3.1</b>	<b>Odvzem vzorcev in meritve fizikalnih parametrov na vzorčni ponikalnici</b>	21
<b>3.3.2</b>	<b>Laboratorijske analize</b>	25
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN RAZPRAVA</b>	26
4.1	ANALIZE DNEVNIH PRETOKOV	26
4.2	ANALITSKI PODATKI: KPK, TOC, BPK <sub>5</sub> , BPK <sub>5</sub> :KPK	28
4.3	ANALITSKI PODATKI DUŠIKA (NO <sub>3</sub> ) IN FOSFORJA (P)	28
4.4	ANALIZE DOBLJENIH VREDNOSTI KPK, TOC, KPK <sub>5</sub>	29
4.5	ANALIZE DOBLJENIH VREDNOSTI FOSFORJA IN NITRATA	30
4.6	TRENTNO STANJE NA VZORČNI PONIKALNICI	31
4.7	POTREBNI UKREPI PRI IZGRADNJI ERM SISTEMA	32
<b>4.7.1</b>	<b>Prva idejna zasnova, manjši ERM sistem</b>	33
<b>4.7.2</b>	<b>Druga idejna zasnova, večji ERM sistem</b>	34
<b>5</b>	<b>SKLEPI</b>	36
<b>6</b>	<b>POVZETEK</b>	37
<b>7</b>	<b>VIRI</b>	38
	<b>ZAHVALA</b>	



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Meritve pretokov (l/s) na vzorčni ponikalnici na Rakovško Unškem polju in označeni datumi vzorčenja vode.	22
Preglednica 2:	Seznam metod uporabljenih za analize odpadne vode na vzorčni ponikalnici.	25
Preglednica 3:	Rezultati KPK, TOC, BPK, BPK:KPK analiza vzorcev inštitut za celulozo in papir Ljubljana.	28
Preglednica 4:	Rezultati nitrata ( $\text{NO}_3$ ) in fosforja (P) analiza vzorcev inštitut za celulozo in papir Ljubljani.	29

## KAZALO SLIK

Slika 1:	Shema ERM sistema s prosto plavajočimi makrofiti (Bulc in Vrhovšek, 2007).	6
Slika 2:	Shema ERM sistema z potopljenimi makrofiti s površinskim tokom vode (Bulc in Vrhovšek, 2007).	7
Slika 3:	Shema ERM sistema z potopljenimi makrofiti s horizontalnim tokom vode pod površino (Bulc in Vrhovšek, 2007).	9
Slika 4:	Shema ERM sistema z emergentnimi makrofiti z vertikalnim tokom vode pod površino. (Bulc, Vrhovšek, Rastlinske ..., 2007)	9
Slika 5:	Čistilni objekt pri Radencih. (foto Petra Kralj cit. po Kranjc, 2007)	10
Slika 6:	Shematski prikaz mikrobiološkega filma (Anžič in Kapun, 2002).	13
Slika 7:	Zemljevid z označenim mestom ERM sistema. (Atlas Slovenije 1996)	19
Slika 8:	Pogled z južne strani na obraščeno ponikalnico, v ozadju hrib Veliki Orljek (Foto: Ileršič T., 2006).	20
Slika 9:	Pogled s severne strani na ponikalnico, v ozadju zahodni del Javornikov ob cesti Rakek–Unec (Foto: Ileršič T., 2006)	21
Slika 10:	Iztok odpadnih voda z Rakeka po cevnem sistemu v ponikalnico, merilno mesto za pretoke in odvzem vzorcev. (Foto: Ileršič T., 2006)	22
Slika 11:	Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v soboto 30.9.2006.	26
Slika 12:	Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v Nedeljo, dne 1.10.2006.	27
Slika 13:	Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v torek, dne 3.10.2006.	27
Slika 14:	Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v četrtek, dne 5.10.2006.	28
Slika 15:	Rezultati vrednosti KPK (mg/l), TOC (mg/l), BPK <sub>5</sub> (mg/l) v odplakah z Rakeka dne 30.10.2006.	29
Slika 16:	Vrednosti KPK, TOC, BPK <sub>5</sub> v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.	30
Slika 17:	Koncentracija fosforja (P) (mg/l) v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.	30
Slika 18:	Koncentracija nitrata (NO <sub>3</sub> ) (mg/l) v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.	31
Slika 19:	Letalski posnetek ponikalnice na Rakeku. (foto: ARSO)	31
Slika 20:	Prikaz razreza letne količine komunalne odpadne vode na Rakeku v obdobju 2004 -2007.	32
Slika 21:	Idejna zasnova z upoštevanjem naravnih danosti za postavitve manjšega ERM sistema v ponikalnici na Rakeku. (foto: ARSO)	33
Slika 22:	Idejna zasnova z upoštevanjem naravnih danosti za postavitve večjega ERM sistema v ponikalnici na Rakeku. (foto: ARSO)	34

## KRATICE, OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

- AOX:** Aromatski ogljikovodiki  
**BPK<sub>5</sub>:** Biološka potreba po kisiku  
**CČN:** Centralna čistilna naprava  
**ČN:** Čistilna naprava  
**ERM:** Ekoremediacija  
**FWS:** (Free Water Surface) Sistem s površinskim tokom vode  
**HSF** ali **HF:** (Horizontal Subsurface Flow) Sistem s podpovršinskim horizontalnim tokom  
**KČN:** Komunalna čistilna naprava  
**KPK:** Kemijska potreba po kisiku  
**PE:** Populacijska enota, populacijski ekvivalent  
**RBTS** (Reed Bed Treatment System) ali **VS** (Vegetated Submerged Bed): Sistemi s tokom vode pod površino, kjer je kot makrofit uporabljen navadni trst.  
**RČN:** Rastlinska čistilna naprava  
**SEP:** Specifična električna prevodnost  
**TOC:** (Total organic carbon) Celoten organski ogljik  
**TP:** (Total fosfor) Celotni fosfor  
**VF:** (Vertical Flow) Sistem z vertikalnim tokom vode  
**JP:** Javno podjetje  
**UV:** Ultra vijolična  
**spp.** (Species) Vrste  
**lab.** Laboratorij  
**št.** Število

## SLOVARČEK\*

- Adsorbpcija:** Pritrditev plinaste, tekoče ali raztopljene kemikalije na površino trdne snovi.
- Amfifilne lastnosti:** Lastnost nekaterih molekul, da je en del molekule topen v vodi, drugi pa hidrofoben.
- Anaerobne razmere:** Razmere, pri katerih ni raztopljenega kisika.
- Anionska površinsko aktivna snov:** Površinsko aktivna snov, ki ionizira v vodni raztopini. Negativno nabiti organski ioni, ki pri tem nastanejo, so površinsko aktivni.
- Anoksičnost:** Stanje, pri katerem je koncentracija raztopljenega kisika tako majhna, da so pri nekaterih skupinah mikroorganizmov akceptorji elektronov oksidirane oblike dušika, žvepla ali ogljika.
- Biofilmi, pritrjena biomasa ali prerast:** Kar se naseli na površinah (prodnikov, sedimenta). Deluje kot življenjska združba v tekočih vodah imenovana perifiton, s to razliko, da v čistilnih napravah ni primarnih producentov.
- Biološka potreba po kisiku:** Pove nam, koliko kisika se porabi v petih dneh pri standardnih pogojih za oksidacijo lahko razgradljivih, večinoma organskih spojin, pa tudi za reducirane anorganske snovi kot so sulfidi,  $Fe^{2+}$  in reducirane oblike dušika.
- Biorazgradljivost:** Dovzetnost organskih snovi za biološko razgradnjo.
- Ekoremediacija:** Metoda, ki uporablja naravne procese in sisteme za varovanje in obnovo okolja.
- Emergentni makrofiti:** Ukoreninjene višje rastline, ki rastejo na stalno ali občasno poplavljenih tleh. Podzemne in del nadzemnih delov imajo potopljenih, nad vodo je del asimilacijskih tkiv in razmnoževalni organi.
- Evapotranspiracija:** Celotno izhlapevanje z rastlinami poraslega območja. Vključuje izhlapevanje vode s površine rastlin in iz tal (evaporacija) ter aktivno oddajanje vode skozi listne reže (transpiracija).
- Filtracija:** Postopek čiščenja, pri katerem voda prehaja skozi porozno plast snovi, ki odstrani trdne delce.
- Intersticijska voda:** Voda, ki se zadržuje v intersticiju (v prostoru med trdnimi delci).
- Ionska izmenjava:** Postopek izmenjave določenih anionov ali kationov v vodi z drugimi ioni s pronicanjem skozi kolono z ionskimi izmenjevalci (snovmi sposobnimi reverzibilne izmenjave ionov z raztopino, s katero je v stiku, ne da bi ob tem bistveno spremenile strukturo).
- Kemijska potreba po kisiku:** To je mera za ekvivalent kisika za razgradnjo organskih snovi sposobnih oksidacije z močnim kemičnim oksidantom.
- Laguna (z odplako), stabilizacijska laguna:** Kotanja za zadrževanje odpadnih voda pred dokončnim izpustom, v kateri se organske snovi biološko oksidirajo z naravnim ali umetno pospešenim vnosom kisika iz zraka v vodo.
- Makrofiti:** Višje vodne rastline. Nekateri uvrščajo sem tudi večje, makroskopsko vidne rastline, kot je na primer alga *Cladophora*.

\* Povzeto po virih: (Roš, 1995; Dular in Roš, 1997; Kadlec in sod., 2000)

**Odpadna voda:** Vsaka voda, ki jo je človek uporabil pri različnih dejavnostih in ji pri tem spremenil fizikalne, kemijske ali biološke lastnosti. Z ekološkega vidika taka voda pomeni alohton vnos organskih ali anorganskih snovi v vodni ekosistem in s tem spremembo prehranjevalnih spletov oziroma metabolnih poti.

**PE:** populacijski ekvivalent. Po evropskih merilih je to 65 g BPK<sub>5</sub>/dan (Vel. Britanija: 60 g BPK<sub>5</sub>/dan). Glede toka se za 1 PE smatra v Vel. Britaniji 200 l/dan na PE, kar je 150 litrov na prebivalca plus 50 l/dan za infiltracijo. Glede hranilnih snovi: 12 g NH<sub>4</sub>-N/dan in 2 g TP/dan na 1 PE.

**Površinsko aktivna snov:** Kemična površinsko aktivna snov, ki raztopljena v tekočini, predvsem v vodi, zmanjša površinsko napetost ali napetost na mejnih ploskvah. Deluje predvsem z adsorbcijo na meji tekočina/para ali drugih mejnih ploskvah. Molekula take spojine ima najmanj eno skupino z afiniteto do zelo polarnih površin, v večini primerov je topna v vodi, in eno skupino z majhno afiniteto do vode.

**Predhodno čiščenje, predtretiranje (preliminarno tretiranje):** Začetni postopki obdelave odpadnih vod. Z njimi odstranimo snovi, ki bi lahko zmanjševale učinkovitost nadaljnjega čiščenja in pripravimo vode za nadaljnje postopke. Sem sodijo predvsem odstranjevanje večjih delcev ter večjih količin olj in maščob.

**Primarno čiščenje odpadne vode:** Faza čiščenja, ki običajno vključuje odstranjevanje pretežnega dela usedljivih trdnih delcev. Pri čiščenju odpadnih vod neposredno sledi predhodnemu čiščenju. Je prva faza tretiranja odpadne vode, v kateri odstranimo velik del suspendiranih in organskih snovi. Pogosto se uporabljajo primarni usedalniki za večje naprave, septični in Imhoffovi zadrževalniki pa za manjše sisteme.

**Prirasla biomasa:** Prirasla združba nitastih bakterij (npr. *Sphaerotilus natans*), gliv (npr. *Fusarium aqueductum*) in drugih vrst, vključno praživali. Lahko se pojavi v ČN ali rekah kot posledica izpustov nepopolno čiščenih odpadnih vod, iztokov ali industrijskih odpadnih vod.

**Redoks potencial (redukcijsko-oxidacijski potencial, Eh):** Je električni potencial, merilo za oksido-redukcijski sistem. Uporablja se za določanje stopnje elektrokemične redukcije v vodnem okolju. Spreminja se glede na vsebnost kisika in nekaterih drugih elementov. Definiran je pri pH = 7. Pri spremembi pH za eno enoto se redoks potencial spremeni za 58 mV.

**Sekundarno čiščenje:** Čiščenje odpadne vode z biološkimi procesi, kot sta biološka filtracija in usedanje ali postopek z aktivnim blatom. Gre za biološko redukcijo in koncentriranje delcev, ki odstranita predvsem razgradljive organske snovi in neraztopljene snovi. Najobičajnejši so sistemi z aktivnim blatom, precejalniki, biodiski in oksidacijski bazeni. V ZDA je na iztoku pogosta dezinfekcija.

**Terciarno čiščenje:** Uporaba dodatnega čiščenja z namenom, da zmanjšamo onesnaženje, ki s primarnim in sekundarnim čiščenjem ni bilo odstranjeno. Dodatno čiščenje je lahko nadaljnje fizikalno, kemično ali biološko čiščenje. Navadno gre za odstranjevanje hranilnih snovi ali strupenih snovi. Praviloma vključuje dezinfekcijo.

**Celoten organski ogljik:** Nam poda količino vsega organskega ogljika vezanega v organskih molekulah. Pri tem testu merimo izhajanje CO<sub>2</sub> ob popolnem razcepu organskih spojin. Je neodvisen od oksidacijskega stanja snovi v vzorcu in na meritev ne vplivajo drugi organsko vezani elementi kot sta dušik in vodik.

## 1 UVOD

### 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Pitna voda postaja v sodobnem svetu vse redkejši in s tem vse bolj iskan ter cenjen naravni vir, brez katerega ni življenja. V prihodnosti se narodi ne bodo bojevali za energente tako kot danes temveč za vire pitne vode. To že občutijo na Bližnjem vzhodu, kjer potekajo spori med Izraelom in Sirijo za izvire reke Jordan. Vire pitne vode je potrebno zaščititi in ohraniti, dokler je še kaj ohraniti. Med uspešnimi načini ohranjanja virov pitne vode je med drugimi tudi postavljanje ekoremediacijskih (ERM) sistemov. Glede na razpršeno poselitev v Sloveniji je ERM sistem zelo primeren, saj je najprimerneje vodo očistiti čim bližje viru onesnaževanja. S koncentriranjem odpadnih voda s kanalizacijskimi vodi so povezani veliki gradbeni posegi v okolje in s tem tudi velik finančni zalogaj za izvedbo tega. Na koncu dobimo skoncentrirano veliko količin odplak, za katere bi potrebovali strokovno zelo zahtevne velike čistilne naprave ali zelo velike površine za uspešen ERM sistem. Iz tega sledi, da je najbolje urediti čiščenje čim bližje viru onesnaževanja, pa naj bo to samostojna kmetija, farma, stanovanjska hiša, zaselek, vas, počitniško naselje. Vse je odvisno od organizacijske, okoljske in ekonomske zmožnosti postavitve v določenem okolju.

Primer, ki ga obravnavamo v tej diplomski nalogi je izpust meteornih in odpadnih gospodinjskih voda v kraško ponikalnico. Želimo narediti vzorčen primer za reševanje tega in temu podobnih primerov onesnaževanja z optimalno postavitvijo ERM sistemov v naravno okolje. V dosedanji praksi pri postavljanju ERM sistemov za potrebe čiščenja odpadnih voda, se ne upošteva dovolj naravnih danosti, kot so: vrtače, naravni jarki, mrtvi rokavi, suhe struge, naravna močvirja, brežine vodotokov. Pod prostorske danosti v naravi lahko štejemo tudi spremembe v naravi, ki so posledica človekovih dejavnosti in so v okolju že prisotne: jarki, drenažni jarki, opuščeni izkopi, opuščene gramoznice, opuščeni zadrževalniki visokih valov, stare mlinščice, obstoječi cevovodi za meteorne ali odpadne vode, ki se iztekajo v kraške ponikalnice ali vodotoke. Ti posegi so v naravi že prisotni in so nekateri neizkoriščeni, drugi pa neprimerno izkoriščeni in s tem moteči. Z uporabo teh površin za postavitev ERM sistema se jih na ta način lahko sanira in se s tem ohrani drugo naravno okolje.

Slovenija je naš dom, je dežela z izjemno biološko in pokrajinsko pestrostjo in posledično zelo občutljivim okoljem. Sodoben način življenja s hlastanjem po materialnih dobrinah posledično pelje v večje onesnaževanje. Tudi z ostalimi človekovimi posegi v prostor je že močno načeto naše naravno bogastvo. Za našo domovino je značilna razpršena poselitev. Povprečna gostota poselitve je 98,1 prebivalcev na kvadratni kilometer. V Sloveniji je 5961 majhnih naselij, od katerih jih ima kar četrtnina manj kot 50 prebivalcev. Samo 90 % naselij ima do 500 prebivalcev in le 7 mest več kot 20.000 prebivalcev. V letu 2005 je bilo v Sloveniji 143,3 milijona m<sup>3</sup> odpadnih voda iz javne kanalizacije, to je za 11,8 % več kot v letu 2004. Od tega je bilo 53,9 % odpadnih voda prečiščenih, 46,1% pa neprečiščenih (Strategija..., 2007).

## 1.2 OPIS PROBLEMATIKE NA IZBRANEM OBMOČJU KRASA

Za raziskovanje tega področja smo se odločili, ker je na območju Cerkniške občine veliko neurejenih izpustov komunalnih vod neposredno v kraške ponikalnice in vodotoke. S tem prihaja do onesnaženja izjemno občutljivega podzemnega kraškega vodonosnika, ki je neprecenljiv in nenadomestljiv vir pitne vode. Področja občin: Cerknica, Bloke, Loška dolina, Postojna, Pivka, so enotni povezani sistem kraškega vodonosnika. Pitna voda od tu lahko oskrbuje s pitno vodo tudi Primorje in del Ljubljanske kotline z Ljubljano.

Na celotnem območju Cerkniške občine je bila v letu 2004 poraba pitne vode 467.648 m<sup>3</sup>. Dve manjši čistilni napravi, sta delno očistili del odpadnih gospodinjstev voda 198.745 m<sup>3</sup> v letu 2004. Obe ČN bi bilo potrebno nadgraditi z ERM sistemom s tretjo stopnjo-čiščenja. Medtem, ko se veliko industrijskih odpadkov izgublja neposredno v ponikalnice in vodotoke in s tem nevarno ogrožajo zajetja pitne vode.

Problem onesnaženja kraške podtalnice smo preučevali na Rakovško-Unškem polju, ki je tipično kraško polje. Kraška polja, s skupnim imenom poimenovana Notranjska podolja, ležijo vzdolž idrijske tektonske prelomnice. Najvišje in najbolj jugovzhodno, ob hrvaški meji leži Babno polje. Proti severozahodu se zvrstijo Loška dolina, Cerkniško polje z znanim presihajočim Cerkniškim jezerom in Rakovško-Unško polje, ki je brez površinskih voda. Sledi Planinsko polje.

Odpadne vode se v ponikalnico stekajo iz kraja Rakek. Ponikalnica je v najnižjem delu polja pod vznožjem hriba Veliki Orlek (563 n.m.). (Atlas Slovenije, 1996) Kot je značilno za kraška polja tudi to polje občasno ob daljših obilnejših padavinah delno poplavlja. Zato je v tisočletjih voda izdolbla poti s polja po vodotopnem apnencu in izoblikovala požiralnike, ki so povezani s podzemnimi jamskimi sistemi. Voda od tu po predvidevanju speleologov nadaljuje pod Menišijo v smeri gradu Bistra na Ljubljanskem barju. Te izvorne vode so pomembne za vodooskrbo južne Ljubljanske kotline vključno z delom Ljubljane. Z barvanjem so dokazali, da se v Bistru stekajo vode neposredno s Cerkniškega polja, in sicer iz ponorov Vodonos, Retje in Rešeto, deloma se vode stekajo tudi iz Rakovega Škocjana ter Planinskega polja (ponori Milavcovi ključ, Žrniki, Ribce). Izviri Velike in Male Ljubljance in Bistre so medsebojno povezani, kar dokazuje povezanost vodnih žil v deltastem ustju podzemne Ljubljance. Najmočnejše vodne žile so usmerjene k izvirom Ljubljance, najnižje pa ležijo v zaledju Bistre (Habič, 1996).

Problematika je zanimiva za širše kraško območje, ker se talna voda v kraških vodonosnikih medsebojno povezana in je del enega sistema. V kolikor pride do onesnaženja na posameznem delu sistema se to pozna na širšem delu sistema. Četrtnina svetovnega prebivalstva, v Sloveniji pa kar polovica, se oskrbuje z vodo iz kraških vodonosnikov. V krasu se zaradi vodotopnosti kamnin razvije mreža kraških kanalov, ki močno spremeni hidravlične lastnosti vodonosnika in omogoča hiter transport snovi. Zaradi izjemne heterogenosti in neznanega položaja kanalov, ki nosijo večino toka, je opredelitev kraških vodonosnikov težka, zato je poglobljeno poznavanje narave in razvoja kraških vodonosnikov izredno pomembno (Gabrovšek, 2005).

### 1.3 CILJI RAZISKOVANJA

V prvi fazi naloge smo zbirali vhodne podatke: poraba pitne vode na Rakeku, pretoki odpadnih voda v ponikalnici, analize vzorcev odpadnih voda v ponikalnici, na osnovi katerih smo želeli ugotoviti dejansko onesnaženje in možnosti za čiščenje z ERM sistemom. Z meritvami pretokov in kemijsko analizo vzorcev komunalnih odplak smo izmerili dejansko količino odpadnih voda ter njihovo obremenjenost z onesnaženjem. Meritve pretokov in vzorčenje smo izvedli v jesenskem sušnem obdobju leta, s tem smo dobili podatke za odpadne vode brez meteornih voda. Podatki o tem so nam potrebni za pravilno projektiranje velikosti, oblike in sestavnih delov ERM sistema, kot vzorčnega modela za reševanje onesnaženja z gospodinjskimi odpadnimi vodami v podobnih primerih.

### 1.4 DELOVNA HIPOTEZA

Predvidevamo, da lahko za čiščenje gospodinjskih in meteornih odpadnih voda ter podobnih odpadnih voda uporabimo naravo posnemajoče čistilne sisteme kot so ERM. Z upoštevanjem in izkoriščanjem že prisotnih naravnih samočistilnih sposobnosti in naravnih reliefnih danosti ob viru onesnaženja, pričakujemo, da je na ta način možno učinkovito in z manjšimi stroški izboljšati ekološko stanje v okolju.



## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 ZNAČILNOSTI ERM SISTEMOV IN NJIHOVE PREDNOSTI

ERM so naravni in sonaravni sistemi, ki omogočajo zaščito in obnovo ekosistemov. So najboljša razpoložljiva tehnologija, ki na trajosten in okolju prijazen način omogoča zmanjševanje onesnaženosti v okolju. ERM so učinkovite rešitve za čiščenje tal in različnih tipov odpadnih vod, omogočajo izboljšanje kakovosti tekočih in stoječih vod ter podtalnice. S svojimi lastnostmi ERM prispevajo k razvoju obnovljivih virov energije in omogočajo trajnostno upravljanje okolja.

Pregled tipov ERM sistemov (Bulc, 2007b):

1. Rastlinska čistilna naprava (RČN) za čiščenje odpadnih voda
2. Rastlinski filter (RF) za čiščenje iztoka z avtoceste
3. RČN za kondicioniranje pitne vode
4. Naravni ERM sistemi
5. Kal za večnamensko uporabo
6. Revitalizacija vodotoka
7. Izcedne vode in trajnostna sanacija odlagališča odpadkov

Fitoremediacija je uporaba rastlin za procese čiščenja okolja. Sem sodi tudi uporaba rastlin za čiščenje vod obremenjenih z organskimi in anorganskimi snovmi. Med procese fitoremediacije sodijo (Raskin in Ensley, 2000):

- fitoekstrakcija (absorbcija snovi iz podlage v rastlinska tkiva),
- rizofiltracija (usedanje in koncentriranje snovi v koreninah ali med njimi),
- fitostabilizacija (stabilizacija snovi v tleh, s čimer postanejo neškodljive),
- fitovolatilizacija (rastline sprejmejo strupene snovi iz tal, nato pa te snovi izhlapijo skozi listne reže).

Prednosti uporabe ERM (Bulc in sod., 1998; Kadlec in sod., 2000; Zupančič in Vrhovšek, 1999; Campbell in Ogden, 1999; Urbanc-Berčič, 2001; Urbanc-Berčič in Bulc, 1995; Herlič, 1993):

- stroški izgradnje in vzdrževanja so veliko nižji kot pri konvencionanih ČN. Skrbno izbrane rastline, substrat in mikroorganizmi nadomestijo drago opremo.
- za nadzorovanje delovanja praviloma zadostujejo občasni pregledi.
- ob primerni konfiguraciji terena lahko delujejo povsem na bazi naravnih procesov in na osnovi gravitacije.
- potrebe po tehnični opremi so minimalne.
- namesto neobnovljivih virov energije v veliki meri delujejo z energijo sonca, vetra in gravitacije.
- praviloma delujejo dolgo brez vsakih posegov.
- lepo se vključujejo v naravno okolje. Oblikovanost lahko zelo lepo prilagajamo glede na relief krajine. Sisteme lahko namestimo na terasah, v občestnih jarkih, pa tudi na strehah bivalnih zgradb ipd.
- enostavna prilagoditev ob povečanju obremenitve.
- dobro prenaša nihanja v hidravlični obremenitvi.

- velika puferska kapaciteta.
- majhna produkcija odpadnega blata.
- praviloma ni smradu in so zato primerne za bližino naselij.
- zadržujejo vodo v pokrajini.
- vodo po obdelavi na ERM sistemu lahko recikliramo, jo uporabimo za namakanje, gašenje požarov ipd.
- kjer voda ni preveč obremenjena, jih lahko uporabimo kot parke, za izobraževanje, rekreacijo, ohranjanje naravnih okolij, preprečevanje erozije in podobno.
- lahko čistimo tudi nizko obremenjene vode, kar z aktivnim blatom ni možno.
- izkazujejo zadovoljivo delovanje tudi v hladnejšem delu leta in hladnejših klimatih
- delujejo tudi pod snegom in ledom.
- pokošeno biomaso lahko uporabljamo za produkcijo metana.

Šibke strani:

- potrebujejo relativno večjo površino kot konvencionalne ČN.
- v preteklosti je bilo pogosto mašenje sistemov. Z uporabo pravih mešanic substrata in ustreznim načinom izgradnje pa se danes ta problem praviloma ne pojavlja več.
- neprepoznavnost – laična in tudi strokovna javnost ERM ne pozna ali pa jo zaradi nepoznavanja podcenjuje.

Že v mnogih starejših kulturah so v močvirja odvajali obremenjene vode. Mokrišča so idealna okolja za kemične pretvorbe zaradi velikega spektra oksidacijskih stanj, ki se običajno pojavlja v takih tleh (Kadlec in sod., 2000). Sprva je šlo predvsem za zaščito pred boleznimi, ki se pojavljajo zaradi obremenjene vode (Zupančič in Vrhovšek, 1999). Prvi poskusi namenske uporabe zgrajenih močvirij za čiščenje odpadnih vod segajo v leto 1973 (ZDA) (Kadlec in sod., 2000), zanimanje pa je naraslo po letu 1980. Prvi so bili uporabljeni sistemi s površinskim tokom vode. Sistem s podzemnim tokom vode so začeli razvijati Nemci leta 1976. Danes obstaja že nad 10.000 takih sistemov, večina je manjših. Uporablja se jih za: ohranjanje naravnih virov, zmanjšanje vnosa onesnaževal in vplivov na naravo sploh, ohranjanje ogroženih habitatov itd. (Zupančič in Vrhovšek, 1999). V Sloveniji je bila prva ERM zgrajena v Ajdovščini leta 1989 (Pavšič, 1996).

ERM sistemi delujejo po enakih zakonitostih kot naravna močvirja, le da lahko pogoje veliko bolj kontroliramo. Nivo vodne gladine in pretok sta večinoma stalna, ali pa nihata v stalnem ritmu.

## 2.2 OBLIKOVANJE ERM SISTEMA IN NAČINI UPORABE

ERM sistem z namenom čiščenja odpadnih voda iz gospodinjstev je najbolj primeren:

1. za naselja z do 1000 PE, kjer potrebna površina za izgradnjo ERM še ni tako velika.
2. v sezonsko obremenjenih turističnih središčih, kot so letovišča ob morju, naravni parki, kjer je problematično vzdrževanje vlažnosti aktivnega blata klasičnih ČN v neaktivni sezoni. ERM sistemi so se izkazali kot odlična rešitev. V neaktivni sezoni rastline in mikroorganizmi izrabljajo v gredah nakopičene hranilne snovi. Poskrbeti je potrebno le, da se grede ne izsušijo. Očiščeno vodo uporabljajo za spiranje sanitarij, namakanje golf igrišč, protipožarno vodo in podobno

3. vse več se uporabljajo za čiščenje netočkovnih virov onesnaževanja površinskih vod: padavinskih vod z avtocest in drugih urbanih površin, vodo onesnaženo z naftnimi derivati, izcedne vode iz kmetijskih površin itd.
4. poseben sistem je razvit za ponovno uporabo čiščene izcedne vode iz smetišč (Bulc in sod. 1998).
5. precej RČN je že zgrajenih za čiščenje industrijskih odpadnih vod in drugih odpadnih vod s strupenimi snovmi, pa tudi za kisle vode iz rudnikov premoga ali kovinskih rud.
6. vključimo jih lahko v postopke stabilizacije in izsuševanja aktivnega blata iz ČN itd. (Kadlec in sod., 2000).
7. pogoste so kombinacije z ostalimi tipi čistilnih naprav. RČN se zelo dobro obnesejo tudi za terciarno čiščenje.

Pri sistemih s tokom vode pod površino potrebujemo za zadovoljivo sekundarno čiščenje 2 do 2,5 m<sup>2</sup>/PE, nekaj več za močno obremenjene ali težko razgradljive vode (Zupančič in Vrhovšek, 1999), za terciarno čiščenje pa le okoli 0,7 m<sup>2</sup>/PE. Za učinkovito čiščenje je zelo pomembna primerna hidravlična obremenitev (Kadlec in sod., 2000).

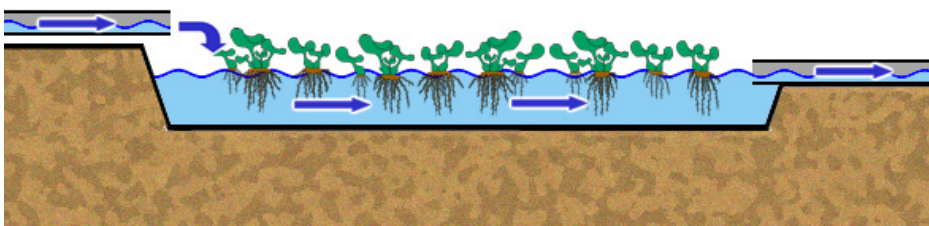
Za večje sisteme večinoma uporabijo več manjših gred ali lagun, kar omogoča boljše prilagodljivost in izboljša prehajanje vode skozi sistem. Nepropustna podlaga (gline, asfalt, sintetične gume ali plastične folije), ki je položena pod ERM, mora biti močna, odporna na poškodbe in kemične snovi v vodi. Njena naloga je preprečevanje pronicanja čiščene vode v podtalnico. Sistem moramo oblikovati tako, da zadrži vodo tudi ob večjih količinah padavin.

## 2.3 DELITEV ERM SISTEMOV

Glede na tip uporabljenih rastlin ločimo sisteme s prosto plavajočimi in s potopljenimi makrofiti.

### 2.3.1 ERM Sistemi s prosto plavajočimi makrofiti

Najpogostejši so sistemi z vodno hijacinto (*Eichornia crassipes*), pojavljajo pa se tudi sistemi z vodno lečo (*Lemna* spp.) ali drugimi prosto plavajočimi rastlinami (Slika 1). Nujno je redno odstranjevanje biomase.



Slika 1: Shema ERM sistema s prosto plavajočimi makrofiti (Bulc in Vrhovšek, 2007).

Vloge korenin vodne hijacinte so:

- med koreninami se voda umiri, kar poveča usedanje delcev.
- na koreninah je bogata razrast mikroorganizmov, ki pomagajo pri čiščenju, saj se nanje lovijo hranljivi delci.
- skozi korenine se v rizosfero dovaja kisik. To poveča intenzivnost nitrifikacije in drugih aerobnih procesov v vodi pod rastlinami.
- zaradi senčenja je onemogočen razvoj alg v vodi pod rastlinami.

Globina vode naj bi bila največ 1 m. V primeru anoksij je včasih potrebno prezračevanje, kar prepreči tudi težave s smradom. Omejitev za sistem z vodno hijacinto predstavljajo nizke temperature. V nasprotju z njo lahko vodna leča uspeva, vse dokler so temperature vsaj nekaj stopinj nad lediščem (Campbell in Ogden, 1999). Ti sistemi se pogosto uporabljajo kot terciarno čiščenje (Kadlec in sod., 2000).

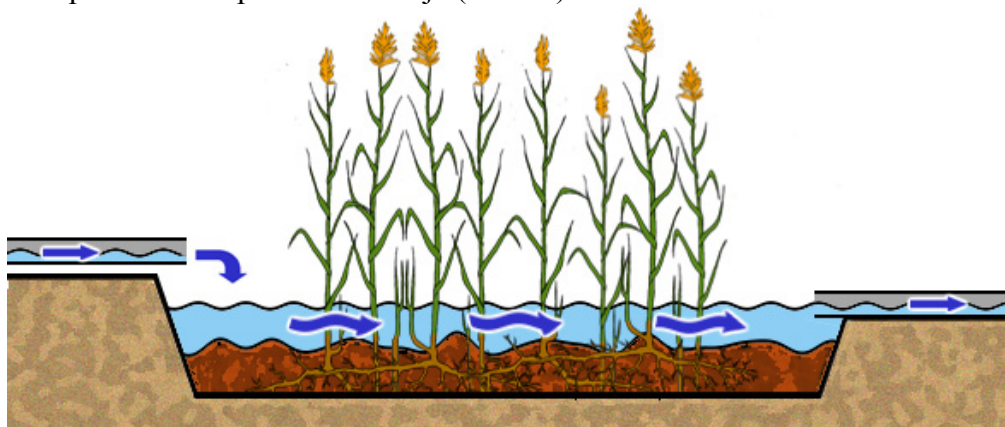
### 2.3.2 ERM sistemi s potopljenimi makrofiti

Potopljene rastline lahko sprejemajo hranilne snovi direktno preko površine ali preko korenin. Fotosinteza poveča vsebnost kisika v vodi. Med rastlinami se voda umiri, kar poveča usedanje delcev. Pomembno vlogo pri čiščenju ima na rastline pritrjena mikrobná združba. Ta način je primeren le za manj obremenjene vode, saj mora biti vsebnost kisika in prosojnost dokaj visoka, da rastline lahko uspevajo (Campbell in Ogden, 1999).

Glede na način pretoka delimo te sisteme na sisteme s površinskim in podzemnim tokom

#### 2.3.2.1 ERM sistemi s površinskim tokom vode (ang. surface flow, FWS)

To so sistemi plitvih bazenov ali kanalov, zasajenih s potopljeno vegetacijo. Uporablja se ukoreninjene potopljene rastline (*Scirpus* spp., *Eleocharis* spp., *Cyperus* spp., *Carex* spp., *Juncus* spp. itd.) ali ukoreninjene rastline s plavajočimi listi (*Nymphaea* spp., *Nuphar* spp.). Delci se usedajo, ali pa že v samem vodnem stolpcu vstopajo v biogeokemične cikle, ki so zelo pomembni v procesu čiščenja (Slika 2).



Slika 2: Shema ERM sistema s potopljenimi makrofiti s površinskim tokom vode (Bulc in Vrhovšek, 2007).

### 2.3.2.2 ERM sistemi s tokom vode pod površino (ang. Reed Bed Treatment System, RBTS v Evropi in Vegetated Submerged Bed, VSB v ZDA)

Ti sistemi bolje prenašajo hladne zime in potrebujejo nekoliko manjše površine kot sistemi s površinskim tokom (Urbanc-Berčič in sod., 1998). Ni problemov z insekti ali smradom. Petdeset do osemdeset centimetrov globoke bazene (grede) zapolnijo z mešanico gramoza, peska, mivke, zemlje in šote v primernih razmerjih (Urbanc-Berčič in sod., 1998; Urbanc-Berčič in Bulc, 1995; Vrhovšek in sod., 1996, Bulc in sod., 1997). To je substrat za ukoreninjenje rastlin in pritrnitev obrasti - mikroorganizmov. Po podatkih raziskav prihaja pri plitvejših sistemih do problemov zaradi zmrzali, pri globljih pa je pri dnu nezadosten preplet korenin (Herlič, 1993). Grede imajo 1-4 stopinje naklona, da voda lahko počasi pronica proti iztoku.

Najpogosteje se uporabljajo: navadni trst (*Phragmites australis*), sitec (*Scirpus* spp.) in rogoz (*Typha* spp.). Pojavljajo se tudi *Phalaris arundinacea* in *Glyceria maxima*.

Pomemben korak je predčiščenje. S tem zmanjšamo vsebnost delcev v vodi, ki so najpogostejši vzrok mašenja. Za odlaganje blata in ostankov rastlin potrebujemo kompostno gredo.

Učinkovitost narašča prvih pet let delovanja na račun vzpostavljanja polne zaraščenosti in prilagajanja rastlin in biofilma na sestavo čiščene vode. Prava zrelost je dosežena, ko RČN deluje s stabilno učinkovitostjo (Bulc, 1998).

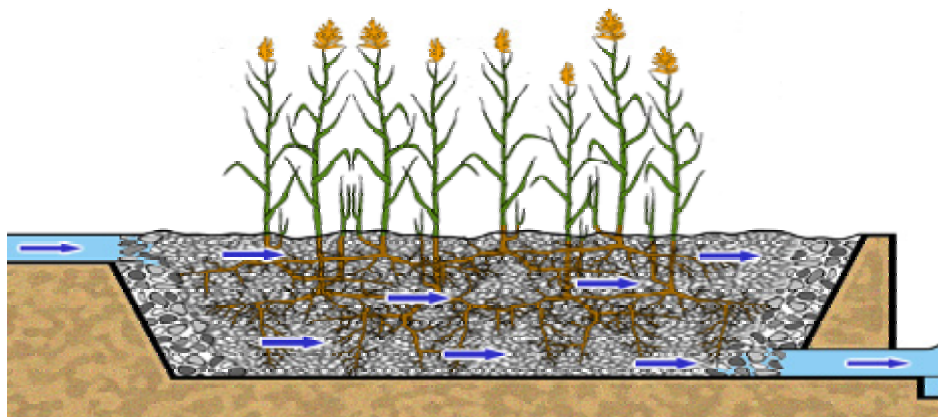
Kisik prihaja v substrat z difuzijo iz zraka, nekaj pa tudi z difuzijo iz korenin. Difuzija iz korenin ne zadošča za popolno oksigenacijo rizosfere, tako da je v sicer anoksičnem substratu množica aerobnih žepov. Pomanjkanje kisika ima za posledico nepopolno nitrifikacijo. Za učinkovitejše čiščenje vodo pogosto dvakrat prečrpamo skozi sistem.

Ločimo več različnih izvedb tega sistema, ki se razlikujejo po smeri toka vode.

#### 2.3.2.2.1 Sistemi s horizontalnim tokom vode pod površino (HS ali HSF)

Na začetku dovedena voda horizontalno teče skozi medij. Navadno je tak sistem sestavljen iz več zaporednih gred. Prva greda ima najbolj grob substrat. Tu se odstranijo večji delci, kar zmanjša nevarnost mašenja nadaljnjega sistema. Substrat zadnje grede je navadno najbolj fin in ima najmanjšo prevodnost.

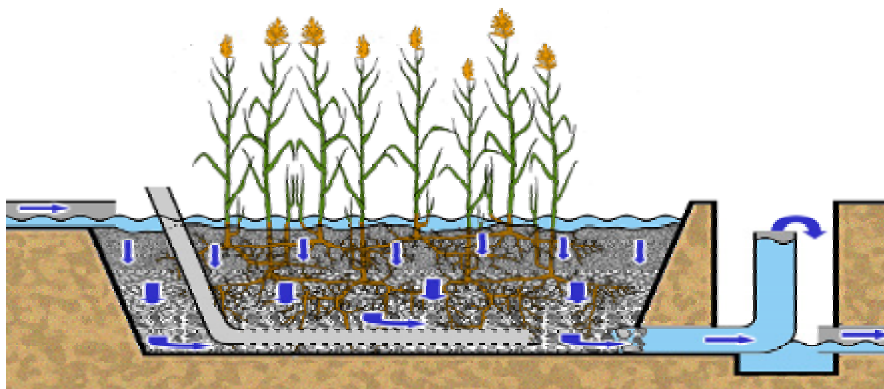
Pomanjkljivost tega sistema je nezadostna prezračevanost rizosfere, saj s tokom vode skozi gredo prehajajo vanjo le zanemarljive količine kisika. Posledica je nepopolna nitrifikacija. Sistem je učinkovit pri nižanju vsebnosti neraztopljenih snovi, pa tudi KPK, BPK<sub>5</sub>, težkih kovin, fekalnih bakterij in uravnavanju pH. Manj učinkovit je za odstranjevanje dušika in fosforja. Priporočeno razmerje med dolžino in širino je 1:3 (Slika 3). Najpogosteje uporabljene makrofite so *Phragmites australis*, pa tudi *Iris*, *Schoenoplectus*, *Spharagnum*, *Carex*, *Typha* in *Acorus* (Campbell in Ogden, 1999).



Slika 3: Shema ERM sistema s potopljenimi makrofiti s horizontalnim tokom vode pod površino (Bulc in Vrhovšek, 2007).

#### 2.3.2.2.2 Sistemi z vertikalnim tokom vode pod površino

Principi čiščenja so enaki kot pri HSF. Drugačna je zgradba in način polnjenja gred s substratom. Tu je substrat najbolj drobno zrnat na površini in globlje vse bolj grob. To omogoča enakomerno razporeditev vode po površini. Globlje plasti so običajno prezračevane s pomočjo prezračevalnih cevi (Slika 4).



Slika 4: Shema ERM sistema z emergentnimi makrofiti z vertikalnim tokom vode pod površino (Bulc in Vrhovšek, 2007).

Vodo dovajajo v pulzih: gredo preplavijo z večjo količino vode in nato pustijo, da zaradi gravitacije počasi ponikne proti dnu grede. Pred naslednjim polnjenjem je nekaj časa suha, da se prezrači in se mineralizira tanka plast trdnih delcev, ki je nastala na površini. Najpogosteje se uporablja več vzporednih gred, ki se izmenično polnijo in praznijo.

Ta sistem je veliko bolj aeroben in zato boljši pri odstranjevanju dušika. O večjih koncentracijah kisika v sistemih z vertikalnim tokom vode poroča tudi Kukanja (1999) in Bulc (1998). Proces nitrifikacije-denitrifikacije pa tudi tu večinoma ne uspe poteči v celoti. Ta sistem je v primerjavi s sistemom s horizontalnim tokom manj učinkovit pri nižanju vsebnosti neraztopljenih snovi. Priporočljive so nekajdnevne prekinitve toka vode (Bulc, 1998). Najpogosteje uporabljen makrofit je navadni trst (*Phragmites australis*).



### 2.3.2.2.3 Hibridni sistemi

To so vse pogosteje rabljene kombinacije sistemov z vertikalnim in horizontalnim tokom. Omogočajo boljše odstranjevanje dušika in ostalih snovi iz vode (Campbell in Ogden, 1999).

### 2.3.3 Sistemi za čiščenje in zadrževanje meteornih vod

Vse pogosteje se zgrajena močvirja uporabljajo za čiščenje vode, ki se ob deževju spira s cest (Slika 5) in za zadrževanje vode na poplavnih območjih. Količina vode tu zelo niha, obremenjenost pa navadno ni tako visoka (Campbell in Ogden, 1999).



Slika 5: Čistilni objekt pri Radencih (foto Petra Kralj, citat po Kranjc, 2007).

## 2.4 GLAVNI DEJAVNIKI ČIŠČENJA PRI SISTEMIH S TOKOM VODE POD POVRŠINO

Pri čiščenju vode sodeluje več med seboj povezanih procesov (Kadlec in sod., 2000):

- usedanje neraztopljenih delcev na dno, v substrat in na rastlinske dele,
- filtracija in kemično obarjanje,
- adsorbcija in ionska izmenjava na površinah rastlin, rastlinskih ostankov, substrata in sedimenta,
- kemične pretvorbe,
- razgradnja, pretvorbe in vgrajevanje onesnaževal in hranil z mikroorganizmi in rastlinami,
- predacija in naravno odmiranje patogenih organizmov.

Najbolj učinkovite ERM so tisti, ki najbolj pospešijo te procese.

### 2.4.1 Substrat

Substrat je lahko iz različnih materialov, odvisno od vrste ERM sistema. V večini primerov so to naravna tla. V umetno zgrajenih lagunah, pa se substrat pripravi kot mešanico

različnih naravnih materialov. V nekaterih primerih čistilnih naprav se za substrat uporablja tudi umetne mase.

Omogoča:

- filtracijo vode.
- adsorbcijo delcev.
- oporo za ukoreninjenje rastlin in naselitev mikroorganizmov.

Pravilna izbira substrata je zelo pomembna za dobro delovanje in preprečevanje mašenja sistema. Zaradi razraščanja korenin in usedanja organskih delcev se v prvih letih delovanja precej zmanjša volumen por med delci substrata. Ob pravilni izbiri substrata večjih težav z mašenjem navadno ni. Do mašenja sistema lahko prihaja iz različnih vzrokov. Zaradi usedanja neraztopljenih snovi, zaradi debeljenja biofilma na substratu in posledično zmanjšane prevodnosti, redkeje tudi zaradi obarjanja in usedanja delcev ali zaradi velike produkcije plinastih mehurčkov v gredah. Prevodnost se pri zrelem sistemu navadno ustali in ne upada več. V primeru problemov z mašenjem zaradi bogate mikrobne obrasti je priporočljivo občasno izsuševanje substrata, kar zelo poveča prepustnost gred za pronicanje vode skozi (Lewandowski in DeFilipi, 1998).

Najpomembnejša je velikost delcev v substratu, pa tudi njegova sestava. Običajno se uporablja mešanice gramoz, peska, mivke, šote in zemlje v ustreznih razmerjih (Herlič, 1993). Z manjšanjem premera delcev narašča površina za pritrditev mikroorganizmov in se manjša prevodnost sistema. Melj ima veliko specifično površino in sposobnost kapilarnega dviga vode. Glineni delci so najmanjši imajo zelo veliko specifično površino zaradi česar imajo veliko kationsko izmenjalno kapaciteto in s tem sposobnost zadrževanja vode in drugih snovi. Slabosti gline so da upočasnjuje gibanje zraka in vode ter mašijo sistem zato se jih v substratu praviloma ne uporablja. V ERM sistem pridejo z vodo, katera teče skozenj.

Bolj grob substrat učinkoviteje odstranjuje neraztopljene snovi, a je manj učinkovit pri manjšanju BPK<sub>5</sub>. Na učinkovitost vpliva tudi vsebnost organskih in anorganskih snovi v substratu (Šot, 1992). Za izboljšanje odstranjevanja fosforja in kovin lahko mediju dodajamo šoto, kalcit, jalovino z aluminijevimi ali železovimi oksidi itd. S trajanjem poplavljenosti in večanjem globine vode narašča anoksija in njeni vplivi na fiziologijo organizmov. Poleg pomanjkanja kisika v tleh pride tudi do upada pH, naraščanja koncentracij reduciranih in toksičnih snovi itd. (Kadlec in sod., 2000).

#### **2.4.2 Pomen makrofitov in značilnosti najpogosteje uporabljenih vrst**

Rastline naj bi opravile okoli 20 % čiščenja. Skupaj s substratom in mikroorganizmi tvorijo odličen puferski sistem. So posredniki med biotskimi in abiotskimi faktorji. Pomen substrata je pomemben za delo mikroorganizmov, ki opravijo glavno nalogo pri razgradnji organskih ostankov ( mineralizacija), da lahko rastline te snovi sprejmejo kot hranila. Najpomembnejši so fizikalni učinki rastlinskih organov (Herlič, 1993):

- filtrirajo onesnaženo vodo,
- tvorijo veliko površino za pritrditev mikroorganizmov,



- preprečujejo erozijo,
- razraščanje korenin rahlja substrat in tvori v njem kanale. S tem preprečujejo mašenje,
- korenine upočasnijo tok vode, kar poveča usedanje delcev,
- dovajajo kisik v rizosfero,
- s senčenjem preprečuje razvoj alg v sistemih s površinskim tokom vode. Manjša vsebnost planktonskih alg ima za posledico manjšo koncentracijo neraztopljenih snovi na iztoku.
- zaradi evapotranspiracije se zmanjša količina vode (poleti povprečno 0,5 cm/dan).
- zagotavljajo vir ogljika, ki ga nekateri heterotrofi potrebujejo za pretvorbe hranilnih snovi,
- odpadli deli rastlin pozimi ščitijo tla pred zmrzovanjem,
- vplivajo na prehajanje svetlobe, temperaturo in vlago v okolju.

Pomen metabolizma makrofitov je večinoma manjši:

- vgrajevanje snovi. Odvisno je od vrste RČN in vrste onesnaževala,
- sproščanje alelokemikalij.

Poleg tega so rastline pomembne zaradi estetskega izgleda, kot bivališče različnih živali in zaradi zmanjševanja vetra ter hrupa (ekološki učinek). Da vzpodbudimo rast korenin v globino, lahko za nekaj časa znižamo gladino vode v gredi. Za uspešno rast je potrebno, da so prisotna vsa hranila v pravih razmerjih. Za intenzivno rast in aktivnost organizmov priporočajo razmerje C:N:P od 100:10:1 do 100:1:0,5. Alge imajo pri procesu čiščenja navadno majhen pomen. Vplivajo na količino raztopljenega kisika, povečajo količino biomase itd. Močvirski makrofiti imajo največjo fotosintezo pri visoki osvetljenosti in visokih temperaturah. Njihove korenine imajo v poplavljenih, anoksičnih tleh težke pogoje za preživetje. Predvsem zaradi visokih koncentracij reduciranih fitotoksičnih snovi ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $H_2S$ , organske kisline itd.) morajo imeti rastline posebne prilagoditve, da lahko preživijo. Zračno tkivo (aerenhim) je med najpomembnejšimi prilagoditvami. Skozenj se v podzemne dele dovaja kisik in odvajajo plini kot so  $CO_2$ ,  $H_2S$  in  $CH_4$ . Nekaj kisika lahko zaradi koncentracijskega in tlačnega gradienta prehaja tudi skozi polomljena stebela navadnega trsta (tudi pozimi).

Večino v tla prenesenega kisika porabijo podzemna tkiva rastlin, nekaj ga lahko skozi končiče korenin prehaja tudi v rizosfero. Tam oskrbuje mikroorganizme, povzroči dvig redoks potenciala in zmanjšanje koncentracije strupenih snovi v neposredni okolici korenin. Raziskovalci poročajo, da ima biofilm na rizomih večjo sposobnost nitrifikacije kot biofilm na substratu (Kukanja, 1999). Aerobni in anaerobni organizmi tako lahko živijo na istem območju, kar je idealno za odstranjevanje dušika (Campbell in Ogden, 1999; Kadlec in sod., 2000). V sistemih s tokom vode pod površino se uporablja več vrst rastlin. Pri izbiri je potrebno upoštevati globino grede, klimo, naravno vegetacijo, stroške sajenja in vzdrževanja, hitrost rasti itd. Najpogosteje uporabljene so:

**Vodna hijacinta** (*Eichornia crassipes*) je doma v Severni Ameriki. Zaradi izredno hitre rasti in morfologije lahko učinkovito odstranjuje onesnaževala iz vode. Je rozetaste oblike, z debelimi listi in gostimi, do 45 cm dolgimi koreninami. Lahko se ukorenini ali prosto plava na površini. Pri tem se korenine iztezajo navzdol v vodo, kjer zelo učinkovito

absorbirajo onesnaževala. Njena rast je prekinjena, čim temperatura upade pod 10°C, zato se jo pogosto uporablja v steklenjakih. Vodna hijacinta je med najbolj produktivnimi in najhitreje množječimi se vrstami na svetu. V eni rastni sezoni lahko dobimo iz desetih 60.000 rastlin in v osmih mesecih prekrijejo površino 0,4 ha.

**Navadni trst** (*Phragmites australis*) je vrsta, ki jo v Evropi na ERM sistemi najpogosteje uporabljajo. Rast je obilna, korenine segajo do globine 75 cm. Pod zemljo ima razrasle rizome, ki imajo založno funkcijo. Nadzemni deli pozimi propadejo. Zgodaj pomladi poženejo poganjki in v 2-3 mesecih zrastejo do višine 2-3 m (Kadlec in sod., 2000). Delež podzemnih delov pri globini 30 cm globine zaseda kar tretjino prostora med delci substrata. Cveti med julijem in oktobrom. Do drugih vrst je zelo kompetitiven. Zelo učinkovito dovaja kisik v podzemne dele. Iz trstičja izhlapi tudi 15 l/m<sup>2</sup>/dan vode. Pri eno leto starem sestoju je Kukanja (1999) izmerila izhlapevanje vode 11,9 l/m<sup>2</sup>/dan, Herlič pa (1993) 3,7 l/m<sup>2</sup>/dan. Ob zasaditvi priporočajo gostoto 2-6 rastlin na kvadratni meter.

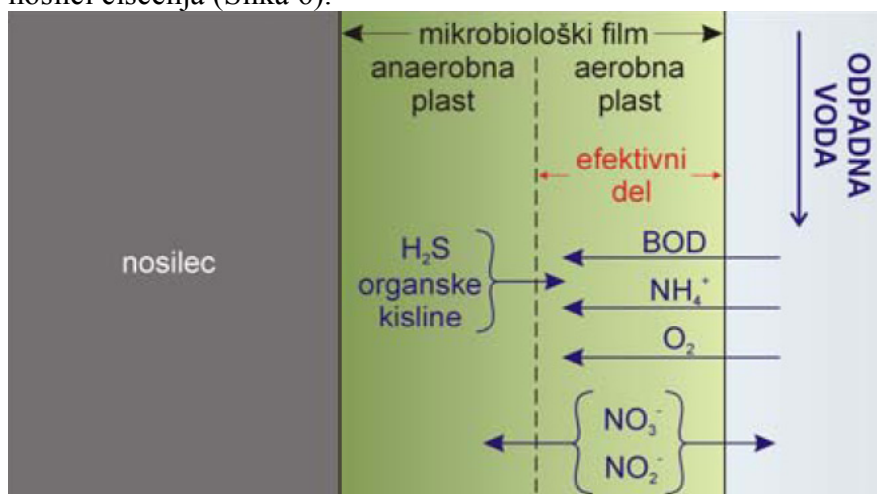
**Jezerki biček** (*Scirpus lacustris* L.) je najpogosteje uporabljena vrsta v Severni Ameriki. Niso tako razširjeni po svetu in rasejo počasneje kot rogoz, a imajo korenine do globine 90 cm in učinkovito prezračujejo tla. Tolerirajo široko območje pH. Lahko rasejo tudi v nekoliko globlji vodi in preživijo občasne poplave. So manj agresivni kot rogoz in trst. Večja rastišča v Sloveniji najdemo na Cerkniškem jezeru.

**Rogoz** (*Typha spp.*) je razširjen po vsej severni polobli. Uspeva v širokem področju podnebnih in drugih rastnih razmer. Od rastlin, ki se uporabljajo v teh sistemih, ima največjo produkcijo biomase na enoto površine. Korenine so le do globine 30 cm, a zelo goste. V močvirjih pogosto izpodriva druge vrste.

**Šaši** (*Carex spp.*) imajo korenine so šopaste, dokaj plitve in goste. Tudi pri šaših so opazili konvektiven tok zraka skozi tkiva.

### 2.4.3 Mikroorganizmi

ERM je posebna vrsta mikrobnege filtra. Biofilmi, ki nastanejo na substratu in rastlinah, so nosilci čiščenja (Slika 6).



Slika 6: Shematski prikaz mikrobiološkega filma (Anžič in Kapun, 2002).

Pri pritrjenih mikroorganizmih se razvijejo bolj pestre mikrobne združbe z obligatnimi simbionti itd. To je nujno za popolno razgradnjo množice različnih snovi. Poleg tega so taki sistemi manj občutljivi na zunanje dejavnike, kot je na primer temperatura (Lewandowski in DeFilipi, 1998). Mikrobne populacije imajo pomemben vpliv na kemizem močvirskih tal. Povzročajo pomembne pretvorbe dušika, železa, žvepla in ogljika. Na potek teh procesov močno vplivajo koncentracije reaktantov, redoks potencial in pH v tleh. Pomembno je, da se vzpostavi zrela, prilagojena mikrobna združba (Kadlec in sod., 2000). Rastline potrebujejo za popolno razrast do 5 let, mikroorganizmi pa zahtevajo za popolno adaptacijo nekaj mesecev.

V tleh z večjo mikrobiološko aktivnostjo je večji potencial za odstranjevanje dušika. V ERM so najbolj številne denitrifikacijske bakterije, nekaj manj je amonifikacijskih, daleč najmanj pa nitrifikacijskih (Šot, 1992). Običajno so najbolj učinkoviti naravno prisotni mikroorganizmi. V nekaterih primerih je uspešno tudi dodajanje umetno vzgojenih mikroorganizmov (bioaugmentacija).

## 2.5 KROŽENJE SNOVI IN ODSTRANJEVANJE SNOVI IZ ČIŠČENE VODE V ERM SISTEMU S TOKOM VODE POD POVRŠINO

Močvirski ekoremediacijski sistemi so med najbolj produktivnimi na svetu. Veliko produkcijo biomase omogoča obilje vode in svetlobe, pogosto pa tudi obilje hranilnih snovi. Rastline so prilagojene tako, da je fotosinteza največja pri visoki osvetljenosti in visoki temperaturi. Podzemni deli se soočajo z neugodnim anoksičnim okoljem. Topnost kisika v vodi je dokaj slaba. Pri 5°C je ob nasičenju v vodi raztopljenega 12,8 mg/l kisika, pri 25°C pa le še 8,4 mg/l. Mejna vsebnost kisika v vodi za preživetje večine aerobnih organizmov je 0,3 do 0,7 mg/l. Za nemoten potek aerobnih procesov koncentracije nikoli ne bi smele pasti pod 2 mg/l (Lewandowski in DeFilipi, 1998). Med povsem anaerobnimi pogoji in koncentracijo raztopljenega kisika pod 2 mg/l živi posebna življenjska združba (Rejic, 1983). Dovajanje kisika skozi korenine zelo spremeni gradient redoks potenciala v poplavljenih tleh. Posledično lahko v tleh vzporedno poteka več različnih kemijskih procesov. Kadlec in sod. (2000) obširneje opisujejo zvezo med količino raztopljenega kisika in ustrežajočimi kemičnimi pretvorbami v tleh. V ERM potekajo samočistilni procesi, ki so značilni tudi za naravna mokrišča (Vrhovšek in sod., 1996). Ti procesi so:

### Fizikalni:

- sedimentacija,
- filtracija med delci substrata in koreninami,
- adsorbcija odpadnih snovi zaradi privlačnih sil med delci,
- hlapenje.

### Kemični:

- obarjanje,
- adsorbcija odpadnih snovi na delce substrata in korenine,
- razgradnja ali pretvorba manj stabilnih snovi zaradi oksidacije, redukcije, obsevanja z UV svetlobo v vrhnji plasti substrata.

### Biološki:

- metabolizem mikroorganizmov in rastlin,
- sprejem snovi v rastlin,
- naravno odmiranje patogenih organizmov zaradi neprimerne in spremenljivega okolja,
- stalno prilagajanje novim okoljskim pogojem.

Celotne trdne snovi v vodi delimo na raztopljene in neraztopljene ali suspendirane snovi. Raztopljene trdne snovi ostanejo v vodi po filtraciji. Lahko vključujejo tudi koloide. Neraztopljene snovi so tiste, ki jih lahko odstranimo s filtracijo ali centrifugiranjem. Pod usedljive trdne snovi štejemo delež neraztopljenih trdnih snovi, ki jih lahko odstranimo z usedanjem v določenem času pod določenimi pogoji (Kukanja, 1999). Količina neraztopljenih snovi v surovih komunalnih odpadnih vodah je praviloma dober pokazatelj organskega bremena. Veliko usedljivih snovi se odstrani že na stopnji predtretiranja (Imhoffovi ali sedimentacijski bazeni). V RČN se večina usedljivih snovi zaradi filtracije in usedanja izloči že v prvih metrih v toku, neraztopljene in koloidne snovi pa vsaj delno odstranijo bakterije in adsorbcija na druge trdne delce. To je bistvenega pomena za učinkovitost čiščenja, ki je za RČN običajno med 80 in 90 % (Campbell in Ogden, 1999).

### **2.5.1 Organska snov v vodi**

ERM imajo praviloma veliko učinkovitost odstranjevanja neraztopljenih snovi in  $BPK_5$  (Vrhovšek in sod., 1996). Količino organskih snovi v vodi določamo največkrat posredno, preko merjenja količine kisika potrebnega za njihovo oksidacijo. Najpomembnejše meritve so  $BPK_5$ , KPK in TOC. Celoten ogljik v vzorcu ločimo na anorganski ogljik (karbonat, bikarbonat in raztopljen  $CO_2$ ) in organski ogljik (TOC). Usedljive snovi se odstranijo z usedanjem in filtracijo, raztopljene snovi pa odstranijo mikroorganizmi ali absorbirajo makrofiti. Razgradnja organskih snovi poteka aerobno in anaerobno. Slednja je veliko počasnejša. Pri razgradnji organskih snovi nastajajo organske kisline. Zniža se pH, kar je lahko vzrok za zmanjšanje ali preprečitev razgradnje nekaterih snovi. Temperatura na učinkovitost nižanja  $BPK_5$  nima večjega učinka (Kadlec in sod., 2000). To omogočata usedanje, ki prevlada nad mikrobno razgradnjo ali zadosten zadrževalni čas, ki zabiše vpliv temperature (Bulc, 1998).

### **2.5.2 Mineralne snovi v vodi**

#### 2.5.2.1 Dušik

Dušik v organsko obremenjenih vodah delimo na organsko vezan dušik in anorganski dušik (nitrat, nitrit, amoniak in raztopljen  $N_2$ ). Vse oblike se v naravnih sistemih pretvarjajo iz ene v drugo in tvorijo cikel kroženja dušika.

Med mehanizme odstranjevanja dušikovih spojin sodijo: nitrifikacija/denitrifikacija, izhlapevanje, amonifikacija, sprejem v rastline, adsorbcija na matriks. Najpomembnejši je mikrobni proces nitrifikacije/denitrifikacija.

**Amonifikacija** ali mineralizacija dušikovih spojin je razgradnja organskih dušikovih spojin do anorganskih snovi. Opravljajo jo aerobni, nekaj manj pa tudi anaerobni mikrobi. Nastane amoniak, ki ga nato v procesu **nitrifikacije** aerobne nitrifikacijske bakterije oksidirajo v nitrit. Tega nato fakultativne kemolitotrofne bakterije pretvorijo v nitrat. Fakultativno anaerobni mikroorganizmi v anaerobnih pogojih v procesu **denitrifikacije** reducirajo nitrat v dušikov oksid ( $N_2O$ ) ali molekularni dušik ( $N_2$ ) (Kadlec in sod., 2000).

Na amonifikacijo, nitrifikacijo in denitrifikacijo pomembno vplivajo tudi temperatura, pH, redoks potencial, prisotnost organskih snovi, prisotnost ustreznih bakterij itd. Pod temperaturo  $5^{\circ}C$  je odstranjevanje dušika zelo počasno ali v celoti sploh ne poteka. Optimalna temperatura za nitrifikacijo je 30 do  $40^{\circ}C$ , optimalen pH pa je 7,5-8,6 (Campbell in Ogden, 1999).

Teoretično je za oksidacijo 1 mg amonijevega dušika do nitrata potrebnih 4,6 mg  $O_2$ . Za dober potek nitrifikacije koncentracije kisika v vodi ne bi smele pasti pod 2 mg/l. Ob zaustavitvi nitrifikacije se v tleh kopiči amonijev dušik. Prost amonij ali amoniak lahko že pri nizkih koncentracijah inhibirata delovanje nitrifikantov (Kukanja, 1999).

Za učinkovito nitrifikacijo/denitrifikacijo so torej potrebni najprej aerobni in nato anaerobni pogoji. V poplavljenih tleh je dovolj aerobnih žepov, tako lahko oba procesa tečeta sočasno. Količina amoniaka, ki izhlapi, je premo sorazmerna s koncentracijo v vodi raztopljenega  $NH_4^+$ . Hlapnost je zelo zmanjšana, če je pH nižji od 7,5. Z naraščanjem pH vse bolj prevladuje amonij, ki se obenem sprošča v atmosfero (Kukanja, 1999). Pomembna je tudi temperatura, hitrost vetra, sončnost, vrsta in gostota rastlin (Campbell in Ogden, 1999).

Količina dušika, ki ga sprejmejo rastline, je omejena z neto produktivnostjo rastlin in koncentracijo dušika v tkivih. Letno lahko z žetvijo navadnega trsta odstranimo okoli 1000 do 2500 kg dušika na hektar, z vodno hijacinto pa do 6000 kg na hektar (Kadlec in sod., 2000). Večinoma so te količine glede na količino dušika v odpadni vodi zanemarljive (največ 10 do 16 %). Količino v trstu akumuliranega dušika in fosforja je preučeval tudi Vrhovšek s sodelavci (1996). V primeru, da rastlinskega tkiva ne odstranjujemo, se ob razgrajevanju odmrlega tkiva sproščena hranila vračajo v vodo (Campbell in Ogden, 1999).

**Adsorbpcija na matriks** je pretežno reverzibilen proces. Količina na substrat vezanega dušika je premo sorazmerna s količino amoniaka v vodi. Odrasel prebivalec prispeva dnevno okoli 13 g dušika, za odstranitev katerega je potrebnih okoli 56 mg kisika (Rejic, 1983).

#### 2.5.2.2 Fosfor

Fosfor je v vodah vezan v organskih snoveh in kot anorganski ortofosfat. Zaradi biološke razgradnje se večina organsko vezanega fosforja spremeni v ortofosfat. Odstranjevanje fosforja poteka z adsorbpcijo, absorbcijo v rastline, vezavo v komplekse in obarjanjem. Najpomembnejša je akumulacija v substratu. Koliko fosforja se bo lahko vezalo na substrat, je odvisno od vsebnosti železovih ter aluminijevih oksidov in hidroksidov,  $CaCO_3$

in metalo-organskih kompleksov v substratu. Ob začetku je učinkovitost vezave navadno največja. S časom pride do nasičenja in je potrebna zamenjava substrata. Zelo pomembna sta tudi pH in redoks potencial. Ob anoksičnih razmerah lahko pride do sproščanja fosforja iz substrata. V koreninski coni zvišan redoks potencial in izločki humusnih snovi kot so: huminske kisline, fulvo kisline in druge organske kisline iz korenin povečajo vezavo fosforja na sediment, ali pa korenine omogočijo povečanje porabe fosforja v mikrobnih združbi (Kukanja, 1999). Kapaciteta sprejema v makrofite je manjša kot za dušik, saj je vsebnost fosforja v rastlinah precej nižja, kot je vsebnost dušika. Z žetvijo makrofitov lahko letno odstranimo do 150 kg P na hektar, pri vodni hijacinti do 359 kg P na hektar. Sezonska in temperaturna nihanja imajo na odstranjevanje fosforja majhen vpliv (Kadlec in sod., 2000).

### 2.5.2.3 Kovine

Nekatere kovine so za organizme nujno potrebne, druge povzročajo težave, tretje so nevarne in strupene. Pogosto so v nizkih koncentracijah nujno potrebne, v visokih koncentracijah pa strupene. Kovine, ki se v vodi pojavljajo kot onesnažila se iz vode odstranijo v procesih sedimentacije, filtracije, adsorpcije na rastline in substrat, vezavo v komplekse, obarjanja, ionske izmenjave, sprejema v rastline in mikrobne delovanja. Pomembna je hitrost toka in vsebnost raztopljenih snovi, vsebnost kisika, ionska jakost, pH, vsebnost organsko vezanega ogljika, koncentracij organskih in anorganskih ligandov in mobilizacija kovin v biokemičnih reakcijah. Večina bakterij povzroči odstranjevanje kovin iz vode preko vpliva na pH ali redoks potencial v tleh. Mikrobna pretvorba je najpogostejši vzrok transformacij kovin v topni obliki. Oksidirane se oborijo in usedajo v substrat kot oksidi ali sulfidi. Oborine postanejo topne le pri zelo nizkem pH. Sistemi se s časom navadno nasičijo s kovinami (Campbell in Ogden, 1999).

Pri procesu čiščenja so pomembnejše tiste vrste rastlin, ki so sposobne koncentrirati težke kovine. Največje koncentracije težkih kovin so v koreninah (Zupančič, 2001). Po navedbah v literaturi (Zupančič in Vrhovšek, 1999b) je več raziskav potrdilo stalno upadanje koncentracij kovin kot so Zn, Cr, Cd in Cu ob toku skozi RČN. Kovine se lahko vežejo tudi na karboksilne in druge skupine huminskih kislin in rastlinskih tkiv.

Železo je v poplavljenih tleh pretežno v reducirani fero obliki ( $\text{Fe}^{2+}$ ; sivo), ki je bolje topna in bolj dosegljiva za organizme. Ob prisotnosti kisika in dovolj visokem pH se oksidira v feri obliko ( $\text{Fe}^{3+}$ ; rumeno-rjavo), ki obori. Proces poteče večinoma spontano, delno pa vplivajo tudi mikroorganizmi. Obarjanje je glavni način odstranjevanja železa iz čiščene vode. Železo vpliva tudi na adsorpcijo ostalih kovin (Zupančič, 2001). V anaerobnih pogojih mikrobi reducirajo sulfat do sulfida. Nastali sulfid tvori oborino s kovinami. Ob tovrstni odstranitvi kovin iz vode pride tudi do povišanja pH. Ob reakciji  $\text{Fe}^{2+}$  s sulfidom nastane v tleh črna usedlina ( $\text{FeS}$ ), ki je tipičen pokazatelj anoksičnih razmer v tleh.

### 2.5.2.4 Anionski tenzidi

Surfaktanti (anionski, kationski ali neionski) so molekule, ki imajo hidrofilen in hidrofoben del. Hidrofoben del je navadno iz verige ogljikovodikov (10 do 20 C-atomov). Hidrofilen del je pri anionskih tenzidih negativno nabit radikal, na katerega je z vezjo vezan kation

kot npr.  $(-RSO_3)Na^+$ . Zaradi amfifilnih lastnosti se zadržujejo na meji med polarnim topilom (navadno vodo) in nepolarno okolico. Vplivajo na površinsko napetost in s tem na pritrjanje mikroorganizmov. Predvsem v večjih koncentracijah lahko zaradi delovanja na membrane mikroorganizmov vplivajo na njihovo rast. Povzročajo penjenje, emulzifikacijo in suspendiranje delcev. Biorazgradljive surfaktante mikroorganizmi lahko uporabljajo kot vir ogljika.

Kationski surfaktanti se uporabljajo v dezinfekcijskih sredstvih, kot industrijski mehčalci in v kozmetičnih pripravkih. Poraba anionskih surfaktantov je veliko večja. Uporabljajo se za različna čistila v gospodinjstvih in industriji. V odpadnih vodah iz gospodinjstev je njihova koncentracija običajno med 1 in 20 mg/l, sicer pa jih je v površinskih vodah običajno manj kot 0,1 mg/l. V ERM večinoma povečajo topnost in mobilnost organskih snovi, ki so sicer močno vezane na delce substrata. Uporabo surfaktantov v procesu bioremediacije opisujeta Lewandowski in DeFilipi (1998).

### 2.5.3 Patogeni mikroorganizmi

Zgrajena močvirja zagotavljajo ugodno kombinacijo dejavnikov, ki omogočajo učinkovito odstranjevanje patogenih organizmov. Med patogene organizme štejemo bakterije, viruse, protozoje in helminte.

Dejavniki, ki vplivajo na njihovo odstranjevanje so (Campbell in Ogden, 1999):

- Fizikalni: mehanska filtracija, sedimentacija.
- Kemični: oksidacija, UV sevanje, izpostavljenost biocidom, ki jih izločajo nekatere rastline, adsorbcije na organske snovi.
- Biološki: antibioza, predacija nematodov, protistov in zooplanktona, napad litičnih bakterij in virusov, naravno odmiranje.

Veliko učinkovitost odstranjevanja koliformnih bakterij in fekalnih streptokokov potrjujejo tudi analize opravljene v Sloveniji (Urbanc-Berčič in Bulc, 1995; Vrhovšek in sod., 1996; Bulc in sod., 1998).

### 2.5.4 Druge snovi

V preteklih raziskavah so opazili pri toku skozi ERM tudi znižanje vsebnosti benzena, fenolov, policikličnih aromatskih ogljikovodikov, hlapnih organskih snovi itd. in zmanjšanje toksičnosti (Kadlec in sod., 2000). Substrat nudi veliko površino za naselitev raznolikih mikrobnih združb, ki omogočajo razgrajevanje težko razgradljivih in strupenih snovi.



### 3 MATERIAL IN METODE DELA

#### 3.1 ZNAČILNOSTI OBMOČJA

Lokacija, kjer smo preučevali izpust odpadnih voda v ponikalnico se nahaja na Notranjskem, na kraškem Unško-Rakovškem polju (Slika 7). Sprva so to polje imeli za primer uvale, a je tipično kraško polje, ki poplavlja tudi pozimi. Zanimivo je, da ležijo vsa notranjska kraška polja na kontaktnih apnenca in dolomita (Šušteršič, 1996). Povprečne letne padavine za obdobje od 1960-90 merjene v pet kilometrov oddaljeni Cerknici so 1796 mm (Hidrometeorološki inštitut Ljubljana, 2004). Zemljepisna širina je 45°49', zemljepisna dolžina pa 14°18' (Atlas Slovenije, 1996).



Slika 7: Zemljevid z označenim mestom ERM sistema (Atlas Slovenije, 1996).

Med vetrovi sta najpogostejša: SV, ki prinaša suho in hladno vreme ter JZ, ki prinaša toplo in vlažno. Glede na to da predstavlja tukajšnji del Dinarskega gorstva (Javorniki, Slivnica, Planinska gora) prvo večjo oviro JZ zračnim masam, ki prihajajo iz Sredozemlja, se ob dvigovanju pojavijo orografske padavine, od tu tudi velika količina letnih padavin. Obilnejša obdobja padavin so spomladi in jeseni. Talni in klimatski pogoji so primerni za gozdarstvo in živinorejo, ki pa je zelo ekstenzivna, kar je pomembno prispevalo k veliki ohranjenosti naravnega okolja.



### 3.2 OPIS PONIKALNICE

Ponikalnica se nahaja na južni strani vznožja hriba Veliki Orljek (Slika 8). Ob iztoku iz cevi v ponikalnico, je sprva ta široka 5m, ki se po dvajsetih metrih razdeli v dva kraka, ki tvorita dve devet metrov široki laguni. Globina ponikalnice ob iztoku iz cevi je en meter pod nivojem okoliškega polja in proti koncu obeh krakov doseže tri metre in pol. Tudi sama konfiguracija okoliškega terena je nekoliko nagnjena proti koncu obeh krakov ponikalnice. S tem dobimo potreben padec za gravitacijsko pretočnost ERM sistema proti koncu ponikalnice.

Na ponikalnico so se same naselile močvirske rastline kot so rogoz (*Typha spp.*), žlezava nedotika (*Impatiens glandulifera*) in rastline, ki uspevajo na bogato založenih tleh s hranili velika kopriva (*Urtica dioica*) in črni bezeg (*Sambucus nigra*) (Slika 8, 9). Ker je dno ponikalnice s časoma prekril mulj voda počasneje ponika. Ob obilnih jesenskih ali pomladanskih padavinah ponikalnico poplavi voda. Zaradi odplak, ki se izlivajo vanjo se iz nje širi neprijeten vonj. V odprtem vodotoku odplak imajo življenjski prostor za razmnoževanje komarji, ki predstavljajo moteč vpliv za bližnje stanovalce.



Slika 8: Pogled z južne strani na obraščeno ponikalnico, v ozadju hrib Veliki Orljek (Foto: Ileršič T., 2006).



Slika 9: Pogled s severne strani na ponikalnico, v ozadju zahodni del Javornikov ob cesti Rakek–Unec (Foto: Heršič T., 2006)

Sčasoma se je Rakek vse bolj večal, z njim se je večala tudi količina meteornih vod. Na sistem za odvodnjavanje meteornih voda se je nelegalno priklopilo tudi veliko gospodinjstev s svojimi odpadnimi vodami. S tem, ko voda odteka onesnažena neposredno v kraško ponikalnico, obremenjuje vire pitne vode za Ljubljansko kotlino, v katere smer se stekajo tukajšnji vodotoki.

### 3.3 FIZIKALNO KEMIJSKE ANALIZE

#### 3.3.1 Odvzem vzorcev in meritve fizikalnih parametrov na vzorčni ponikalnici

Meritve pretokov vode smo izvajali 26.9.2006 do 30.10.2006, vse meritve so predstavljene v preglednici 1. V tem obdobju smo pobrali tudi vzorce potrebne za analizo. Onesnažena voda priteče iz sistema za odvodnjavanje meteorne vode z Rakeka, preko Rakovško-Unškega polja (v dolžini kilometer in pol) po betonski cevi, premer cevi je 0,4 metra. Meritve pretokov smo opravili na iztoku iz cevi v jarek. V prerez jarka je bilo izdelano korito dimenzij 1 m x 0,5 m, zaradi lažjega računanja volumna pretoka (slika 10). Za določanje višine vode smo v tok vode postavili ožjo merilno letev z merilno skalo. Postavljena je bila točno na dolžini enega metra, tako smo obenem lahko odbrali višino vodostaja in dolžino toka vode, ki smo jo potrebovali za merjenje hitrosti. Ko smo plovec postavili v vodo smo hkrati vključili štoparico za določanje, v koliko časa naredi voda pot enega metra. Iz teh podatkov smo izračunali pretok (l/s) (preglednica 1).





Slika 10: Iztok odpadnih voda z Rakeka po cevnem sistemu v ponikalnico, merilno mesto za pretoke in odvzem vzorcev. (Foto: Ileršič T., 2006)

$$Q = (a \times b \times c) / t \quad \dots(1)$$

- Q ..... pretok vode ( m<sup>3</sup> )
- a ..... višina vode ( m )
- b ..... širina vode ( m )
- c ..... dolžina vode ( m )
- t ..... pretočni čas ( s )
- 1 m<sup>3</sup> = 1000 litrov

Preglednica 1: Meritve pretokov (l/s) na vzorčni ponikalnici na Rakovško Unškem polju in označeni datumi vzorčenja vode.

datum	dan	ura	višina (cm)	višina (m)	hitrost (s)	volumen (l)	pretok (l/s)	širina (m)	padavine/dan, opombe
26.9.2006	tor	9:00	3,5	0,03	44	17,50	0,40	0,5	
27.9.2006	sre	15:00	4	0,04	24	20,00	0,83	0,5	
28.9.2006	čet	10:00	3	0,03	118	15,00	0,13	0,5	
29.9.2006	čet	7:00	3	0,03	136	15,00	0,11	0,5	
29.9.2006	pet	10:00	3	0,03	82	15,00	0,18	0,5	
30.9.2006	sob	7:00	3	0,03	150	15,00	0,10	0,5	
30.9.2006	sob	8:00	3	0,03	142	15,00	0,11	0,5	
30.9.2006	sob	9:00	3	0,03	246	15,00	0,06	0,5	

se nadaljuje

nadaljevanje

datum	dan	ura	višina (cm)	višina (m)	hitrost (s)	volumen (l)	pretok (l/s)	širina (m)	padavine/dan, opombe
30.9.2006	sob	10:45	5	0,05	28	25,00	0,89	0,5	
30.9.2006	sob	12:00	4	0,04	50	20,00	0,40	0,5	
30.9.2006	sob	13:00	4	0,04	38	20,00	0,53	0,5	
30.9.2006	sob	14:00	4	0,04	40	20,00	0,50	0,5	
30.9.2006	sob	15:30	4	0,04	53	20,00	0,38	0,5	
30.9.2006	sob	16:30	4	0,04	45	20,00	0,44	0,5	
30.9.2006	sob	17:30	4	0,04	50	20,00	0,40	0,5	
30.9.2006	sob	21:00	3	0,03	150	15,00	0,10	0,5	
30.9.2006	sob	23:00	3	0,03	190	15,00	0,08	0,5	
1.10.2006	ned	7:00	3	0,03	251	15,00	0,06	0,5	
1.10.2006	ned	8:00	3	0,03	230	15,00	0,07	0,5	
1.10.2006	ned	9:00	3	0,03	189	15,00	0,08	0,5	
1.10.2006	ned	10:00	3	0,03	152	15,00	0,10	0,5	
1.10.2006	ned	11:00	3	0,03	63	15,00	0,24	0,5	
1.10.2006	ned	12:00	3,5	0,03	55	17,50	0,32	0,5	
1.10.2006	ned	13:00	4	0,04	50	20,00	0,40	0,5	
1.10.2006	ned	14:00	4	0,04	41	20,00	0,49	0,5	
1.10.2006	ned	15:00	4	0,04	50	20,00	0,40	0,5	
1.10.2006	ned	16:00	4	0,04	51	20,00	0,39	0,5	
1.10.2006	ned	17:30	4	0,04	52	20,00	0,38	0,5	
1.10.2006	ned	18:30	4	0,04	37	20,00	0,54	0,5	
1.10.2006	ned	19:30	4,3	0,04	29	21,50	0,74	0,5	
1.10.2006	ned	21:00	4	0,04	43	20,00	0,47	0,5	
1.10.2006	ned	23:00	4,3	0,04	37	21,25	0,57	0,5	
2.10.2006	pon	9:00	3	0,03	170	15,00	0,09	0,5	
3.10.2006	tor	7:00	3	0,03	270	15,00	0,06	0,5	
3.10.2006	tor	8:00	3	0,03	185	15,00	0,08	0,5	
3.10.2006	tor	9:30	3	0,03	175	15,00	0,09	0,5	
3.10.2006	tor	11:30	3,8	0,04	64	19,00	0,30	0,5	
3.10.2006	tor	12:30	4	0,04	40	20,00	0,50	0,5	
3.10.2006	tor	13:00	4	0,04	31	20,00	0,65	0,5	
3.10.2006	tor	14:30	3,8	0,04	80	19,00	0,24	0,5	
3.10.2006	tor	16:00	4	0,04	66	20,00	0,30	0,5	
3.10.2006	tor	17:00	4	0,04	66	20,00	0,30	0,5	
3.10.2006	tor	18:00	4	0,04	76	20,00	0,26	0,5	
3.10.2006	tor	19:30	4	0,04	70	20,00	0,29	0,5	
3.10.2006	tor	21:00	4	0,04	63	20,00	0,32	0,5	
3.10.2006	tor	23:00	4	0,04	82	20,00	0,24	0,5	
5.10.2006	čet	8:00	4	0,04	32	20,00	0,63	0,5	10 mm
5.10.2006	čet	9:00	4	0,04	40	20,00	0,50	0,5	
5.10.2006	čet	10:00	4	0,04	52	20,00	0,38	0,5	
5.10.2006	čet	11:00	4	0,04	38	20,00	0,53	0,5	
5.10.2006	čet	12:00	4	0,04	31	20,00	0,65	0,5	
5.10.2006	čet	14:00	4	0,04	44	20,00	0,45	0,5	
5.10.2006	čet	16:00	4	0,04	45	20,00	0,44	0,5	

se nadaljuje

nadaljevanje

datum	dan	ura	višina (cm)	višina (m)	hitrost (s)	volumen (l)	pretok (l/s)	širina (m)	padavine/dan, opombe
5.10.2006	čet	17:00	4	0,04	53	20,00	0,38	0,5	
5.10.2006	čet	18:00	4	0,04	42	20,00	0,48	0,5	
5.10.2006	čet	19:30	4	0,04	55	20,00	0,36	0,5	
5.10.2006	čet	21:00	3	0,03	64	15,00	0,23	0,5	
5.10.2006	čet	23:00	3	0,03	67	15,00	0,22	0,5	
27.10.2006	pet	8:00	3	0,03	121	15,00	0,12	0,5	
27.10.2006	pet	10:00	4	0,04	69	20,00	0,29	0,5	
27.10.2006	pet	12:00	4	0,04	70	20,00	0,29	0,5	
27.10.2006	pet	14:00	4	0,04	43	20,00	0,47	0,5	<b>1. vzorec</b>
27.10.2006	pet	16:00	4	0,04	49	20,00	0,41	0,5	
27.10.2006	pet	18:00	4	0,04	65	20,00	0,31	0,5	
28.10.2006	sob	14:00	4	0,04	33	20,00	0,61	0,5	<b>2. vzorec</b>
29.10.2006	ned	14:00	4,5	0,04	22	22,50	1,02	0,5	<b>3. vzorec</b>
30.10.2006	pon	7:00	3,5	0,03	80	17,50	0,22	0,5	<b>4. vzorec</b>
30.10.2006	pon	10:30	3,5	0,03	55	17,50	0,32	0,5	<b>5. vzorec</b>
30.10.2006	pon	14:00	4	0,04	46	20,00	0,43	0,5	<b>6. vzorec</b>
30.10.2006	pon	17:30	4	0,04	47	20,00	0,43	0,5	<b>7. vzorec</b>
30.10.2006	pon	21:00	4	0,04	58	20,00	0,34	0,5	<b>8. vzorec</b>

V času merjenja je bilo sušno obdobje. Glede na to, da je odtočni sistem namenjen izključno meteornim vodam, je s tem tudi dokazano, da se iztekajo v času meritev le odpadne vode iz gospodinjstev. Padavine so bile le 5.10. med 4 in 5 uro ponoči, ko je padlo 10 mm dežja. Padavine so se odrazile na jutranjih meritvah kot povečan pretok, ki pa se je s hitro vrnil v povprečne dnevne okvire.

Sprva smo meritve pretoka merili naključno, zatem smo to opustili ter ga nadomestili s ponavljajočimi meritvami v enakih časovnih presledkih, zaradi boljše preglednosti in primerljivosti dobljenih podatkov. Vzorce za analizo v laboratorijih smo jemali vsak posamezni dan ob 14 uri. Ti vzorci naj bi pokazali vrednosti glede na dan. Zadnji dan smo vzorce pobrali preko celega dne v razmikih po tri ure in pol.

Zaradi omejenih finančnih sredstev smo bili pri številu vzorcev omejeni. Analizirali smo toliko vzorcev, da smo z njimi dobili dnevne odmike vrednosti ter vrednosti preko posameznega dneva. Posameznega vzorca za analizo, ki jo je opravljal Inštitut za celulozo in papir Ljubljana smo vzeli 1,5 litra v plastično embalažo – (plastenka za pitno vodo). Vzorci vzeti za analizo v laboratoriju Centra za pedologijo in varstvo okolja, pa 0,5 litra v plastični embalaži. Vsi vzorci so bili takoj zmrznjeni na  $-12^{\circ}\text{C}$  in so bili taki tudi dostavljeni v oba laboratorija.

### 3.3.2 Laboratorijske analize

Vzorci vode odvzete v oktobru 2006 so analizirali po metodah, ki so predstavljeni v preglednici 2, na Inštitutu za celulozo in papir v Ljubljani ter na Biotehniški fakulteti - Oddelek za agronomijo - Center za pedologijo in varstvo okolja. Substrata nismo analizirali, saj se ob načrtovani izgradnji ERM sistema sedanji neustreznemu substratu zamenja z novim.

Preglednica 2: Seznam metod uporabljenih za analize odpadne vode na vzorčni ponikalnici

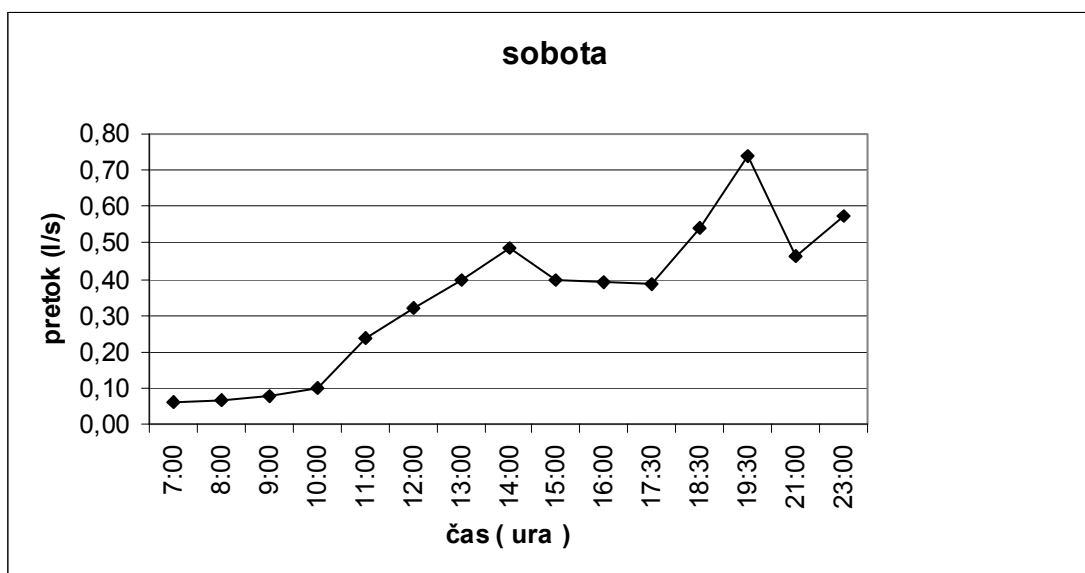
PARAMETER	MERILNA METODA
pH vrednost	SIST ISO 10523
Določitev celokupnega organskega ogljika (TOC)	SIST ISO 8245
KPK	SIST ISO 6060
BPK <sub>5</sub>	SIST ISO 5815-1

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 4.1 ANALIZE DNEVNIH PRETOKOV

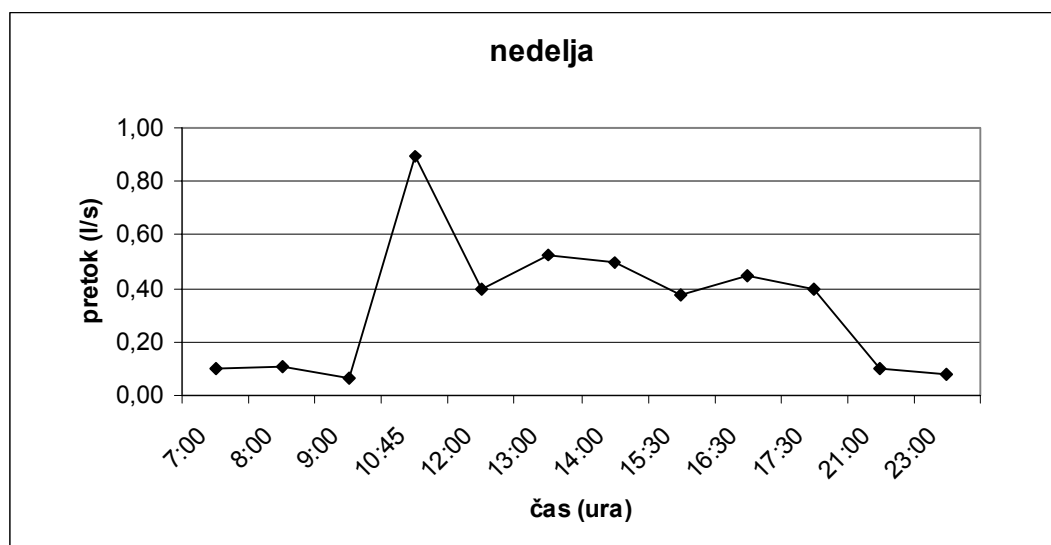
Analizirali smo dnevne pretoke na vzorčni ponikalnici. Dobljeni rezultati kažejo dnevne aktivnosti prebivalcev. Pri rezultatih je potrebno upoštevati od pol do enourni zamik, ki ga odplake potrebujejo za pot od gospodinjstev do merilnega mesta v ponikalnici.

Pretoki so bili v soboto 30.9.2006 (Slika 11) v jutranjih urah nizki, kar je verjetno posledica, da konec tedna prebivalci vstanejo kasneje. Prvi maksimum je v času kosila, ko so potrebe večje zaradi kuhanja. Potem rahlo pade, vendar ne izrazito, saj v tem času gospodinjstva porabijo več vode za čiščenje in pranje. V večernih urah je izrazit maksimum kar je verjetno posledica pranja perila in sobotnega tuširanja in kopanja večjega števila ljudi.



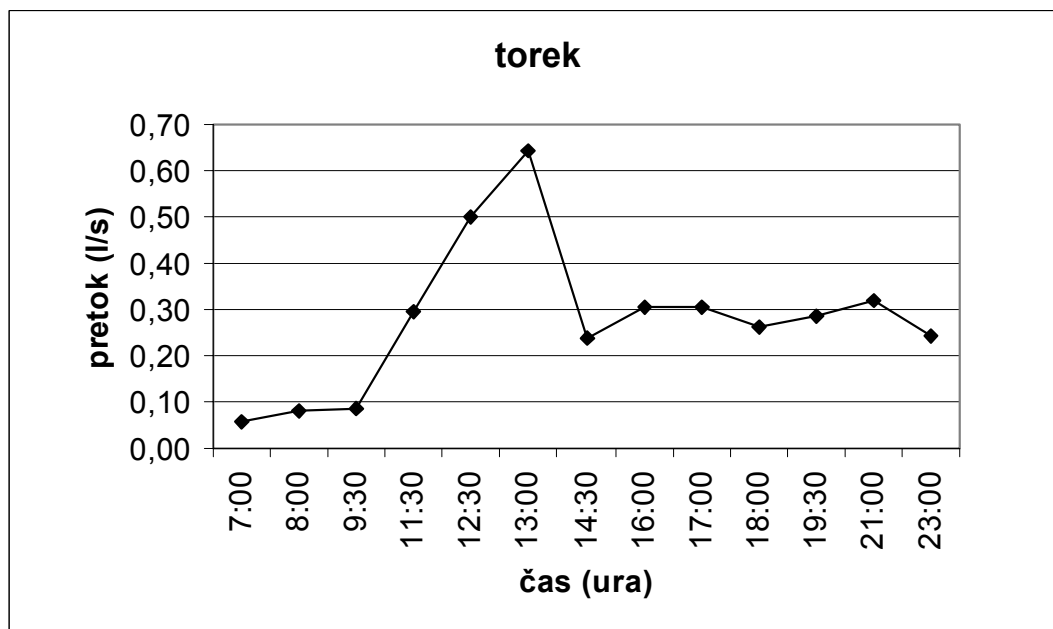
Slika 11: Pretoki (l/s) odpadne vode, merjeni na ponikalnici na Rakeku v soboto 30.9.2006.

V nedeljo 1.10.2006 (Slika 12) je bil malo pred kosilom izrazit maksimum. To je pripisati temu, da del populacije zaradi kasnejšega vstajanja v nedeljo v tem času opravlja jutranjo higieno, medtem ko del populacije proizvaja odpadno vodo, ki je povezana z pripravo nedeljskega kosila. Zatem sprva naglo, zatem počasneje pada poraba vode. V zgodnjih nočnih urah je poraba izredno nizka, saj se odpravijo spat prej, zaradi novega delovnega tedna. Za razliko od sobote, ko je v tem delu dneva poraba vode še zelo velika (od 5 do 7 krat večja).



Slika 12: Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v Nedeljo, dne 1.10.2006.

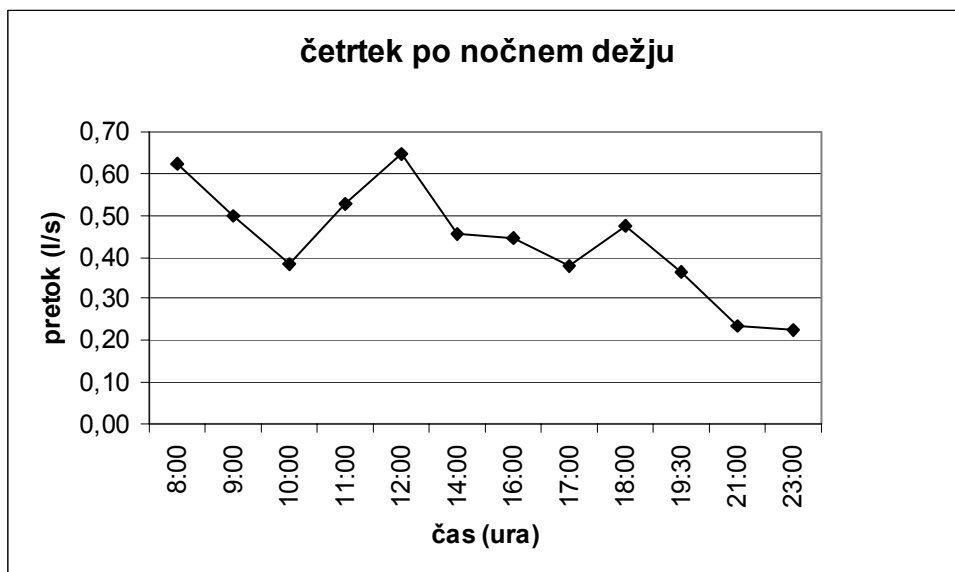
Pretoki odpadka so med delovnim tednom (slika 13) še najbolj podobni nedeljskim. Maksimum za kosilo je v torek 3.10.2006 naraščal v širšem razponu in je bil dve uri kasnejši. Naslednja dva manjša maksimuma bi lahko bila posledica: prvi med 16 in 17 uro pozno kosilo zaposlenih v oddaljenih krajih predvsem v Ljubljani. Drugi večerni maksimum predstavlja večerno higieno.



Slika 13: Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v torek, dne 3.10.2006.

Pri četrтковih pretokih (5.11.2006) (Slika 14) se je zjutraj poznal povečan pretok, ki je bil posledica nočnega dežja med 4 in 5 uro ponoči 10 mm, vendar ta naglo pada. Ostali del dneva je podoben torkovem, ki ima vzorec obnašanja populacije med delavnim dnevom tedna.





Slika 14: Pretoki (l/s) odpadne vode merjeni na ponikalnici na Rakeku v četrtek, dne 5.10.2006.

#### 4.2 ANALITSKI PODATKI: KPK, TOC, BPK<sub>5</sub>, BPK:KPK

Obremenitve analiziranih vzorcev odpadnih vod niso bile visoke. Razmerje med vrednostmi za BPK<sub>5</sub> in KPK potrjuje, da so bili analizirani vzorci tipične komunalne vode, ki so biološko dobro razgradljive. Povprečno razmerje BPK:KPK je 1:2,5. Tudi vrednosti za celotni organski ogljik (TOC) kažejo na tipično organsko onesnaženje odpadnih vod. Razlike v obremenitvah odpadnih vod na čas vzorčenja niso visoke in ne predstavljajo večjih nihanj (Ivanuš, 2006) (Preglednica 3).

Preglednica 3: Rezultati KPK, TOC, BPK, BPK:KPK analiza vzorcev inštitut za celulozo in papir Ljubljana.

Vzorec / odvzem	KPK (mg/l)	TOC (mg/l)	BPK <sub>5</sub> (mg/l)	BPK:KPK
1. / 27.10.	270	185	80	1:3,4
2. / 28.10.	210	170	80	1:2,6
3. / 29.10.	240	190	100	1:2,4
4. / 30.10.	270	210	120	1:2,3
5. / 30.10.ob10:30	290	230	125	1:2,3
6. / 30.10.ob14:00	260	180	80	1:3,3
7. / 30.10.ob17:30	200	180	75	1:2,7
8. / 30.10.ob21:00	220	190	65	1:1,2
Povprečna vrednost	245	191,9	90,6	1:2,5
Minimum	290	230	125	1:3,4
Maksimum	200	170	65	1:1,2

#### 4.3 ANALITSKI PODATKI NITRATA (NO<sub>3</sub>) IN FOSFORJA ( P )

Dobljene vrednosti ne odstopajo veliko od povprečnih vrednosti. Povprečna vrednost za nitrat je 0,45 (mg/l) in za fosfor 13,25 (mg/l). Kar je razumljivo, ker so gospodinjstva glavni onesnaževalec. V kolikor bi se pojavljal drugi večji onesnaževalec, na primer

industrija, onesnaženje z ceste kot posledica izlitja po cestišču in iztok v sistem za meteorne bi bilo to zaznati pri morebitnih kasnejših meritvah (Preglednica 4).

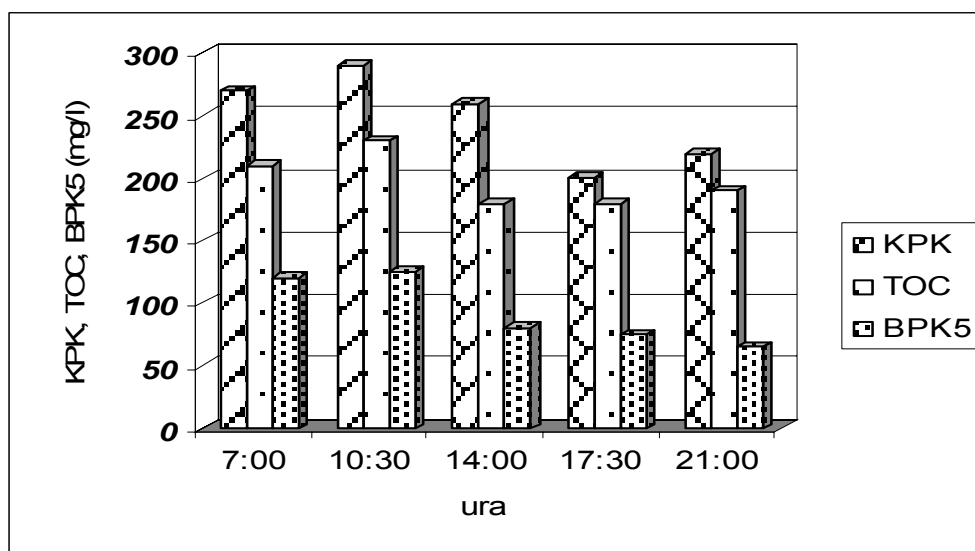
Preglednica 4: Rezultati nitrata ( $\text{NO}_3$ ) in fosforja (P) analiza vzorcev inštitut za celulozo in papir Ljubljani.

lab. št.	Oznaka vzorca	$\text{NO}_3$ (mg/l)	P (mg/l)
1/07/4	27.10.06 Rakek 1	0,63	12,9
2/07/4	28.10.06 Rakek 2	0,46	12,1
3/07/4	29.10.06 Rakek 3	0,40	14,3
4/07/4	30.10.06 Rakek 4	0,47	15,1
5/07/4	30.10.06 Rakek 5	0,32	15,3
6/07/4	30.10.06 Rakek 6	0,30	13,7
7/07/4	30.10.06 Rakek 7	0,40	13,7
8/07/4	30.10.06 Rakek 8	0,35	11,5
<b>Povprečna vrednost</b>		<b>0,45</b>	<b>13,25</b>
<b>Maksimum</b>		<b>0,63</b>	<b>15,3</b>
<b>Minimum</b>		<b>0,30</b>	<b>11,5</b>

Glede na vse parametre, gre za tipično komunalno odpadno vodo, za katero je potrebno  $2,5 \text{ m}^2$  površine v ERM/PE. Preračunavanje obremenitev PE preko hidravlike  $1\text{PE} = 150 \text{ l/dan}$ , če imamo podatke o količini vode. Analize vzorcev odplak iz ponikalnice so pokazale povečano vsebnost fosforja, običajno so vrednosti do  $5 \text{ mg/l}$  (Bulc, 2007).

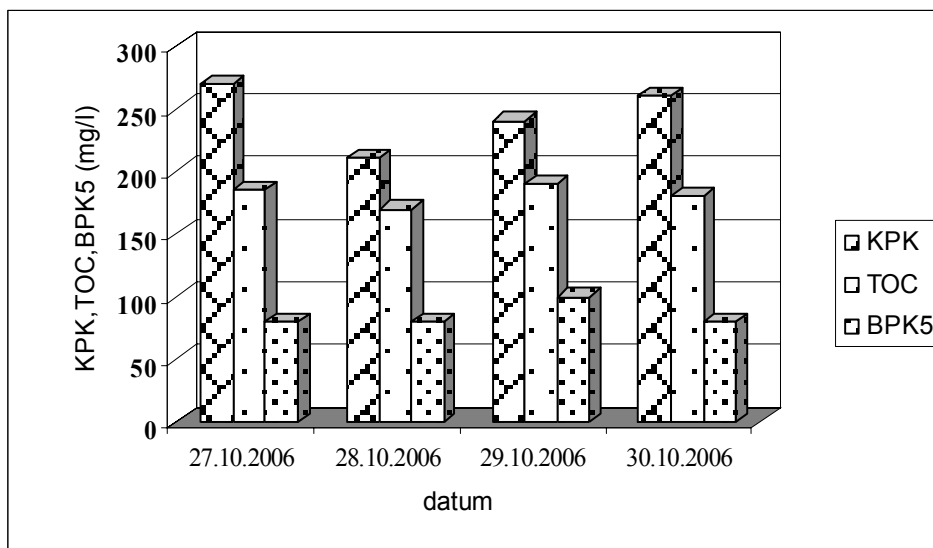
#### 4.4 ANALIZE DOBLJENIH VREDNOSTI KPK, TOC in $\text{BPK}_5$

Obremenjenost voda, ki se odraža v koncentracijah KPK, TOC in  $\text{BPK}_5$  (Slika 15) nam pokaže nekoliko večjo obremenjenost v dopoldanskem času. Celodnevno nihanje sledi trendom pretokov vode v delovnih dneh, le da niso tako izraziti.



Slika 15: Rezultati vrednosti KPK (mg/l), TOC (mg/l),  $\text{BPK}_5$  (mg/l) v odplakah z Rakeka dne 30.10.2006.

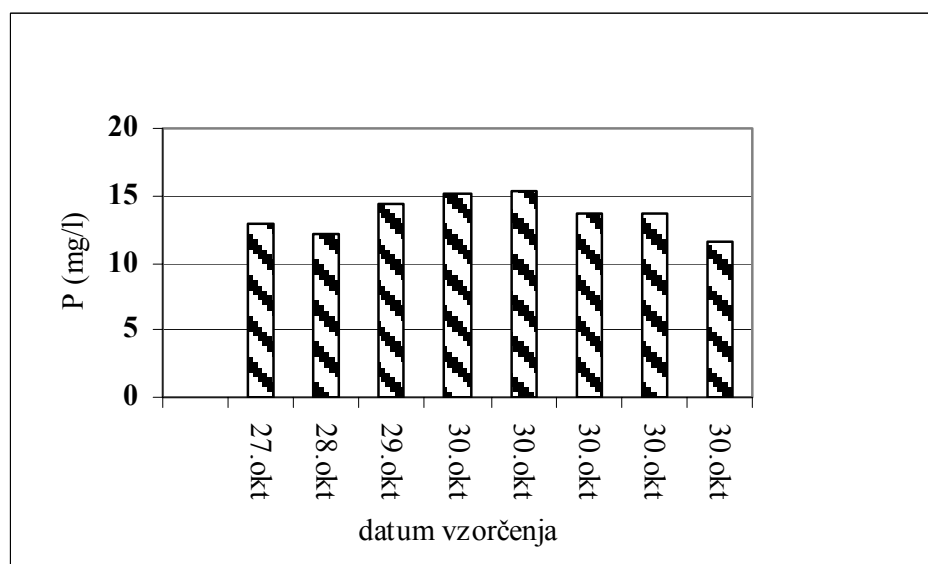
Pri večdnevni meritvah vrednosti koncentracij KPK, TOC, BPK<sub>5</sub> ob isti uri dneva (ob 14 uri) (Slika 16) ni zaznati večjih odstopanj, skladno s pričakovanji, saj so celoten čas onesnaževalci isti. Stopnja onesnaženja tudi ni dnevno pogojena.



Slika 16: Vrednosti KPK(mg/l), TOC mg/l, BPK<sub>5</sub> mg/l v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.

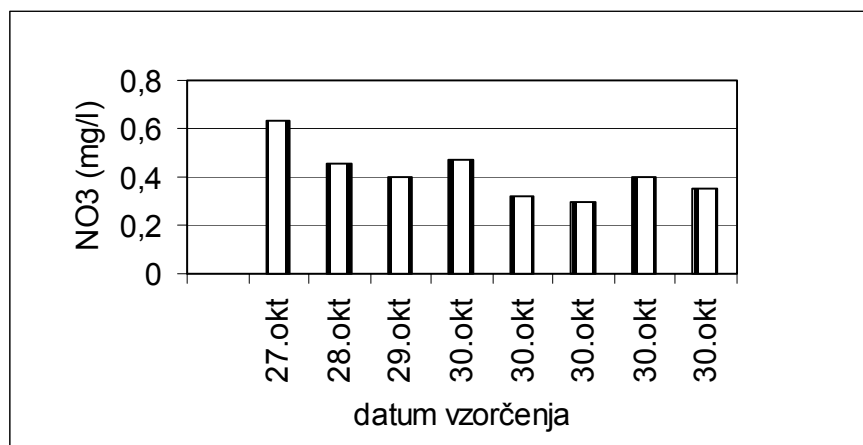
#### 4.5 ANALIZE DOBLJENIH VREDNOSTI FOSFORJA IN NITRATA

Pri merjenju vsebnosti fosforja P (mg/l) v vzorcih odpadne vode (Slika 17) merjenega v več dneh, od 27. do 30 oktobra 2006 ob 14 uri, dobljene vrednosti ne odstopajo veliko med posameznimi dnevi in med povprečno vrednostjo, ki znaša 13,6 mg/l.



Slika 17: Koncentracija fosforja P (mg/l) v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.

Vrednosti vsebnosti nitrata v odpadnih vodah (slika 18) ne odstopajo veliko od povprečne vrednosti, ki znaša 0,42 mg/l, z izjemo nekoliko povišane vrednosti 27.10. in nekoliko nižje vrednosti dveh vzorcev 30.10, katerega vzroki nam niso poznani.

Slika 18: Koncentracija nitrata NO<sub>3</sub> (mg/l) v odpadni vodi z Rakeka v različnih datumih ob 14 uri.

#### 4.6 TRENUTNO STANJE NA VZORČNI PONIKALNICI

Na letalskem posnetku ponikalnice (Slika 19), je razvidna oblika ponikalnice in njene okolice. Z oštevilčenimi točkami so označen posamezni pomembni deli ponikalnice.



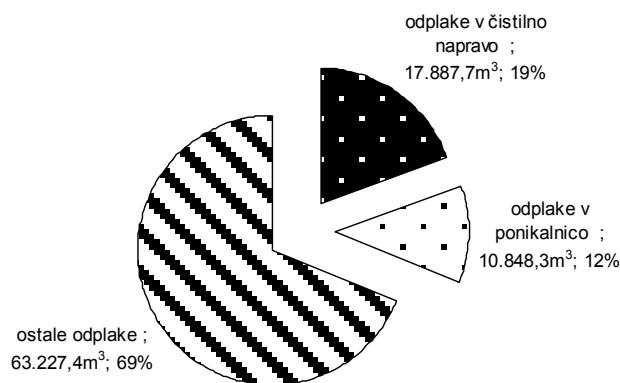
Slika 19: Letalski posnetek ponikalnice na Rakeku. (podlaga: GERK..., 2007)

Legenda:

**1** Iztok iz betonske cevi v jarek. **2** Zamuljen jarek obraščen z žlezavo nedotiko (*Impatiens glandulifera*), veliko koprivo (*Urtica dioica* L.), katera obrašča celotno obrežje ponikalnice. **3** Dostopno mesto po treh različnih poteh. **4** Zamuljen jarek obraščen z rogozom (*Typha* spp.). **5** Višje ležeč teren obraščen z grmovjem. **6,7** najnižji del lagun, kjer skozi plast mulja ponikajo odplake. **8** Suhe struge po katerih ob visokih vodah teče voda proti drugim ponikalnicam. **9,10** Dve ponikalnici, v kateri ponika voda ob poplavih.

#### 4.7 POTREBNI UKREPI PRI NAČRTOVANJU ERM SISTEMA

Rakek ima po podatkih Komunale Cerknica v letu 2004, 1827 prebivalcev (PE) (JP komunalna..., 2004). Letno porabijo 91.963,52 m<sup>3</sup> vode iz javnega vodovoda. Ravnanje z odplakami, ki nastanejo pri porabi te vode je razvidno iz razreza na sliki 20. Voda iz javnega vodovoda je poleg meteorne voda edina razpoložljiva voda na Rakeku. Del kraja ima speljano kanalizacijo za odpadne vode v manjšo čistilno napravo na Rakeku. Letno se vanjo steče 17.887 m<sup>3</sup> ali 19,45% odpadne vode od skupaj porabljene, 63.227 m<sup>3</sup> ali 68,75% steče v okolje neprečiščena. Večina te vode se izpusti v individualne greznice, ki so v veliko primerih narejene brez zaprtega vodotesnega dna, tako da delujejo, kot ponikalnice v katere se izteka redkejši del odpadnih vod. Goščo, ki ostaja lastniki greznic v veliki večini nelegalno odpeljejo v bližnji gozd ali drugo naravno okolje. Po naših meritvah v našo izbrano ponikalnico steče letno 10.848,38 m<sup>3</sup> ali 11,80% odplak, v kar niso vštete meteorne vode.



Slika 20: Prikaz razreza letne količine komunalne odpadne vode na Rakeku v obdobju 2004-2007.

Sedanja površina ponikalnice, merjena od iztoka vkopane betonske cevi v jarek ponikalnice, do konca obeh lagun je 1.140 m<sup>2</sup>. Ta velikost bi ob izgradnji ERM zadostovala za 456 PE to je 24.996 m<sup>3</sup> (1PE = 150 l/dan), kar je 230 % sedanjih odplak, ki stečejo v ponikalnico. Pri tem smo upoštevali, da gre za tipično komunalno odpadno vodo, za katero je potrebno 2,5 m<sup>2</sup> za PE (Bulc, 2007a). V delu Rakeka, ki še nima urejenega sistema za komunalne vode, nastane letno 74.076 m<sup>3</sup> odplak. To je 203.000 litrov/dan, kar je enako 1.353 PE. Za to količino odplak, bi potrebovali 3.400 m<sup>2</sup> velik ERM sistem, kar pa je približno trikratna velikost trenutne velikosti ponikalnice. Po potrebi bi se z upoštevanjem naravnih danosti, ki jih nudi sama okolica ponikalnice, ERM sistem lahko postopoma povečeval do 4500 PE, v smeri točke 8, 9 in 10 (Slika 22).

#### 4.7.1 Prva idejna zasnova, manjši ERM sistem

V točki **1** smer pritoka odpadnih voda po cevnem sistemu (Slika 21). Potrebno bi bilo odkopati in odstraniti nekaj metrov cevi, ki se je pod težo kmetijske mehanizacije vdrla. Na to mesto se vgradi grablje za lovljenje naplavine in zadrževalni usedalnik večjih delcev. V točki **2** se zgradi pregrado, ki onemogoča poplavitve sistema ob večjih nalivih. V sistem se dovaja toliko vode, kolikor jo prenese. Višek se po blago izkopanem kanalu točka **13** spelje neposredno v ponikalnico (točka **12**). Ta voda je manj onesnažena, saj je zelo razredčena z meteorno vodo. V točki **3** odstraniti mulj, delno razširiti in izgraditi filtrirno gredo. Vse grede imajo nepropustno dno. V točki **4** opraviti manjši izkop in vgraditi kompostno gredo. Točka 4 je najbolj dostopno mesto celotne ponikalnice. Obenem je blizu usedalnika, zato gredo izcedne vode iz kompostne grede lahko v usedalnik. Na kompostno gredo se odlagajo tudi gošče iz greznic. V točki **5** odstraniti mulj, vgraditi ločevalnik, ki vodo iz prve grede razdeli na dva dela. Točka **6** in **10** je čistilna greda, kjer poteka največji del čiščenja, sledi lahko še polirna greda. V točki **7** in **9** zgraditi bazen za večnamensko izrabo vode (namakanje, gašenje požarov, estetski videz, povečanje biodiverzitete). Dno narediti delno prepustno, tako da lahko neizrabljena očiščena voda počasi ponika. Točka **8** prelivni kanal iz lagune 7 v 9. Točka **11** prelivni jarek za pretok viška vode iz lagune točka 9 v ponikalnico točka 12.



Slika 21: Idejna zasnova z upoštevanjem naravnih danosti za postavitev manjšega ERM sistema v ponikalnici na Rakeku. (podlaga: GERK..., 2007)



#### 4.7.2 Druga idejna zasnova, večji ERM sistem

Iz smeri **A** priteka odpadna voda iz vzhodnega, iz smeri **B** pa iz zahodnega dela Rakeka. Iz smeri **C** je voda iz dela Unca (Slika 22).

V točkah **1, 2** in **3** so predvidene grablje za lovljenja večjih naplavin, usedalniki za težje delce in pregrade, ki onemogočajo poplavitve sistema ob večjih nalivih. V sistem prepuščajo le toliko vode, kolikor jo le ta prenese. Višek se po predvidenih blago izkopanih kanalnih točk **4, 4a** in **6** spelje neposredno v ponikalnici točki **8** in **9**. V točki **5** so predvidene vkopane cevi, ki odvajajo višek meteorne vode iz točke **2** v ponikalnico točka **7**. V točkah **10, 11** in **12** so predvidene filtrirne grede. V točkah **13, 14, 15, 16** in **17** se postavi čistilne grede. Povezanost posameznih delov ERM sistema je označena z rumeno barvo. Smer toka odplak je proti ponikalnici **8**, ki je najnižji del v ERM sistemu.



Slika 22: Idejna zasnova z upoštevanjem naravnih danosti za postavitev večjega ERM sistema v ponikalnici na Rakeku. (podlaga: GERK..., 2007)

Obremenitve analiziranih vzorcev odpadnih vod niso bile visoke. Razmerje med vrednostmi za  $BPK_5$  in  $KPK$  potrjuje, da so bili analizirani vzorci tipične komunalne vode, ki so biološko dobro razgradljive. Tudi vrednosti za celotni ogljik (TOC) kažejo na tipično organsko onesnaženje odpadnih vod (Ivanuš, 2006). Vrednosti meritev onesnaženja odpadnih vod v ponikalnici niso velike, glede na parametre, ki so določeni v zakonodaji. Vendar niso zanemarljive in so vsekakor potrebne resne obravnave s strani pristojnih ministrstev. Pri tem se moramo zavedati, da neposredni izpusti obremenjenih vod v kraško

podzemlje, ki ima slabo sposobnost samoočiščenja, pomenijo tudi neposredno onesnaževanje talne vode v kraških vodonosnikih in nižje ležečih zajetij pitne vode.

Viri neoporečne, za zdravje neškodljive vode na Zemlji se zmanjšujejo zaradi naraščanja števila ljudi, razvoja intenzivnega kmetijstva, industrije in drugih razlogov. Marsikje je treba čistiti rečno vodo, da bi jo lahko uporabili za pitje in umivanje. Kako je onesnažena slovenska podtalnica, smo se zavedli šele pred kratkim. V okviru državnega monitoringa kakovosti podtalnice se od leta 1987 sistematično spremlja onesnaženost podtalnice 18 aluvijalnih vodonosnikov. Od začetka vzpostavitve monitoringa podzemne vode je bila ugotovljena prekomerna onesnaženost predvsem z nitrati, pesticidi ter z organoklorinimi spojinami (Zaščita..., 2007). Kakšen je učinek težkih kovin ter organskih in anorganskih sestavin v pitni vodi, še ne vemo. Naša hrana je sestavljena v 80 % iz vode. Na dan popijemo in pojemo približno 2,5 litra vode, s sečem izločimo 1,5 litra vode. Pomislimo, koliko vode "predela" naše telo v enem mesecu, letu in v vsem življenju! Zato je še kako pomembno, kakšno vodo pijemo, uporabljamo za kuhanje, za umivanje, posebno za umivanje zob in ustne votline in s kakšno vodo peremo perilo, ki je v tesnem stiku s telesom. Pri nas je voda dolga leta veljala za dobrino, ki je vsem na razpolago. Spomnimo se, kako se nam je še pred leti zdelo smešno, ko so v tujini pričeli prodajati ustekleničeno navadno vodo. Ob potovanjih v tujino smo se smejali turistom, ki so s seboj tovorili stekleničke z vodo in jo počasi, po požirkih pili. Danes že tudi mi kupujemo vodo. Človeški zarodek vsebuje 80% vode, ob rojstvu je v našem telesu več kot 70% vode. Naša hrana je v 80% sestavljena iz vode. Tkiva našega telesa vsebujejo različne količine vode. Največ vode je v možganskem tkivu, ki jo vsebuje do 90% vode, najmanj v kosteh, ki vsebujejo do 35% vode. Oseba, ki tehta 70 kilogramov, naj se zaveda, da prispeva k njeni teži 42 litrov vode. Od te vode je 1/3 oz. 14 litrov zunaj celic, 2/3 oz. 28 litrov vode v celicah kot celična voda. Brez vode človeški organizem zdrži le nekaj dni. Vnosi strupov z vodo se v telesu kopičijo in vodijo do raznih bolezni in vplivajo na kvaliteto in dolžino življenja nas in naših otrok (Šalehar, 2007).

Zato so tukaj vsi kompromisi glede dovoljenih stopenj onesnaževanja pitne vode, še posebej talne vode, nedopustni in nesprejemljivi. O tem govori tudi zakon o vodah:

(ZV-1):64. člen (odvajanje odpadnih voda):

(2) Neposredno odvajanje odpadnih voda v podzemne vode je prepovedano. Posredno odvajanje odpadnih voda ter oddajanje toplote v podzemne vode in odvzem toplote iz podzemnih voda je dovoljeno samo na način in pod pogoji, ki jih določa ta zakon in predpisi na področju varstva okolja.

Pri upoštevanju naravnih danosti za postavitev ERM sistemov neposredno dvignemo kakovost bivanja tudi stanovalcem, ki živijo v bližini divjih izpustov odpadnih voda v ponikalnice. Na teh lokacijah je pogosto zaznati smrad in razmnoževanje mrčesa (komarjev), kar z izdelavo ERM sistema odpravimo.

Potrebe po izgradnji ERM sistema so nujne, zaradi zmanjšanja onesnaževanja podtalnice in s tem virov pitne vode. Z zmanjšanjem onesnaženja pitne vode, je manjša tudi obolenost prebivalcev, katere vzrok je onesnažena pitna voda.



## 5 SKLEPI

Vzorčni primer postavitve čistilne naprave, na katerega smo se osredotočili pri izdelavi te diplomske naloge, je le eden od ERM sistemov. Upoštevanje naravnih danosti za postavitve vodnih ERM sistemov, pomeni nadgradnjo dosedanjemu znanju s področja ERM sistemov.

Ob postavitvi ERM sistema sedanje velikosti ponikalnice bi le ta zadostoval za 465 PE, kar je 230 % sedanjih odplak, ki stečejo v ponikalnico. Pri tem smo upoštevali, da gre za tipično komunalno odpadno vodo, za katero je potrebno 2,5 m<sup>2</sup> za PE.

Predstavljen lokacija ponikalnice in sama oblika ponikalnice s svojim sedanjim stanjem in stanjem okolice omogoča izgradnjo ERM sistema z upoštevanjem naravne danosti. Za to so potrebni minimalni gradbeni posegi. ERM sistem je po potrebi možno povečati in ga prilagoditi potrebam kraja.

Potrebno je narediti več na prepoznavnosti ERM sistemov. Laično in strokovno javnost je smiselno seznaniti s prednostmi pri postavitvi ERM sistema z upoštevanjem naravnih danosti na izbrani ponikalnici, kot so: ohranjanje naravnega okolja ter saniranje že degradirane krajine. Ključen argument, ki lahko še dodatno prepriča, pa je nižja cena izgradnje.

## 6 POVZETEK

Namen tega raziskovalnega dela je predstaviti možnost nadgradnje dosedanjega znanja o ERM sistemih z upoštevanjem naravnih danosti za postavitev vodnih ERM sistemov. Naravne danosti zajemajo: naravne reliefne danosti (vrtače, uvale, naravni suhi jarki) in stanja v naravi, ki so posledica človekovih posegov v naravi (zapuščeni: izkopi, jarki, nizke gradnje).

Naloga je zastavljena kot izdelava in predstavitev vzorčnega modela za izgradnjo ERM sistemov v naravnih danostih. Za vzorčen model smo vzeli izpust sistema za odvodnjavanje meteornih voda z kraja Rakek, v naravno kraško ponikalnico na Rakovško–Unškemu polju. V sistem za odvodnjavanje meteornih voda so nelegalno priklopljena z odpadnimi vodami tudi mnoga gospodinjstva. Ta onesnažujejo kraško podtalnico in nižje ležeča vodna zajetja.

Vzorčno mesto za jemanje vzorcev in merjenje pretokov je bilo na iztoku iz cevne sistema v ponikalnico. Meritve pretokov odpadnih voda smo izvedli v poletnem sušnem delu leta, tako, da smo dobili pretoke odpadnih in ne meteornih voda. S tem smo dobili vzorce nerazredčenih koncentracij odpadnih voda. Rakek je del kraškega območja in v sušnem obdobju nima površinskih vodotokov, ki bi lahko vplivali na dobljene rezultate.

Z meritvami pretokov odpadnih voda smo ugotovili: dnevne maksimume, ki znašajo med 0,6 in 0,9 l/s, minimume med 0,06 in 0,1 l/s ter povprečen dnevni pretok, ki znaša 0,344 l/s. Obenem smo z meritvami preko več dni v tednu ugotovili aktivnosti prebivalcev preko dneva, ki so pogojeni z porabo vode. Analize KPK, TOC, BPK<sub>5</sub>, BPK<sub>5</sub>:KPK so pokazale, da gre za klasično komunalno odpadno vodo. Povprečne vrednosti: KPK 245 mg/l, TOC 199 mg/l, BPK<sub>5</sub> 90,6 mg/l, BPK<sub>5</sub>:KPK 1:2,52, dušika NO<sub>3</sub> 0,447 mg/l, fosforja P 13,25 mg/l. Z dobljenimi podatki pretokov in analizami vzorcev smo tudi dokazali, da so na sistem za odvodnjavanje meteornih voda priklopljena z odpadnimi vodami tudi gospodinjstva.

Povprečni dnevni pretok znaša 29.721 litrov, kar pomeni 200 PE. Sedanja površina ponikalnice bi ob minimalnih gradbenih posegih zadostovala za 456 PE. Ob upoštevanju naravnih danosti, ki jih nudi okolica ponikalnice bi se po potrebi s časoma lahko širila vse do 4500 PE.

Upoštevanje naravnih danosti za postavitev vodnih ERM sistemov, pomeni revitalizacijo napačnih ali opuščenih gradbenih posegov iz preteklosti. S sanacijo se jim da nov pomen in življenjski prostor številnim rastlinam ter živalim. Prihrani se naravno okolje ter bistveno zniža stroške izgradnje.

Predstavljena lokacija ponikalnice in sama oblika ponikalnice s svojim sedanjim stanjem in stanjem okolice omogoča izgradnjo ERM sistema z upoštevanjem naravne danosti. Za to so potrebni minimalni gradbeni posegi. ERM sistem je po potrebi možno povečati in ga prilagoditi potrebam kraja.

## 7 VIRI

- Atlas Slovenije. 1996. Ljubljana, Mladinska knjiga 164 stran: 440 str.
- Anžič B., Kapun G. 2002. Biofilm–difuzijski model: seminarska naloga. Ljubljana, (4.6.2002) <http://www.kemik.org/dokumenti/st2/Biofilm.pdf> (10.8.2007)
- Bulc T. 1998. Uspešnost čiščenja izcednih voda z različnimi tipi rastlinskih čistilnih naprav. Magistrsko delo. Ljubljana Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 78 str.
- Bulc T. 2007a. "Ocena dobljenih laboratorijskih analiz". Ljubljana, LIMNOS (osebni vir, 26.3.2007)
- Bulc T. 2007b. "Definicija ekoremediacij" Ljubljana, LIMNOS (osebni vir, 30.10.2007)
- Bulc T., Vrhovšek D. Zupančič M. 1998. The use of constructed wetland in the Mediterranean area. *Public Enterprise*, 16, 3-4: 311-318
- Bulc T., Vrhovšek D. 2007. Rastlinske čistilne naprave za čiščenje odpadnih voda, [http://www.bf.uni-lj.si/zt/bioteh/kongresi/voda2007/pdf/12\\_Griessler.pdf](http://www.bf.uni-lj.si/zt/bioteh/kongresi/voda2007/pdf/12_Griessler.pdf) (5.avg.2007)
- Campbell C. S., Ogden M. 1999. *Constructed wetlands in the sustainable landscape*. Danvers, John Wiley & Sons, Inc: 265 str.
- Dular M., Roš M., Trontelj A., Kompare B., Tišler T. 1997. *Izrazje s področja voda*. Ljubljana, Slovensko društvo za zaščito voda: 107 str.
- Eaton A. D., Clescheri L. S., Greenberg E.G. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, 19th edition. American Public Health Association: 181 str.
- Gabrovšek F., Romanov D., Dreybrodt W. 2005. *Procesi speleogeneze: modelski pristop*. Ljubljana, Založba ZRC: 376 str.
- Habič P. 1996. *Vrhniški izviri in njihovo kraško zaledje*. Vrhniški razgledi, 1: 43-74
- Herlič V. 1993. *Ugotavljanje učinkovitosti rastlinske čistilne naprave v Gradišču*. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 65 str.
- Hidrometeorološki inštitut Ljubljana., *meteorološki letopis 2004*. [http://www.arso.gov.si/vreme/podnebe/2004pad\\_vis.pdf](http://www.arso.gov.si/vreme/podnebe/2004pad_vis.pdf) (12.5. 2007)
- Ivanuš A. 2006. "Ocena kemijske obremenitve komunalnih vod". Ljubljana, Inštitut za celulozo in papir (osebni vir, analize 23.11.2006)
- JP komunalna Cerknica. *Poraba pitne vode in kanalizacijske vode v občini Cerknica za leto 2004*. Cerknica, Komunalna Cerknica (osebni vir, januar 2005)
- Kadlec R., Knight J. Vymazal, H. Brix, P. Cooper, R. Haberl 2000. *Constructed wetlands for pollution control*. London, IWA Publishing: 156 str.
- Krajnc U. 2007. *Odvajanje in čiščenje padavinske vode z javnih cest*. [http://www.ekolist.si/pdf/s019\\_odvajanje\\_in\\_ciscenje\\_padavinske\\_vode.pdf](http://www.ekolist.si/pdf/s019_odvajanje_in_ciscenje_padavinske_vode.pdf) (6.7.2007)
- Kukanja V. 1999. *Tretja stopnja čiščenja komunalnih voda mesta Sežana z modelom RČN*. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 96 str.
- Lewandowski G. J., DeFilipi L. J. 1997. *Biological treatment of hazardous wastes*. Hoboken, New Jersey John Wiley & Sons, Inc.: 416 str.
- GERK: *grafična podlaga MKGP*. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. <http://rkg.gov.si/GERK/viewer.jsp> (7.3.2007)

- Pavšič P. 1996. Strupenost odpadne vode po Offhausu in odstranjevanje dušika v pilotni čistilni napravi. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 63 str.
- Raskin I., Ensley B. D. 2000. Phytoremediation of toxic metals. Hoboken, New Jersey John Willey & Sons, Inc.: 304 str.
- Rejic M. 1983. Onesnaževanje in varstvo voda – celinske vode. Ljubljana, VTOZD za biologijo, Biotehniška fakulteta: 43 str.
- Roš M. 1995. Oznake in poimenovanja na področju biološkega čiščenja odpadnih vod. Ljubljana, Slovensko društvo za zaščito voda: 46 str.
- SIST ISO 10523. Mednarodni standard za določanje pH vrednosti. 1994
- SIST ISO 8245. Mednarodni standard za določanje določitev celokupnega organskega ogljika (TOC). 1999
- SIST ISO 6060. Mednarodni standard za določanje kemijske potrebe po kisiku (KPK). 1989
- SIST ISO 5815-1. Mednarodni standard za določanje biološke potrebe po kisiku (BPK<sub>5</sub>). 2003
- Strategija prostorskega razvoja Slovenije. Ministrstvo za okolje in prostor RS.  
[http://www.pososki-rc.si/sites/www/files/SPRS\\_260104\\_celota.pdf](http://www.pososki-rc.si/sites/www/files/SPRS_260104_celota.pdf) (okt.2007)
- Šot L. 1992. Možnost čiščenja odpadnih vod v Belsadu z rastlinsko čistilno napravo. Diplomsko naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 48 str.
- Šušteršič F. 1996. Poročilo o terenskih vajah, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška Fakulteta, oddelek za geologijo: 25 str.
- Šalehar M. 2007. Voda v zdravju in boleznih.  
[http://www.med.over.net/zdrava\\_prehrana/clanki/clanki\\_julij2002/voda\\_zdravje\\_bolezn\\_i.php](http://www.med.over.net/zdrava_prehrana/clanki/clanki_julij2002/voda_zdravje_bolezn_i.php) (12.8.2007)
- Urbanc-Berčič O. 2001. Constructed wetlands as low technology wastewater treatment. Nova Gorica, 22-23 okt. 2001, Nova Gorica, Politehnika Nova Gorica,
- Urbanc-Berčič O., Bulc T. 1995. Integrated constructed wetland for small communities. Water Science and Technology, 32, 3: 41-47
- Urbanc-Berčič O., Bulc T., Vrhovšek D. 1998. Slovenija. V: Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Vymazal (ur.). Blackhuy publishers: 241-250
- Vrhovšek D., Bulc T. 1994. Development of constructed wetlands in Slovenia. Aquaphyte, 14, 2: 13-15
- Vrhovšek D., Kukanja V., Bulc T. 1996. Constructed wetland for industrial wastewater treatment. Water Science and Technology, 30, 10: 2287-2292
- Zakon o vodah (ZV-1).. Ur.l. št. RS 67/202
- Zaščita virov pitne vode v Sloveniji. Ministrstvo za okolje in prostor RS.  
[http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/clanek\\_SAD.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/clanek_SAD.pdf) (okt.2007)
- Zupančič M. 2001. Vloga substrata pri odstranjevanju kovinskih ionov v modelu rastlinske čistilne naprave. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 78 str.

## **ZAHVALA**

Hvala mentorici izr. prof. dr. Marini Pintar za sprejem, vodenje, pomoč, razumevanje, somentorici doc. dr. Tjaši Griessler Bulc iz podjetja Limnos za širino in podporo, prof. biol. Alenki Ivanuš iz Inštituta za celulozo in papir Ljubljana za izredno razumevanje in podporo, Gorazdu Lavsegar iz JP komunala Cerknica za širino in podporo, sodelavcem centra za pedologijo in varstvo okolja za prijaznost in pomoč, vsem profesorjem in asistentom, da so mi pri študiju nesebično podajali znanje.

Posebna zahvala moji ženi Nini, mojima otrokoma Zarji in Svitlu ter mami Gabrijeli. Diplomsko nalogo posvečam nedavno pokojnemu očetu Jožetu za ves njegov trud in vzor v življenju.