

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ŠTUDIJ BIOTEHNOLOGIJE

Ivanka KRAJNIK

**UČINKOVITOST ČIŠČENJA ODPADNIH VODA V  
RASTLINSKI ČISTILNI NAPRAVI OB ZAGONU**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij – 2. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ŠTUDIJ BIOTEHNOLOGIJE

Ivanka KRAJNIK

**UČINKOVITOST ČIŠČENJA ODPADNIH VODA V RASTLINSKI  
ČISTILNI NAPRAVI OB ZAGONU**

MAGISTRSKO DELO  
Magistrski študij – 2. stopnja

**EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT IN  
CONSTRUCTED WETLAND AT START-UP**

M. SC. THESIS  
Master Study Programmes

Ljubljana, 2016

Magistrsko delo je zaključek Magistrskega študijskega programa 2. stopnje - Biotehnologija na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Delo je bilo opravljeno na Katedri za mikrobiologijo in mikrobno biotehnologijo Oddelka za zootehniko Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani ter v Podjetju za aplikativno ekologijo LIMNOS d.o.o.

Komisija za študij 1. in 2. stopnje je za mentorico magistrskega dela imenovala prof. dr. Romano Marinšek Logar, za somentorja prof. dr. Danijela Vrhovška in za recenzentko prof. dr. Ines Mandić Mulec.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednica: prof. dr. Branka JAVORNIK  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Članica: prof. dr. Romana MARINŠEK LOGAR  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za zootehniko

Član: prof. dr. Daniel VRHOVŠEK  
LIMNOS d.o.o., podjetje za aplikativno ekologijo

Članica: prof. dr. Ines MANDIĆ MULEC  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo

Datum zagovora:

Podpisana izjavljam, da je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Ivanka Krajnik

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Du2  
DK UDK 606.628.3/.4:628.32:628.35(043.2)  
KG okolje/naravovarstvo/učinkovitost čiščenja/odpadne vode/Rakitna/rastlinske čistilne naprave  
AV KRAJNIK, Ivanka  
SA MARINŠEK LOGAR, Romana (mentorica)/VRHOVŠEK, Danijel (somentor)  
KZ SI-1000, Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
ZA Univerza u Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Študij biotehnologije  
LI 2016  
IN UČINKOVITOST ČIŠČENJA ODPADNIH VODA V RASTLINSKI ČISTILNI NAPRAVI OB ZAGONU  
TD Magistrsko delo (Magistrski študij – 2. stopnja)  
OP XV,67, [15] str., 22 pregl., 19 sl., 13 pril., 87 vir.  
IJ sl  
JI sl/en  
AI Raziskave o učinkovitosti delovanja rastlinskih čistilnih naprav (RČN) poročajo o vrsti primerov uspešnega čiščenja odpadnih voda različnih virov. RČN Rakitna predstavlja RČN horizontalnega tipa in je posajena s *Phragmites australis*. Nahaja se na nadmorski višini 800 m ter je projektirana za čiščenje odpadne vode do obremenitve 870 populacijskih enot (PE). Povprečna vrednost kemijske potrebe po kisiku (KPK) je na vtoku znašala 309 mg/L in na iztoku 26 mg/L, kar ustreza 92 % učinkovitosti čiščenja, povprečna vrednost biokemijske potrebe po kisiku (BPK<sub>5</sub>) pa je na vtoku znašala 197 mg/L in na iztoku 22 mg/L, kar ustreza 89 % učinkovitosti čiščenja. V okviru magistrskega dela so se poleg meritev KPK in BPK<sub>5</sub> opravljale meritve deleža suhe snovi, koncentracije fosfatov, dušika po Kjeldahlu, amonijevega dušika, nitratnega dušika in mikrobiološke analize. Rezultati so pokazali 48 % učinkovitost čiščenja glede na delež suhe snovi, 90 % učinkovitost glede na koncentracijo fosfatov, 57 % učinkovitost glede na dušik po Kjeldahlu, 72 % učinkovitost glede na amonijev dušik, 62 % učinkovitost glede na nitratni dušik in 99,5 % učinkovitost glede na mikrobiološke analize. Kljub relativno visokim odstotkom učinkovitosti čiščenja smo izmerili nekaj vrednosti, ki so presegale zakonsko določene mejne vrednosti. Očitne korelacije med rastlinsko biomaso in učinkovitostjo čiščenja nismo dokazali, saj bi za določanje le-te potrebovali več podatkov. Spomladi, v začetnem delu meritev, namreč rast rastlin ni bila uspešna, zato je bila potrebna ponovna dosadnja poganjkov.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Du2  
DC UDC 606.628.3/.4:628.32:628.35(043.2)  
CX environment/nature protection/treatment efficiency/Rakitna/constructed wetlands  
AU KRAJNIK, Ivanka  
AA MARINŠEK LOGAR, Romana (supervisor)/VRHOVŠEK, Danijel (co-advisor)  
PP SI-1000, Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Master Study in Biotechnology  
PY 2016  
TI EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT IN CONSTRUCTED WETLAND AT START-UP  
DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)  
NO XV,67, [15] p., 22 tab., 19 fig., 13 ann., 87 ref.  
LA sl  
AL sl/en  
AB A series of studies on the efficiency of constructed wetlands (CW) report of successful examples of wastewater treatment from different sources. CW Rakitna represents a horizontal type of CW and is planted with *Phragmites australis*. It is located at an altitude of 800 m and is designed for loadings of wastewater up to 870 population equivalents (PE). The average detected value of chemical oxygen demand (COD) was 309 mg/L in the inflow and 26 mg/L in the outflow, which corresponds to 92 % cleaning efficiency. Further, the average detected value of biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) was 197 mg in the inflow and 22 mg/L in the outflow, which corresponds to 89 % cleaning efficiency. For determining the efficiency of wastewater treatment there where in addition to COD and BOD<sub>5</sub> values during our master thesis also performed measurements of dry matter content, phosphates, Kjeldahl nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate and microbiological analyzes. Results showed 48 % removal efficiency for dry matter content, 90 % efficiency for phosphate content, 57 % efficiency for Kjeldahl nitrogen, 72 % efficiency for ammonia nitrogen, 62 % efficiency for nitrate and 99,5 % efficiency for microbiological parameters. Despite relatively high cleaning efficiency percentage we measured a handful of values above the legal limits during our research. Obvious correlation between plant biomass and cleaning efficiency was not observed. For determining such more data would be required. In the spring, when beginning part of measurements took place, the plant growth was not successful, so it was necessary to replant the shoots.

## KAZALO VSEBINE

|                                                                  |          |
|------------------------------------------------------------------|----------|
| KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....                         | III      |
| KEY WORDS DOCUMENTATION .....                                    | IV       |
| KAZALO VSEBINE .....                                             | V        |
| KAZALO PREGLEDNIC.....                                           | IX       |
| KAZALO SLIK.....                                                 | XI       |
| KAZALO PRILOG .....                                              | XIII     |
| OKRAJŠAVE IN SIMBOLI .....                                       | XIV      |
| SLOVARČEK .....                                                  | XV       |
| <br>                                                             |          |
| <b>1 UVOD .....</b>                                              | <b>1</b> |
| 1.1 NAMEN DELA .....                                             | 1        |
| 1.2 HIPOTEZE .....                                               | 2        |
| <br>                                                             |          |
| <b>2 PREGLED OBJAV .....</b>                                     | <b>3</b> |
| 2.1 RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE (RČN) .....                      | 3        |
| 2.1.1 Ekoremediacijske metode .....                              | 3        |
| 2.1.2 Tipi RČN .....                                             | 3        |
| 2.1.2.1 RČN s površinskim tokom .....                            | 4        |
| 2.1.2.2 RČN s podpovršinskim tokom .....                         | 5        |
| 2.1.3 Pomen RČN.....                                             | 6        |
| 2.1.4 Prednosti in pomanjkljivosti RČN.....                      | 7        |
| 2.1.4.1 Prednosti RČN.....                                       | 7        |
| 2.1.4.2 Pomanjkljivosti RČN.....                                 | 7        |
| 2.1.5 RČN za čiščenje pitne vode.....                            | 8        |
| 2.2 SESTAVINE RČN .....                                          | 8        |
| 2.2.1 Pomen matriksa v RČN .....                                 | 8        |
| 2.2.2 Pomen makrofitov v RČN.....                                | 9        |
| 2.2.2.1 Izbira makrofitov za RČN .....                           | 11       |
| 2.2.2.2 Razmnoževanje rastlin, uporabljenih v RČN .....          | 11       |
| 2.2.3 Pomen perifitona v RČN .....                               | 12       |
| 2.3 KORELACIJA MED RASTLINAMI IN MIKROORGANIZMI ZNOTRAJ RČN...12 |          |
| 2.3.1 Encimska aktivnost znotraj RČN .....                       | 13       |
| 2.4 NAČRTOVANJE, IZGRADNJA IN VZDRŽEVANJE RČN .....              | 14       |
| 2.5 UČINKOVITOST DELOVANJA RČN .....                             | 15       |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.5.1 Odstranjevanje dušikovih spojin in fosfatov .....</b>                               | <b>17</b> |
| 2.5.1.1 Cikel dušikovih spojin v RČN.....                                                    | 17        |
| 2.5.1.2 Fosfatni cikel v RČN .....                                                           | 18        |
| <b>2.5.2 Določanje učinkovitosti delovanja RČN.....</b>                                      | <b>18</b> |
| <b>2.6 SLOVENSKA ZAKONODAJA IN EVROPSKE DIREKTIVE NA PODROČJU</b>                            |           |
| <b>    ČIŠČENJA ODPADNIH VODA .....</b>                                                      | <b>19</b> |
| <b>2.6.1 Zakon o vodah.....</b>                                                              | <b>19</b> |
| <b>2.6.2 Zakon o varstvu okolja .....</b>                                                    | <b>19</b> |
| <b>2.6.3 Zakonodajni predpisi na področju čiščenja odpadnih voda s pomočjo</b>               |           |
| <b>    čistilnih naprav .....</b>                                                            | <b>20</b> |
| 2.6.3.1 Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in              |           |
| javno kanalizacijo .....                                                                     | 21        |
| 2.6.3.2 Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih            |           |
| naprav .....                                                                                 | 21        |
| 2.6.3.3 Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih                |           |
| čistilnih naprav .....                                                                       | 21        |
| 2.6.3.4 Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne in padavinske odpadne vode ....             | 22        |
| 2.6.3.5 Mejne vrednosti, veljavne za RČN Rakitna .....                                       | 22        |
| <b>3 MATERIALI IN METODE .....</b>                                                           | <b>24</b> |
| <b>3.1 VZORČENJE .....</b>                                                                   | <b>24</b> |
| <b>3.2 MERITVE NA TERENU .....</b>                                                           | <b>25</b> |
| <b>3.2.1 Merjenje temperature, pH in prevodnosti .....</b>                                   | <b>25</b> |
| <b>3.2.2 Merjenje raztopljenega kisika .....</b>                                             | <b>25</b> |
| <b>3.2.3 Določanje števila poganjkov <i>Phragmites australis</i> in njihove višine .....</b> | <b>26</b> |
| <b>3.3 MERITVE V LABORATORIJU .....</b>                                                      | <b>26</b> |
| <b>3.3.1 Merjenje suhe snovi (SS).....</b>                                                   | <b>26</b> |
| <b>3.3.2 Merjenje koncentracije nitratov .....</b>                                           | <b>27</b> |
| <b>3.3.3 Merjenje koncentracije fosfatov.....</b>                                            | <b>27</b> |
| <b>3.3.4 Merjenje kemijske potrebe po kisiku (KPK) .....</b>                                 | <b>28</b> |
| <b>3.3.5 Merjenje biokemijske potrebe po kisiku (BPK<sub>5</sub>).....</b>                   | <b>28</b> |
| <b>3.3.6 Merjenje amonijevega dušika in dušika po Kjeldahlu .....</b>                        | <b>30</b> |
| 3.3.6.1 Merjenje vsebnosti dušika po Kjeldahlu .....                                         | 30        |
| 3.3.6.2 Merjenje vsebnosti amonijaka .....                                                   | 31        |
| <b>3.3.7 Mikrobiološke analize .....</b>                                                     | <b>31</b> |
| 3.3.7.1 Priprava gojišča LB .....                                                            | 31        |
| 3.3.7.2 Priprava tekočega gojišča MacConkey.....                                             | 32        |

|         |                                                                              |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.7.3 | Ugotavljanje skupnega števila mikroorganizmov na gojišču LB .....            | 32 |
| 3.3.7.4 | Ugotavljanje števila koliformnih bakterij na selektivnem gojišču .....       |    |
|         | MacConkey.....                                                               | 33 |
| 3.4     | PODATKI O RASTLINSKI ČISTILNI NAPRAVI RAKITNA .....                          | 33 |
| 3.4.1   | Posebnosti RČN Rakitna .....                                                 | 34 |
| 3.5     | TEŽAVE MED VZORČENJEM NA RČN RAKITNA .....                                   | 36 |
| 3.5.1   | Meteorna voda .....                                                          | 36 |
| 3.5.2   | Rast rastlin .....                                                           | 36 |
| 4       | REZULTATI.....                                                               | 38 |
| 4.1     | REZULTATI FIZIKALNO-KEMIJSKIH DEJAVNIKOV, IZMERJENIH NA<br>TERENU.....       | 38 |
| 4.1.1   | Vrednosti pH.....                                                            | 38 |
| 4.1.2   | Temperatura .....                                                            | 38 |
| 4.1.3   | Prevodnost.....                                                              | 39 |
| 4.1.4   | Delež raztopljenega kisika .....                                             | 40 |
| 4.2     | REZULTATI FIZIKALNO-KEMIJSKIH DEJAVNIKOV, IZMERJENIH V<br>LABORATORIJU ..... | 40 |
| 4.2.1   | Suha snov.....                                                               | 40 |
| 4.2.2   | Vrednosti KPK.....                                                           | 41 |
| 4.2.3   | Vrednosti BPK <sub>5</sub> .....                                             | 42 |
| 4.2.4   | Vsebnost fosfatov .....                                                      | 43 |
| 4.2.5   | Vsebnost dušika po Kjeldahlu .....                                           | 43 |
| 4.2.6   | Vsebnost amonijevega dušika.....                                             | 44 |
| 4.2.7   | Koncentracija nitratnega dušika.....                                         | 45 |
| 4.2.8   | Primerjava izbranih dejavnikov vtoka in iztoka .....                         | 46 |
| 4.3     | REZULTATI MIKROBIOLOŠKIH PREISKAV .....                                      | 46 |
| 4.4     | SPREMLJANJE RASTI <i>P. australis</i> .....                                  | 49 |
| 4.5     | PODATKI O TEMPERATURI IN KOLIČINI PADAVIN V ČASU VZORČENJA<br>.....          | 49 |
| 4.6     | UČINKOVITOST ČIŠČENJA RČN RAKITNA .....                                      | 50 |
| 4.6.1   | Učinkovitost čiščenja glede na biomaso makrofitov.....                       | 50 |
| 4.6.2   | Vpliv dinamike obremenjenosti na učinkovitost delovanja RČN Rakitna ...      | 51 |
| 5       | RAZPRAVA.....                                                                | 53 |
| 5.1     | FIZIKALNO-KEMIJSKI DEJAVNIKI NA RČN .....                                    | 53 |
| 5.2     | MIKROBIOLOŠKI DEJAVNIKI .....                                                | 57 |
| 5.3     | SPREMLJANJE RASTI <i>P. australis</i> .....                                  | 58 |

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| <b>6 SKLEPI .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>7 POVZETEK.....</b> | <b>60</b> |
| <b>8 VIRI .....</b>    | <b>61</b> |
| ZAHVALA                |           |
| PRILOGE                |           |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Mejne vrednosti za mikrobiološke dejavnike (Uredba o emisiji ..., 2007a)..                                                                                                                         | 21 |
| Preglednica 2: Mejne vrednosti dejavnikov KPK in BPK <sub>5</sub> za odpadne vode na iztoku male komunalne čistilne naprave (Uredba o emisiji ..., 2007b).....                                                    | 22 |
| Preglednica 3: Dnevi izvedenih meritev na RČN Rakitna. ....                                                                                                                                                       | 24 |
| Preglednica 4: Volumen uporabljenega vzorca glede na pričakovani BPK <sub>5</sub> (System OxiTop ..., 1998).....                                                                                                  | 29 |
| Preglednica 5: Gram snovi v 100 mL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, standardne raztopine glukoze in glutaminske kisline ter inhibitorja nitrifikacije (System OxiTop..., 1998). .... | 30 |
| Preglednica 6: Sestavine bakterijskega gojišča LB (Gerhardt in sod., 1994).....                                                                                                                                   | 31 |
| Preglednica 7: Sestava gojišča MacConkey za selektivno rast enterobakterij (Acumedia, 2012).....                                                                                                                  | 32 |
| Preglednica 8: Izmerjene vrednosti pH na posameznih gredah v času vzorčenja. ....                                                                                                                                 | 38 |
| Preglednica 9: Izmerjena temperatura na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                                                   | 39 |
| Preglednica 10: Izmerjena prevodnost na posameznih gredah v času vzorčenja. ....                                                                                                                                  | 39 |
| Preglednica 11: Izmerjene vrednosti deleža raztopljenega kisika na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                        | 40 |
| Preglednica 12: Izmerjene vrednosti SS na posameznih gredah v času vzorčenja. ....                                                                                                                                | 41 |
| Preglednica 13: Izmerjene vrednosti KPK na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                                                | 42 |
| Preglednica 14: Izmerjene vrednosti BPK <sub>5</sub> na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                                   | 43 |
| Preglednica 15: Izmerjene vrednosti koncentracije fosfatov na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                             | 43 |
| Preglednica 16: Izmerjene vrednosti dušika po Kjeldahlu na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                                | 44 |
| Preglednica 17: Izmerjene vrednosti amonijevega dušika na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                                                                                                 | 45 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 18: Izmerjene vrednosti nitratnega dušika na posameznih gredah v času vzorčenja.....                                             | 46 |
| Preglednica 19: Povprečne koncentracije izbranih dejavnikov na vtoku in iztoku RČN Rakitna brez upoštevanja vzorcev V6, V9 in V10. ....      | 46 |
| Preglednica 20: Pregled rezultatov mikrobioloških preiskav vzorcev RČN Rakitna.....                                                          | 47 |
| Preglednica 21: Povprečno število poganjkov in njihova povprečna višina na površini enega m <sup>2</sup> na posamezni gredi RČN Rakitna..... | 49 |
| Preglednica 22: Povprečna učinkovitost čiščenja izmerjenih dejavnikov.....                                                                   | 50 |

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Klasifikacija RČN za čiščenje odpadnih voda (prirejeno po Vymazal, 2007).....                                                                                                                 | 4  |
| Slika 2: Zgoraj – RČN s prosto plavajočimi rastlinami, spodaj – RČN s površinskim tokom in emergentnimi makrofiti (prirejeno po Vymazal, 2007). ....                                                   | 5  |
| Slika 3: Zgoraj – RČN s horizontalnim tokom, spodaj – RČN z vertikalnim tokom (prirejeno po Vymazal, 2007).....                                                                                        | 6  |
| Slika 4: Prikaz sproščanja kisika v okolici koreninskega sistema, ki omogoča nastanek območji s prisotnim kisikom (oksična cona) in območij brez kisika (anoksična cona) (Brix in sod., 2003). ....    | 10 |
| Slika 5: Shematski prikaz izgradnje RČN (Limnos, 2014). ....                                                                                                                                           | 14 |
| Slika 6: Levo - primer vzorčenja z merilno čašo iz cevi zbiralnega jaška, opravljeno pri vzorčenju V8, desno – primer shranjevanja vzorca, primerne za transport in nadaljnje delo v laboratoriju..... | 25 |
| Slika 7: Primer merjenja in beleženja temperature, pH in prevodnosti, opravljeno pri vzorčenju V8.....                                                                                                 | 25 |
| Slika 8: Prikaz označene površine kvadranta leve strani polirne grede (v ospredju) in leve strani čistilne grede (v ozadju) pri vzorčenju V4. ....                                                     | 26 |
| Slika 9: Skica RČN Rakitna, zgrajene v letu 2012.....                                                                                                                                                  | 34 |
| Slika 10: Polirna greda RČN Rakitna ob vzorčenju V10. ....                                                                                                                                             | 34 |
| Slika 11: Zgoraj – topografska karta Rakitne (1:500) , spodaj – zračni posnetek RČN Rakitna (označeno na sliki) z okolico (Sinergise, 2013; Google Zemljevidi, 2015).....                              | 35 |
| Slika 12: Prelivanje vode čez jašek neposredno po dvigu pokrova na filtrirni gredi RČN Rakitna, opaženo pri vzorčenju V9. ....                                                                         | 36 |
| Slika 13: Zgoraj – razraščanje trave ob vzorčenju V3 na filtrirni gredi in v ozadju vidna čistilna greda brez prisotnih makrofitor, spodaj - razraščanje trave na filtrirni gredi ob vzorčenju V4..... | 37 |
| Slika 14: Okužba <i>Phragmites australis</i> z listnimi ušmi na filtrirni gredi, vidna na steblu in listih rastlin .....                                                                               | 37 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 15: Levo – povprečne vrednosti SS, KPK in BPK <sub>5</sub> na vtoku in iztoku iz RČN Rakitna, desno - povprečni koncentraciji fosfatov in amonijevega dušika na vtoku in iztoku iz RČN Rakitna.....           | 46 |
| Slika 16: Levo - primer plošče po 24-urnem gojenju mikroorganizmov iz vzorcev RČN Rakitna na gojišču MacConkey, desno – primer plošče po 24-urnem gojenju mikroorganizmov iz vzorcev RČN Rakitna na gojišču LB..... | 48 |
| Slika 17: Temperatura in količina padavin v času vzorčenja na območju Rakitne.....                                                                                                                                  | 50 |
| Slika 18: Dinamika povprečnih vrednosti dejavnikov KPK, BPK <sub>5</sub> , fosfatov in amonijevega dušika v času vzorčenja. ....                                                                                    | 51 |
| Slika 19: Dinamika obremenjenosti RČN Rakitna v času od marca do septembra 2014, izražene kot enote PE v odvisnosti od časa. ....                                                                                   | 52 |

## KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Preglednica indeksov MPN s 95 % verjetnostjo različnih kombinacij pozitivnih epruvet v testu razredčevanja v treh epruvetah s vrednostmi 0,1, 0,01 in 0,001 g (mL).

PRILOGA B: Preglednica indeksov MPN s 95 % verjetnostjo različnih kombinacij pozitivnih epruvet v testu razredčevanja v treh epruvetah s vrednostmi 0,01, 0,001 in 0,0001 g (mL).

PRILOGA C: Podatki o porabi vode za odjemalce, priključene na RČN Rakitna v času od marca do septembra 2014

PRILOGA D: Izmerjene vrednosti teže žarilnega lončka pred in po sušenju vzorca za izračun deleža SS, opravljene v dveh ponovitvah

PRILOGA E: Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti KPK

PRILOGA F: Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti koncentracije fosfatov

PRILOGA G: Izmerjene vrednosti množine dušika po Kjeldahlu, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti

PRILOGA H: Izmerjene vrednosti množine amonijevega dušika, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti

PRILOGA I: Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti koncentracij nitratnega dušika

PRILOGA J: Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču LB pri temperaturi 38 °C

PRILOGA K: Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču MacConkey pri temperaturi 38 °C

PRILOGA L: Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču MacConkey pri temperaturi 42 °C

PRILOGA M: Temperatura zraka (°C) in količina padavin (mm/h) v času izvajanja meritev na RČN Rakitna od marca do septembra 2014

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

| Okrajšava          | Pomen                                                                                                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARSO               | Agencija Republike Slovenije za okolje                                                                                   |
| ATP                | Adenozin trifosfat                                                                                                       |
| BPK <sub>5</sub>   | Biokemijska potreba po kisiku (angl. <i>biochemical oxygen demand</i> ; <i>BOD</i> <sub>5</sub> )                        |
| DO                 | Koncentracija raztopljenega kisika (angl. <i>dissolved oxygen</i> )                                                      |
| EPA                | Agencija za varstvo okolja Združenih držav (angl. <i>United States Environmental Protection Agency</i> ; <i>US EPA</i> ) |
| FWS                | Sistem s površinskim tokom vode (angl. <i>free water surface</i> )                                                       |
| HSSF               | Rastlinske čistilne naprave s horizontalnim tokom vode (angl. <i>horizontal subsurface flow wetlands</i> )               |
| KPK                | Kemijska potreba po kisiku (angl. <i>chemical oxygen demand</i> ; <i>COD</i> )                                           |
| LB                 | Gojišče Luria-Bertani                                                                                                    |
| ORP                | Oksidacijsko redukcijski potencial                                                                                       |
| RČN                | Rastlinska čistilna naprava                                                                                              |
| T                  | Temperatura                                                                                                              |
| TSS                | Skupna suspendirana snov (angl. <i>total suspended solids</i> ; <i>TSS</i> )                                             |
| MO                 | Mikroorganizmi                                                                                                           |
| NH <sub>4</sub> -N | Amonijev dušik                                                                                                           |
| NO <sub>2</sub> -N | Nitritni dušik                                                                                                           |
| NO <sub>3</sub> -N | Nitratni dušik                                                                                                           |
| PE                 | Populacijski ekvivalent                                                                                                  |
| SSF                | Rastlinske čistilne naprave s podpovršinskim tokom vode (angl. <i>subsurface flow wetlands</i> )                         |
| ZV                 | Zakon o vodah                                                                                                            |
| ZVO                | Zakon o varstvu okolja                                                                                                   |

## SLOVARČEK

|           |                                                                                                                                                                                           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fitosfera | Neposredna okolica rastlin, kjer okoljski dejavniki opredeljujejo habitate in življenjske cikle rastlin                                                                                   |
| Makrofiti | Vodne rastline, vidne s prostim očesom                                                                                                                                                    |
| Perifiton | Združba obrasti ali prerast je združba mikroskopskih avtotrofnih in heterotrofnih organizmov, ki so pritrjeni na podlago v vodotokih in litoralu stojećih voda                            |
| Rizosfera | Del fitosfere, ki obdaja koreninski sistem rastlin. Gre za ozko področje tal okoli korenin, ki je pod vplivom izločkov korenin in posledično vključuje drugačno mikrobno združbo kot tla. |

## 1 UVOD

Čiščenje onesnažene vode z močvirskimi rastlinami in ponovna uporaba očiščene vode sega v obdobje antične Grčije in Rima. V 14. in 15. stoletju se je odpadna voda uporabljala za zalivanje v mediteranskih mestih ter tudi v osrednji in severni Evropi, npr. v Nemčiji, Franciji, na Poljskem in v Veliki Britaniji (Ilias in sod., 2014). Naravni sistemi za čiščenje odpadnih voda so v uporabi od samega začetka zbiranja odpadne vode, ki sodeč po dokumentaciji sega v leto 1912 (Kadlec in Knight, 1996). Raziskave o uporabi rastlinskih čistilnih naprav (RČN) za čiščenje odpadnih voda so se v Evropi pojavile v 50. letih prejšnjega stoletja, v ZDA pa v poznih 60. letih prejšnjega stoletja (Constructed ..., 2000).

RČN so naprave, ki posnemajo samočistilne procese v naravnih močvirskih ekosistemih in s katerimi želimo dosegati čim večjo učinkovitost čiščenja na najmanjšem možnem prostoru (Pendelton in sod., 2005). Tehnologija RČN je bila v Sloveniji predstavljena leta 1989, prva RČN pa je bila zgrajena leta 1991 v Ponikvi in je v obratovanju še danes (Zupančič Justin in sod., 2012). Ena od prednosti RČN pred ostalimi napravami za čiščenje odpadnih voda je njihovo preprosto vzdrževanje. V večini primerov ti sistemi namreč delujejo brez elektrike (Vovk Korže in Vrhovšek, 2007).

RČN v današnjem času predstavljajo možnost trajnostnega ekološkega čiščenja odpadne vode. Gre za zapleten ekosistem, kjer prihaja do interakcij med biotskimi in abiotskimi sestavinami, ki so bistvenega pomena za razumevanje delovanja procesov čiščenja. Osnova je biološko raznolik ekosistem, ki omogoča odstranjevanje, recikliranje, preoblikovanje ali imobilizacijo sedimentov in hranil. Večina procesov temelji na delovanju vegetacije v sodelovanju z mikroorganizmi (Greenway, 2008).

Rastlinska čistilna naprava Rakitna se nahaja v občini Brezovica. Idejna zasnova za njeno izgradnjo se je pojavila leta 2005 pri projektu Očistimo Ljubljano. V letu 2011 se je začelo intenzivno načrtovanje, do same izgradnje pa je prišlo leta 2012. Zasaditev RČN Rakitna z navadnim trsom (*Phragmites australis*) je bila opravljena septembra 2013. Gre za novejšo RČN velike dimenzije, ki ima svoje specifičnosti glede ekoloških pogojev, saj se nahaja na nadmorski višini 800 m in leži na območju kraškega polja. Spada med RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom. Zasnovana je za čiščenje odpadne vode za obremenitve do 870 populacijskih ekvivalentov (PE) (Limnos, 2014).

### 1.1 NAMEN DELA

Naš namen je bil preizkusiti in ugotoviti učinkovitost čiščenja odpadnih voda v RČN Rakitna. Optimizirati smo želeli zagon RČN Rakitna v njenem prvem letu delovanja. Na osnovi rednih analiz fizikalno-kemijskih dejavnikov in mikrobioloških dejavnikov ter biomase rastlin smo želeli ugotoviti in predlagati pretoke v RČN, ki bi dosegali največje učinke čiščenja odpadne vode. Meritve so potekale v rednih 3-tedenskih presledkih in sicer na vtoku v filtrirno gredo (1. greda), vtoku v čistilno gredo (2. greda), vtoku v polirno gredo (3. greda) ter iztoku iz RČN v bližnji vodotok. Ob polni rasti rastlin smo želeli spremljati nivo iztoka in spremljati izmerjene dejavnike.

## 1.2 HIPOTEZE

- Učinkovitost čiščenja RČN Rakitna se poveča z večanjem biomase rastlin.
- Izmerjeni dejavniki (temperatura, pH, prevodnost, raztopljen kisik, suha snov, koncentracija nitratov, fosfatov, kemijska potreba po kisiku, biokemijska potreba po kisiku, amonijev dušik, dušik po Kjeldahlu, skupno število mikroorganizmov in skupno število koliformnih bakterij) se spreminjajo glede na vremenske pogoje in obremenitve z odpadno vodo.
- Najhitrejšo rast rastlin pričakujemo na polirni gredi, najpočasnejšo rast pa na filtrirni gredi.
- Izmerjeni dejavniki na iztoku iz RČN Rakitna bodo pod mejnimi vrednostmi, ki jih določata Zakon o vodah in Zakon o varstvu okolja ter zakonodajni predpisi na področju čiščenja odpadnih voda.

## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE (RČN)

Rastlinske čistilne naprave (angl. *constructed wetlands*) so naprave, katerih delovanje temelji na fizikalnih, kemijskih in bioloških procesih. Sem spadajo (Sim, 2003):

- fizikalni procesi: sedimentacija, filtracija, adsorpcija, izhlapevanje,
- kemijski procesi: precipitacija, hidroliza, oksidacija/redukcija,
- biološki procesi: metabolizem bakterij, rastlin, absorpcija, naravno odmiranje.

RČN so oblikovane kot bazeni iz vode, matriksa in rastlin. Te tri sestavine lahko poljubno spreminjamo glede na naše razmere in zahteve. Ostale sestavine, kot so mikrobna združba in vodni nevretenčarji, se razvijajo spontano (Davis in sod., 1995).

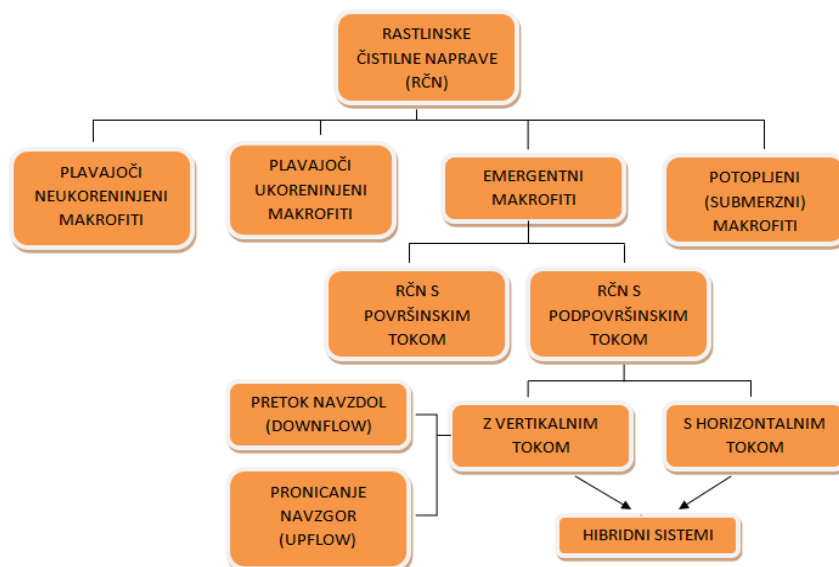
Mokrišča so definirana kot kombinacija vodnega in talnega ekosistema, saj kažejo karakteristike obeh sistemov. Dokazana očiščevalna sposobnost je spodbudila znanstvenike in inženirje, da izdelajo umetne čistilne naprave, ki izkoriščajo to sposobnost. RČN so sistemi, zasnovani za čiščenje odpadnih voda, ki zajemajo kombinacijo bioloških, kemijskih in fizikalnih procesov čiščenja (Huang in sod., 2012).

#### 2.1.1 Ekoremediacijske metode

Ekoremediacija je pojem, s katerim označujemo uporabo naravnih procesov za obnovo in zaščito okolja. Z ekoremediacijskimi metodami lahko zmanjšamo in odpravljamo posledice kmetijskega onesnaževanja, turizma, prometa, industrije, odlagališč in poselitve. Vključujejo zbiranje, zadrževanje, čiščenje in večkratno uporabo vode, pri čemer izkoriščajo samočistilne sposobnosti naravnih ekosistemov. Možnosti uporabe ekoremediacijskih metod je zelo široka, zato bomo v nadaljevanju izpostavili zgolj nekaj primerov. Mednje spada uporaba RČN in drugih sistemov za terciarno čiščenje komunalnih, živinorejskih, industrijskih in drugih problematičnih odpadnih voda, čiščenje odpadnih voda iz razpršenih virov, vegetacijski pasovi (blažilne cone), revitalizacija (biološka obnova) degradiranih vodotokov, jezer, gramoznic ipd., obnova ekosistemov za redke ogrožene vrste rastlin in živali, zaščita podtalnice in vodnih zajetij, zaščita naravovarstvenih področij in obdelava vode za večnamensko uporabo (Vrhovšek in Vovk Korže, 2006). Ekoremediacijski sistemi so torej večnamenski, saj povečujejo samočistilno zmogljivost okolja, omogočajo zadrževanje vode ter povrnejo habitat divjim živalim in rastlinam (Istenič in sod., 2012).

#### 2.1.2 Tipi RČN

Osnovna razdelitev RČN temelji na tipu rasti makrofitov. Poznamo tudi ločevanje RČN glede na smer vodnega toka (slika 1) (Vymazal, 2007).

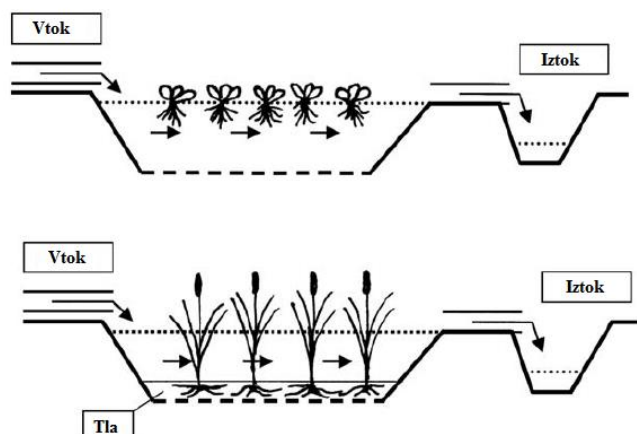


Slika 1: Klasifikacija RČN za čiščenje odpadnih voda (prirejeno po Vymazal, 2007).

Tako v praktični uporabi kot v strokovni literaturi RČN ločimo na RČN s površinskim tokom in RČN s podpovršinskim tokom (Constructed ..., 2000). V nadaljevanju bomo podrobneje predstavili oba tipa čistilnih naprav.

#### 2.1.2.1 RČN s površinskim tokom

Za RČN s površinskim tokom (angl. *free water surface: FWS*) je značilno, da je vodna površina na letni ravni izpostavljena atmosferi (slika 2) (Davis in sod., 1995). Značilna je tudi plitva globina vode in nizka hitrost pretoka (Iasur-Kruh, 2012). Imenovane RČN so po izgledu zelo podobne naravnim mokriščem, saj vsebujejo vodne rastline, ki so ukoreninjene v plasti zemlje na dnu RČN, medtem ko vodni tok poteka okrog listov in stebel rastlin (Constructed ..., 2000). Glavna predstavnika tovrstnih RČN so močvirja in barja porasla z vegetacijo. Slabost RČN s površinskim tokom je privabljanje komarjev, rib, dvoživk, plazilcev in ptic (Ammonia ..., 2009). Uporabljajo se predvsem v namen sekundarnega in terciarnega čiščenja za manjše število PE in za sisteme posameznih greznic, kjer dnevni pritok odpadne vode ni večji od 190 m<sup>3</sup>/dan (Davis in sod., 1995; Ammonia ..., 2009).



Slika 2: Zgoraj – RČN s prosto plavajočimi rastlinami, spodaj – RČN s površinskim tokom in emergentnimi makrofiti (prirejeno po Vymazal, 2007).

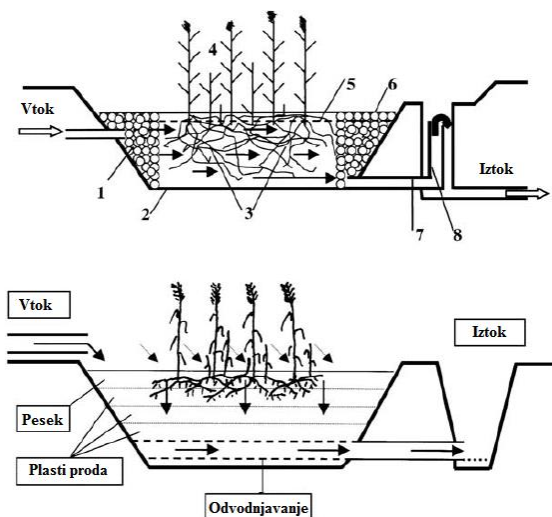
#### 2.1.2.2 RČN s podpovršinskim tokom

RČN s podpovršinskim tokom (angl. *subsurface flow wetlands: SSF*) se razlikujejo od sistemov FWS v poroznem matriksu (prod, pesek oz. prst), ki se v tem primeru nahaja nad nivojem vode. Tok odpadne vode je vedno pod površino matriksa. Tok vode poteka okrog koreninskega sistema rastlin. Ob višjih koncentracijah raztopljenega kisika prihaja do procesa nitrifikacije in tvorbe biofilmov na površini rizosfere (Davis in sod., 1995; Ammonia ..., 2009).

RČN s podpovršinskim tokom nadalje razdelimo na dva tipa (slika 3) (Vymazal, 2007):

- **RČN s horizontalnim tokom (angl. *horizontal subsurface flow wetlands; HSSF*):** odpadna voda se nahaja pod površino matriksa. Sistemi HSSF so v splošnem dražji od sistemov FWS, vendar so stroški vzdrževanja nizki. Navadno se uporabljajo za sekundarno čiščenje odplak iz manjših stanovanjskih objektov. Ti sistemi lahko delujejo tudi v hladnejših vremenskih razmerah, pri čemer ima glavno izolativno vlogo pesek. Problemi, ki se lahko pojavljajo pri tovrstnih sistemih, so povezani z zamažitvijo matriksa (Kadlec in Wallance, 2009). Odpadna voda zapolnjuje prostor med prodom in se pretaka horizontalno, spontano, brez odvisnosti od zunanjih virov energije. RČN tega tipa imajo relativno tanko plast matriksa (globine 0,4-0,85 m). Gre za najbolj zastopan tip RČN (Wastewater Gardens, 2012). Začetni vložek za izgradnjo horizontalnih sistemov je višji kot za RČN s površinskim tokom predvsem na račun večje količine porabljenega matriksa, njihova prednost pa je uspešno delovanje pri nižjih temperaturah (Davis in sod., 1995).
- **RČN z vertikalnim tokom (angl. *vertical flow wetlands: VF*):** tovrsten tip RČN se v Evropi uporablja kot alternativa sistemom HSSF, saj želimo zagotoviti višjo koncentracijo kisika, kot ga lahko dosežemo pri horizontalnem sistemu. Uporabljajo se za močno onesnaženo odpadno vodo (Kadlec in Wallance, 2009). Navadno zavzamejo za tretjino manjšo površino v primerjavi z sistemi HSSF. Nekateri primeri dajejo boljše rezultate čiščenja kakor horizontalni sistemi, vendar je njihova pomanjkljivost ta, da temeljijo na kontroliranem viru energije. Odpadna voda

priteka v presledkih, vsakih 2-6 ur. Velja, da imajo debelejšo plast matriksa v primerjavi s horizontalnim tipom (navadno 0,65 m), pri čemer je matriks sestavljen iz 3 različnih plasti proda oz. peska. Vrhnji sloj predstavlja 5 cm plast proda premera od 4-8 mm, sledi 50 cm plast peska (0-4 mm), nato zopet 5 cm plast proda (4-8 mm) in spodnja 5 cm plast proda (8-16 mm) (Wastewater Gardens, 2012).



Slika 3: Zgoraj – RČN s horizontalnim tokom, spodaj – RČN z vertikalnim tokom (prirejeno po Vymazal, 2007).

### 2.1.3 Pomen RČN

Eno izmed perečih vprašanj industrijske družbe je velika poraba vode in posledično potreba po čiščenju nastale odpadne vode, pri čemer RČN predstavljajo učinkovit način čiščenja le-te. Njihova uporaba je vedno širše zastopana v državah članicah Evropske unije. Uporabljajo se za čiščenje različnih tipov odpadnih voda, med drugim tudi industrijskih odplak (Philippe in sod., 2015). Poleg Evropskih držav RČN predstavljajo učinkovit način čiščenja odplak iz gospodinjstev in industrijske odpadne vode v tropskem podnebj (Ebrahimi in sod., 2013).

RČN se uporabljajo za primarno, sekundarno in terciarno čiščenje odpadne vode iz gospodinjstev, kanalizacije, agroživilske in industrijske odpadne vode (Ebrahimi in sod., 2013; Huang in sod., 2012). Spadajo med eko-tehnološke pristope čiščenja in veljajo za najbolj primeren način čiščenja odpadnih voda manjših naselji. Najbolj uporabljani so sistemi s horizontalnim tokom, vendar v zadnjem času prihaja tudi do gradnje vertikalnih sistemov. RČN s površinskim tokom so od omenjenih sistemov najmanj zastopane, čeprav spadajo med najstarejše načine čiščenja v Evropi (Ebrahimi in sod., 2013).

Cilj uporabe čistilnih naprav je doseganje maksimalnega izkoristka odpadne vode na način, ki nima negativnega vpliva na okolje in je tako družbeno kot ekonomsko sprejemljiv. Navadno to vključuje pridobivanje energije ali njeno skladiščenje v obliki organskega ogljika, recikliranje hranil in ponovno uporabo vode, predvsem v sušnih območjih. Na drugi strani pa RČN predstavljajo učinkovit sistem za zaščito pred poplavami (Harrington in McInnes, 2009).

RČN predstavljajo cenejši način čiščenja odpadnih vod v primerjavi z ostalimi tehnološkimi procesi čiščenja le-teh. Njihova primarna vloga je izboljšanje kakovosti vode (Sim, 2003). Učinkovito lahko odstranjujejo onesnaževala iz odpadnih voda ter izboljšujejo kvaliteto vode. Sistem RČN ima hidravlični režim, pri čemer je hitrost pretoka v RČN vedno višji od hitrosti pretoka iz RČN. Zmanjšan pretok je posledica evaporacije, evapotranspiracije, padavin ter infiltracije. Za učinkovito čiščenje je potrebno uravnavanje matriksa, globine vode in ustrezen izbor rastlinske vrste. Večje RČN imajo ekonomsko prednost pred manjšimi naravnimi sistemi čiščenja odpadne vode predvsem v smislu nižjih stroškov vzdrževanja na očiščeno enoto (Office of Water Programs, 2009).

## **2.1.4 Prednosti in pomanjkljivosti RČN**

### **2.1.4.1 Prednosti RČN**

Prednosti RČN (Davis in sod., 1995; Huang in sod., 2012; Vrhovšek in Kroflič, 2007):

- poceni in tehnično nezahteven način čiščenja odpadnih voda,
- nizki stroški izgradnje in vzdrževanja (ni porabe električne energije za vzdrževanje),
- vzdrževanje zahteva zgolj periodičen in ne stalen nadzor,
- omogočajo učinkovito čiščenje tudi ob spremembi pretoka,
- omogočajo ponovno uporabo vode,
- RČN s podpovršinskim tokom so odpornejše na mraz in ne povzročajo smradu
- se estetsko vklopijo v pokrajino in ustvarjajo nov življenjski prostor,
- imajo visoko samočistilno in pufersko sposobnost,
- zadržujejo vodo v pokrajini.

Poleg naštetega RČN omogočajo povečanje biodiverzitete, omogočajo skladiščenje ogljika, imajo poučno in rekreativno vlogo in prispevajo k ureditvi poplavne varnosti (Huang in sod., 2012).

### **2.1.4.2 Pomanjkljivosti RČN**

Pomanjkljivosti RČN (Davis in sod., 1995):

- za svoje delovanje potrebujejo večjo površino v primerjavi z ostalimi sistemi čiščenja odpadnih voda. Izgradnja RČN je ekonomsko upravičena, kadar je na razpolago cenovno dostopno zemljišče,
- učinkovitost čiščenja RČN je lahko odvisna od letnega časa oz. se spreminja glede na okoljske razmere, kot so npr. obilno deževje ali suša. RČN sicer lahko delujejo tudi v hladnejših mesecih, saj fiziološki procesi čiščenja potekajo nemoteno, pod pogojem, da voda v sami RČN ne zamrzne. Večina reakcij poteka znotraj matriksa, kjer se zaradi mikrobne aktivnosti in razgradnje sprošča dovolj toplote, ki

preprečuje zamrznitev podzemnih plasti. Ob tem poteka čiščenje odpadne vode pod plastjo ledu. Za ustvarjanje toka vode pod plastjo ledu se poslužujemo dviganja vodostajev, pri čemer prihaja do zamrznitve zgornjih plasti. Po nastanku plasti ledu sledi znižanje nivoja vode,

- učinkovitost čiščenja je lahko zmanjšana v primeru večjega vstopa onesnaževal in sprememb v pretoku vode,
- biološke sestavine, prisotne v RČN so občutljive na toksične snovi (npr. amonijak in pesticidi),
- zahtevajo minimalno količino vode, ki je potrebna za preživetje bioloških sistemov znotraj RČN. Čiščenje sicer poteka ob začasnem pomanjkanju vode, vendar je ob popolni izsušitvi RČN prekinjeno.

Glavni pomisleki pri načrtovanju in delovanju RČN so hidravlične in hidrološke razmere, učinkovitost odstranjevanja organskih snovi, učinkovitost odstranjevanja dušika ter izbira in vzdrževanje primerne vegetacije (Reed, 2003).

### 2.1.5 RČN za čiščenje pitne vode

Poleg čiščenja odpadnih voda se RČN lahko uporabljajo za čiščenje pitne vode. Prednost uporabe RČN pred drugimi postopki čiščenja vode so nižji stroški. Ob tem se ne dodaja kemikalij, ki bi se ob postopku čiščenja sproščali v vodo (Vrhovšek in Vovk Korže, 2006). Posledica agrikulturne dejavnosti na območjih, kjer ni ustrezne zaščite vodnih virov, je lahko povečanje koncentracije nitratov, ostankov pesticidov in mikrobiološko onesnaženje. Obstoječe tehnološke rešitve (adsorpcijski filtri, membrane) so dragi in zahtevni za upravljanje. Pogosto uporabljeno kloriranje in ozoniranje ne odstranita škodljivih nitratov. Slednji ne morejo biti odstranjeni z adsorpcijskimi agensi (npr. aktivni ogljik), lahko pa se odstranijo z reverzno osmozo ali ionsko izmenjavo (Istenič D. in sod., 2009). Enostavna tehnologija RČN omogoča poceni in sonaravno čiščenje. Ob uporabi ustreznih rastlin, pretoka in dimenzij RČN lahko omogočimo odstranjevanje zdravju škodljivih mikroorganizmov iz pitne vode in odstranjujemo pesticide, nitrate in težke kovine, ki se vežejo na rastlinsko biomaso. RČN za čiščenje pitne vode lahko uporabimo predvsem za manjše vodooskrbne sisteme (Vrhovšek in Vovk Korže, 2006).

## 2.2 SESTAVINE RČN

### 2.2.1 Pomen matriksa v RČN

Matriks predstavlja rastno okolje za mikroorganizme, deluje kot sito in vpliva na hidravlični zadrževalni čas (Wastewater Gardens, 2012). Glavne lastnosti matriksa, ki določajo, ali je le-ta primeren za uporabo v RČN so kationska izmenjalna kapaciteta (angl. *cation exchange capacity*; CEC), električna prevodnost, tekstura, pH ter prisotnost organske snovi. Optimalen pH tal je med 6,5 in 8,5. Vrednost pH določa dostopnost in zadrževanje težkih kovin ter nutrientov. Kationska izmenjalna kapaciteta meri kapaciteto tal, ki lahko zadrži pozitivno nabite ione in se močno razlikuje med različnimi tipi tal.

Oksidacijsko redukcijski potencial (ORP) tal je pomemben faktor pri odstranjevanju dušika, fosforja, nitratov, amonijaka, železa in mangana iz vode (Davis in sod., 1995).

Matriks je navadno mešanica več vrst peska, na njem pa so posajene vlagoljubne rastline (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007). Matriks, ki se uporablja pri RČN so: prst, pesek, kamni, prod in organski material, npr. kompost. Matriks predstavlja mesto, kjer potekajo kemijske in mikrobiološke transformacije za čiščenje odpadne vode, po drugi strani pa omogoča zadrževanje nezaželenih kontaminantov. Različne vrste matriksov kažejo dobre rezultate za čiščenje odpadnih voda manjših populacij. Podpirajo rastlinsko vodno življenje in omogočajo razvoj rizosfere, kljub temu, da je med njimi velika razlika v prepustnosti. Večja stopnja prepustnosti poveča adsorpcijo rastlin v rizosferi, kjer se nahaja večina aktivnih mikroorganizmov. Makrofiti omogočajo višjo stopnjo nitrifikacije, saj povečujejo koncentracijo raztopljenega kisika (Davis in sod., 1995).

Kljub temu, da poteka čiščenje odpadne vode tudi brez prisotnosti rastlin, se učinkovitost čiščenja s strani matriksa čez čas zmanjšuje in onesnaževala zopet postanejo biološko dostopna. Pomembno je, preučimo toksikološki efekt onesnaževal na rastline ter da se pri izbiri rastlin za RČN omejimo na odporne vrste, ki lahko vzdržujejo dobro zdravstveno stanje in ohranjajo fitoremediacijsko aktivnost v daljšem časovnem obdobju. Medtem ko ima matriks glavno vlogo pri odstranjevanju težkih kovin, ima izbira rastlin pomemben vpliv na čistilno sposobnost matriksa v daljšem časovnem obdobju. Dobo delovanja matriksa je mogoče podaljšati s pogostimi žetvami rastlin, ki v biomaso kopičijo težke kovine. Težave se lahko pojavijo ob fizioloških in kemijskih spremembah, ko pride do izločanja težkih kovin iz matriksa v RČN (Guittonny-Philippe in sod., 2015).

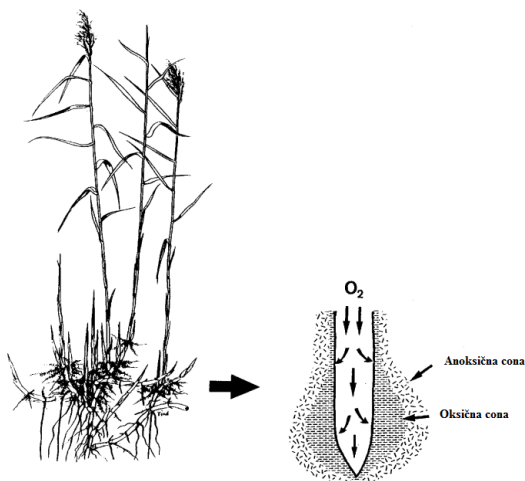
## 2.2.2 Pomen makrofitov v RČN

Rastline, ki se uporabljajo v RČN, imenujemo močvirske ali vlagoljubne rastline, ki so se sposobne prilagoditi na rast v tleh nasičenih z vodo (Huang in sod., 2012). RČN so navadno zasajene z odpornimi vrstami, ki se hitro razmnožujejo, npr. *Phragmites australis* in *Typha* spp. V literaturi zasledimo malo primerov, ki opisujejo tolerantnost divjih makrofitov na mešanico različnih onesnažil v odpadni vodi (Guittonny-Philippe in sod., 2015).

Vlogo rastlin v RČN lahko razdelimo na vlogo višjih rastlin in vlogo alg. Fotosinteza alg povečuje delež raztopljenega kisika v vodi, medtem ko višje rastline pripomorejo k samemu čiščenju odpadne vode, saj stabilizirajo matriks in zmanjšujejo pretok odpadne vode. Rastline omogočajo suspendiranje delcev, privzemajo ogljik in hranila ter jih vgrajujejo v tkiva, prenašajo pline med zrakom in tlemi, omogočajo nastanek mikro-oksigeniranih področji s prehodom kisika iz površine rastlin v matriks, s svojim koreninskim sistemom omogočajo mesta za pritrjevanje mikrobov in ob odmiranju predstavljajo nov vir organske snovi za mikroorganizme (Davis in sod., 1995). Rastline utrjujejo površino sistema, omogočajo pogoje za učinkovito filtracijo, preprečujejo tvorbo erozijskih kanalov, omogočajo naselitev številnih mikroorganizmov na svojo površino, asimilirajo hranljive snovi (npr. dušikove spojine, fosfate) in kovine ter doprinesejo k estetskemu izgledu (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007).

Cardinal in sod. (2014) so primerjali učinkovitost čiščenja modelnih RČN s površinskim tokom pri odpadnih vodah, ki je vsebovala farmacevtske produkte in prispevek rastlin pri čiščenju le-teh. Izkazalo se je, da ni bistvenih razlik v sposobnosti uspešnega čiščenja farmacevtskih produktov med RČN s prisotnimi makrofiti in RČN brez prisotnih makrofitov (Cardinal in sod., 2014). Do drugačnega zaključka pa so prišli Huang in sod. (2012), ki so ugotovili večjo učinkovitost čiščenja vode iz onesnažene reke pri RČN s prisotnimi makrofiti kot pri RČN brez njih. V splošnem so raziskave učinkovitosti čiščenja RČN s prisotnimi močvirskimi rastlinami pokazale, da je delovanje RČN ob prisotnosti rastlin bolj uspešno predvsem na račun izboljšane sposobnosti privzemanja hranilnih snovi (Huang in sod., 2012).

Rastline omogočajo razgradnjo nekaterih organskih snovi, sproščanje kisika, so vir izločanja encimov in organskih kislin in omogočajo vzpostavitev ustreznega življenjskega prostora za rast mikroorganizmov (slika 4). Pomembno je, da izbiramo tolerantne rastlinske vrste, ki razvijejo zdrav koreninski sistem in imajo širok razrast. Takšne rastline učinkovito odstranjujejo težke kovine in organska onesnaževala (Guitttonny-Philippe in sod., 2015). Selekcija rastlinske vrste je pomemben dejavnik pri oblikovanju RČN. Rastline morajo biti tolerantne na toksične snovi in na spremembe v sestavi odpadnih voda. V Evropi je najpogostejše uporabljena vrsta *Phragmites australis* (navadno trstičevje), uporabljajo pa se tudi *Typha* spp. (rogoz), *Scirpus* spp. (jezerski biček) in *Phalaris arundinacea* (pisana čužka). *Phragmites australis* spada med invazivne vrste. Ima sposobnost čiščenja površinskih voda, pri čemer se je izkazal za visoko produktiven vir t.i. zelene energije (Meerburg in sod., 2010). Zanj je značilen globok koreninski sistem, ki zagotavlja dobro oskrbo mikroorganizmov s kisikom (Davis in sod., 1995). Na Portugalskem se v večji meri uporablja *Cyperus alternifolius* (pahljačasta ostrica), ki je večletna rastlina z močnim koreninskim sistemom. Njena prednost je enostavno razmnoževanje z uporabo semen oz. delov rastlin (Ebrahimi in sod., 2013).



Slika 4: Prikaz sproščanja kisika v okolici koreninskega sistema, ki omogoča nastanek območji s prisotnim kisikom (oksična cona) in območij brez kisika (anoksična cona) (Brix in sod., 2003).

Izbor rastlinske vrste je najboljši način, s katerim se dodatno poveča odstranjevanje onesnaževal v RČN. Trendi kažejo, da so za onesnažena mesta dobri kandidati tudi avtohtone rastlinske vrste. Predlog Guitttonny-Philippe in sod. (2015) za gradnjo RČN v

Evropi je uporaba rastlinskih vrst, kot so *Carex cuprina* (podlesni šaš), *Alisma lanceolatum* (šuličastolični porečnik) ali *Iris pseudacorus* (močvirska perunika), ki so močno razširjene v Evropskih državah.

Ebrahimi in sod. (2013) so v mestu Yazd, Iran določali vpliv rastlin v RČN. V ta namen so primerjali učinkovitost čiščenja med RČN, posajeno z rastlinami (*Cyperus alternifolius*) in RČN, ki ni vsebovala rastlin. Učinkovitost čiščenja je bila glede na dobljene rezultate najboljša pri KPK, najslabša pa pri merjenju fosfatov v odpadni vodi. Eden od razlogov za slabše rezultate pri merjenju fosfatov je sproščanje fosforja iz odmrlih rastlin na RČN. Prednost uporabe *C. alternifolius* je predvsem v nizki ceni in hitri rasti rastlin (Ebrahimi in sod., 2013).

#### 2.2.2.1 Izbira makrofitov za RČN

Izbira rastlinske vrste, uporabljene v RČN, je odvisna od globine vode in pričakovanega obsega narasle vode ob poplavih. Priporočljiva je uporaba kombinacije emergentnih, podvodnih in plavajočih makrofitov (Davis in sod., 1995).

Med emergentne makrofite spadajo (Brix, 2003; Davis in sod., 1995):

- ločje (*Juncus sp.*),
- jezerski biček oz. sitec (*Scirpus sp.*),
- navadni trs (*Phragmites sp.*),
- ostrica (*Cyperus sp.*),
- sita (*Eleocharis sp.*),
- rogoz (*Typha sp.*),
- šaš (*Carex*),
- sladika (*Glyceria*),
- perunika (*Iris sp.*)

Med podvodne makrofite spadajo npr. *Elodea*, *Myriophyllum*, *Ceratophyllum*, *Isoetes*, *Littorell* in *Lobelia*, medtem ko med plavajoče makrofite spadajo vrste *Nymphaea*, *Nupar*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Lemna*, *Spirodella* idr. (Brix, 2003).

Vodna hiacinta (*Eichhornia crassipes*) in vodna leča (*Lemna*, *Woffia* in *Spirodela*) so vodne rastline, ki se uporabljajo v sistemih s površinskim tokom vode. V čistilnih napravah s površinskim tokom se uporablja predvsem ločje, ki je tolerantno na visoko vsebnost hranil, ima sposobnost hitre adaptacije in ne spada med invazivne vrste (Davis in sod., 1995).

#### 2.2.2.2 Razmnoževanje rastlin, uporabljenih v RČN

Pri naselitvi rastlin na RČN se uporabljajo semena, sadike, cele rastline ali deli rastlin (korenike, gomolji, podtaknjenci). Mnogo rastlin, ki uspevajo na RČN spada v skupino vetrocvetk, spet druge uporabljajo vegetativno razmnoževanje s stoloni. Pri presajanju rastlin na RČN je potrebna posebna pozornost, saj gre za prenos vrste v nov habitat.

Korenike in gomolji se navadno pobirajo pozno jeseni, ko se rast zaustavi ali zgodaj pomladi, ko se rast zopet prične. Celoten koreninski sistem mora biti prenesen skupaj z okoliško prstjo, saj na ta način omogočimo inokulacijo z mikroorganizmi iz prvotnega mokrišča (Davis in sod., 1995).

Korenike so navadno odrezane na dolžino dveh ali treh nodijev ter nameščene na vlažno podlago šote ali peska, kjer se hranijo pri nižjih temperaturah (4-5 °C) do zasaditve. Nižje temperature omogočajo nastanek gomoljev in rizomov. Sajenje je najbolj primerno od jeseni do prve tretjine poletja oz. zgodaj spomladi. Jeseni je priporočljivo sajenje gomoljev in korenik jezerskega bička, rogoza in osta, medtem ko je ostrice priporočljiveje gojiti spomladi, ko pride do prekinitve dormance (Davis in sod., 1995).

### 2.2.3 Pomen perifitona v RČN

Ena izrazitejših karakteristik RČN je, da so njihove funkcije v veliki meri regulirane preko delovanja mikroorganizmov in njihovega metabolizma. Glavni predstavniki so bakterije (ponekod tudi arheje), kvasovke, glive, praživali in alge. Mikrobnna biomasa predstavlja zalogo ogljika in nutrientov. Mikroorganizmi omogočajo transformacijo organskih in anorganskih snovi v netopne snovi, vršijo oksidacijo oz. redukcijo onesnažil, s čimer vplivajo na predelovalne zmogljivosti RČN in so vključeni v recikliranje hranilnih snovi. Na številčnost mikrobne populacije vplivajo toksične substance, kot so pesticidi in visoka koncentracija težkih kovin (Davis in sod., 1995).

Mikroorganizmi se naseljujejo na površini makrofitov. Največje sproščanje kisika je prisotno na apikalnem delu korenine in se z razdaljo od tega dela zmanjšuje. Vpliv na stopnjo sproščanja kisika ima tudi starost korenin in propustnost povrhnjice (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007). V nasičenem matriksu voda izpodrine zrak v porah in v procesu mikrobnega metabolizma mikroorganizmi hitreje porabljajo kisik, kot ta lahko prehaja z difuzijo iz atmosfere, zato postane matriks anoksičen. Okolje brez kisika omogoča odstranjevanje nitrata v procesu denitrifikacije in odstranjevanje oz. privzem kovin v RČN (Davis in sod., 1995).

## 2.3 KORELACIJA MED RASTLINAMI IN MIKROORGANIZMI ZNOTRAJ RČN

Huang in sod. (2012) so preučevali korelacijo med talnimi mikroorganizmi, aktivnostjo encimov v tleh in učinkovitostjo čiščenja pilotnih RČN. Primerjali so RČN brez posajenih rastlin z RČN s posajenimi rastlinami, pri čemer so opazovali kvantiteto talnih mikroorganizmov (bakterij, gliv, aktinomicet) in encimsko aktivnost (katalaze, ureaze, dehidrogenaze). Rezultati so pokazali, da je aktivnost katalaze v največji meri odvisna od številčnosti prisotnih aktinomicet in gliv, medtem ko sta aktivnosti dehidrogenaze in ureaze odvisni od številčnosti prisotnih bakterij. Najbolj zastopane med mikroorganizmi znotraj RČN so bakterije, ki predstavljajo okrog 87 % celotnih mikroorganizmov, sledijo aktinomicete, v najmanjšem številu pa so prisotne glive. Izkazalo se je, da prisotnost rastlin izboljša učinkovitost čiščenja odpadne vode, poveča število prisotnih mikroorganizmov in poveča aktivnost encimov v tleh. Število rastlin se z nižanjem temperature sorazmerno zmanjšuje in doseže svoj minimum pozimi. Število prisotnih mikroorganizmov v zimskem času predstavlja okrog 70 % prisotnih mikroorganizmov poleti (Huang in sod., 2012).

Biološke karakteristike tal RČN omogočajo aktivnost in vplivajo na razporeditev mikrobov ter vplivajo na koreninski sistem rastlin in na encime v tleh. Talni mikroorganizmi so najpomembnejša komponenta RČN. Opravljajo namreč ključno vlogo pri kroženju snovi in čiščenju odpadne vode. Ogljik, dušik in fosfor so glavni elementi, ki jih za svojo rast potrebujejo tako talni mikroorganizmi, kot tudi rastline. Mikroorganizmi uporabljajo onesnažila v odpadni vodi pri različnih procesih, npr. mineralizaciji, asimilaciji in oksidaciji. Glive imajo pomembno vlogo pri razgradnji organskega materiala, medtem ko aktinomicete poleg tega omogočajo tudi razgradnjo dušika (Huang in sod., 2012).

Raziskave so pokazale, da se znotraj RČN nahaja raznolika bakterijska združba, pri čemer so prevladujoče  $\gamma$ -proteobakterije, bakterije iz debla Bacteroidetes, Firmicutes, ter tudi aktinobakterije,  $\alpha$ -,  $\beta$ - in  $\delta$ -proteobakterije, acidobakterije in bakterije iz debla Chloroflexi. Iz RČN so pridobili genetski material bakterij, soroden vrstam *Acinetobacter* ( $\gamma$ -proteobakterije), *Arthrobacter* (aktinobakterije), *Bacillus* (Firmicutes), *Flavobacterium*, ki spadajo med potencialne denitrifikacijske bakterije, medtem ko vrsto *Acinetobacter* lahko povežemo z izboljšanim odstranjevanjem fosfatov, vrsto *Arthrobacter* pa s fiksacijo dušika (Adrados in sod., 2014; Ibekwe in sod., 2015).

### 2.3.1 Encimska aktivnost znotraj RČN

Encimska aktivnost v tleh je ena pomembnejših dejavnikov kakovosti tal. Encimi, ki katalizirajo dehidrogenacijo organskega materiala v elektronskem transportnem sistemu so dehidrogenaze, saj le-te igrajo pomembno vlogo pri degradaciji organskega materiala. Določanje dehidrogenazne aktivnosti se uporablja za določanje splošne aktivnosti mikrobov v tleh (Huang in sod., 2012).

Vodikov peroksid je prisoten znotraj rastlinskih delov in v tleh. Ima toksične učinke na biološke sisteme. Glive, bakterije in koreninski sistemi rastlin imajo sposobnost izločanja katalaze, ki ublaži toksično delovanje vodikovega peroksida, saj omogoča njegovo razgradnjo do vode in kisika (Huang in sod., 2012).

Tretji pomembnejši encim znotraj RČN je ureaza, ki omogoča hidrolizo sečnini podobnih substratov na amonijak in  $\text{CO}_2$ . Tovrstna encimska aktivnost kaže na onesnaženje z dušikovimi spojinami. Ureaze pospešujejo mineralizacijo proteinov iz rastlin. Amonijak nastaja kot produkt hidrolizacije in ga v tej obliki rastline lahko privzemajo in uporabijo kot vir anorganskega dušika (Huang in sod., 2012).

Merjenje encimske aktivnosti je eden od načinov, ki omogočajo spremljanje številčnosti talne mikrobne populacije. Encimi so odgovorni za intenziteto in smer biološke aktivnosti znotraj RČN. Mikrobi sodelujejo pri mineralizaciji organskega materiala tako v aerobnih kot anaerobnih razmerah, procesih nitrifikacije, denitrifikacije in odstranjevanju fosfatov. Prisotnost mikroorganizmov, mikrobnih komponent (encimov) in bazalne respiracije lahko uporabimo v namen potencialnih indikatorjev čistilne sposobnosti RČN (Huang in sod., 2012).

## 2.4 NAČRTOVANJE, IZGRADNJA IN VZDRŽEVANJE RČN

Izbira prostora za izgradnjo RČN je pomemben vidik načrtovanja. Pri tem je potrebno upoštevati dostopnost, razpoložljivost in uporabo zemljišča, topografijo in strukturo tal ter okoljske vire tamkajšnjega mesta in sosednjih zemljišč. Prostor za RČN se mora nahajati čim bližje viru odpadne vode. Če je mogoče, RČN namestimo na mesto, kjer se voda od vira do čistilne naprave in po njej pretaka s pomočjo gravitacijskega toka. Pri izgradnji težimo k temu, da je RČN rahlo nagnjena (Davis in sod., 1995).

Izgradnja tipične RČN vključuje 8 faz. Slika 5 prikazuje primer izgradnje RČN, ki obsega zemeljska dela, polaganje folije, nanos matriksa, vgradnjo jaškov in cevi ter zasaditev rastlin (Limnos, 2014).



Slika 5: Shematski prikaz izgradnje RČN (Limnos, 2014).

Pred zasaditvijo rastlin na RČN je potrebna predhodna priprava podlage. Z oranjem se stisnjeno zemljo zrahlja, nato se podlaga rahlo naplavi, da se le-ta poravna. Priporočljivo je, da usedanje traja eno leto oz. če je le mogoče, do naslednje rastne sezone. RČN so pogosto zgrajene v jeseni in se jih čez zimo preprosto pusti, da jih naplavijo padavine. Tik pred sajenjem se površino odvodnjava, vendar ne povsem osuši, da dobimo mehka, vlažna tla za uspešno zasaditev rastlin. Zasaditev navadno poteka ročno (Davis in sod., 1995).

Napotki za oblikovanje RČN (Davis in sod., 1995):

- preprost dizajn in izogibanje uporabe kompleksnih tehnoloških pristopov, ki navadno vodijo v neuspeh,

- oblikovanje RČN, ki zahtevajo minimalno potrebno vzdrževanje,
- oblikovanje sistema, ki ga poganja gravitacijski vir energije,
- oblikovanje RČN, ki so primerne tudi za ekstremne vremenske in klimatske pogoje, saj moramo načrtovati učinkovito delovanje RČN v težjih vremenskih razmerah (neurja, poplave, suše) in ne v povprečnih razmerah,
- oblikovanje sistema, ki zajema pokrajino in se vključuje v njeno naravno topografijo,
- posnemanje naravnih sistemov.

Rastlinska čistilna naprava mora biti zasnovana tako, da ima lastnosti naravnih močvirskih ekosistemov (Greenway, 2008). Pri oblikovanju RČN so najpomembnejši dejavniki, ki določajo učinkovitost delovanja sledeči: velikost RČN, matriks, rastlinska vrsta, postavitve in koncentracija odpadne vode (Davis in sod., 1995).

Prva stopnja vključuje mehansko predčiščenje, s čimer zagotovimo sedimentacijo trdnih delcev, ki ne smejo vstopiti na samo RČN. Možna je izgradnja iztočne lagune na končnem delu RČN, ki omogoča večnamensko izrabo vode – npr. zalivanje, gašenje požarov, dodana vrednost krajini. Po mehanskem čiščenju se voda steka v sistem vodotesnih gred izoliranih s folijo, ki opravljajo čiščenje odpadne vode. Pogoji za postavitve RČN je razpoložljiva površina 2-3 m<sup>2</sup> na PE (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007).

Hidrologija je pomemben dejavnik, ki vpliva na delovanje RČN, saj imajo že zelo majhne spremembe v hidrologiji velik vpliv na učinkovitost čiščenja. RČN imajo veliko, vendar plitko vodno površino, zato so podvržene padavinam in izgubi vode neposredno z evaporacijo ter s transpiracijo preko listnih rež rastlin. Na hidrologijo vpliva tudi gostota vegetacije, saj le-ta povzroča spremembe vodnega toka skozi preplet poganjkov, listov in korenin ter predstavlja zaščito pred soncem in vetrom (Davis in sod., 1995).

## 2.5 UČINKOVITOST DELOVANJA RČN

Za učinkovito delovanje RČN je potrebno ravnovesje med stopnjo obremenitve z onesnaževalom in hidravličnim zadrževalnim časom (Greenway, 2008). Hidravlični zadrževalni čas (HRT; angl. *hydraulic residence time*) je povprečni čas, ko se voda nahaja v čistilni napravi in je izražen kot povprečen volumen deljen s povprečno hitrostjo pretoka. Hidravlična stopnja obremenitve (HLR; angl. *hydraulic loading rate*) je izražena kot obremenitev določenega volumna vode na enoto površine (Davis in sod., 1995). Velikost RČN je odvisna od količine odpadne vode, karakteristik onesnaževal v odpadni vodi, želene stopnje končnega čiščenja in od obsega, v katerem bo mokrišče delovalo kot zadrževalni bazen (Greenway, 2008).

Predhodna obdelava odpadne vode in zadrževalni čas sta ključnega pomena za doseg optimalnega čiščenja RČN. Usedalniki so pomembni za odstranjevanje večjih trdih in grobih delcev, medtem ko so z makrofiti gosto poraščene cone bistvenega pomena za doseg maksimalnega odstranjevanja suspendiranih snovi in hranil (Greenway, 2008).

Evapotranspiracija (ET) je kombinacija izgube vode preko transpiracije rastlin in evaporacije vode iz površine RČN. Glede na to, da je površina RČN relativno velika glede na volumen vode, ima ET pomembno vlogo pri delovanju RČN. V zelo suhem, vročem obdobju lahko prihaja do močnega pomanjkanja vode in je potrebno dodajanje vode v namen zagotavljanja ustrezne vlažnosti RČN in preprečevanje koncentriranja onesnaževalcev do toksičnih vrednosti (Davis in sod., 1995). Klimatske razmere imajo poseben pomen pri upravljanju z odpadno vodo, pri čemer je relevantna tako pogostost padavin kakor tudi njihovo trajanje. V sušnih območjih v RČN priteče manjši volumen bolj koncentrirane odpadne vode. Pri načrtovanju RČN je potrebno predvidevati spremembe volumna odpadne vode in njene sestave, pri čemer je nujno usklajevanje glede na podnebne razmere (Harrington in McInnes, 2009).

Glede na to, da pri učinkovitem delovanju RČN gre za usklajeno delovanje skupnih fizioloških, kemijskih in bioloških karakteristik RČN, ki vključuje mikrobne, rastlinske in živalske združbe, je zelo pomembno, da razumemo hidrološki in biogeokemijski režim delovanja RČN (Harrington in McInnes, 2009). Učinkovitost mikrobne razgradnje se zmanjšuje z nižanjem temperature. RČN morajo biti v takšnih primerih večje za prilagoditev upočasnim reakcijskim stopnjam. Nadalje se problemi lahko pojavljajo ob taljenju snega in močnem deževju, pri čemer prihaja do hitrega pretoka skozi RČN do te mere, da retenzijski čas ni dovolj dolg za ustrezno čiščenje (Davis in sod., 1995).

Ziqiang in sod. (2009) so primerjali učinkovitost delovanja *Phragmites australis* in *Typha orientalis* znotraj RČN. Vsebnost dušika in fosforja v tkivih *Phragmites australis* je bila višja v primerjavi s koncentracijami v tkivih *Typha orientalis*. Prva se je izkazala za bolj učinkovito pri čiščenju odpadne vode. Rezultati so pokazali, da se fosfati koncentrirajo v spodnjih delih rastlin, medtem ko se nitrati koncentrirajo v zgornjih delih (listih, steblih). Iz tega lahko sklepamo, da bomo z odstranjevanjem oz. žetvijo zgornjih delov rastlin posledično odstranjevali nitrat iz RČN. Rastline so sposobne absorpcije večinskega deleža dušika v odpadni vodi, medtem ko ima pesek visoko kapaciteto za absorpcijo suspendiranih snovi in fosfatov. Čiščenje odpadne vode mora vsebovati kombinacijo fizikalnega in biološkega čiščenja (Ziqiang in sod., 2009).

Pomemben dejavnik, ki v veliki meri vpliva na učinkovito delovanje RČN je zadrževani čas. Sirianuntapiboon in sod. (2006) so primerjali učinkovitost delovanja pilotnih RČN pri zadrževalnem času 18, 36 in 72 ur. Pilotna študija glede na dejavnike KPK, BPK<sub>5</sub>, dušika po Kjeldahlu, skupnega fosfata in suspendiranih snovi je pokazala najvišjo učinkovitost čiščenja pri zadrževalnem času 3 dni, medtem ko je bila opazna najhitrejša rast rastlin pri zadrževalnem času 18 ur (Sirianuntapiboon in sod., 2006). Podobno sta tudi Ghosh in Gopal (2010) prišla do zaključka, da je učinkovitost čiščenja pri zadrževalnem času 4 dni uspešnejša v primerjavi z zadrževalnim časom 1 dne.

## 2.5.1 Odstranjevanje dušikovih spojin in fosfatov

### 2.5.1.1 Cikel dušikovih spojin v RČN

Dušik ima kompleksen biogeokemični cikel, ki temelji na biotskih in abiotskih transformacijah. Dušikove spojine se pojavljajo v širokem razponu oksidacijskih števil (od +5 do -3). V nadaljevanju so naštet in na kratko opisani procesi, ki omogočajo transformacijo, odstranjevanje in fiksacijo dušika znotraj RČN (Vymazal, 2007).

- Nitrifikacija: je biološka oksidacija amonijaka do nitrata in spada med aerobne biološke reakcije. Učinkovitost nitrifikacije je odvisna od temperature, pri čemer velja, da se le-ta izboljšuje z višanjem temperature odpadne vode (Davis in sod., 1995). Za proces nitrifikacije je potrebnega 4,3 mg/L kisika na mg oksidirane dušika (Constructed ..., 2000). Višje vrednosti raztopljenega kisika (5 mg/L ali več) povečajo verjetnost nastopa nitrifikacije (Huang in sod., 2012). Na dnu RČN je voda v anoksičnem stanju, kar zavira proces nitrifikacije. Obratno so blizu površja aerobne razmere, ki omogočajo rast rastlin. Aerobne reakcije potekajo ob prisotnosti kisika, ki je dostopen na vodni površini, v mikro območjih okoli koreninskega sistema, rizomov in na površini rastlin (Ammonia ..., 2009).
- Denitrifikacija: je redukcija nitrata do dušika v plinski fazi ( $N_{2(g)}$ ) in dušikovega oksida ( $N_2O$ ) in nastopi pod anaerobnimi pogoji (Constructed ..., 2000). Mikroorganizmi, ki vršijo denitrifikacijo, spadajo med heterotrofne bakterije in za svoje delovanje potrebujejo enostavno razgradljive vire ogljika (Davis in sod., 1995).
- Fiksacija dušika: je transformacija dušika v plinasti fazi ( $N_{2(g)}$ ) v amonijak (Vymazal, 2007). V RČN se fiksacija dušika lahko vrši tako v okolici korenin v vodnem okolju, kakor tudi na površini listov in stebel rastlin, v aerobnem ali anaerobnem okolju (Buresh in sod., 1980). Za fiksacijo dušika so odgovorne simbiotske aktinomicete, prostoživeče heterotrofne bakterije in cianobakterije (Johnston, 1991).
- Izhlapevanje amonijaka: se pojavlja na meji med vodno in plinsko fazo, kjer amonijev ion izhlapeva v amonijak, ki se nahaja v plinski fazi in se na ta način sprosti v ozračje. Izhlapevanje amonijaka se pojavi predvsem pri vrednostih pH nad 9 (Davis in sod., 1995). Pri pH vrednosti 9,3 je razmerje med amonijakom in amonijevim ionom enako 1:1 (Vymazal, 2007).
- Mineralizacija (amonifikacija): je proces mikrobne transformacije organskega dušika v anorganski dušik (amonijak).
- Asimilacija: je proces, pri katerem rastline privzemajo amonijak in nitrat. Dušik v teh dveh oblikah lahko mineralizira ali difundira v tla, od koder je v okolici

koreninskega sistema dostopen za privzem rastlin (Davis in sod., 1995). Sposobnost asimilacije imajo poleg rastlin tudi mikroorganizmi in alge (Vymazal, 2007).

- Adsorpcija amonijevega iona: amonijev ion ( $\text{NH}_4^+$ ) se lahko iz vodne faze adsorbira na anorgansko snov v tleh. Gre za šibko vezavo, ki se ob spremenjenih kemijskih pogojih v vodi hitro sprosti (Vymazal in sod., 2007).
- Anaerobna oksidacija amonijaka (ANAMMOX): je transformacija amonijaka in nitrita ( $\text{NO}_2^-$ ) do dušika v plinski fazi (Mudler in sod., 1995).

Med naštetimi mehanizmi niso vsi takšni, ki omogočajo odstranjevanje dušika iz RČN. Odstranjevanje namreč poteka zgolj preko procesov denitrifikacije, izhlapevanja amonijaka, asimilacije rastlin (pod pogojem, da rastline pred zimo odstranimo), adsorpcije amonijevega iona in procesa ANAMOX (Vymazal, 2007; Davis in sod., 1995). Ostali procesi, kamor spadata npr. nitrifikacija in mineralizacija, so zgolj procesi transformacije med različnimi oblikami dušikovih spojin in dejansko ne odstranjujejo dušika iz RČN. Kljub temu kombinacija nitrifikacije z denitrifikacijo skupaj predstavlja glavno pot odstranjevanja amonijskega dušika pri RČN (Vymazal, 2007). Učinkovitost odstranjevanja dušika je odvisna od tipa RČN in dostopnosti kisika (Ammonia ..., 2009).

Praviloma velja, da RČN z vertikalnim tokom uspešno odstranjujejo amonijak, medtem ko je proces denitrifikacije zelo omejen. Obratno pa RČN s horizontalnim tokom omogočajo dobre pogoje za denitrifikacijo, vendar sistem omejuje proces nitrifikacije amonijaka (Vymazal, 2007). Kadar nitrat prevladuje med prisotnimi oblikami dušikovih spojin, v največji meri poteka denitrifikacija (Davis in sod., 1995).

#### 2.5.1.2 Fosfatni cikel v RČN

Odstranjevanje in transformacija fosfatov vključuje adsorpcijo in precipitacijo v tleh, raztapljanje, privzem s strani rastlin in mikrobov, izpiranje, mineralizacijo in sedimentacijo. Mikrobní privzem fosfatov je izjemno hiter, vendar je količina odvzetega fosfata zelo nizka. Večji del fosfata privzamejo rastline preko koreninskega sistema, največji privzem pa je značilen v času rastne sezone. Večina fosfatov se odstrani pri procesih sedimentacije, adsorpcije, precipitacije in privzema rastlin, pri čemer se zadnji trije procesi navadno pojavljajo zgolj pri RČN s površinskim tokom. Odstranjevanje fosfatov pri vseh tipih RČN je praviloma nizko, v kolikor se ne uporabi matriksa z visoko sorpcijsko kapaciteto. V splošnem je dosežena učinkovitost odstranjevanja fosfatov pri RČN med 40 in 60 % oz. v razponu med 45 in 75 g P/m<sup>2</sup>/leto (Vymazal, 2007).

Poleg odstranjevanja dušikovih spojin in fosfatov je pomembno tudi odstranjevanje suspendiranih snovi s pomočjo sedimentacije, filtracije, adsorpcije in precipitacije, odstranjevanje patogenih mikroorganizmov in odstranjevanje težkih kovin.

#### 2.5.2 Določanje učinkovitosti delovanja RČN

Ključni dejavniki za določanje učinkovitosti delovanja RČN so (Guittonny-Philippe in sod., 2015; Cardinal in sod., 2014):

- skupna suspendirana snov (angl. *Total Suspended Solids*; TSS),
- kemijska potreba po kisiku (KPK),
- biokemijska potreba po kisiku (BPK<sub>5</sub>),
- merjenje koncentracije fluoridov, kloridov, bromidov, sulfatov, fosfatov, nitritov, nitratov,
- merjenje koncentracije kemijskih elementov: natrija, aluminija, kadmija, kroma, bakra, železa, mangana, niklja, cinka in svinca,
- fizikalno-kemijske analize: merjenje pH, T, koncentracija raztopljenega kisika, ORP, električna prevodnost.

## 2.6 SLOVENSKA ZAKONODAJA IN EVROPSKE DIREKTIVE NA PODROČJU ČIŠČENJA ODPADNIH VODA

### 2.6.1 Zakon o vodah

Zakon o vodah (ZV-1) je bil sprejet 12. julija 2002 in ureja upravljanje z morjem, celinskimi in podzemnimi vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči. Obsega varstvo voda, urejanje voda in določanje o rabi voda. Ureja tudi javno dobro in javne službe na področju voda, vodne objekte in naprave ter druga vprašanja, povezana z vodami (Zakon o vodah, 2002).

Imenovan zakon določa, da se v pravni red Republike Slovenije prenaša Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES oz. Vodna direktiva (angl. *Water Framework Directive*: WFD). Le-ta direktiva določa ukrepe Skupnosti na področju vodne politike, s katerimi se doseže postopno zmanjševanje emisij nevarnih snovi v vodo (Directive 2000/60/ES). Cilj direktive je doseganje in ohranjanje dobrega vodnega stanja ob upoštevanju ekonomskih zmožnosti države, ki je odgovorna za izvedbo ukrepov (Globevnik, 2007). Vodna direktiva ureja tudi sledenje dogajanja v vodah (monitoring voda) z istimi oz. čim bolj podobnimi standardiziranimi metodami na področju držav članic, saj površinske vode največkrat segajo na področja več držav (Marinšek Logar, 2007).

Ena pomembnejših orodij vodne politike v Evropi je Direktiva Sveta z dne 21. maja 1991 (91/271/EGS). Cilj te direktive je varstvo voda pred škodljivimi vplivi odvajanja komunalne odpadne vode iz območij poselitve ter biološko razgradljive industrijske odpadne vode iz kmetijsko-živilskega sektorja (Council Directive 91/271/EEC, 1991).

### 2.6.2 Zakon o varstvu okolja

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1) ureja varstvo okolja pred obremenjevanjem in določa temeljna načela varstva okolja, ukrepe varstva okolja, spremljanje stanja okolja in informacije o okolju, ekonomske in finančne instrumente varstva okolja, javne službe varstva okolja in druga vprašanja, povezana z varstvom okolja. Namen ZVO-1 je usmerjanje takšnega družbenega razvoja, ki omogoča dolgoročne pogoje za človekovo zdravje, kakovost življenja ter ohranjanje biotske raznovrstnosti. Velja, da področje

odvajanja in čiščenja odpadne vode urejajo predpisi, izdani na podlagi Zakona o varstvu okolja (Zakon o varstvu okolja, 2004). To pomeni, da iz tega zakona izhajajo predpisi, ki urejajo odvajanje odpadnih voda.

Zakon o varstvu okolja (2004) določa, da povzročitelj onesnaženja mora izvesti ukrepe, potrebne za preprečevanje in zmanjševanje onesnaževanja, tako da njegove emisije v okolje ne presegajo predpisanih mejnih vrednosti. Mejne vrednosti emisije, ki pri običajnih pogojih obratovanja naprave ali opravljanja dejavnosti ne smejo biti presežene, določa Vlada Republike Slovenije. Povzročitelj obremenitve mora pri opravljanju svoje dejavnosti zagotavljati monitoring vplivov svojega delovanja na okolje (Uredba o kakovosti ..., 2004).

### **2.6.3 Zakonodajni predpisi na področju čiščenja odpadnih voda s pomočjo čistilnih naprav**

Področje čiščenja odpadnih voda s pomočjo čistilnih naprav oz. emisij iz čistilnih naprav ureja več predpisov. Med pomembnejše spadajo:

- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo (2012),
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (2007a),
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav (2007b); (do velikosti 2000 PE),
- Operativni program odvajanja in čiščenja komunalne odpadne vode za obdobje od 2005 do 2017 (ARSO, 2015),
- Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne in padavinske odpadne vode (2012).

Poleg naštetih uredb obstajajo tudi uredbe, ki določajo mejne vrednosti emisij in ukrepe za njihovo zmanjševanje za posamezne industrijske oz. storitvene dejavnosti (npr. tekstilna industrija, proizvodnja kovinskih izdelkov, usnjarska industrija, proizvodnja stekla, reja domačih živali, klavnice, proizvodnja celuloze in papirja, zdravstvena dejavnost, proizvodnja fitofarmacevtskih sredstev, proizvodnja barvnih kovin, izcedne vode iz odlagališč...) (ARSO, 2015).

#### 2.6.3.1 Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo

Ta uredba določa mejne vrednosti emisije snovi v vode in v javno kanalizacijo, mejne vrednosti emisije toplote v vode, vrednotenje emisije snovi in toplote, prepovedi, omejitve in druge ukrepe zmanjševanja emisije snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda (Uredba o emisiji ..., 2012). Predpis je splošen in ureja emisije iz čistilnih naprav in vseh ostalih naprav (ARSO, 2015). Uredba podaja definicijo, da je PE enota za obremenjevanje vode, izražena v BPK<sub>5</sub>, pri čemer 1 PE predstavlja 60 g BPK<sub>5</sub>/dan (Uredba o emisiji ..., 2012).

#### 2.6.3.2 Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav

Ta uredba je v skladu z Direktivo o čiščenju komunalne odpadne vode (91/271/EGS) in določa mejne vrednosti dejavnikov odpadne vode, mejne vrednosti učinkov čiščenja odpadne vode, posebne ukrepe v zvezi z načrtovanjem in obratovanjem komunalnih čistilnih naprav in dejavnosti, za katere veljajo posebne zahteve pri odvajanju industrijske odpadne vode (Uredba o emisiji..., 2007a).

Mejne vrednosti mikrobioloških preiskav odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (2007b). Določanje mikrobioloških dejavnikov je potrebno v primeru odvajanja odpadnih voda iz male komunalne čistilne naprave na vplivnem območju kopalnih voda (Uredba o emisiji..., 2007a).

Preglednica 1: Mejne vrednosti za mikrobiološke dejavnike (Uredba o emisiji..., 2007a).

| Dejavnik                                     | Enota                                      | Mejna vrednost emisije |       |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|-------|
|                                              |                                            | Vodotoki               | Morje |
| <b>Skupne koliformne bakterije</b>           | Število prisotnih bakterij v 100 mL vzorca | 10000                  | 2000  |
| <b>Koliformne bakterije fekalnega izvora</b> | Število prisotnih bakterij v 100 mL vzorca | 2000                   | 500   |
| <b>Streptokoki fekalnega izvora</b>          | Število prisotnih bakterij v 100 mL vzorca | 400                    | 200   |

#### 2.6.3.3 Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav

Ta uredba določa mejne vrednosti dejavnikov odpadne vode, posebne ukrepe v zvezi z odvajanjem odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav glede na občutljivost vodnega okolja in ukrepe v zvezi z nadzorom obratovanja malih komunalnih čistilnih naprav in izvajanjem prvih meritev in monitoringa emisij malih komunalnih čistilnih naprav ter posebne zahteve v zvezi z nadzorom obratovanja tovrstnih čistilnih naprav. Uredba določa, da med male komunalne čistilne naprave spadajo naprave za čiščenje komunalne odpadne vode z zmogljivostjo čiščenja, manjšo od 2000 PE (Uredba o emisiji..., 2007b). V imenovani uredbi so določene mejne vrednosti dejavnikov KPK in BPK<sub>5</sub> za odpadne vode na iztoku iz malih komunalnih čistilnih naprav, kamor spada tudi RČN Rakitna.

Preglednica 2: Mejne vrednosti dejavnikov KPK in BPK<sub>5</sub> za odpadne vode na iztoku male komunalne čistilne naprave (Uredba o emisiji..., 2007b).

| Dejavnik                                          | Enota               | Mejna vrednost emisije |
|---------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Kemijska potreba po kisiku (KPK)                  | mg/L O <sub>2</sub> | 150                    |
| Biokemijska potreba po kisiku (BPK <sub>5</sub> ) | mg/L O <sub>2</sub> | 30                     |

#### 2.6.3.4 Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne in padavinske odpadne vode

Ta uredba določa vrste nalog, ki se izvajajo v okviru opravljanja storitev obvezne občinske gospodarske javne službe odvajanja in čiščenja komunalne in padavinske odpadne vode. Določa tudi obveznosti občin in izvajalcev javne službe ter standarde komunalne opremljenosti, ki morajo biti izpolnjeni za odvajanje in čiščenje komunalne odpadne vode (Uredba o odvajanju..., 2012).

#### 2.6.3.5 Mejne vrednosti, veljavne za RČN Rakitna

Z vidika mejnih vrednosti, ki jih določa Slovenska zakonodaja, spada RČN Rakitna med male komunalne čistilne naprave, ki so definirane kot naprave za čiščenje komunalne odpadne vode z zmogljivostjo čiščenja, manjšo od 2000 PE in v katerih se odpadna voda obdeluje z biološko razgradnjo (Uredba o emisiji..., 2007b).

Zakonodaja v Sloveniji določa mejne vrednosti za male komunalne čistilne naprave, kamor spada RČN Rakitna za sledeče dejavnike, ki smo jih izmerili v okviru izdelave magistrskega dela:

- amonijev dušik: mejna vrednost za amonijev in celotni dušik je 10 mg/L, pri čemer velja zgolj za temperaturo odpadne vode v območju 12° C ali več na iztoku iz čistilne naprave. To vrednost določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Uredba o emisiji..., 2007a),
- temperatura: mejno vrednost 30 °C za odvajanje neposredno in posredno v vode določa Zakon o vodah
- vrednost pH: mejno vrednost 6,5 – 9,0 za odvajanje neposredno in posredno v vode določa Zakon o vodah (2002),
- nitratni dušik: mejno vrednost 30 mg/L določa Zakon o vodah (2002),
- KPK: mejno vrednost 150 mg/L določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode za male komunalne čistilne naprave (Uredba o emisiji..., 2007b),
- BPK<sub>5</sub>: mejno vrednost 30 mg/L določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode za male komunalne čistilne naprave (Uredba o emisiji..., 2007b),
- Koncentracija fosfatov: mejno vrednost 2 mg/L določa Zakon o vodah (2002),

- Skupne koliformne bakterije: mejno vrednost 100 celic/mL določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Uredba o emisiji..., 2007a),
- Koliformne bakterije fekalnega izvora: mejno vrednost 20 celic/mL določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Uredba o emisiji..., 2007a),
- Streptokoki fekalnega izvora: mejno vrednost 4 celice/mL določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Uredba o emisiji..., 2007a).

### 3 MATERIALI IN METODE

V okviru magistrske naloge smo opravljali terensko in laboratorijsko delo, opisano v nadaljevanju. Potekalo je od sredine marca do konca septembra 2014.

Preglednica 3: Dnevi izvedenih meritev na RČN Rakitna.

| Vzorčenje | Dan<br>vzorčenja |
|-----------|------------------|
| V1        | 18.3.2014        |
| V2        | 8.4.2014         |
| V3        | 28.4.2014        |
| V4        | 20.5.2014        |
| V5        | 10.6.2014        |
| V6        | 1.7.2014         |
| V7        | 22.7.2014        |
| V8        | 12.8.2014        |
| V9        | 2.9.2014         |
| V10       | 23.9.2014        |

Delo na terenu je obsegalo:

- merjenje fizikalno-kemijskih dejavnikov odpadne vode: merjenje pH, temperature, prevodnosti in deleža raztopljenega kisika,
- odvzem in sortiranje vzorcev v vnaprej določenih volumnih za merjenje fizikalno-kemijskih in mikrobioloških dejavnikov odpadne vode in sortiranje vzorcev za kasnejše laboratorijske analize,
- štetje poganjkov na površini enega m<sup>2</sup> in merjenje njihove višine na cm natančno na vsaki gredi v dveh ponovitvah.

Laboratorijsko delo je obsegalo fizikalno-kemijske in mikrobiološke metode. V okviru fizikalno-kemijskih metod smo v vzorcih izmerili delež suhe snovi, koncentracijo fosfatov, nitratov, KPK, BPK<sub>5</sub>, vsebnost dušika po Kjeldahlu, ter vsebnost amonijevega in nitratnega dušika. Mikrobiološke metode pa so obsegale ugotavljanje najverjetnejšega skupnega števila mikroorganizmov na gojišču LB (angl. *Luria Bertani Broth*), ugotavljanje najverjetnejšega skupnega števila koliformnih bakterij na gojišču MacConkey pri 38 °C in ugotavljanje najverjetnejšega števila bakterij *E. coli* in drugih koliformnih bakterij, ki rastejo na gojišču MacConkey pri 42 °C.

#### 3.1 VZORČENJE

Vzorčenje je potekalo z merilno čašo, ki smo jo previdno potopili v cev zbiralnega jaška tako, da se s čašo nismo dotikali notranje stene cevi (slika 9). Pri tem smo uporabili zaščitne rokavice. Vodni vzorec smo pretočili v naprej pripravljene steklenice in plastenke. Vzorce smo nato shranili v hladilno torbo in jih odnesli na analizo.



Slika 6: Levo - primer vzorčenja z merilno čašo iz cevi zbiralnega jaška, opravljeno pri vzorčenju V8, desno – primer shranjevanja vzorca, primerne za transport in nadaljnje delo v laboratoriju.

Vodni vzorci so bili shranjeni pri 4°C v temi do opravljanja analiz, ki smo jih izvedli v roku 48 ur od vzorčenja. Preostale sveže vzorce smo zamrznili pri -20°C in jih odmrznili na dan opravljanja analize.

### 3.2 MERITVE NA TERENU

#### 3.2.1 Merjenje temperature, pH in prevodnosti

Uporabili smo univerzalni merilnik WTW® (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, Nemčija) z elektrodo za merjenje pH in temperature (WTW SenTix HWD pH probe) ter elektrodo za merjenje prevodnosti (ProfiLine Cond 3210/3310). Merjenje je potekalo po navodilih proizvajalca WTW.



Slika 7: Primer merjenja in beleženja temperature, pH in prevodnosti, opravljeno pri vzorčenju V8.

#### 3.2.2 Merjenje raztopljenega kisika

Uporabili smo elektrodo za merjenje koncentracije raztopljenega kisika (multi merilnik HACH® HQ40d in sonda HACH® LDO). Kisikovo elektrodo smo potopili v vodni vzorec takoj po odvzemu in počakali, da se je vrednost ustalila. Odčitali smo absolutno vrednost koncentracije raztopljenega kisika v mg/L in relativno vrednost, izraženo v odstotkih.

### 3.2.3 Določanje števila poganjkov *Phragmites australis* in njihove višine

Na vseh treh gredah RČN Rakitna smo označili naključno površino enega m<sup>2</sup> v dveh ponovitvah. Posamezen kvadrant smo označili s štirimi lesenimi palicami. Na zgornjem delu smo okrog posamezne palice ovili vrstico tako, da smo dobili obliko kvadrata. Merjenje višine poganjkov je potekalo od vzorčenja V3 do V10. Na posamezni označeni površini smo prešteli število poganjkov in izmerili njihovo višino. Iz pridobljenih podatkov je sledil izračun povprečnih vrednosti števila in višine poganjkov za vse tri grede.



Slika 8: Prikaz označene površine kvadranta leve strani polirne grede (v ospredju) in leve strani čistilne grede (v ozadju) pri vzorčenju V4.

## 3.3 MERITVE V LABORATORIJU

### 3.3.1 Merjenje suhe snovi (SS)

Pri merjenju SS smo uporabili keramične žarilne lončke, ki smo jih predhodno sušili v sušilniku SP-45 C (Kambič, Slovenija) eno uro pri 105 °C. Osušene lončke smo prenesli v eksikator in jih stehali. Sledilo je odmerjanje 50 mL vzorca in sušenje lončkov z vzorci pri 105°C. Sušenje je potekalo 24 ur, da je izhlapela vsa voda iz vzorcev. Po sušenju je sledilo ponovno tehtanje žarilnih lončkov na miligram natančno (Standard methods ..., 2005).

Za izračun deleža suhe snovi smo uporabili naslednjo enačbo:

$$SS \text{ (g/L)} = 1000 \cdot (m_{\text{pos}} - m_{\text{lon}}) / V_{\text{vz}} \quad \dots (1)$$

$m_{\text{lon}}$  - masa praznega žarilnega lončka (g)

$m_{\text{pos}}$  - masa žarilnega lončka z vzorcem po sušenju (g)

$V_{\text{vz}}$  - volumen vzorca pred sušenjem (50 mL)

(Standard methods ..., 2005).

Navadno se za opisano metodo uporablja volumen 10 mL, vendar je bil delež suhe snovi v vzorcih RČN Rakitna izjemno majhen, zato smo uporabili večje količine vzorca. Volumen 50 mL je omogočal merjenje suhe snovi.

### 3.3.2 Merjenje koncentracije nitratov

Merjenje koncentracije nitratov v vodnih vzorcih je potekalo s spektrofotometrično metodo. Pri tem smo uporabili komercialni komplet NANOCOLOR Nitrate<sup>®</sup> (MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG, Nemčija, kataloška številka 918 65).

Pri uporabi komercialnega kompleta smo sledili navodilom proizvajalca, vendar smo metodo modificirali v prid manjše porabe, pri čemer smo uporabili polovične volumne predpisanih reagentov in vzorcev. Najprej smo preizkusili izmerjene vrednosti tako, da smo primerjali umeritveno krivuljo, dobljeno po uporabi zmanjšanih volumnov z umeritveno krivuljo, dobljeno po pripravi reagentov predpisanih volumnov. Umeritvena krivulja po modificirani metodi je podala enake končne vrednosti, zato smo se odločili za uporabo modificirane metode. Tako smo v epruveto Hach prenesli 250 µL vzorca in temu dodali 2 mL reagenta R1. Sledil je dodatek 250 µL reagenta R2 in rahlo mešanje na vibracijskem mešalniku za nekaj sekund. Po 10 min smo reakcijsko mešanico prelili v plastične kivete za enkratno uporabo in izmerili absorbanco pri 365 nm. Koncentracijo nitratov smo izračunali s pomočjo umeritvene krivulje.

### 3.3.3 Merjenje koncentracije fosfatov

Osnova metode je spektrofotometrično merjenje absorbance vzorcev pri 420 nm, iz katerih smo izračunali koncentracijo fosfatov v vodnih vzorcih. Uporabljali smo vanadij-molibdatni reagent, kjer je intenziteta rumene barve proporcionalna koncentraciji fosfata. V epruveto Hach smo prenesli 3,5 mL vzorca in dodali 1 mL vanadij-molibdatnega reagenta. Sledil je dodatek 0,5 mL destilirane vode. Po 10 minutah smo izmerili absorbanco pri 420 nm (Standard methods ..., 1999). S pomočjo umeritvene krivulje smo izračunali koncentracijo fosfatov v vzorcih RČN Rakitna.

Za pripravo vanadij-molibdatnega reagenta smo pripravili raztopini A in B. Raztopina A je vsebovala 2,5 g amon-molibdata ((NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O), ki smo ga raztopili v 30 mL destilirane vode. Sledila je priprava raztopine B, kjer smo s segrevanjem raztopili 0,125 g amonijevega metavanadata (NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>) v 30 mL destilirane vode. Ko se je raztopina ohladila, smo dodali 33 mL koncentrirane HCl. Raztopino A smo zlili v raztopino B in dopolnili do 100 mL (Standard methods ..., 1999).

Pri merjenju smo uporabljali plastične UV kivete. Posebna pozornost je bila potrebna pri uporabljeni steklovini, saj je obstajala možnost kontaminacije s fosfati, ki se nahajajo v detergentih za čiščenje steklovine v laboratoriju. Fosfati se namreč lahko adsorbirajo na površino steklovine in tako povzročijo lažno pozitivne rezultate (Standard methods ..., 1999).

### 3.3.4 Merjenje kemijske potrebe po kisiku (KPK)

Za merjenje KPK smo uporabili standardno kolorimetrično metodo, ki temelji na redukciji dikromatnega iona ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ). Ob oksidaciji vzorca se namreč dikromatni ion reducira do kromovega  $3^+$  iona ( $\text{Cr}^{3+}$ ) in ob tem pride do spremembe barve. Oksidirajo se tako organske kot anorganske sestavine, vendar prevladujejo organske sestavine, ki so predmet našega merjenja (Standard methods ..., 2005).

Vzorci RČN Rakitna na iztoku iz čistilne naprave so imeli nižje vrednosti, kot jih lahko zaznamo z osnovno metodo merjenja pri 600 nm. Merjenje absorbance je zato potekalo pri dveh valovnih dolžinah:

- merjenje vzorcev, katerih pričakovana vrednost KPK je bila v območju med 100 in 900 mg/L je potekalo pri valovni dolžini 600 nm,
- merjenje vzorcev, katerih pričakovana KPK vrednost je bila pod 90 mg/L, pa je potekalo pri valovni dolžini 420 nm  
(Standard methods ..., 2005).

Heksavalentni krom dikromatnega iona se ob oksidaciji organskih snovi reducira v trivalentni krom. Heksavalentni krom absorbira pri 420 nm, trivalentni pa pri 600 nm. Pri 420 nm merimo padec koncentracije heksavalentnega iona, pri 600 nm pa merimo povečanje vsebnosti nastale trivalentne oblike (Standard methods ..., 2005).

Dan pred merjenjem KPK smo pripravili raztopino DSh (angl. *digestion solution – high range*) za merjenje višjih koncentracij KPK, raztopino DSl (angl. *digestion solution – low range*) za merjenje nižjih koncentracij KPK in reagent z žvepleno kislino SAR (angl. *sulfuric acid reagent*). Kalijev dikromat ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) smo najprej sušili 2 uri pri 150 °C. Za pripravo raztopine DSh smo raztopili 10,216 g  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  v 500 ml destilirane vode in dodali 167 mL koncentrirane  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Ko se je raztopina ohladila, smo dodali destilirano vodo do končnega volumna 1000 mL. Enak postopek smo uporabili tudi za pripravo DSl, le da smo za pripravo enakega volumna raztopine dodali 10-krat manjšo količino  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (1,022 g). Za pripravo reagenta SAR smo zatehtali 10,12 g  $\text{AgSO}_4$  v 1000 mL koncentrirane  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in raztopino premešali (Standard methods ..., 2005).

Za izvedbo meritev smo v epruveto odpipetirali 2,5 mL vzorca in dodali 1,5 mL raztopine DSh za pripravo vzorcev, kjer smo pričakovali vrednosti KPK nad 100 mg/L oz. DSl, kjer smo pričakovali vrednosti KPK pod 90 mg/L. Sledilo je počasno dodajanje 3,5 mL reagenta SAR. Epruvete smo zaprli, premešali in inkubirali 2 uri na termobloku pri temperaturi 150 °C. Ohlajenim vzorcem smo izmerili absorbanco pri 600 nm oz. 420 nm (Standard methods ..., 2005).

### 3.3.5 Merjenje biokemijske potrebe po kisiku (BPK<sub>5</sub>)

Uporabili smo standardno 5-dnevno metodo merjenja BPK<sub>5</sub> v temi pri 20°C. Pri tem smo potrebovali nepredušno zaprte steklenice in merilne glave (OxyTop®-C Measuring Heads,

WTW<sup>®</sup>, Nemčija), ki merijo padec pritiska na račun porabe kisika v plinski fazi. Steklenice smo inkubirali na stresalniku 5 dni, pri 120 obr/min (System OxiTop ..., 1998).

Test BPK<sub>5</sub> spada med standardizirane metode za spremljanje učinkovitosti čistilnih naprav. Rezultat testa nam poda vrednost, ki predstavlja množino kisika, potrebnega za biološko razgradnjo organske snovi v vzorcu. Mikroorganizmi v vzorcu oksidirajo v vodi raztopljene organske snovi. Pri testu je obvezna uporaba ATU (alitiouree) ali drugega ustreznega inhibitorja, ki zavira proces nitrifikacije. S tem preprečimo porabo kisika za oksidacijo reduciranih oblik dušika (amonijak, organski dušik) (System OxiTop ..., 1998).

Volumen uporabljenega vzorca smo izbrali glede na pričakovano vrednost BPK<sub>5</sub>, pri čemer smo upoštevali, da vrednost BPK<sub>5</sub> običajno predstavlja 60-70 % vrednosti KPK (System OxiTop ..., 1998).

Preglednica 4: Volumen uporabljenega vzorca glede na pričakovani BPK<sub>5</sub> (System OxiTop ..., 1998).

| <b>Pričakovani BPK<sub>5</sub><br/>(mg/L)</b> | <b>Volumen vzorca<br/>(mL)</b> |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>0-40</b>                                   | 432                            |
| <b>0-80</b>                                   | 365                            |
| <b>0-200</b>                                  | 250                            |
| <b>0-400</b>                                  | 164                            |
| <b>0-800</b>                                  | 97                             |
| <b>0-2000</b>                                 | 43,5                           |

V preglednici 5 so zbrane raztopine, ki smo jih pripravili v sveži miliQ vodi in uporabili za test BPK<sub>5</sub>:

- Za pripravo raztopine za merjenje BPK<sub>5</sub> vzorcev iz vtoka smo uporabili 164 mL vtoka, 164 µL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, železovega klorida in 328 µL inhibitorja nitrifikacije,
- Za pripravo raztopine za merjenje BPK<sub>5</sub> vzorcev filtrirne grede smo uporabili 250 mL vzorca filtrirne grede, 250 µL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, železovega klorida in 500 µL inhibitorja nitrifikacije,
- Za pripravo raztopine za merjenje BPK<sub>5</sub> vzorcev čistilne grede smo uporabili 432 mL vzorca filtrirne grede, 432 µL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, železovega klorida in 864 µL inhibitorja nitrifikacije
- Za pripravo raztopine za merjenje BPK<sub>5</sub> vzorcev polirne grede smo uporabili 432 mL vzorca filtrirne grede, 432 µL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, železovega klorida in 864 µL inhibitorja nitrifikacije,
- Za pripravo raztopine za merjenje BPK<sub>5</sub> standardnih vzorcev smo uporabili 250 mL vzorca filtrirne grede, 250 µL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, železovega klorida in 500 µL inhibitorja nitrifikacije. Standardni raztopini smo dodali 5 mL cepiva (vzorec iztoka iz čistilne naprave).

Preglednica 5: Gram snovi v 100 mL fosfatnega pufra, magnezijevega sulfata, kalcijevega klorida, standardne raztopine glukoze in glutaminske kisline ter inhibitorja nitrifikacije (System OxiTop ..., 1998).

|                                                                            | Gram snovi za<br>100 mL | Uporabljena<br>kemikalija                                   |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Fosfatni<br/>pufer</b>                                                  | 0,85                    | $\text{KH}_2\text{PO}_4$                                    |
|                                                                            | 2,18                    | $\text{K}_2\text{HPO}_4$                                    |
|                                                                            | 3,34                    | $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$        |
|                                                                            | 0,17                    | $\text{NH}_4\text{Cl}$                                      |
| <b>Magnezijev<br/>sulfat</b>                                               | 2,25                    | $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$                  |
| <b>Kalcijev<br/>klorid</b>                                                 | 2,75                    | $\text{CaCl}_2$                                             |
| <b>Železov<br/>klorid</b>                                                  | 0,025                   | $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$                  |
| <b>Standardna<br/>raztopina<br/>glukoze in<br/>glutaminske<br/>kisline</b> | 0,075                   | Predhodno posušena<br>glukoza pri 105 °C,<br>1h             |
|                                                                            | 0,075                   | Predhodno posušena<br>glutaminska kislina<br>pri 105 °C, 1h |
| <b>Inhibitor<br/>nitrifikacije</b>                                         | 0,1                     | Alitiourea (ATU)                                            |

Vzorci smo prezračili s 15 min mešanjem in z vmesnim odpiranjem steklenic, v tulce na merilnih glavah dodali 4-5 granul NaOH in jih inkubirali pri 20 °C za 5 dni (System OxiTop ..., 1998).

### 3.3.6 Merjenje amonijevega dušika in dušika po Kjeldahlu

#### 3.3.6.1 Merjenje vsebnosti dušika po Kjeldahlu

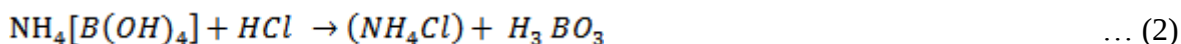
Kjeldahlova metoda je standardna metoda, ki se običajno uporablja za merjenje vsebnosti beljakovin v vzorcih. Osnova za izračun vsebnosti beljakovin temelji na dejstvu, da večina beljakovin vsebuje približno enak odstotek dušika. V našem primeru smo metodo uporabili za merjenje vsebnosti dušika v vzorcih odpadne vode iz RČN Rakitna.

Za merjenje dušika po Kjeldahlu so bili potrebni trije koraki:

1. Razklop vzorca v 96 % žveplove kisline ob prisotnosti katalizatorja (mešanica bakrovega sulfata ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) in kalijevega sulfata ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )). Vzorce smo ob tem segrevali s pomočjo termičnega bloka za razklop. Rezultat razklopa je nastanek amonijaka iz organsko vezanega dušika. Ob tem raztopina postane bistra. Zatehtali smo 10 g vzorca, dodali 1 žlice mešanice bakrovega sulfata ter kalijevega sulfata in 96 % HCl in zmes dobro premešali. Vzorce smo prenesli v termični blok za razklop, ki je bil opremljen z absorberjem za sproščene pline.

Pri razklopu se namreč v ozračje sproščajo korozivni in zdravju nevarni žveplov in dušikovi oksidi (Official method ..., 2000).

2. Destilacija amonijaka: vzorec smo naalkalili z dodatkom NaOH, pri čemer so amonijevi ioni ( $\text{NH}^+$ ) prešli v amonijak ( $\text{NH}_3$ ). Sledila je destilacija v predložko oz. destilacijsko enoto Büchi (Distillation Unit B-324) z raztopino borove kisline (2 % vodna raztopina  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) in dodatkom mešanega indikatorja (metil rdeče-bromkrezol zeleno). Amonijak in borova kislina sta reagirali in nastane amonijev boratni kompleks. Destilacija je trajala 3 min (Official method ..., 2000).
3. Titracija z močno kislino: z dodatkom 0,1 mol/L HCl smo razgradili amonijev boratni kompleks (Official method ..., 2000).



Titracija je potekala do spremembe barve iz zelene v rdečo. Zapisali smo volumne porabljene kisline, ki so bili porabljeni pri titraciji in jih uporabili za izračun množine predestiliranega amonijaka (Official method ..., 2000).

### 3.3.6.2 Merjenje vsebnosti amonijaka

Amonijak smo merili v dveh korakih, ki sta bila identična zadnjima dvema korakoma pri metodi merjenja dušika po Kjeldahlu. Edina razlika med metodama je, da pri merjenju amonijaka ne opravimo razklopa vzorca. Vzorcju pred destilacijo dodamo MgO, nato sledi destilacija in titracija s  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Official method ..., 2000).

## 3.3.7 Mikrobiološke analize

### 3.3.7.1 Priprava gojišča LB

Tekoče gojišče LB smo uporabili za gojenje *E. coli* in koliformnih bakterij. Po pripravi osnovnih sestavin (preglednica 6) smo uravnali pH na 7,0 in sterilizirali z avtoklaviranjem pri 121 °C, 15 min. Gojišče smo pred uporabo ohladili na sobno temperaturo.

Preglednica 6: Sestavine bakterijskega gojišča LB (Gerhardt in sod., 1994).

| Komponenta             | Koncentracija (g/L) |
|------------------------|---------------------|
| <b>Trypton</b>         | 10 g/L              |
| <b>Kvasni ekstrakt</b> | 5 g/L               |
| <b>NaCl</b>            | 5 g/L               |

### 3.3.7.2 Priprava tekočega gojišča MacConkey

V 1 L destilirane vode smo raztopili 35 g medija (MacCONKEY BROTH (7185), ZDA), premešali in avtoklavirali 15 min pri 121 °C. Končen pH gojišča smo uravnali na  $7,3 \pm 0,2$ . Gojišče MacConkey se uporablja za detekcijo koliformnih bakterij v mleku in vodi. Tekoče gojišče MacConkey je modificirana oblika osnovnega gojišča MacConkey, ki vsebuje barvilo bromkrezol modro. Selektiven učinek gojišča temelji na prisotnosti encimskega hidrolizata želatine, laktoze, govejega žolča (Ox-bile) in barvila bromkrezol modro. Encimski hidrolizat želatine predstavlja vir dušika in vitaminov, medtem ko laktoza predstavlja vir ogljikovih hidratov za Gram-negativne bakterije, katerih osnoven vir ogljika je laktoza. Goveji žolč zavira rast po Gramu pozitivnih bakterij. Bromkrezol modro ima vlogo indikatorja, ki spremeni barvo iz temno modre v rumeno. Sprememba barve je posledica znižanja pH zaradi tvorbe kislin, ki jih izločajo koliformne bakterije (Acumedia, 2012).

Preglednica 7: Sestava gojišča MacConkey za selektivno rast enterobakterij (Acumedia, 2012).

| Sestavine                    | Koncentracija (g/L) |
|------------------------------|---------------------|
| Encimski hidrolizat želatine | 20                  |
| Laktoza                      | 10                  |
| Goveji žolč                  | 5                   |
| Bromkrezol modro             | 0,01                |

### 3.3.7.3 Ugotavljanje skupnega števila mikroorganizmov na gojišču LB

Metoda ugotavljanja najverjetnejšega števila (angl. *Most probable number*; MPN) je metoda, pri kateri z razredčevanjem vzorca ugotovimo, kolikšno je število celic v nekem vzorcu. Temelji na predpostavki, da se celice ob ustreznem mešanju enakomerno razporedijo po celotnem volumnu. Uporabili smo mikro-MPN metodo z uporabo mikrotitrskih plošč, ki sta jo opisala Hartel in Hagedorn (1983).

Za vse 4 vzorce RČN Rakitna (vtoka, po čiščenju filtrirne grede, po čiščenju čistilne grede in po čiščenju polirne grede oz. iztoka) smo v treh ponovitvah pripravili redčitveno vrsto v razmerju 1:10. Vzorce za ugotavljanje skupnega števila mikroorganizmov po metodi MPN smo pripravili po postopku, ki ga opisuje patent Lu in sod. (2005). V vsako luknjico na mikrotitrski plošči smo nanесли 180  $\mu\text{L}$  gojišča LB, dodali 20  $\mu\text{L}$  vzorca in premešali. Z mešanjem smo zagotovili enakomerno razporeditev celic v posameznih luknjicah. Sledilo je zaporedno prenašanje 20  $\mu\text{L}$  vzorca v vsako naslednjo luknjico mikrotitrške plošče do končne redčitve  $10^{-9}$ . Po končanem razredčevanju smo vzorce inkubirali pri 38 °C, 24 ur.

Število celic smo ugotavljali s pomočjo merjenja optične gostote (angl. *optical density*: OD) pri 650 nm. Plošče smo prenesli v čitalec mikrotitrskih plošč, ki je izmeril optično gostoto v vsaki luknjici mikrotitrške plošče. Na podlagi rezultatov merjenja optične gostote smo ugotovili, pri katerih redčitvah je bila prisotna rast bakterij iz vzorcev odpadne vode.

V prilogah A in B se nahajata preglednici indeksov MPN s 95 % verjetnostjo različnih kombinacij pozitivnih epruvet v testu razredčevanja, ki smo jo uporabljali za ugotavljanje

najverjetnejšega števila bakterij v posameznih vzorcih. Povprečje treh ponovitev nam je po odčitaniu iz preglednice indeksov MPN podalo vrednost, ki je predstavljalo najverjetnejše število bakterij v nekem vzorcu.

#### 3.3.7.4 Ugotavljanje števila koliformnih bakterij na selektivnem gojišču MacConkey

Ugotavljanje števila koliformnih bakterij je potekalo po enakem postopku, kot ugotavljanje skupnega števila mikroorganizmov, le da je bilo uporabljeno selektivno gojišče MacConkey. Po končanem razredčevanju smo en set mikrotitrskih plošč z redčitvami vzorcev inkubirali pri 38 °C za 24 ur, drug set pa pri 42 °C za 24 ur.

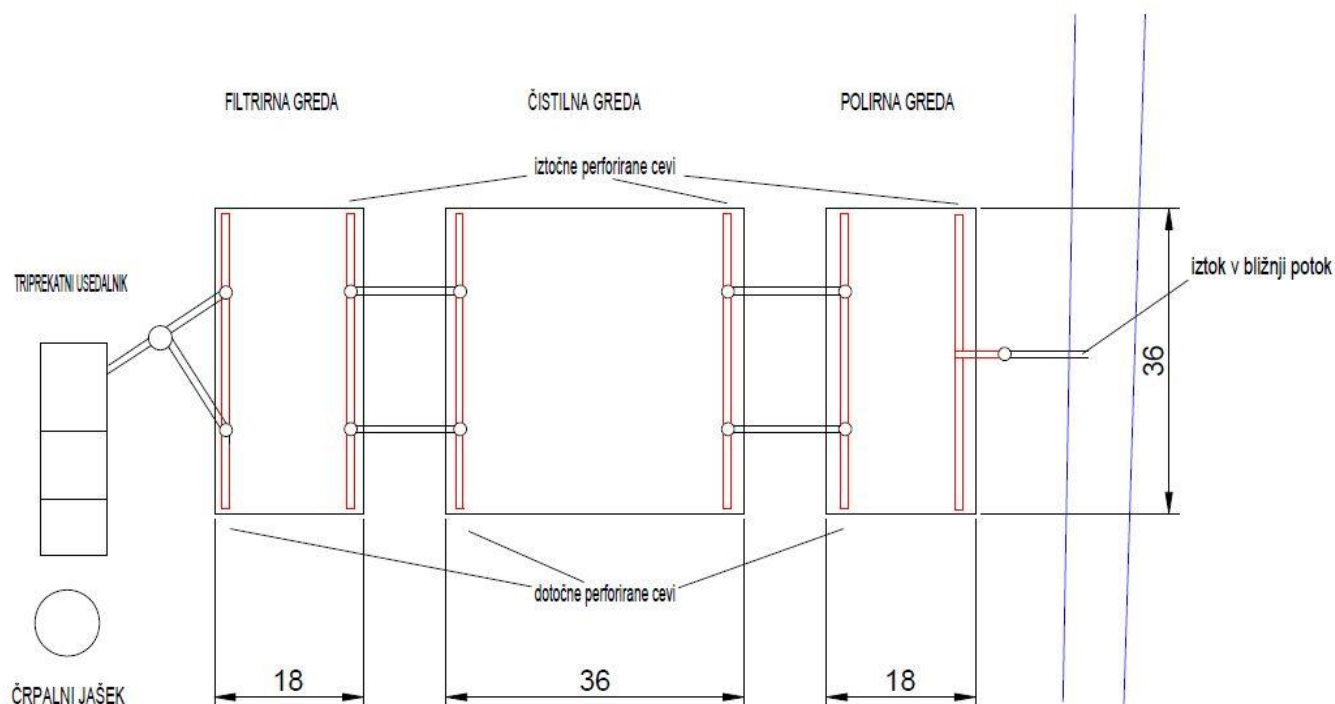
Inkubacija pri 38 °C v največji meri omogoča rast *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli* in *Salmonella typhimurium* in ne omogoča rasti *Staphylococcus aureus*, medtem ko inkubacija pri 42 – 44 °C v največji meri omogoča rast *Escherichia coli* (Acumedia, 2012).

### 3.4 PODATKI O RASTLINSKI ČISTILNI NAPRAVI RAKITNA

Odpadna voda prihaja iz Mladinskega klimatskega zdravilišča Rakitna (MKZ), bližnjih kmetij in gospodinjstev. V RČN Rakitna torej priteka tudi odpadna voda iz zdravstvenih in agroživilskih virov in ne zgolj odpadna voda iz gospodinjstev. Pri tem moramo upoštevati, da je MKZ Rakitna najbolj obremenjeno v obdobju od maja do avgusta (Mušič, 2009).

RČN Rakitna je zasnovana iz 5 glavnih komponent: triprekadni usedalnik, filtrirne grede, čistilne grede, polirne grede in iztoka očiščene vode v okolico (slika 6). Uporabljen matriks je drobljenec, ki še dodatno poveča površino za vezavo mikroorganizmov. Gre za silikatni pesek velikosti od 2-32 mm, pri čemer je na filtrirni gredi matriks najbolj grob, s pomikanjem proti polirni gredi pa postaja matriks vedno bolj fin. Poudariti je potrebno, da morajo biti mešanice matriksa prane, saj bi vnos prahu pomenil hitrejše mašenje posameznih gred.

Projektirani zadrževalni čas v usedalniku je 1 dan, znotraj same RČN Rakitna pa 3 – 4 dni. Površina RČN Rakitna je 2592 m<sup>2</sup>, globina filtrirne in polirne grede je 50 cm, globina čistilne grede pa 75 cm. Ob predpostavki, da za čiščenje odpadne vode 1 osebe potrebujemo 2,5 m<sup>2</sup>, površina RČN Rakitna zadostuje za 870 prebivalcev. Glede na podatke o mesečni porabi vode odjemalcev, priključenih na RČN Rakitna (priloga C), znaša dnevni pritok 25 m<sup>3</sup>.



Slika 9: Skica RČN Rakitna, zgrajene v letu 2012.



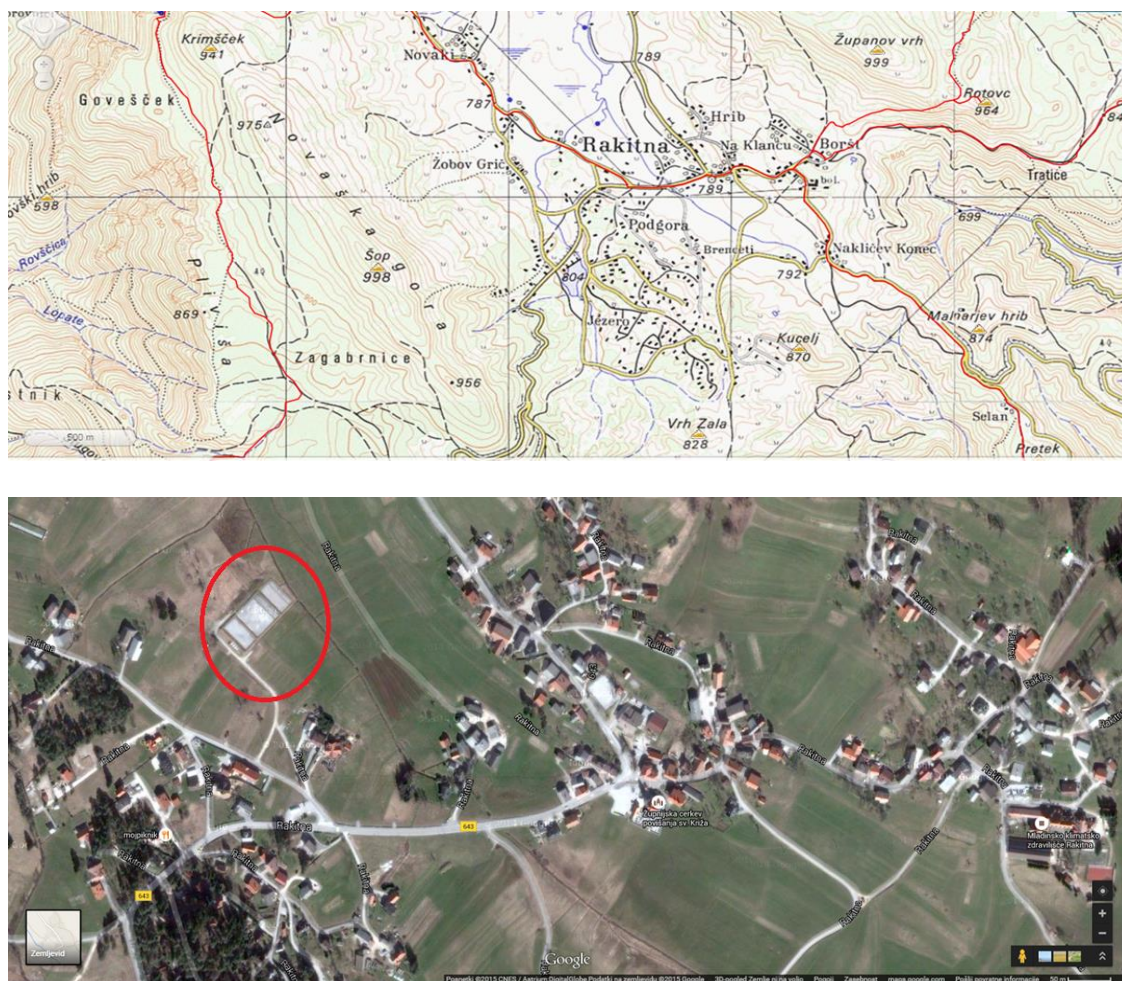
Slika 10: Polirna greda RČN Rakitna ob vzorčenju V10.

### 3.4.1 Posebnosti RČN Rakitna

RČN Rakitna je čistilna naprava velike dimenzije, saj je zasnovana za čiščenje odpadne vode v obsegu obremenitve do 870 PE. V splošnem velja, da so RČN primerne zlasti za posamezne hiše in manjša naselja, do 500 PE (Ammonia ..., 2009). Gre za drugo največjo RČN Limnowet®, zgrajeno v Sloveniji (Limnos, 2014).

RČN Rakitna je zanimiva tudi zaradi svoje lege. Rakitna je razloženo naselje na Rakitenski planoti v Občini Brezovica (slika 8). Leži na plitvem kraškem polju in deloma valoviti dolomitni planoti na nadmorski višini med 780 in 820 m ter predstavlja najvišje ležeče kraško polje v Sloveniji (Rakitna, 2015). Na tej višini so prisotne relativno nizke temperature, zato je značilen zamik vegetacijske sezone. Začetek rasti rastlin je bil pričakovan v mesecu maju.

Ena od posebnosti RČN Rakitna je povezana z iztokom iz čistilne naprave. Vsa očiščena odpadna voda iz čistilne naprave se po čiščenju polirne grede namreč zbere v zbiralnem jašku in na koncu izliva v manjši potok v neposredni bližini RČN.



Slika 11: Zgoraj – topografska karta Rakitne (1:500) , spodaj – zračni posnetek RČN Rakitna (označeno na sliki) z okolico (Sinergise, 2013; Google Zemljevidi, 2015).

### 3.5 TEŽAVE MED VZORČENJEM NA RČN RAKITNA

#### 3.5.1 Meteorna voda

Ob močnem deževju se je zaradi prevelike količine meteorne vode le-ta prelivala čez jašek pri vtoku (slika 21). Trdni delci se niso usedli na dno usedalnika, pač pa so z vodo potovali naprej, kjer jih je voda naplavila na površino RČN. Zaradi naraslega nivoja vode v usedalnikih so trdni delci iz usedalnika zamašili filtrirni sistem in perforirane cevi. Na ta način je prišlo do nanašanja trdnih delcev in smeti na čistilno napravo. Delovanje čistilne naprave je bilo manj učinkovito, čistilna naprava pa je bila bolj obremenjena kot navadno. Poleg tega je močno deževje tudi vplivalo na rezultate, saj se je odpadna voda razredčevala in se s tem ni prikazalo realnega stanja na rastlinski čistilni napravi.



Slika 12: Prelivanje vode čez jašek neposredno po dvigu pokrova na filtrirni gredi RČN Rakitna, opaženo pri vzorčenju V9.

#### 3.5.2 Rast rastlin

Rastline na čistilni napravi niso uspešno rastle. Prvi dve gredi sta bili že od vsega začetka najmanj zaraščeni. Zavrto rast na filtrirni gredi lahko pripišemo večjemu stresu, ki so jo rastline deležne zaradi onesnažene vode, saj le-ta najprej vstopi na filtrirno gredo. Težave so se pojavljale z razraščanjem trave, kar je še dodatno oteževalo rast in onemogočajo razvoj monokulture trstičevja.



Slika 13: Zgoraj – razraščanje trave ob vzorčenju V3 na filtrirni gredi in v ozadju vidna čistilna greda brez prisotnih makrofitov, spodaj - razraščanje trave na filtrirni gredi ob vzorčenju V4.

Ob zadnjem vzorčenju smo opazili, da so bile nekatere rastline na začetku filtrirne grede okužene z listnimi ušmi. Rast *Phragmites australis* je bila zavrta že od začetka, saj rastline niso bile v dobrem kondicijskem stanju in so bile bolj podvržene okužbam.



Slika 14: Okužba *Phragmites australis* z listnimi ušmi na filtrirni gredi, vidna na steblu in listih rastlin.

## 4 REZULTATI

V nadaljevanju so v obliki preglednic predstavljeni rezultati dejavnikov, izmerjenih v odpadni vodi RČN Rakitna na vtoku v RČN, po čiščenju filtrirne grede, čistilne grede in na iztoku iz RČN. Prvi cikel meritev je bil opravljen dne 18. 3. 2014, zadnji pa dne 23. 9. 2014, pri čemer je vzorčenje potekalo v rednih 3-tedenskih intervalih.

### 4.1 REZULTATI FIZIKALNO-KEMIJSKIH DEJAVNIKOV, IZMERJENIH NA TERENU

#### 4.1.1 Vrednosti pH

Vrednosti pH so se tekom vzorčenja gibale med 6,9 in 7,9. Na vtoku je povprečna pH vrednost znašala 7,34, na iztoku pa 7,45. Vrednost na vtoku se je v povprečju rahlo povišala v primerjavi z iztokom. Najvišja izmerjena vrednost na iztoku je znašala 7,9 in je bila izmerjena v mesecu juniju, najnižja pa 7,0 v mesecu marcu.

Rezultati meritev so pokazali, da vrednosti pH ne presegajo zakonsko določenih mejnih vrednosti, ki jih določa Zakon o vodah (2002). Vrednosti pH so bile rahlo bazične in so na iztoku v povprečju znašale 7,45, pri čemer je bila najvišja dosežena vrednost na iztoku 7,9. Mejna vrednost pH za male komunalne čistilne naprave je med 6,5 in 9.

Preglednica 8: Izmerjene vrednosti pH na posameznih gredah v času vzorčenja.

| pH  | Vtok | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|-----|------|-------------|-------------|-------|
| V1  | 7,8  | 7,3         | 7,5         | 7,0   |
| V2  | 7,4  | 7,2         | 7,4         | 7,5   |
| V3  | 7,3  | 7,1         | 7,4         | 7,4   |
| V4  | 7,4  | 7,2         | 7,5         | 7,4   |
| V5  | 6,9  | 7,3         | 7,7         | 7,9   |
| V6  | 7,3  | 7,1         | 7,2         | 7,3   |
| V7  | 7,3  | 7,3         | 7,4         | 7,6   |
| V8  | 7,0  | 7,0         | 7,3         | 7,2   |
| V9  | 7,5  | 7,4         | 7,4         | 7,5   |
| V10 | 7,5  | 7,4         | 7,6         | 7,7   |

#### 4.1.2 Temperatura

Temperatura odpadne vode na vtoku je bila v hladnejših mesecih višja kakor na iztoku, v času od konca aprila do septembra pa se je pri prehodu skozi RČN zviševala. Najvišja izmerjena vrednost je bila 19,7 °C, izmerjena na iztoku iz RČN v mesecu avgustu. Najnižja izmerjena vrednost pa je znašala 8,4 °C, izmerjena v začetku julija na vtoku v RČN. V 70 % primerov se je temperatura na iztoku iz čistilne naprave v primerjavi z vtokom povišala. Povprečna vrednost temperature na vtoku je bila 12,6 °C, po čiščenju filtrirne grede 13,7 °C, po čiščenju čistilne grede 13,9 °C in na iztoku 14,2 °C. Podobno kot pri meritvah pH je bila najvišja temperatura izmerjena na iztoku iz RČN (19,7 °C) v mesecu juniju, najnižja (9,6 °C) pa v mesecu marcu.

Povprečna izmerjena temperatura na RČN Rakitna je znašala 14,2 °C. Najvišja dosežena vrednost je bila 19,7 °C, mejna vrednost za temperaturo odpadne vode pri malih komunalnih čistilnih napravah pa znaša 30 °C, torej je bila temperatura odpadne vode pod mejnimi vrednostmi, ki jo določa Zakon o vodah (2002). Temperatura na iztoku iz čistilne naprave se je v primerjavi z vtokom dvignila za maksimalno 4,2 °C v mesecu juniju, kar lahko pripišemo dejstvu, da je bil to v povprečju najtoplejši mesec v času izvajanja meritev (priloga M).

Preglednica 9: Izmerjena temperatura na posameznih gredah v času vzorčenja.

| T (°C) | Vtok | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|--------|------|-------------|-------------|-------|
| V1     | 10,3 | 8,8         | 10,1        | 9,6   |
| V2     | 13,6 | 13,5        | 12,7        | 13,0  |
| V3     | 10,8 | 12,0        | 11,5        | 11,7  |
| V4     | 12,3 | 13,2        | 14,5        | 15,1  |
| V5     | 15,1 | 18,8        | 18,0        | 19,3  |
| V6     | 8,4  | 10,9        | 11,3        | 11,3  |
| V7     | 14,4 | 16,2        | 16,6        | 17,1  |
| V8     | 16,5 | 19,2        | 18,8        | 19,7  |
| V9     | 13,8 | 13,6        | 13,8        | 13,7  |
| V10    | 11,2 | 11,2        | 11,5        | 11,5  |

#### 4.1.3 Prevodnost

Prevodnost odpadne vode je bila v vseh primerih na iztoku nižja kot na vtoku in se je gibala med 221 in 1206  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Prevodnost na iztoku se je v povprečju znižala za 1,6-krat, v mesecu maju pa kar za 4-krat v primerjavi z vtokom. Najnižja izmerjena prevodnost na iztoku je bila v mesecu maju (221  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), najvišja pa v začetku aprila (746  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Preglednica 10: Izmerjena prevodnost na posameznih gredah v času vzorčenja.

| Prevodnost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Vtok | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|----------------------------------------|------|-------------|-------------|-------|
| V1                                     | 956  | 874         | 627         | 568   |
| V2                                     | 1038 | 975         | 719         | 746   |
| V3                                     | 221  | 980         | 729         | 714   |
| V4                                     | 883  | 714         | 598         | 221   |
| V5                                     | 1206 | 1133        | 575         | 588   |
| V6                                     | 806  | 746         | 1031        | 712   |
| V7                                     | 1016 | 892         | 685         | 555   |
| V8                                     | 978  | 945         | 638         | 683   |
| V9                                     | 779  | 735         | 723         | 688   |
| V10                                    | 717  | 658         | 657         | 597   |

Opazili smo postopno nižanje prevodnosti od vtoka proti iztoku. Ob čiščenju odpadne vode namreč prihaja do zmanjševanja koncentracije raztopljenih anorganskih snovi in s tem do zmanjšanja prevodnosti. Prevodnost predstavlja pomemben dejavnik pri ugotavljanju čistosti odpadne vode, saj nam poda informacijo o prisotnosti raztopljenih snovi, ki prevajajo električni tok. Velja, da višja vrednost pomeni višjo stopnjo onesnaženja, torej večja prevodnost pomeni manjšo kvaliteto vode. Prevodnost destilirane vode znaša med

0,5-3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (EPA, 2012). Zakonodaja ne določa mejne vrednosti za prevodnost odpadne vode na iztoku malih komunalnih čistilnih naprav, vendar dobljene vrednosti lahko primerjamo z mejno vrednostjo za prevodnost pitne vode, ki znaša 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Pravilnik ..., 2004). Prevodnost na iztoku torej ustreza zakonodajnim merilom za izpust odpadne vode v okolje.

#### 4.1.4 Delež raztopljenega kisika

Delež raztopljenega kisika je v večini primerov upadal od vtoka proti iztoku iz RČN. Največji upad koncentracije raztopljenega kisika je bil izmerjen v začetku meseca septembra, kjer se je vrednost zmanjšala za 23 odstotnih točk (iz 39,5 % na 16,5 %). Vrednosti raztopljenega kisika so se gibale med 0,60 mg/L (6,2 %) in 3,72 mg/L (39,5 %). Povprečna izmerjena vrednost raztopljenega kisika je bila 1,89 mg/L na vtoku in 1,51 mg/L na iztoku iz RČN. Najvišja izmerjena vrednost na iztoku iz RČN je bila 2,43 mg/L (28,4 %), najnižja pa 0,99 mg/L (10,2 %). Zakonodaja ne določa mejne vrednosti za delež raztopljenega kisika v odpadni vodi na iztoku malih komunalnih čistilnih naprav, vendar dobljene vrednosti lahko primerjamo z mejno vrednostjo za površinske vode, ki znaša 4 mg/L (Uredba o kakovosti ..., 2002).

Preglednica 11: Izmerjene vrednosti deleža raztopljenega kisika na posameznih gredah v času vzorčenja.

| Delež raztopljenega kisika (mg/L) | Vtok          | Po 1. gredi   | Po 2. gredi   | Iztok         |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| V1                                | Ni podatka    | Ni podatka    | Ni podatka    | Ni podatka    |
| V2                                | 2,65 (28,6 %) | 0,38 (4,1 %)  | 1,62 (17,5 %) | 1,03 (11,1 %) |
| V3                                | 2,14 (22,7 %) | 0,51 (5,3 %)  | 0,60 (6,2 %)  | 1,17 (12,5 %) |
| V4                                | 2,43 (25,2 %) | 0,80 (8,3 %)  | 0,89 (9,2 %)  | 0,99 (10,2 %) |
| V5                                | 0,51 (5,6 %)  | 0,64 (7,6 %)  | 1,40 (16,5 %) | 1,68 (20,4 %) |
| V6                                | 1,43 (15,3 %) | 0,36 (4 %)    | 1,55 (17,3 %) | 1,21 (13,4 %) |
| V7                                | 0,95 (10,3 %) | 0,71 (8,1 %)  | 2,40 (27,6 %) | 2,43 (28,4 %) |
| V8                                | Ni podatka    | Ni podatka    | Ni podatka    | Ni podatka    |
| V9                                | 3,72 (39,5 %) | 1,84 (19,5 %) | 1,92 (20,7 %) | 1,54 (16,5 %) |
| V10                               | 1,30 (13,0 %) | 1,27 (12,8 %) | 1,46 (15,2 %) | 2,02 (20,7 %) |

## 4.2 REZULTATI FIZIKALNO-KEMIJSKIH DEJAVNIKOV, IZMERJENIH V LABORATORIJU

### 4.2.1 Suha snov

Suha snov, izmerjena pri vzorcih odpadne vode RČN Rakitna se je gibala med 140 mg/L in 670 mg/L in je upadala od vtoka proti iztoku. Povprečna vrednost na vtoku RČN je bila 530 mg/L, na iztoku pa 290 mg/L. Največji upad deleža SS je bil izmerjen v mesecu marcu, ker je znašala razlika med vrednostjo vtoka in iztoka 370 mg/L (preglednica 9).

Učinek čiščenja RČN Rakitna glede na delež SS je bil najboljši v začetku marca in aprila ter v obdobju od junija do konca julija. Najnižji odstotek čiščenja odpadne vode (16 %) je bil v začetku meseca septembra, najvišji pa junija (62 %). V povprečju je bil najvišji odstotek čiščenja (25 %) dosežen na filtrirni gredi. Povprečna učinkovitost čiščenja glede

na SS je bila 48 %. Zakonodaja ne določa mejne vrednosti za delež SS v odpadni vodi na iztoku malih komunalnih čistilnih naprav, določa pa mejno vrednost za neraztopljene snovi, ki znaša 80 mg/L (Zakon o vodah, 2002).

Preglednica 12: Izmerjene vrednosti SS na posameznih gredah v času vzorčenja.

| SS (mg/L) | Vtok | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|-----------|------|-------------|-------------|-------|
| V1        | 660  | 440         | 320         | 290   |
| V2        | 570  | 490         | 290         | 320   |
| V3        | 690  | 520         | 370         | 360   |
| V4        | 460  | 400         | 310         | 330   |
| V5        | 550  | 410         | 170         | 210   |
| V6        | 580  | 450         | 480         | 340   |
| V7        | 670  | 490         | 360         | 310   |
| V8        | 310  | 270         | 150         | 200   |
| V9        | 450  | 400         | 390         | 380   |
| V10       | 380  | 140         | 150         | 170   |

#### 4.2.2 Vrednosti KPK

Najnižja izmerjena vrednost KPK na iztoku iz RČN Rakitna je znašala 5 mg/L, najvišja pa 54 mg/L. Največji upad vrednosti KPK na iztoku v primerjavi z vtokom je bil izmerjen v mesecu marcu (426 mg/L), sledil je mesec maj (411 mg/L), najnižji upad vrednosti KPK pa je bil izmerjen v mesecu septembru (3 mg/L). Povprečna izmerjena vrednost KPK na vtoku je znašala 218 mg/L, po čiščenju filtrirne grede 52 mg/L, po čiščenju čistilne grede 24 mg/L, na iztoku pa 21 mg/L. Kot smo že omenili pri podpoglavju 3.3, smo zaradi nizkih vrednosti KPK nekaterih vzorcev merili pri 600 nm, drugih pa pri 420 nm. V preglednici 13 je s simbolom (\*) označeno merjenje KPK pri 420 nm, neoznačeni rezultati pa pomenijo merjenje pri 600 nm.

Izmerjene vrednosti KPK na iztoku so bile skozi celotno obdobje meritev izrazito pod mejnimi vrednostmi, ki so določene za čistilne naprave do 2000 PE. Že po čiščenju filtrirne grede so bile vse izmerjene vrednosti KPK, razen vrednosti, izmerjene ob vzorčenju V2, pod mejno vrednostjo 150 mg/L, ki jo določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode za male komunalne čistilne naprave (2007b). Učinek čiščenja glede na izmerjene vrednosti KPK je bil najvišji v obdobju od marca do junija ter v sredini julija in avgusta. Najvišjo učinkovitost čiščenja glede na vrednost KPK smo zaznali ob prvem vzorčenju in je znašala 97 %. Najnižjo učinkovitost čiščenja pa smo zaznali pri vzorcih V6, V9 in V10, kjer so bile izjemno nizke vrednosti KPK že na vtoku v čistilno napravo. Nizke vrednosti lahko pripišemo obilnim padavinam nekaj dni pred opravljeno meritvijo oz. na dan meritve (priloga M). Povprečna učinkovitost čiščenja glede na vrednost KPK brez upoštevanja vzorcev V6, V9 in V10 je bila 92 %.

Preglednica 13: Izmerjene vrednosti KPK na posameznih gredah v času vzorčenja. Zakonodaja določa mejno vrednost KPK na 150 mg/L.

| KPK (mg/L) | Vtok | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|------------|------|-------------|-------------|-------|
| V1         | 439  | 139         | 17          | 13    |
| V2         | 331  | 184         | 61          | 54    |
| V3         | 354  | 58*         | 56*         | 34*   |
| V4         | 439  | 32*         | 21*         | 28*   |
| V5         | 298  | 42*         | 29*         | 26*   |
| V6         | 60   | 9*          | 22*         | 10*   |
| V7         | 266  | 18*         | 16*         | 20*   |
| V8         | 33   | 21*         | 9*          | 6*    |
| V9         | 12*  | 5*          | 4*          | 9*    |
| V10        | 9*   | 7*          | 2*          | 5*    |

#### 4.2.3 Vrednosti BPK<sub>5</sub>

Vrednosti BPK<sub>5</sub> so se gibale med 7,6 mg/L in 300,3 mg/L. Najvišji vrednosti BPK<sub>5</sub>, ki precej odstopata od ostalih vrednosti, izmerjenih na iztoku, opazimo ob vzorčenju V2 in V3 (51,9 mg/L in 50,4 mg/L). Povprečna vrednost BPK<sub>5</sub> na vtoku je znašala 163 mg/L, po čiščenju filtrirne grede 66 mg/L, po čiščenju čistilne grede 21 mg/L in na iztoku 19 mg/L. Najvišji upad vrednosti BPK<sub>5</sub> na iztoku v primerjavi z vtokom je bil ob vzorčenju V5, najnižji upad pa pri naslednji meritvi, torej ob vzorčenju V6. V preglednici 14 lahko opazimo, da so pri vzorčenju V9 nimamo podatka o vrednosti BPK<sub>5</sub> pri nobenem od štirih vzorcev, saj je prišlo do okvare termostatske komore. Podatkov ni bilo mogoče pridobiti, ker so se vzorci segreli iz 20 °C na 30 °C.

Vrednosti BPK<sub>5</sub>, izmerjeni ob vzorčenju V2 in V3 na iztoku sta presegali mejno vrednost 30 mg/L, medtem ko so bile ostale meritve pod mejno vrednostjo 30 mg/L, ki jo določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode za male komunalne čistilne naprave (2007b). Najvišja izmerjena učinkovitost čiščenja glede na vrednost BPK<sub>5</sub> je bila v mesecu juniju (96 %), najnižja pa v začetku meseca aprila (74 %). Povprečna učinkovitost čiščenja RČN Rakitna glede na dejavnik BPK<sub>5</sub> je bila 89 %.

Vrednosti BPK<sub>5</sub> so kazale podobna nihanja v sestavi odpadne vode kot rezultati analiz KPK. Najbolj vidna odklona od povprečja sta na primerih vzorcev V6 in V10, kjer sta bili tako vrednosti BPK<sub>5</sub> kot KPK izjemno nizki. Nizke vrednosti lahko pripišemo vzorčenju odpadne vode tik po noči obilnega deževja. Dne 30. 6. 2014 je bila intenziteta padavin 23 mm/h, dne 22. 9. 2014 pa 14 mm/h. Obilno deževje je bilo značilno tudi za dan 1. 9. 2014 (16 mm/h) ter 2. 9. 2014 (11 mm/h), kar je vplivalo na rezultate meritev vzorcev V9. Podatkov o vrednosti BPK<sub>5</sub> nismo pridobili zaradi okvare termostatske komore, vendar pa podatki o vrednostih KPK kažejo na to, da je prišlo do precejšnjega redčenja vzorcev, saj so bile vrednosti KPK tako na vtoku kot na iztoku izjemno nizke. Glede na naše meritve je BPK<sub>5</sub> v povprečju predstavljal 66 % vrednosti KPK na vtoku in 86 % vrednosti KPK na iztoku (pri tem so izvzeti vzorci z dne 1. 7. 2014 in 23. 9. 2014, kjer so bile vrednosti BPK<sub>5</sub> in KPK izjemno nizke).

Preglednica 14: Izmerjene vrednosti  $BPK_5$  na posameznih gredah v času vzorčenja. Zakonodaja določa mejno vrednost  $BPK_5$  na 30 mg/L.

| <b>BPK<sub>5</sub> (mg/L)</b> | <b>Vtok</b> | <b>Po 1. gredi</b> | <b>Po 2. gredi</b> | <b>Iztok</b> |
|-------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------|
| V1                            | 191         | 79,3               | 13,6               | 6,6          |
| V2                            | 198         | 130                | 57,5               | 51,9         |
| V3                            | 269,4       | 144,6              | 57                 | 50,4         |
| V4                            | 146,8       | 40,6               | 18,3               | 20,6         |
| V5                            | 300,3       | 107,3              | 15,5               | 10,5         |
| V6                            | 44,4        | 31,5               | 8,5                | 7,6          |
| V7                            | 179,6       | 36,9               | 8,4                | 7,9          |
| V8                            | 97,3        | 21,6               | 9,5                | 9,2          |
| V9                            | Ni podatka  | Ni podatka         | Ni podatka         | Ni podatka   |
| V10                           | 40          | >3                 | >3                 | >3           |

#### 4.2.4 Vsebnost fosfatov

Izmerjene koncentracije fosfatov so se gibale med 0,60 in 10,83 mg/L. Povprečna izmerjena vrednost na vtoku je znašala 6,9 mg/L, po čiščenju filtrirne grede 3,2 mg/L, po čiščenju čistilne grede 1,34 mg/L in na iztoku 0,9 mg/L. Največji upad koncentracije fosfatov je bil izmerjen v mesecu juniju, najmanjši pa v mesecu septembru.

Koncentracija fosfatov na iztoku iz RČN je bila pri vseh meritvah pod mejno vrednostjo 2 mg P/L, ki jo določa Zakon o vodah (2002). Najvišja učinkovitost čiščenja glede na izmerjeno koncentracijo fosfatov je bila v mesecu juniju (96 %), najnižja pa v mesecu septembru (38 %). Koncentracija fosfatov se je pri večini vzorcev v največji meri znižala že na prehodu iz filtrirne v čistilno gredo. Povprečna učinkovitost čiščenja fosfatov je bila 90 %, pri čemer nismo upoštevali vzorcev, kjer je bila koncentracija fosfatov pod mejo detekcije.

Preglednica 15: Izmerjene vrednosti koncentracije fosfatov na posameznih gredah v času vzorčenja. Zakonodaja določa mejno vrednost koncentracije fosfatov na 2 mg/L.

| <b>Koncentracija fosfatov (mg/L)</b> | <b>Vtok</b> | <b>Po 1. gredi</b> | <b>Po 2. gredi</b> | <b>Iztok</b>       |
|--------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| V1                                   | 3,93        | 1,44               | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije |
| V2                                   | 8,51        | 3,43               | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije |
| V3                                   | 10,83       | 4,72               | 0,68               | 0,56               |
| V4                                   | 6,3         | 1,8                | 1,5                | 1,0                |
| V5                                   | 16,0        | 5,2                | 1,0                | 0,6                |
| V6                                   | 4,4         | 4,5                | 2,1                | 1,0                |
| V7                                   | 5,8         | 3,9                | 1,9                | 1,1                |
| V8                                   | 8,5         | 2,7                | 1,4                | 1,4                |
| V9                                   | 1,6         | 1,9                | 1,2                | 1,0                |
| V10                                  | 3,15        | 2,39               | 0,94               | 0,73               |

#### 4.2.5 Vsebnost dušika po Kjeldahlu

Izmerjene vrednosti dušika po Kjeldahlu so se gibale med 9 mg/kg in 108 mg/kg. Povprečna izmerjena vrednost na vtoku je bila 42 mg/kg, po čiščenju filtrirne grede 36 mg/kg, po čiščenju čistilne grede 22 mg/kg in na iztoku 20 mg/kg. Največji upad izmerjene

vrednosti dušika po Kjeldahlu je bil v začetku meseca aprila, najmanjši pa v začetku meseca septembra (preglednica 9).

Izmerjene koncentracije dušika po Kjeldahlu so postopno upadale od vtoka proti iztoku iz RČN. Učinkovitost čiščenja se je glede na povprečne vrednosti izkazala za najboljšo po čiščenju čistilne grede (38 %), kateri sledi čiščenje po filtrirni gredi (14 %). Najvišja učinkovitost čiščenja je bila dosežena pri vzorčenju V2 v začetku meseca aprila (83 %) in vzorčenju V5 v mesecu juniju (81 %), medtem ko je bila najnižja učinkovitost čiščenja pri vzorčenju V1 v mesecu marcu in vzorčenju V9 v začetku meseca septembra. V nekaterih primerih so vrednosti na iztoku malenkost presegale vrednost na vtoku. Povprečna učinkovitost čiščenja glede na koncentracijo dušika po Kjeldahlu je bila 57 %. Zakonodaja ne določa mejne vrednosti dušika po Kjeldahlu v odpadni vodi na iztoku malih komunalnih čistilnih naprav, določa pa mejno vrednost za celotni dušik, ki znaša 25 mg/L (Uredba o emisiji..., 2007b).

Preglednica 16: Izmerjene vrednosti dušika po Kjeldahlu na posameznih gredah v času vzorčenja.

| Dušik po Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Vtok   | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------|-------|
| V1                            | 57,91  | 45,80       | 40,49       | 61,80 |
| V2                            | 108,61 | 103,92      | 19,21       | 18,43 |
| V3                            | 39,55  | 34,10       | 16,04       | 14,70 |
| V4                            | 34,72  | 18,67       | 17,48       | 16,36 |
| V5                            | 71,02  | 48,96       | 14,65       | 13,49 |
| V6                            | 25,2   | 29,9        | 33,9        | 20,5  |
| V7                            | 26,2   | 22,4        | 17,1        | 15,5  |
| V8                            | 26,61  | 22,46       | 24,30       | 15,33 |
| V9                            | 15,13  | 18,21       | 20,41       | 14,55 |
| V10                           | 20,01  | 20,05       | 14,10       | 9,24  |

#### 4.2.6 Vsebnost amonijevega dušika

Izmerjene vrednosti koncentracije amonijevega dušika so se gibale med 4 mg/L in 56 mg/L. Povprečna izmerjena vrednost na vtoku je bila 26 mg/L, po čiščenju filtrirne grede 23 mg/L, po čiščenju čistilne grede 13 mg/L in na iztoku 10 mg/L. Največji upad izmerjene vrednosti amonijevega dušika je bil v mesecu juniju, najmanjši pa v mesecu juliju in septembru.

Izmerjene koncentracije amonijevega dušika so bile v večini primerov pod mejno vrednostjo 10 mg/L, ki jo določa Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (2007b). Vrednosti, ki so presegale mejno koncentracijo, so bile izmerjene pri vzorcih V2, V3 in V6 v mesecu aprilu in v začetku meseca julija in so mejno vrednost presegale za 4,9 mg/L, 5,0 mg/L in 9,2 mg/L.

V večini primerov so vrednosti amonijevega dušika postopno upadale v smeri od vtoka proti iztoku. Vrednosti so rahlo narastle pri nizkih koncentracijah izmerjenega dejavnika. Največjo učinkovitost čiščenja lahko opazimo po čiščenju čistilne grede (43 %), kateremu sledi čiščenje polirne grede (27 %). Povprečna učinkovitost čiščenja glede na vrednost amonijevega dušika je bila 72 %. Najvišja učinkovitost čiščenja je bila opazna pri vzorcih

V5 in V1, odvzetih v mesecu juniju in marcu (86 % in 85 %), najnižja učinkovitost pa je bila pri vzorcih V9 iz začetka meseca septembra, kjer so bile vrednosti amonijevega dušika nizke že na vtoku v čistilno napravo in je vrednost na iztoku malenkost presegala vrednost na vtoku. Nizko učinkovitost čiščenja lahko opazimo tudi pri vzorcih V6 iz začetka meseca julija, kjer je vrednost amonijevega dušika presegala mejno vrednost 10 mg/L.

Preglednica 17: Izmerjene vrednosti amonijevega dušika na posameznih gredah v času vzorčenja. Zakonodaja določa mejno vrednost amonijevega dušika na 10 mg/L.

| Amonijev dušik (mg/L) | Vtok  | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------|
| V1                    | 28,65 | 23,61       | 6,91        | 4,29  |
| V2                    | 40,14 | 29,57       | 15,50       | 14,89 |
| V3                    | 43,16 | 35,05       | 17,82       | 15,02 |
| V4                    | 23,74 | 9,37        | 11,45       | 7,80  |
| V5                    | 55,66 | 48,03       | 10,08       | 7,70  |
| V6                    | 20,1  | 28,5        | 35,5        | 19,2  |
| V7                    | 23,7  | 19,8        | 11,8        | 9,4   |
| V8                    | 17,44 | 18,87       | 6,13        | 6,85  |
| V9                    | 5,76  | 11,28       | 10,83       | 8,38  |
| V10                   | 6,51  | 8,86        | 6,23        | 3,54  |

#### 4.2.7 Koncentracija nitratnega dušika

Izmerjene vrednosti nitratnega dušika so se gibale med 0,1 in 1,5 mg/L. Povprečna izmerjena vrednost na vtoku je bila 0,5 mg/L, po čiščenju filtrirne grede 0,2 mg/L, po čiščenju čistilne grede 0,2 mg/L in na iztoku prav tako 0,2 mg/L. Največji upad vrednosti nitratnega dušika je bil izmerjen konec meseca aprila, najmanjši pa v mesecu juliju in septembru. Pri merjenju nitratnega dušika smo na začetku iskali primerno metodo za detekcijo, zato so bili vzorci V1, V2 in V3 zamrznjeni in nato odmrznjeni dne 21. 5., ko smo ob uporabi komercialnega kompleta uspeli izmeriti koncentracijo nitratnega dušika. Izmerjene koncentracije zamrznjenih vzorcev so bile nizke oz. nitrata nismo zaznali. Izmerjene vrednosti po vsej verjetnosti ne odražajo realnega stanja ob vzorčenju, saj so bili uporabljeni vzorci večkrat odmrznjeni.

Koncentracije nitratnega dušika so bile v vseh primerih pod mejno vrednostjo 30 mg/L, ki jo določa Zakon o vodah (2002), kar je veljalo tako na vtoku kakor na iztoku RČN. Odpadna voda, ki prihaja v RČN Rakitna glede na naše rezultate nitratnega dušika ni nevarna okolju in zdravju. Vrednosti so bile v nekaterih primerih pod mejo detekcije, v večini primerov pa so koncentracije nitratnega dušika upadale v smeri od vtoka proti iztoku RČN. Povprečna učinkovitost čiščenja je znašala 62 %, pri čemer nismo upoštevali vzorcev, kjer je bila koncentracija nitratov pod mejo detekcije. Najvišjo učinkovitost čiščenja smo opazili pri vzorčenju V3 na koncu meseca aprila ter V4 v mesecu maju, ki je v obeh primerih presegala 90 %.

Preglednica 18: Izmerjene vrednosti nitratnega dušika na posameznih gredah v času vzorčenja. Zakonodaja določa mejno vrednost nitratnega dušika na 30 mg/L.

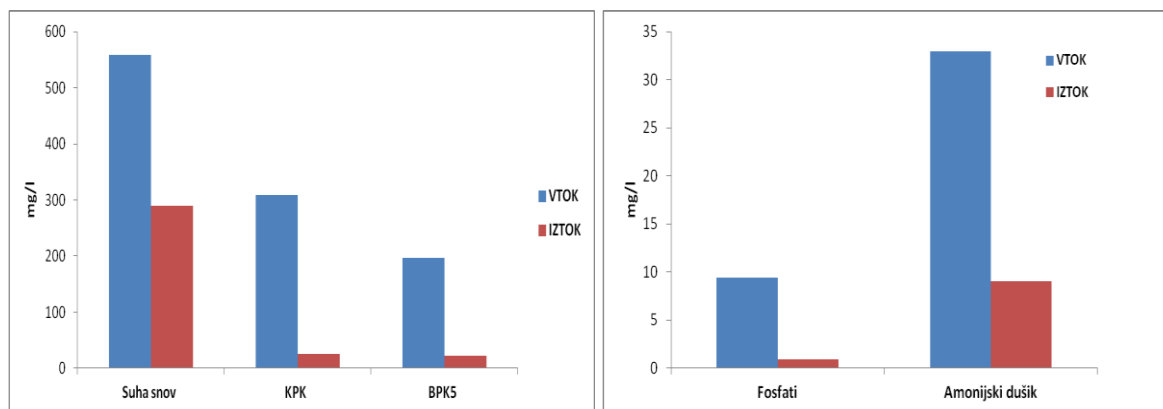
| Nitratni dušik (mg/L) | Vtok               | Po 1. gredi        | Po 2. gredi        | Iztok              |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| V1                    | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije |
| V2                    | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije |
| V3                    | 1,5                | Pod mejo detekcije | Pod mejo detekcije | 0,1                |
| V4                    | 0,49               | 0,26               | 0,03               | 0,01               |
| V5                    | 0,46               | 0,28               | 0,07               | 0,07               |
| V6                    | 0,29               | 0,15               | 0,16               | 0,10               |
| V7                    | 0,29               | 0,12               | 0,05               | 0,66               |
| V8                    | 0,17               | 0,14               | 0,08               | 0,08               |
| V9                    | 0,26               | 0,16               | 0,22               | 0,11               |
| V10                   | 0,59               | 0,01               | 0,69               | 0,82               |

#### 4.2.8 Primerjava izbranih dejavnikov vtoka in iztoka

Koncentracije vseh izmerjenih dejavnikov (preglednica 19) so se na iztoku močno znižale. V največji meri se je znižala vrednost KPK in BPK<sub>5</sub>.

Preglednica 19: Povprečne koncentracije izbranih dejavnikov na vtoku in iztoku RČN Rakitna brez upoštevanja vzorcev V6, V9 in V10.

| Dejavnik | SS (mg/L) | KPK (mg/L) | BPK <sub>5</sub> (mg/L) | Fosfati (mg/L) | Amonijev dušik (mg/L) | Dušik po Kjeldahlu (mg/kg) | Nitratni dušik (mg/L) |
|----------|-----------|------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| Vtok     | 559       | 309        | 197                     | 9,4            | 33                    | 52                         | 0,42                  |
| Iztok    | 289       | 26         | 22                      | 0,9            | 9                     | 22                         | 0,13                  |



Slika 15: Levo – povprečne vrednosti SS, KPK in BPK<sub>5</sub> na vtoku in iztoku iz RČN Rakitna, desno - povprečni koncentraciji fosfatov in amonijskega dušika na vtoku in iztoku iz RČN Rakitna.

#### 4.3 REZULTATI MIKROBIOLOŠKIH PREISKAV

Skupno število bakterij, ugotovljenih z metodo MPN, se je gibalo med 3 ali manj celic/mL in  $1,1 \times 10^4$  ali več celic/mL. Podobne rezultate smo pridobili tudi pri štetju skupnih koliformnih bakterij na gojišču MacConkey pri 38 °C ter *E. coli* in drugih koliformnih bakterij, ki so rastle na gojišču MacConkey pri 42 °C.

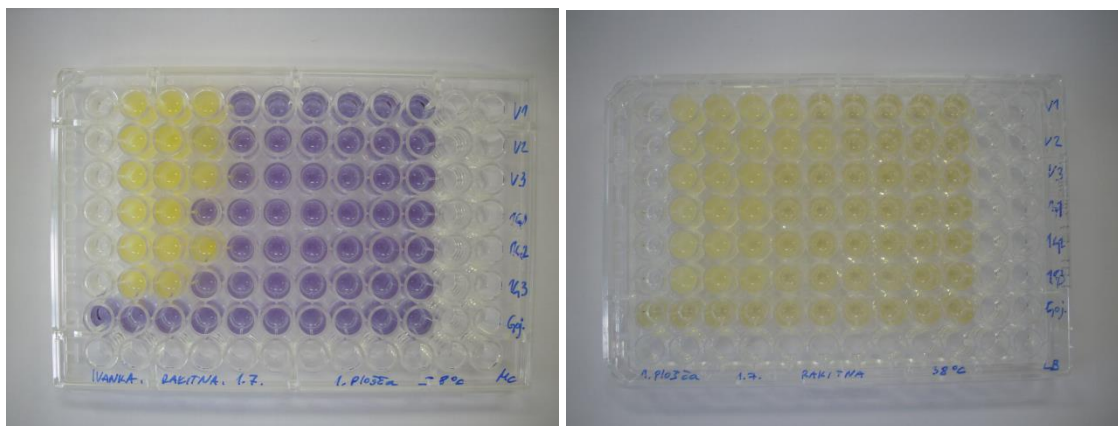
Preglednica 20: Pregled rezultatov mikrobioloških preiskav vzorcev RČN Rakitna.

| Skupno število bakterij (MPN/mL)                               | Vtok     | Po 1. gredi | Po 2. gredi | Iztok |
|----------------------------------------------------------------|----------|-------------|-------------|-------|
| V1                                                             | 93       | 23          | 9,2         | <3,0  |
| V2                                                             | 23       | 9,2         | <3,0        | <3,0  |
| V3                                                             | >11000** | 150         | 93          | 23    |
| V4                                                             | >11000** | 1100        | 93          | 38    |
| V5                                                             | >11000** | 150         | 3,6         | 3,6   |
| V6                                                             | 11000**  | 4600        | 210         | 1100  |
| V7                                                             | >11000** | 2400        | 93          | 150   |
| V8                                                             | 4600     | 460         | 23          | 9,2   |
| V9                                                             | >11000** | 290         | 23          | 93    |
| V10                                                            | >11000** | 2400        | 43          | 43    |
| <b>Skupne koliformne bakterije (MPN/mL)</b>                    |          |             |             |       |
| V1                                                             | <3,0     | <3,0        | <3,0        | <3,0  |
| V2                                                             | 3,6      | 9,2         | <3,0        | <3,0  |
| V3                                                             | >11000** | 11000**     | 23          | 23    |
| V4                                                             | 11000**  | 43          | 23          | 43    |
| V5                                                             | >11000** | 43          | <3,0        | 9,2   |
| V6                                                             | 11000    | 460         | 9,2         | 3,6   |
| V7                                                             | 4600     | 750         | 15          | 3,6   |
| V8                                                             | 11000**  | 93          | <3          | <3    |
| V9                                                             | 4600     | 2100        | 7,4         | 3,6   |
| V10                                                            | >11000** | 750         | 23          | 23    |
| <b><i>E. coli</i> in koliformne bakterije na 42°C (MPN/mL)</b> |          |             |             |       |
| V1                                                             | 3,6      | <3,0        | <3,0        | <3,0  |
| V2                                                             | 3,6      | 7,4         | <3,0        | <3,0  |
| V3                                                             | 4600     | 43          | 23          | <3,0  |
| V4                                                             | 2400     | 240         | 3,6         | 3,6   |
| V5                                                             | 11000    | 23          | <3,0        | <3,0  |
| V6                                                             | 2400     | 750         | 3,6         | 9,2   |
| V7                                                             | 2400     | 240         | 9,2         | 9,2   |
| V8                                                             | 4600     | 23          | <3          | <3    |
| V9                                                             | 1200     | 150         | 3,6         | <3,0  |
| V10                                                            | 1500     | 1100        | 9,2         | 3,6   |

Podobno kot pri merjenju nitratnega dušika so bili vzorci za mikrobiološke preiskave pri vzorčenju V1, V2 in V3 zamrznjeni in šele kasneje uporabljeni, kar je po vsej verjetnosti vplivalo na živost celic. Rezultati prvih treh meritev ne odražajo realnega stanja prisotnosti bakterij v vzorcih odpadne vode.

V preglednici 20 so s simbolom (\*\*) označene vrednosti, ki smo jih odčitali po preglednici indeksov MPN pri različnih kombinacijah pozitivnih serij vzorcev za koncentracije inokulumov 0,01; 0,001; 0,0001. Ostale (neoznačene) vrednosti smo odčitali po preglednici indeksov MPN pri različnih kombinacijah pozitivnih serij vzorcev za

koncentracije inokulumov 0,1; 0,01; 0,001. V redkih primerih je bila pri eni ponovitvi od treh pozitivna tudi 5. redčitev (0,00001).



Slika 16: Levo - primer plošče po 24-urnem gojenju mikroorganizmov iz vzorcev RČN Rakitna na gojišču MacConkey, desno – primer plošče po 24-urnem gojenju mikroorganizmov iz vzorcev RČN Rakitna na gojišču LB

Izkazalo se je, da rezultati mikrobioloških preiskav, podobno kot velja za večino rezultatov fizikalno-kemijskih dejavnikov, niso presegali zakonsko določenih mejnih vrednosti. Mejna vrednost, ki je določena z Uredbo o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (2007a) znaša za skupne koliformne bakterije 100 celic/mL. Največje število skupnih koliformnih bakterij, ki smo ga ugotovili z metodo ugotavljanja najverjetnejšega števila celic pa je znašalo 43 celic/mL.

Največje skupno število bakterij je bilo v vseh primerih na vtoku, najmanjše pa na iztoku iz RČN. Največji upad skupnega števila bakterij, skupnih koliformnih bakterij ter *E. coli* in koliformnih bakterij pri 42 °C se je pojavil ob vzorčenju V5 v mesecu juniju.

Število bakterij se je glede na vse mikrobiološke dejavnike na vtoku v primerjavi z iztokom močno zmanjšalo. Učinkovitost čiščenja glede na skupno število bakterij ter *E. coli* in koliformnih bakterij na 42 °C je bila najboljša po čiščenju filtrirne grede, medtem ko je bila učinkovitost čiščenja glede na skupne koliformne bakterije boljša po čiščenju čistilne grede.

Učinkovitost čiščenja glede na skupno število bakterij je bilo največje ob vzorčenju V5 v mesecu juniju, kjer je bila dosežena kar 99,9 % učinkovitost. Najnižja učinkovitost čiščenja glede na omenjeni dejavnik je bila ob vzorčenju V2 v začetku meseca aprila in je znašala 87 %, povprečna učinkovitost čiščenja pa je bila 99,5 %. Podobne rezultate smo dobili tudi pri ostalih dveh mikrobioloških analizah, kjer je bila učinkovitost čiščenja v obeh primerih 99,9 %.

#### 4.4 SPREMLJANJE RASTI *P. australis*

Največje število poganjkov in najvišje poganjke smo lahko opazili na polirni gredi. Povprečna višina poganjkov se je gibala med 6 in 141 cm. Največje število poganjkov in tudi najvišjo povprečno višino poganjkov je bilo moč opaziti pri vzorčenju V8 in V9 v sredini avgusta in v začetku meseca septembra.

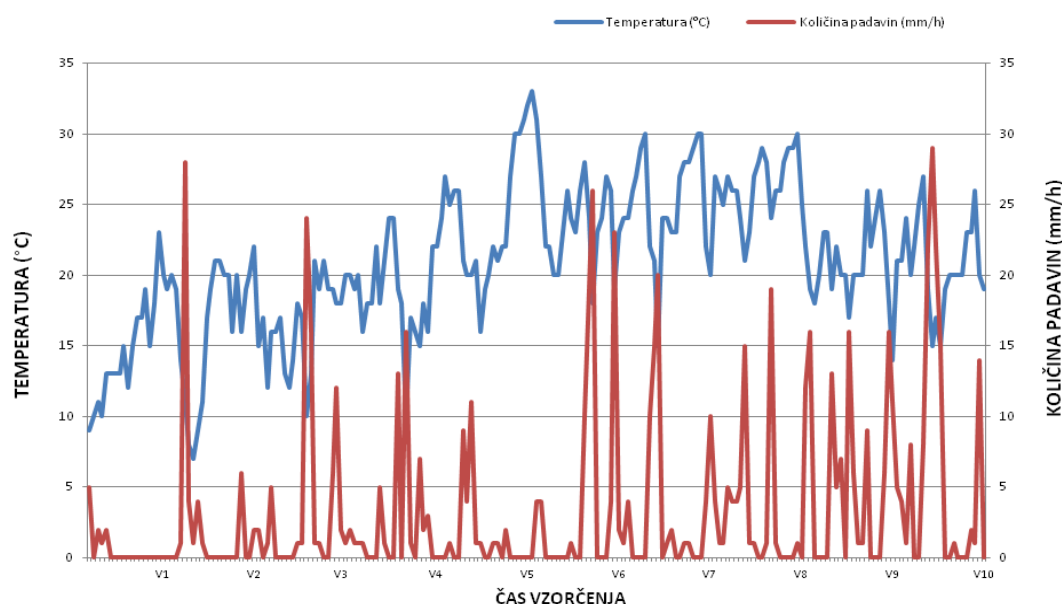
Rast makrofitov na čistilni napravi na začetku ni bila uspešna. Odločili smo se, da je potrebno na novo zasaditi rastline navadnega trstičevja. Dne 26. 6. 2014 je bila tako opravljena dosadnja rastlin na čistilni napravi. Na filtrirni in čistilni gredi je bilo relativno majhno število poganjkov, ki bi uspešno rastle. Rast na polirni gredi je bila do meseca maja zavrta, ob nekoliko višjih temperaturah pa se je kasneje spodbudila. Po zasaditvi rastlin, to je od vzorčenja V6 do V10 je bila na obeh dveh gredah vidna hitrejša rast rastlin. Rast je bila najintenzivnejša v obdobju od konca julija do sredine avgusta, to je med vzorčenjem V7 in V8. Glede na naše meritve se je le-ta pričela zaustavljati v mesecu septembru.

Preglednica 21: Povprečno število poganjkov in njihova povprečna višina na površini enega m<sup>2</sup> na posamezni gredi RČN Rakitna.

| Povprečno število poganjkov                       | 1. greda | 2. greda | 3. greda |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| V3                                                | 5        | 1        | 1        |
| V4                                                | 2        | 1        | 2        |
| V5                                                | 2        | 1        | 2        |
| V6                                                | 3        | 1        | 9        |
| V7                                                | 7        | 5        | 14       |
| V8                                                | 21       | 16       | 20       |
| V9                                                | 20       | 19       | 21       |
| V10                                               | 11       | 10       | 31       |
| Povprečna višina poganjkov na m <sup>2</sup> (cm) |          |          |          |
| V3                                                | 19       | 6        | 28       |
| V4                                                | 28       | 8        | 33       |
| V5                                                | 53       | 12       | 42       |
| V6                                                | 27       | 19       | 50       |
| V7                                                | 38       | 32       | 65       |
| V8                                                | 55       | 43       | 135      |
| V9                                                | 56       | 48       | 141      |
| V10                                               | 40       | 51       | 86       |

#### 4.5 PODATKI O TEMPERATURI IN KOLIČINI PADAVIN V ČASU VZORČENJA

V času vzorčenja se je temperatura zraka na RČN Rakitna gibala med 7 °C in 33 °C (priloga M), pri čemer je bila povprečna temperatura v obdobju od marca-maja (V1-V4) 17,3 °C, v juniju in juliju (V5-V7) 24,9°C ter v avgustu in septembru (V8-V10) 22,2°C. Intenzivnejša rast *P. australis* na polirni gredi je bila opazna po vzorčenju V5, ko so se temperature nekoliko povišale, medtem ko smo intenzivnejšo rast na filtrirni in čistilni gredi lahko opazili šele po vzorčenju V7, ko je bila izvedena ponovna zasaditev rastlin.



Slika 17: Temperatura in količina padavin v času vzorčenja na območju Rakitne

#### 4.6 UČINKOVITOST ČIŠČENJA RČN RAKITNA

Mikrobiološke analize so pokazale, da je RČN Rakitna zelo uspešno odstranjevala koliformne bakterije iz odpadne vode. Izkazalo se je, da smo pri teh analizah dobili najboljše rezultate čiščenja odpadne vode v primerjavi z ostalimi meritvami. Uspešna učinkovitost čiščenja je vidna tudi pri dejavnikih BPK<sub>5</sub>, KPK in fosfatih.

Preglednica 22: Povprečna učinkovitost čiščenja izmerjenih dejavnikov. Z namenom enakovredne primerjave učinkovitosti čiščenja pri izračunu povprečja nismo upoštevali vzorčenja V6, V9 in V10, saj zaradi obilnih padavin v času vzorčenja meritve ne prikazujejo realnih vrednosti dejavnikov.

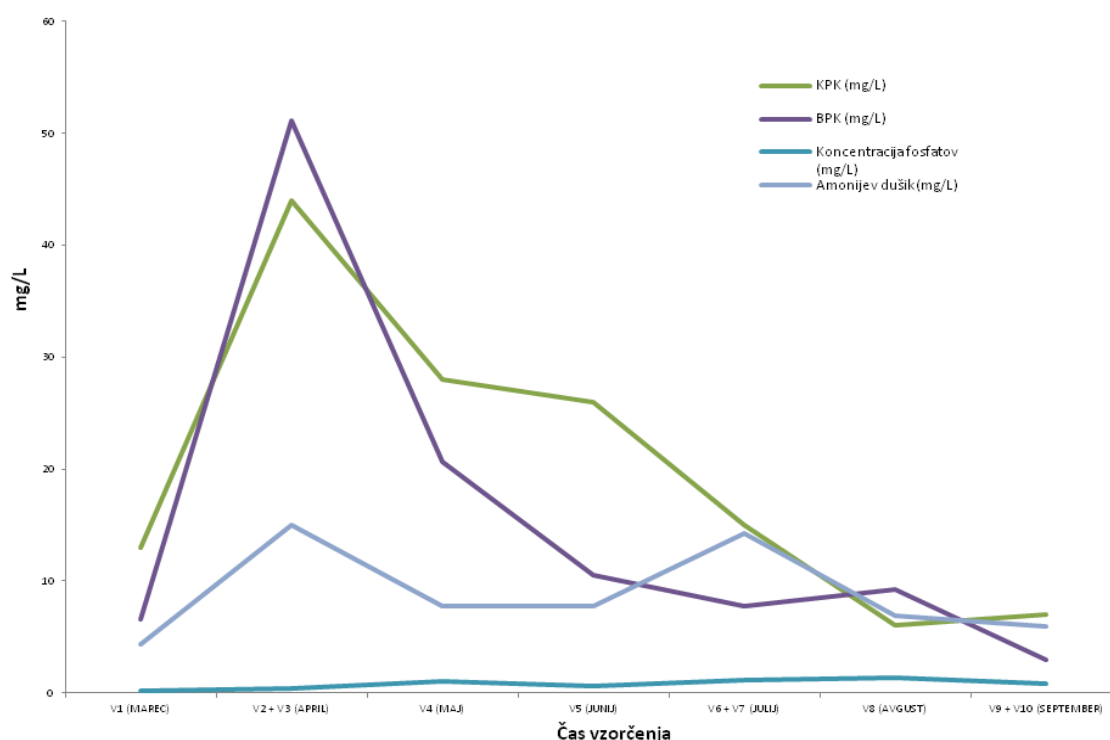
|                                      | SS<br>(mg/L) | KPK<br>(mg/L) | BPK <sub>5</sub><br>(mg/L) | Fosfati<br>(mg/L) | Amonijev<br>dušik<br>(mg/L) | Dušik po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Nitratni<br>dušik<br>(mg/L) | Skupno<br>število<br>bakterij<br>(MPN/mL) |
|--------------------------------------|--------------|---------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Učinkovitost<br/>čiščenja (%)</b> | 48           | 92            | 89                         | 90                | 72                          | 57                               | 62                          | 99,5                                      |

##### 4.6.1 Učinkovitost čiščenja glede na biomaso makrofitov

Največje število poganjkov na filtrirni in čistilni gredi je bilo ob vzorčenjih V8 in V9, na polirni gredi pa ob vzorčenjih V8, V9 in V10. Delež raztopljenega kisika je bil v času vzorčenja V9 na najvišji ravni, žal pa podatka za vzorčenje V8 nismo pridobili, saj je ravno v tem času prišlo do okvare kisikove sonde. Delež raztopljenega kisika je ostajal visok tudi ob vzorčenju V10. Iz tega lahko kljub pomanjkanju podatkov ugotovimo, da so rastline prispevale k višji koncentraciji raztopljenega kisika.

Učinkovitost čiščenja je bila v času največjega števila poganjkov visoka predvsem pri dejavniku  $BPK_5$ . Učinkovitost čiščenja glede na mikrobiološke analize je bila izjemno uspešna v času visoke biomase makrofitov, vendar je bila učinkovitost glede na prisotnost koliformnih bakterij skozi celotno obdobje meritev zelo visoka. Tudi pri ostalih meritvah je bila učinkovitost čiščenja v času največjega števila poganjkov ugodna, vendar ni bila med najvišjimi.

Ugotovimo lahko, da vrednosti dejavnikov KPK,  $BPK_5$ , amonijevega dušika in koncentracije fosfatov v začetnih meritvah rahlo narastejo, proti koncu vzorčenja pa njihova vrednost prične upadati. Podatki nakazujejo, da je bilo v tem času na RČN prisotnih več rastlin, ki so bile pri čiščenju bolj uspešne.



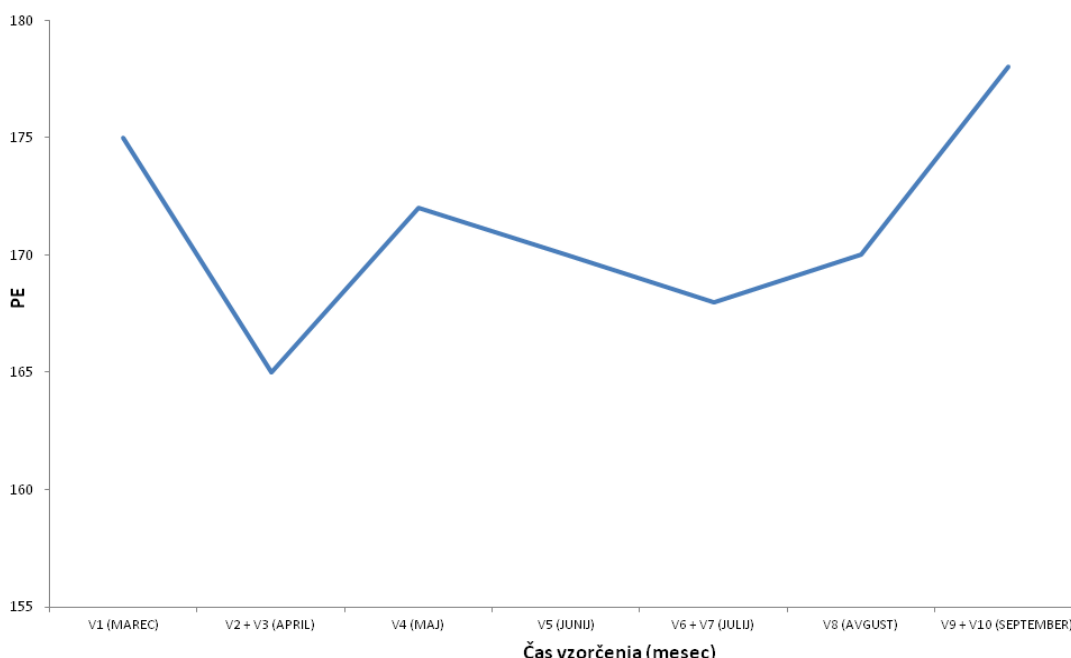
Slika 18: Dinamika povprečnih vrednosti dejavnikov KPK,  $BPK_5$ , fosfatov in amonijevega dušika v času vzorčenja.

#### 4.6.2 Vpliv dinamike obremenjenosti na učinkovitost delovanja RČN Rakitna

Na RČN Rakitna so priključeni sledeči objekti: Mladinsko klimatsko zdravišče, Osnovna šola Preserje, 22 individualnih hiš in objekt z deljenim lastništvom trgovine Mercator, pošte Slovenije, Urada krajevne skupnosti Rakitna ter knjižnica Rakitna. V prilogi C se nahajajo podatki o porabi vode za odjemalce, priključene na RČN Rakitna. V namen lažjega posredovanja podatkov smo podatke o porabi vode predstavili v obliki PE (preglednica 14).

Preglednica 23: Skupna količina porabljene vode odjemalcev, priključenih na RČN Rakitna v času vzorčenja in pripadajoče vrednosti PE

| Mesec                 | Skupna količina porabljene vode (m <sup>3</sup> ) | PE  |
|-----------------------|---------------------------------------------------|-----|
| <b>Marec 2014</b>     | 789                                               | 175 |
| <b>April 2014</b>     | 742                                               | 165 |
| <b>Maj 2014</b>       | 774                                               | 172 |
| <b>Junij 2014</b>     | 767                                               | 170 |
| <b>Julij 2014</b>     | 757                                               | 168 |
| <b>Avгust 2014</b>    | 766                                               | 170 |
| <b>September 2014</b> | 800                                               | 178 |



Slika 19: Dinamika obremenjenosti RČN Rakitna v času od marca do septembra 2014, izražene kot enote PE v odvisnosti od časa.

Podatki kažejo, da je bila RČN Rakitna v času našega vzorčenja v povprečju obremenjena s 171 PE. Pri tem smo upoštevali, da 1 PE pripada 0,15 m<sup>3</sup> porabljene vode na dan. RČN Rakitna je bila prvotno projektirana na 870 PE, torej je bila obremenjenost v času vzorčenja 19,7 %.

Iz grafikona, ki prikazuje dinamiko obremenjenosti RČN Rakitna (slika 19) lahko ugotovimo, da je bila obremenjenost RČN v času vzorčenja relativno konstantna. Kot prikazuje slika 18, so bile povprečne vrednosti dejavnikov KPK, BPK<sub>5</sub>, fosfatov in amonijevega dušika v začetnem delu meritev do pričetka poletne sezone nekoliko višje, proti koncu opravljanja meritev, v času višjih temperatur pa nekoliko nižje.

## 5 RAZPRAVA

Takoj ob začetku raziskav na RČN Rakitna so se pojavljale težave ob velikih količinah meteorne vode, zaradi katere je narastel nivo vode v usedalnikih, s čimer so trdni delci iz usedalnika zamašili filtrirni sistem ter perforirane cevi. Na ta način je prišlo do nanašanja trdnih delcev in smeti na čistilno napravo. Delovanje čistilne naprave je bilo manj učinkovito, le-ta pa je bila bolj obremenjena kot navadno. Po drugi strani je prevelika količina vode znotraj RČN vplivala na rezultate analiz. Ob močnem deževju je namreč prišlo do redčenja odpadne vode in s tem do nižjih izmerjenih koncentracij dejavnikov, ki smo jih uporabili za ugotavljanje učinkovitosti čiščenja RČN. Ob močnem deževju tako nismo pridobili realnih vrednosti dejavnikov odpadne vode, pač pa so bili le-ti nižji zaradi razredčenih vzorcev.

Eden naših ciljev je bil tudi spreminjanje nivoja iztoka ob polni rasti rastlin in spremljanje učinkov na izmerjene dejavnike. Tega žal nismo uspeli uresničiti, saj je bila rast močno zavirana in je bila potrebna dosadnja rastlin ravno v času, ko smo pričakovali polno rast. Zavirana rast je bila po vsej verjetnosti posledica neugodnih vremenskih razmer. Poletje 2014 je bilo na splošno precej hladno in mokro (priloga M), zato je prišlo do upočasnjene rasti rastlin. Poleg tega se RČN Rakitna nahaja na nadmorski višini 800 m, kjer je značilen zamik vegetacijske sezone.

### 4.7 FIZIKALNO-KEMIJSKI DEJAVNIKI NA RČN

Povprečna učinkovitost čiščenja RČN Rakitna je bila 48 % glede na SS, 92 % glede na KPK, 89 % glede na BPK<sub>5</sub>, 90 % glede na koncentracijo fosfatov, 57 % glede na koncentracijo dušika po Kjeldahlu, 72 % glede na koncentracijo amonijevega dušika, 62 % glede na koncentracijo nitratnega dušika in 99,5 % glede na opravljene mikrobiološke analize (preglednica 22). Primerjava izbranih parametrov vtoka in iztoka, ki jih prikazuje preglednica 19, kaže, da so se koncentracije vseh izmerjenih dejavnikov na iztoku močno znižale. To dokazuje uspešno delovanje RČN Rakitna.

Vrednosti pH ne presegajo zakonsko določenih mejnih vrednosti (preglednica 8). Opazili smo, da se je pH vzorcev, izmerjenih ob vzorčenju V5, dvigal v smeri od vtoka proti iztoku izraziteje kot pri ostalih meritvah. Odstopanje je lahko odraz sprememb v sestavi odpadne vode, lahko pa je posledica napake pri merjenju.

Delež SS je dejavnik, ki nima zakonsko določene mejne vrednosti na iztoku iz RČN. Izmerjene vrednosti so kazale na postopno zmanjševanje deleža SS v odpadni vodi od vtoka proti iztoku (preglednica 12). V primerjavi s podatki iz literature je bil učinek čiščenja RČN Rakitna slabši, kot jih dosegajo primerljive RČN. Murthy in sod. (2007) so izmerili 80 % učinkovitost čiščenja SS pri merjenju vtoka in iztoka RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom. Podobno tudi Vrhovšek in sod. (1996) poročajo o 96 % učinkovitosti čiščenja glede na koncentracijo ortofosfata pri RČN s horizontalnim tokom. Potrebno pa je poudariti, da so bile vrednosti, ki smo jih izmerili na RČN Rakitna precej nižje že na vtoku v RČN (532 mg/L), v primerjavi z vrednostmi, ki so jih izmerili Murthy in sod. (6583 mg/L). Predvidevamo, da učinkovitost čiščenja glede na SS ni bila večja

predvsem na račun močnega deževja, saj se je odpadna voda razredčevala in se s tem ni prikazalo realnega stanja suhe snovi v vzorcih odpadne vode.

Zanimiv pojav pri naši raziskavi na RČN lahko opazimo pri vrednostih raztopljenega kisika pri vzorčenjih V5, V7 in V10, kjer vrednosti naraščajo od vtoka proti iztoku. V mesecu juniju je tako vrednost narastla kar za 14,8 odstotnih točk (preglednica 11). Povišana koncentracija raztopljenega kisika nastopi kot posledica fotosinteze in izločanja kisika v okolico koreninskega sistema (Bezbaruah in Zhang, 2005). Rastline so po vsej verjetnosti izločale več kisika, kot so ga bili mikroorganizmi zmožni porabljati. Delež raztopljenega kisika je pomemben dejavnik, ki nam poda informacijo o okolju, v katerem delujejo mikroorganizmi, odgovorni za čiščenje odpadne vode in v veliki meri vpliva na metabolizem mikrobnih celic. Določa namreč prisotnost aerobnih in anaerobnih mikroorganizmov in njihovo uspešnost razgradnje organskih snovi. (Sewwandi in sod., 2010). Glede na to, da so bile vrednosti KPK in BPK<sub>5</sub> pri vzorčenjih V5, V7 in V10 (preglednica 13 in 14) na vtoku pod povprečnimi vrednostmi, je lahko šlo pri teh primerih vzorcev za obdobje nizkih obremenitev, zato je bila aktivnost mikroorganizmov manjša. Poslednica zmanjšane aktivnosti mikroorganizmov je manjša poraba kisika in s tem višja izmerjena koncentracija raztopljenega kisika v odpadni vodi. Vseeno pa vrednosti KPK in BPK<sub>5</sub> niso bile najnižje izmed vsemi izmerjenimi vrednostmi tekom vzorčenja, tako da tega ne moremo z gotovostjo potrditi.

Reeder (2011) poroča o velikih nihanjih raztopljenega kisika pri naravnih mokriščih, kjer je bil odstotek raztopljenega kisika v jutranjih urah pogosto blizu nič, čez dan pa se je vrednost povišala tudi preko 100 % nasičenosti s kisikom. Variacije pri količini raztopljenega kisika v vodi so torej normalen pojav pri naravnih sistemih čiščenja in se pojavljajo tudi pri RČN (Reeder in sod., 2011; Sewwandi in sod., 2010). Vrednost DO se na račun fotosinteze čez dan povečuje, nizka vrednost DO v jutranjih urah pa se pojavi na račun privzemanja kisika s strani rastlin in mikroorganizmov, ki se nahajajo v RČN (Sewwandi in sod., 2010). Glede na to, da je bil ta pojav značilen zgolj pri 3 vzorcih, je eventualno lahko prišlo tudi do napak pri merjenju. Uporabljeni vzorci so bili lahko nereprezentativni oz. je napačna meritev lahko posledica nekalibrirane sonde za merjenje raztopljenega kisika.

Glede na podatke iz literature lahko najdemo vrsto primerov, ki dokazujejo uspešnost čiščenja odpadnih vod z RČN. Povprečna vrednost KPK na vtoku RČN Rakitna je bila 309 mg/L, na iztoku pa 26 mg/L (preglednica 19), kar predstavlja 92 % učinkovitost čiščenja (preglednica 22) in dokazuje uspešno delovanje RČN Rakitna. Izmerjene vrednosti KPK na iztoku so bile skozi celotno obdobje meritev izrazito pod mejnimi vrednostmi, ki jih določa zakonodaja. Rezultate lahko primerjamo z raziskavo, opravljeno na Kitajskem, kjer so spremljali učinkovitost čiščenja dveh RČN na nadmorskih višinah 2190 m (jezero Lugu) in 1200 m (gore Fairy). Povprečna vrednost KPK na iztoku iz čistilne naprave, poraščene s *P. australis*, na območju jezera Lugu je znašala 21 mg/L, na čistilni napravi, poraščeni s *Cyperus alternifolius*, na območju gore Fairy pa 27,5 mg/L (Zhai in sod., 2011). Primer dobre prakse najdemo tudi v Italiji, kjer so Folidari in sod. (2012) zasadili RČN na nadmorski višini 739 m s *P. australis* in uspeli zmanjšati koncentracijo KPK na vtoku iz 572 mg/L na 36 mg/L na iztoku iz RČN.

Učinkovitost čiščenja lahko spremljamo ne le po dejavniku KPK, ampak tudi po dejavniku BPK<sub>5</sub>. Na Češkem je približno 300 delujočih RČN, vse s horizontalnim podpovršinskim tokom, medtem ko so RČN z vertikalnim tokom še v fazi preizkušanja. Vymazal in Brezinova (2014) sta preučevala RČN na nadmorskih višinah okrog 500 m. Vsi 4 prikazani primeri RČN na Češkem so v uporabi najmanj 15 let, najstarejši sistem pa 20 let. Primerjava med vrednostmi BPK<sub>5</sub> med poletnim in zimskim obdobjem ni pokazala razlik med zimo in poletjem. Povprečna vrednost na vtoku je znašala 247 mg/L in se je na iztoku znižala na 11 mg/L, medtem ko je bila vrednost na vtoku v zimskem obdobju 239 mg/L in se je na iztoku znižala na 9,8 mg/L. Učinkovitost čiščenja se je gibala med 88-94 % za BPK<sub>5</sub> in med 67-85 % za KPK, kar je primerljivo z vrednostmi, ki smo jih pridobili iz vzorcev RČN Rakitna. V našem primeru je bila dosežena učinkovitost čiščenja glede na dejavnik BPK<sub>5</sub> 89 % (preglednica 22), pri čemer je bila povprečna vrednost BPK<sub>5</sub> na vtoku 197 mg/L, na iztoku pa 22 mg/L (preglednica 19). Vse meritve, razen 2 vrednosti BPK<sub>5</sub>, izmerjeni ob vzorčenju V2 in V3, so bile pod mejno vrednostjo, ki jo določa zakonodaja (preglednica 14).

Vrhovšek in sod. (1996) so spremljali učinkovitost čiščenja industrijske, komunalne in meteorne vode z RČN s horizontalnim tokom. Dokazana je bila 92 % učinkovitost čiščenja glede na KPK, 89 % učinkovitost glede na BPK<sub>5</sub>, 86 % učinkovitost glede na koncentracijo amonijevega dušika in 65 % učinkovitost glede na koncentracijo nitrata. Uspešnost čiščenja so pokazale tudi mikrobiološke preiskave, kjer je bila učinkovitost odstranjevanja koliformnih bakterij 99 %, fekalnih streptokokov pa 98 % (Vrhovšek, 1996). Nadalje so Zupančič Justin in sod. (2009) v 2-letnem spremljali delovanje hibridne RČN, na katero sta bila priključena 2 različna industrijska obrata. Odpadna voda je prihajala iz živilskopredelovalnega obrata, kjer je potekala proizvodnja vina in jabolčnega kisa ter iz kemijskega obrata, kjer je potekalo pakiranje detergentov in mila. Nizka stopnja razgradljivosti je bila ugotovljena predvsem na račun ostankov detergentov iz odpadne vode. Povprečna učinkovitost delovanja glede na KPK in BPK<sub>5</sub> je bila 67 % in 66 % (Zupančič Justin in sod., 2007).

Vymazal in Brezinova (2014) sta ocenjevala dolgoročno učinkovitost čiščenja štirih RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom, ki so locirane na 500 m nadmorske višine. Rezultati so pokazali, da RČN izjemno učinkovito odstranjujejo organske in neraztopljene trdne snovi. Učinkovitost čiščenja se je gibala med 88 % in 94 % za BPK<sub>5</sub>, med 67 % in 85 % za KPK in med 74 % in 96 % za odstranjevanje SS. Najpogostejši načini odstranjevanja organskega materiala pa so absorpcija skozi koreninski sistem rastlin, razgradnja rastlin in mikroorganizmov na površini korenin ter zadrževanje na drugih delih RČN, npr. odmrli biomasi rastlin (Guittonny-Philippe in sod., 2015).

Povprečna vrednost koncentracije fosfatov na vtoku RČN Rakitna je bila 9,4 mg/L, na iztoku pa 0,9 mg/L (preglednica 19), kar predstavlja 92 % učinkovitost čiščenja (preglednica 22). Vrednosti koncentracij fosfatov na iztoku RČN Rakitna ne presegajo zakonsko določenih mejnih vrednosti (preglednica 15). Ugotovimo lahko, da je učinkovitost odstranjevanja fosfatov na primeru RČN Rakitna precej visoka glede na učinkovitost čiščenja drugih RČN. Kot primer lahko vzamemo raziskavo Vymazala in Brezinove (2014), ki sta ocenjevala dolgoročno učinkovitost čiščenja štirih RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom, lociranih na 500 m nadmorske višine. Učinkovitost

odstranjevanja fosfatov je v povprečju znašala 59 %, pri čemer je bila v 18 letih delovanja ves čas stabilna. Povprečna učinkovitost čiščenja fosfatov glede na raziskave Zupančič Justin in sod. (2007), opisane v nadaljevanju, pa je bila 67 %. Velja, da je odstranjevanje fosforja v RČN s podpovršinskim tokom navadno slabše zaradi nižje sorpcijske kapacitete pogosto uporabljenih filtrirnih materialov (zdrobljeni kamni, prod) (Vymazal in Brezinova, 2014). Fosfor se zadržuje preko privzema rastlin in vezave na trdne delce v tleh (Harrington in sod., 2009). Med najbolj uspešnimi materiali za odstranjevanje fosforja iz odpadne vode se je izkazal prod, saj je značilna relativno visoka stopnja absorpcije delcev soli na prodnate delce (Ziqiang in sod., 2009). Poleg absorpcije pa lahko poteka tudi mikrobiološko odstranjevanje fosforja, ki se pojavi v aerobnih razmerah pri mikroorganizmih z visoko zmožnostjo znotrajcelične akumulacije fosforja. Odstranjevanje poteka preko mehanizma akumulacije fosforja v bakterijskih celicah v obliki polifosfatnih granul (angl. *polyphosphate (polyP) granules*). Organizme, ki imajo zmožnost privzema in shranjevanja fosforja v obliki granul imenujemo polifosfat akumulacijski organizmi (angl. *polyP accumulating organisms*: PAO). Nadalje lahko ti mikroorganizmi v anaerobnih razmerah uporabljajo polifosfatne granule za sintezo ATP (Seviour in sod., 2003).

Povprečna vrednost amonijevega dušika na vtoku RČN Rakitna je bila 33 mg/L, na iztoku pa 9 mg/L (preglednica 19), kar predstavlja 72 % učinkovitost čiščenja (preglednica 22). Izmerjene koncentracije amonijevega dušika so bile v večini primerov, razen 3 meritev, pod mejno vrednostjo, določeno z zakonodajo (preglednica 17). Glede na podatke iz literature lahko ugotovimo, da je učinkovitost čiščenja RČN Rakitna glede na vrednost amonijevega dušika precej uspešna. Vymazal in Brezinova (2014) poročata o 53 % povprečni učinkovitosti odstranjevanja amonijevega dušika. Pomembna ugotovitev Vymazala in Brezinove (2014) je, da ni prihajalo do razlik v koncentraciji  $\text{NH}_4\text{-N}$  na iztoku iz RČN med poletnim in zimskim obdobjem.

Povprečna vrednost dušika po Kjeldahlu na vtoku RČN Rakitna je bila 52 mg/kg, na iztoku pa 22 mg/kg (preglednica 16), kar predstavlja 57 % učinkovitost čiščenja (preglednica 22). Zakonodaja ne določa mejne vrednosti dušika po Kjeldahlu v odpadni vodi na iztoku malih komunalnih čistilnih naprav. Povprečna vrednost nitratnega dušika na vtoku RČN Rakitna je bila 0,42 mg/L, na iztoku pa 0,13 mg/L (preglednica 18), kar predstavlja 90 % učinkovitost čiščenja (preglednica 22). Koncentracije nitratnega dušika so bile v vseh primerih pod mejno vrednostjo, določena z zakonodajo.

Dolgo časa je na osnovi teoretičnih dognanj veljalo, da RČN niso primerne za območja, ki se nahajajo na višjih nadmorskih višinah (Jerebic, 2008). Vzrok za to naj bi bil v nezmožnosti preživetja uporabljenih rastlin v težkih gorskih razmerah ter zamrzovanje podlage RČN, skozi katero se filtrira odpadna voda. Izkušnje na področju RČN pa dokazujejo, da ne prihaja do zamrzovanja podlage na višje ležečih območjih. Obstaja namreč več primerov uspešnega čiščenja RČN s horizontalnim podpovršinskim tokom na višjih lokacijah in pri nizkih temperaturah. V Švici je na 730 m nadmorske višine uspešno delovala RČN v obdobju med 1986-1998 s povprečno letno temperaturo 8,4 °C. Učinkovitost čiščenja se je gibala med 80 in skoraj 100 % (Zust in Schonborn, 2003). Izkazalo se je, da rastlinska biomasa omogoča dobro izolacijo v hladnejših mesecih. Pri nižjih temperaturah se delež raztopljenega kisika v vodi močno poveča in prihaja do sproščanja kisika v območju korenin. Sproščanje kisika se poveča v hladnejšem obdobju,

saj se respiracija zmanjšuje z nižanjem temperature. Rast korenin je značilna predvsem v jesenskem in zimskem času, zato podzemeljska biomasa doseže svojo najvišjo vrednost pozimi (Vymazal in Brezinova, 2014).

Izsledki raziskav soglasno nakazujejo, da ni sezonskega vpliva in vpliva temperature na učinkovitost odstranjevanja dušika (Vymazal in Brezinova, 2014). Züst in Schönborn (2003) nista našla nobenega vpliva temperature na odstranjevanje dušika v RČN, locirani v Schattweidu, Švica. Podobno ugotovitev sta podala tudi Mæhlum in Jessen (2003), ki nista zaznala nobenih sprememb v učinkovitosti med mrzlim ( $< 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in toplim ( $> 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) obdobjem za koncentracijo skupnega dušika pri kar 9 RČN na Norveškem. Na drugi strani pa so Steinmann in sod. (2003) opazili rahlo zmanjšanje amonijevega dušika v zimskem obdobju pri RČN s horizontalnim tokom.

#### 4.8 MIKROBIOLOŠKI DEJAVNIKI

Povprečna učinkovitost odstranjevanja bakterij glede na skupno število bakterij je bila 99,5 % (preglednica 22). Podobne rezultate smo dobili tudi pri ostalih dveh mikrobioloških analizah (analiza skupnih koliformnih bakterij ter *E. coli* in koliformnih bakterij na  $42^{\circ}\text{C}$ ), kjer je bila učinkovitost čiščenja v obeh primerih 99,9 % (preglednica 20). Ugotovimo lahko, da so vrednosti mikrobioloških dejavnikov pod mejnimi vrednostmi, ki jih določa zakonodaja. O podobni uspešnosti sanitacije odpadne vode v RČN poročajo tudi Mairi in sod. (2012), kjer je bila dosežena 92,9 % učinkovitost odstranjevanja *E. coli* in koliformnih bakterij fekalnega izvora. Graczyk in sod. (2009) pa so po primerjavi uspešnosti RČN s površinskim in podpovršinskim tokom ugotovili, da RČN s podpovršinskim tokom veliko uspešneje odstranjuje patogene mikroorganizme, saj so dosegli 97,4 % učinkovitost pri odstranjevanju *Cryptosporidium* in 95,4 % pri odstranjevanju *G. duodenalis* (Graczyk in sod., 2009).

RČN so praviloma učinkovite pri odstranjevanju patogenov, pri čemer navadno lahko dosežemo kar 5x manjše število patogenih mikroorganizmov na iztoku v primerjavi z vtokom (Reed in sod., 1995). Mikroorganizmi se navadno odstranijo z naravnim odmiranjem, sedimentacijo, filtracijo, ionizacijo z ultravijolično svetlobo, ter spremembo pH in temperature. RČN so bolj učinkovite pri odstranjevanju patogenih mikroorganizmov v primerjavi z ostalimi sistemi, saj omogočajo razvoj širokega spektra mikroorganizmov, ki tekmujejo s patogenimi mikroorganizmi (Kadlec in Knight, 1996). Pomembno vlogo pri odstranjevanju patogenih bakterij imajo praživali. Decamp in sod. (1999) so ugotavljali uspešnost odstranjevanja bakterije *Escherichia coli* iz odpadne vode na račun predatorskih migetalkarjev. Dokazali so uspešnejše odstranjevanje bakterij pri čistilnih napravah s prisotnimi rastlinami v primerjavi z čistilnimi napravami brez prisotnih rastlin (49 bakterij/migetalkarja/uro pri prisotnih rastlinah in 9,5 bakterij/migetalkarja/uro brez prisotnih rastlin) (Decamp in sod., 1999). Podobno sta Awuah in Gyasi (2014) prišla do zaključka, da praživali znotraj RČN igrajo pomembno vlogo pri odstranjevanju *E. coli* in *Salmonella*. Poleg praživali imajo pomembno vlogo tudi rastlinski eksudati (organske kisline, aminokisline, polisaharidi, sekundarni metaboliti), ki na eni strani zavirajo patogene mikroorganizme in na drugi strani predstavljajo vir energije za simbiotske mikroorganizme (Shukla in sod., 2011; Truu in sod., 2015).

#### 4.9 SPREMLJANJE RASTI *P. australis*

V skladu z našimi pričakovanji smo ugotovili, da je bila rast rastlin na filtririni gredi upočasnjena v primerjavi s polirno. Tudi po kasnejši dosadnji rastlin je bilo povprečno število poganjkov na filtrirni gredi veliko manjše v primerjavi s polirno gredo. Enako velja tudi za njihovo višino. Na polirni gredi smo opazili več rastlin, saj je na njej prisoten bolj fin matriks, ki zadrži več vlage. V skladu z našo hipotezo lahko ugotovimo, da je bila na polirni gredi prisotna najhitrejša in najbujnejša rast rastlin, ki je trajala od meseca junija do konca septembra (preglednica 21).

Glede na to, da smo v času največje biomase makrofitov uspeli vzorčenje opraviti zgolj dvakrat oz. trikrat, imamo na razpolago malo podatkov za primerjavo. Za bolj natančno primerjavo učinkovitosti čiščenja bi bilo vzorčenje potrebno izvesti v krajših zamikih in ne zgolj vsake tri tedne. Hipoteze, ki govori o povečanju učinkovitosti RČN s povečanjem biomase ne moremo ne ovreči in ne potrditi, saj bi za to potrebovali več podatkov.

Spremembe obremenjenosti RČN Rakitna glede na naše rezultate niso imele večjega vpliva. To povezujemo predvsem z dejstvom, da RČN Rakitna ni delovala pri polni obremenjenosti, saj je bila dejanska obremenitev z odpadno vodo pod vrednostjo projektirane obremenitve. Na podlagi dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da očitne korelacije med izmerjenimi dejavniki in obremenitvijo z odpadno vodo ni moč opaziti, medtem ko tovrstno korelacijo lahko opazimo glede na spremembo vremenskih pogojev.

## 5 SKLEPI

- Učinek čiščenja odpadne vode RČN Rakitna je visok predvsem glede na dejavnike KPK (92 %), BPK<sub>5</sub> (89 %), koncentracijo fosfatov (90 %) in mikrobiološke analize (99,5 %). Najnižjo učinkovitost čiščenja smo zaznali pri merjenju SS, kjer je bila koncentracija SS relativno nizka že na vtoku v RČN.
- Z izjemo 3 vrednosti amonijevega dušika, izmerjenih ob vzorčenju V2, V3 in V6 ter 2 vrednosti BPK<sub>5</sub> na RČN, izmerjenih ob vzorčenju V2 in V3 na iztoku RČN Rakitna so bili izmerjeni dejavniki pod mejnimi vrednostmi za odpadne vode, ki jih določa zakonodaja (temperatura 30 °C, pH 6,5 – 9,0, nitratni dušik 30 mg/L, amonijev dušik 10 mg/L, KPK 150 mg/L, BPK<sub>5</sub> 30 mg/L, fosfati 2 mg/L, koliformne bakterije 100 celic/mL).
- Očitne korelacije med izmerjenimi dejavniki na RČN in vremenskimi pogoji ter obremenitvami z odpadno vodo ni bilo moč določiti, saj bi za to potrebovali večji nabor meritev v daljšem časovnem obdobju.
- Spomladi rastline na RČN niso uspešno rastle, zato v času izvajanja meritev na RČN Rakitna ni bilo dosežene pričakovane biomase rastlin, saj optimalna rast ni bila dosežena. V kasnejši fazi opravljanja meritev, na sredini julija, smo kljub začetnim težavam dosegli bujnejšo rast. S povečevanjem biomase rastlin je bilo opazno rahlo povečanje učinkovitosti čiščenja RČN, vendar bi za nedvomno potrditev prav tako potrebovali večje število meritev v daljšem obdobju oz. intenzivnejše povečevanje biomase.
- Najhitrejša rast rastlin je bila prisotna na polirni gredi, najpočasnejša rast pa je bila prisotna tako na filtrirni kakor na čistilni gredi. Opaznejših razlik med rastjo rastlin na filtrirni in čistilni gredi ni bilo.

## 6 POVZETEK

Glede na naše rezultate lahko ugotovimo, da je RČN Rakitna delovala učinkovito in razen redkih izjem ni presegala zakonsko določenih mejnih vrednosti. Izmerjeni dejavniki na iztoku iz RČN Rakitna so bili v večini primerov močno pod mejnimi vrednostmi, dostikrat pa je bilo čiščenje dovolj učinkovito že po delovanju filtrirne in čistilne grede.

Ugotovimo lahko, da bi bilo potrebnih več sprotnih meritev za določanje učinkovitosti delovanja RČN Rakitna, saj precejšnje število rezultatov ne moremo upoštevati zaradi izjemno spremenljivih okoljskih razmer. Problem, ki se je pojavil, je bil povezan z močnim deževjem v času vzorčenja. S tem smo namreč pridobili podatke o vzorcih, ki so bili močno razredčeni in niso kazali realnih vrednosti izmerjenih dejavnikov odpadne vode.

Poleg fizikalno-kemijskih in mikrobioloških analiz bi bila za oceno učinkovitosti delovanja RČN Rakitna zanimiva tudi uporaba bioloških metod, ki bi nam podale informacijo o biodostopnosti in bioloških učinkih onesnaževal, ki se morebiti ohranijo na iztoku iz RČN Rakitna. Z uporabo teh metod bi lahko potrdili oz. ovrgli predpostavko, da se na iztoku iz RČN Rakitna v odpadni vodi ohranijo onesnaževala, ki negativno vplivajo na rast in razmnoževanje živih organizmov, populacije organizmov vodnih ekosistemov (Allan in sod., 2006). Možno je, da se kljub nizkim izmerjenim koncentracijam kemijskih analiz izkaže, da je prisoten negativen biološki učinek. Iz fizikalno-kemijskih dejavnikov torej ne moremo predvidevati ali bo prišlo do toksičnega efekta ali ne (Helma in sod., 1998).

Generalno gledano je bilo poletje 2014 izjemno mokro in hladno, tako da smo lahko pridobili podatke o delovanju v dokaj hladnih, deževnih razmerah. Glede na to, da za oceno delovanja RČN potrebujemo tudi podatke o delovanju v sušnih razmerah, kadar prihaja do izhlapevanja vode iz površine čistilne naprave, smo lahko delovanje RČN Rakitna le delno predstavili. Kljub temu podatki kažejo, da RČN Rakitna deluje skladno z zakonodajnimi okvirji tudi v težkih vremenskih razmerah, ki so pogoste na območju, kjer se nahaja RČN.

Priložnost uporabe RČN v Sloveniji se kaže v dejstvu, da je za Slovenijo značilna velika razpršenost naselij, saj le dobra polovica prebivalcev živi v mestih (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007). 59,5 % prebivalcev živi naseljih z manj kot 5000 prebivalci, pri čemer večina živi v naseljih z 200 do 500 prebivalci. Posebnost Slovenije predstavlja tudi Kras, ki velja za izjemno občutljivo, vodovarstveno območje (Zupančič Justin in sod., 2012). Glede na to, da je Vlada Republike Slovenije sprejela operativni program odvajanja in čiščenja komunalne odpadne vode za obdobje od 2005 do 2017 (ARSO, 2015), RČN predstavljajo priložnost za postavitev ekonomsko učinkovite naprave za čiščenje komunalnih odpadnih vod, predvsem kot nadomestek gradnje dražjega, dolgega kanalizacijskega sistema do centralne čistilne naprave (Vrhovšek in Griessler Bulc, 2007).

Optimizacija učinkovitosti delovanja RČN v prihodnosti temelji na sodelovanju ekologov in inženirjev. Potrebno bo tudi vključevanje krajinskih arhitektov, s pomočjo katerih se bo omogočila njihova večnamenska vloga v urbanem okolju. RČN bodo z ekološkim inženirstvom uspele doseči stopnjo tehnične rešitve, ki bo ustrezala tako naravi kakor družbi (Greenway in sod., 2008).

## 7 VIRI

AccuWeather. 2015. Pensilvanija.

<http://www.accuweather.com/sl/si/rakitna/297389/month/297389?monyr=3/01/2014>  
(maj, 2015)

Acumedia. 2012. MacConkey broth, 7185. ZDA, Neogen Corporation: 2 str.

[http://foodsafety.neogen.com/pdf/Acumedia\\_PI/7185\\_PI.pdf](http://foodsafety.neogen.com/pdf/Acumedia_PI/7185_PI.pdf) (junij, 2016)

Adrados B., Sanchez O., Arias C.A., Becares E., Garrido L., Mas J., Brix H., Morato J.

2014. Microbial communities from different types of natural wastewater treatment systems: Vertical and horizontal flow constructed wetlands and biofilters. *Water Research*, 55: 304-312

Allan I.J., Vrana B., Greenwood R., Mills G.A., Roig B., Gonzalez C. 2006. A toolbox for biological and chemical monitoring requirements for the European Union's Water Framework Directive. *Talanta*, 69: 302-322

Ammonia Removal in Wetlands: A literature review. 2009. Sacramento, California State University Sacramento, Office of Water Programs: 13 str.

ARSO. Agencija Republike Slovenije za okolje. 2015.

[http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje\\_voda/vsebine/predpisi](http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje_voda/vsebine/predpisi) (julij, 2015)

Awuah E., Gyasi S.F. Role of protozoa in faecal bacteria removal in macrophyte and algal waste stabilization ponds. 2014. *Microbiology Journal*, 4: 41-50

Bezbaruah A.N., Zhang T.C. 2005. Quantification of oxygen release by bulrush (*Scirpus valindus*) roots in a constructed treatment wetland. *Biotechnology Bioengineering*, 89, 3: 308-318

Biochemical oxygen demand (BOD), aggregate organic constituents, standard methods for the examination of water and wastewater (5210). 2000. 20. izd. Clesceri L.S., Greenberg A.E., Eaton A.D. (ur.) Washington D.C., American Public Health Association: 1325 str.

Brix H. 2003. Plants used in constructed wetlands and their functions. 1 st International seminar in the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. *Maio*, 8,10: 1-30

Buresh R.J., Casselman M.E., Patrick W.H. 1980. Nitrogen fixation in flooded soil systems: a review. *Advances in Agronomy*, 33: 149-192

Cardinal P., Anderson J.C., Carlson J.C., Low J.E., Challis J.K., Beattie S.A., Bartel C.N., Elliott A.D., Montero O.F., Lokesh S., Favreau A., Kozlova T.A., Knapp C.W., Hanson M.L., Wong C.S. 2014. Macrophytes may not contribute significantly to removal of

- nutrients, pharmaceuticals and antibiotic resistance in model surface constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 483: 294-304
- Constructed Wetlands Treatment of municipal wastewaters. 2000. Ohio, EPA, United States Environmental Protection Agency. Office of Research and Development: 166 str. <https://www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands>
- Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. 1991. Official Journal of the European Union, L135: 40-52
- Davis L., DuPoldt C., Edwards R., Garber L., Isaacs B., Lapp J., Murphy T., Rider G., Sayers M., Takita C. 1995. A handbook of constructed wetlands. A Guide to creating wetlands in the Mid-Atlantic Region. U.S. Government Printing Office, Washington DC: 52 str.
- Decamp O., Warren A., Sanchez R. The role of ciliated protozoa in subsurface flow wetlands and their potential as bioindicators. 1999. *Water Science and Technology*, 40, 3: 91-98.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for the Community action in the field of water policy. 2007. The European Parliament and Council, L327/1: 72 str.
- Ebrahimi A., Taheri E., Hassan Ehrampoush M., Nasiri S., Jalali F., Soltani R., Fatehizadeh A. 2013. Efficiency of constructed wetland vegetated with *Cyperus alternifolius* applied for municipal wastewater treatment. *Journal of environmental and Public Health*, 2013, D815962, doi:10.1155/2013/815962:5 str.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2012. Conductivity. Washington. <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms59.cfm> (avgust, 2015)
- Foladori, P., Ortigara, A.R.C., Ruaben, J., Andreottola, G., 2012. Influence of highorganic loads during the summer period on the performance of hybrid constructed wetlands (VSSF + HSSF) treating domestic wastewater in the Alpsregion. *Water Science and Technology*, 65, 5: 890–897
- Gerhardt P., Murray R.G.E., Wood W.A., Krieg N.R. 1994. *Methods for general and Molecular Bacteriology*. Washington, ASM Press.: 791 str.
- Ghosh D., Gopal B., 2010. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36, 8: 1044 1051
- Globevnik L. 2007. Voda kot politična dobrina V: Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost: Voda. Raspor P. (ur). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 12-22

- Google Zemljevidi, 2015. Posnetki 2015 CNES, Astrium. DigitalGlobe.  
<https://www.google.si/maps/@45.8914663,14.4401086,644m/data=!3m1!1e3> (avgust, 2015)
- Graczyk T. K., Lucy F. E., Tamang L., Mashinski Y., Broaders M.A., Connolly M., Hui Wen A. Cheng. 2009. Propagation of human enteropathogens in constructed horizontal wetlands used for tertiary wastewater treatment. *Applied and Environmental Microbiology*, 75, 13: 4531-4538
- Greenway M. 2008. Constructed wetlands for water pollution control - process, parameters and performance. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 12, 5-6: 491-504
- Guittonny-Philippe A., Petit M.E., Masoti V., Monnier Y., Malleret L., Colomb B., Combroux I., Braumberger T., Viglione J., Laffont-Schwob I. 2015. Selection of wild macrophytes for use in constructed wetlands for phytoremediation of contaminant mixtures. *Journal of Environmental Management*, 147: 108-123
- Harrington R., McInnes R., 2009. Integrated constructed wetlands (ICW) for livestock wastewater management. *Bioresource Technology*, 100: 5498-5505
- Hartel P.G., Hagedorn C. 1983. Microtechnique for isolating fecal coliforms from soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 46, 2: 518-520
- Helma C., Eckl P., Gottmann E., Kassie F., Rodinger W., Steinkeller H., Windpassinger C., Schulte-Hermann R., Knasmüller S. 1998. Genotoxic and ecotoxic effects of groundwaters and their relation to routinely measured chemical parameters. *Environmental Science Technology*, 32: 1799-1805
- Iasur-Kruh L. 2012. Bacterial composition of constructed wetland's biofilm: The influence of biotic and a-biotic parameters on the composition of the biofilm. Jerusalem, Hebrew University of Jerusalem: 121 str.
- Ibekwe A.M., Ma J., Murinda S., Reddy G.B. 2015. Bacterial community dynamics in surface flow constructed wetlands for the treatment of swine waste. *Science of the Total Environment*, 544: 68-76
- Ilias A., Panoras A., Angelakis A. 2014. Wastewater recycling in Greece: The case of thessaloniki. *Sustainability*, 6: 2876-2892
- Istenič D., Oblak L., Vrhovšek D. 2009. Conditioning of drinking water on constructed wetland: elimination of *Escherichia coli*. *Ekológia (Bratislava)*: 28, 3: 300-311
- Istenič D., Vrhovšek D., Zupančič Justin M. 2012. Ecoremediation for natural restoration of the environment. *Zaštita materiala i životne sredine* 1, 1: 30-35

- Jerebic A. 2008. Model čiščenja odpadnih voda iz planinskih koč nad visokogorskimi jezeri. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede: 55 str.
- Johnston C.A. 1991. Sediments and nutrient retention by freshwater wetlands: Effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21: 491-565
- Kadlec R.H., Knight R.L. 1996. *Treatment Wetlands*. Boca Raton, CRC Press, Florida: 893 str.
- Kadlec R.H., Wallace S.D. 2009. *Introduction to Treatment Wetlands V: Treatment Wetlands*, Second edition. Kadlec R.H. in Wallace S.D. (ur). Florida, Boca Raton, Taylor & Francis Group: 1-19
- Limnos, Podjetje za aplikativno ekologijo. 2014. Limnowet®, Rakitna, Brezovica pri Ljubljani, Ljubljana.  
<http://www.limnowet.si/project/page/2/> (avgust, 2015)
- Lu M.S.H., Chapman J.S., Gordon Anderson A. 2005. Process for providing antimicrobial surfaces. US patent application US 7601361 B2: 17 str.
- Mairi J.P., Lyimo T.J., Njau K.N. 2012. Performance of subsurface flow constructed wetland for domestic wastewater treatment. *Tanzania Journal of Science*, 38, 2: 66-79
- Marinšek Logar R. 2007. Metode sledenja dogajanja v vodi V: Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost: Voda. Raspor P. (ur). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 72-84
- Meerburg B. M., Vereijken P.H., de Visser W., Verhagen J., Korevaar H., Querner E. P., de Blaeij A. T., van der Werf A. 2010. Surface water sanitation and biomass production in a large constructed wetland in the Netherlands. *Wetlands Ecology and Management*, 18; 463-470
- Most probable number procedure and tables, MLG Appendix 2,05. 2014. Washington, United States Department of Agriculture. Laboratory Quality Assurance, 5: 8 str.  
<https://www.google.si/webhp?tab=ww&ei=eLW6VIybFcOqacy6gvAG&ved=0CAYQ1S4#> (junij, 2016)
- Mulder A., Van de Graaf A.A., Robertson L.A., Kuenen J.G. 1995. Anaerobic Ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *Microbial Ecology*, 16: 177-184
- Murthy V. K., Khanal S.N., Majumder A.K., Weiss A., Shrestha D., Maharjan S. 2007. Assessment of performance characteristics of some constructed wetlands in Nepal. *Kalmar ECO-TECH*: 202 str.

- Mušič A. 2009. Na Rakitni bi lahko zdravili do desetkrat več otrok. Ljubljana, MMC, RTV Slovenija.  
<http://www.rtv slo.si/zdravje/novice/na-rakitni-bi-lahko-zdravili-do-desetkrat-vec-otrok/207228> (september, 2015)
- Mæhlum, T., Jenssen, P.D., 2003. Design and performance of integrated subsurfaceflow wetlands in a cold climate. V: *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates*. Mander, Ü., Jenssen, P. (ur.), C. Southampton, UK, WIT Press: 69–86  
Official methods of analysis of AOAC International. Nitrogen (Total) in water, Kjeldahl method, Nitrogen (Ammonia) in water, 2000. 17. izd. Horwitz W. (ur). Gaithersburg, AOAC International, 1146 str.
- Pendleton C.H., Morris J.W., Goldemund H., Rozema L.R., Mallamo M.S., Agricola L. 2005. Leachate treatment using vertical subsurface flow wetland system-findings from two pilot studies. V: *10th International waste management and landfill symposium, Sardinia*: 1-10
- Pravilnik o pitni vodi. 2004. Ur. l. RS, št. 19/04
- Rakitna. 2015. Wikipedija. Wikimedija Foundation Inc.  
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Rakitna> (avgust, 2015)
- Reeder B. C., 2011. Assessing constructed wetland functional success using diel changes in dissolved oxygen, pH, and temperature in submerged, emergent, and open-water habitats in the Beaver Creek Wetlands Complex, Kentucky (USA). *Ecological Engineering*, 37, 11: 1772-1778
- Reed S.C., Crites R.W., Middlebrooks E.J. 1995. *Natural systems for waste management and treatment*. New York, McGraw-Hill, Inc.: 433 str.
- Reed S. C. 2003. *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment*. Washington, Environmental Protection Agency: 87 str.
- Seviour R.J., Mino T., Onuki M. 2003. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems. *FEMS Microbiology Reviews*, 13: 99-127
- Sewwandi B.G.N., Weragoda S.K., Mowjood M.I.M., Tanaka N., Sasikala S. 2010. Effect of submerged and floating plants on Dissolved oxygen dynamics and nitrogen removal in constructed wetlands. *Tropical Agricultural Research*, 21, 4: 353-360
- Shukla K.P., Sharma S., Singh N.K., Shingh V., Tiwari K., Singh S. 2011. Nature and role of root exudates: Efficacy in bioremediation. *African Journal of Biotechnology*, 10, 48: 9717-9724
- Sim C.H. 2003. *The use of constructed wetlands for wastewater treatment*. Malaysia, Wetlands International: 24 str.

Sinergise LTD. 2013. Rakitna, Ljubljana.

[http://www.hribi.net/zemljevid\\_poti.asp?id=1729](http://www.hribi.net/zemljevid_poti.asp?id=1729) (avgust, 2015)

Sirianuntapiboon S., Kongchum M., Jitmaikasem W. 2006. Effect of hydraulic retention time and media of constructed wetland for treatment of domestic wastewater. *African Journal of Agricultural Research*, 1, 2: 27-37

Standard methods for the examination of water and wastewater. Aggregate Organic Constituents, 5220 Chemical Oxygen Demand (COD). 2005a. 21. izd. Washington, American Public Health Association: 13 str.

<https://www.standardmethods.org/store/ProductView.cfm?ProductID=37> (junij, 2016)

Standard methods for the examination of water and wastewater. 2540 Solids. 2005b. 21. izd. Washington, American Public Health Association: 13 str.

<https://www.standardmethods.org/store/ProductView.cfm?ProductID=63> (junij, 2016)

Standard methods for the examination of water and wastewater. 1999. Inorganic nonmetals, 4500 Phosphorus. 20. izd. Washington D.C., American Public Health Association: 9 str.

Steinmann C.R., Weinhart S., Melzer A. 2003. A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment. *Water Research*, 37: 2035-2042

Truu J., Truu M., Espenberg M., Nolvak H., Juhanson J. 2015. Phytoremediation and plant-assisted bioremediation in soil and treatment wetlands: a review. *The Open Biotechnology Journal*, 9: 85-92

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo. 2012. Ur. l. RS, št. 64/12

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav. 2007a. Ur. l. RS, št. 45/07

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav. 2007b. Ur. l. RS, št. 98/07

Uredba o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih vrst rib. 2002. Ur. l. RS, št. 46/02

Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne in padavinske odpadne vode. 2012. Ur. l. RS, št. 8/12

Vovk Korže A., Vrhovšek D. 2007. Ekoremediacije. Maribor, Filozofska fakulteta Maribor, Mednarodni center za ekoremediacije in Limnos d.o.o.: 126 str.

- Vovk Korže A., Vrhovšek D. 2006. Ekoremediacije za učinkovito varovanje okolja, Maribor, Filozofska fakulteta Maribor: 56 str.
- Vrhovšek D., Griessler Bulc T. 2007. Rastlinske čistilne naprave za čiščenje odpadnih voda V: Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost: voda. Raspor P. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 116-128
- Vrhovšek D., Kroflič B. 2007. Ekološka in ekonomska upravičenost rastlinskih čistilnih naprav na območjih razpršene poselitve. Geografski obzornik, 54, 3: 13-16
- Vrhovšek D., Kukanja V., Bulc T. 1996. Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment. Water Reaserch, 30, 10: 2287-2292
- Vymazal J. in Brezinova T. 2014. Long term treatment performance of constructed wetlands for wastewater treatment in mountain areas: Four case studies from the Czeck Republic. Ecological Engineering, 71: 578-583
- Vymazal J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 380: 48-65
- Wastewater Gardens® (WWG). Information sheet. Constructed wetlands to treat wastewater: Framework and schematic overview. 2012. Washington, Wastewater Gardens: 26 str.
- System OxiTop Control, OxiTop OC110 Controller, OxiTop-C Measuring Heads. 1998. Weilheim, WTW GmbH: 114 str.
- Zakon o varstvu okolja. 2004. Ur. l. RS, št. 41/04
- Zakon o vodah. 2002. Ur. l. RS, št. 67/02
- Zhai J., Xiao H.W., Kujawa-Roeleveld K., He Q., Kerstens S.M., 2011. Experimental study of a novel hybrid constructed wetland for water reuse and its application in Southern China. Water Research and Technology, 64, 11: 2177–2184
- Zupančič Justin M., Vrhovšek D., Ameršek I., Istenič D. 2012. Constructed wetlands for multi-functional wastewater treatment. Zaštita materiala i životine sredine 1, 1: 1-11
- Zupančič Justin M., Vrhovšek D., Stuhlbacker A., Griessler Bulc T. 2009. Treatment of wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents. Desalination, 246, 1-3: 100-109
- Züst, B., Schönborn, A., 2003. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climates: planted soil filter Schattweid–13 years' experience. V: Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climates. Mander Ü., Jenssen P. (ur.). Southampton, UK, WIT Press: 53–68

## ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorici prof. dr. Romani Marinšek Logar za vse napotke, strokoven pregled in spodbudne besede pred in med pisanjem magistrskega dela. Hvala somentorju prof. dr. Danijelu Vrhovšku za usmerjanje, strokovno pomoč in ves vložen čas. Zahvaljujem se tudi ekipi podjetja Limnos, predvsem Martinu Vrhovšku, ter osebju na katedri za mikrobiologijo in mikrobno biotehnologijo, predvsem asist. dr. Maši Zorec. Hvala za vsa pojasnila in pomoč tekom opravljanja praktičnega dela. Najlepša hvala tudi recenzentki prof. dr. Ines Mandić Mulec za strokoven pregled magistrskega dela.

Ob tej priliki, ki pomeni zaključek mojega študija, bi se rada zahvalila družini, ki me je vsak dan podpirala in zaupala v moje sposobnosti. Hvala prijateljem in sošolcem za nešteto izrečen stavek: «oh, saj veš da bo šlo, Ivanka». Le kaj bi človek brez prijateljev?

Dobre stvari so vedno enostavne. Naj zaključim enostavno. Brez vas mi ne bi uspelo. Hvala vam.

## PRILOGA A

Preglednica indeksov MPN s 95 % verjetnostjo različnih kombinacij pozitivnih epruvet v testu razredčevanja v treh epruvetah s vrednostmi 0,1, 0,01 in 0,001 g (mL).

| Kombinacija pozitivnih epruvet | MPN indeks na g (mL) | 95 % interval zaupanja |        |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|--------|
|                                |                      | Nižja                  | Višja  |
| 0-0-0                          | <3,0                 | ---                    | 9,5    |
| 0-0-1                          | 3,0                  | 0,15                   | 9,6    |
| 0-1-0                          | 3,0                  | 0,15                   | 11,0   |
| 0-1-1                          | 6,1                  | 1,2                    | 18,0   |
| 0-2-0                          | 6,2                  | 1,2                    | 18,0   |
| 0-3-0                          | 9,4                  | 3,6                    | 38,0   |
|                                |                      |                        |        |
| 1-0-0                          | 3,6                  | 0,17                   | 18,0   |
| 1-0-1                          | 7,2                  | 1,3                    | 18,0   |
| 1-0-2                          | 11,0                 | 3,6                    | 38,0   |
| 1-1-0                          | 7,4                  | 1,3                    | 20,0   |
| 1-1-1                          | 11,0                 | 3,6                    | 38,0   |
| 1-2-0                          | 11,0                 | 3,6                    | 42,0   |
| 1-2-1                          | 15,0                 | 4,5                    | 42,0   |
| 1-3-0                          | 16,0                 | 4,5                    | 42,0   |
|                                |                      |                        |        |
| 2-0-0                          | 9,2                  | 1,4                    | 38,0   |
| 2-0-1                          | 14,0                 | 3,6                    | 42,0   |
| 2-0-2                          | 20,0                 | 4,5                    | 42,0   |
| 2-1-0                          | 15,0                 | 3,7                    | 42,0   |
| 2-1-1                          | 20,0                 | 4,5                    | 42,0   |
| 2-1-2                          | 27,0                 | 8,7                    | 94,0   |
| 2-2-0                          | 21,0                 | 4,5                    | 42,0   |
| 2-2-1                          | 28,0                 | 8,7                    | 94,0   |
| 2-2-2                          | 35,0                 | 8,7                    | 94,0   |
| 2-3-0                          | 29,0                 | 8,7                    | 94,0   |
| 2-3-1                          | 36,0                 | 8,7                    | 94,0   |
|                                |                      |                        |        |
| 3-0-0                          | 23,0                 | 4,6                    | 94,0   |
| 3-0-1                          | 38,0                 | 8,7                    | 110,0  |
| 3-0-2                          | 64,0                 | 17,0                   | 180,0  |
| 3-1-0                          | 43,0                 | 9,0                    | 180,0  |
| 3-1-1                          | 75,0                 | 17,0                   | 200,0  |
| 3-1-2                          | 120,0                | 37,0                   | 420,0  |
| 3-1-3                          | 160,0                | 40,0                   | 420,0  |
| 3-2-0                          | 93,0                 | 18,0                   | 420,0  |
| 3-2-1                          | 150,0                | 37,0                   | 420,0  |
| 3-2-2                          | 210,0                | 40,0                   | 430,0  |
| 3-2-3                          | 290,0                | 90,0                   | 1000,0 |
| 3-3-0                          | 240,0                | 42,0                   | 1000,0 |
| 3-3-1                          | 460,0                | 90,0                   | 2000,0 |
| 3-3-2                          | 1100,0               | 180,0                  | 4100,0 |
| 3-3-3                          | >1100                | 420,0                  | ---    |

(MLG Appendix 2,05, MPN Table 3)

## PRILOGA B

Preglednica indeksov MPN s 95 % verjetnostjo različnih kombinacij pozitivnih epruvet v testu razredčevanja v treh epruvetah s vrednostmi 0,01, 0,001 in 0,0001 g (mL).

| Kombinacija pozitivnih epruvet | MPN indeks na g (mL) | 95 % interval zaupanja |       |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|-------|
|                                |                      | Nižja                  | Višja |
| 0-0-0                          | <30                  | ---                    | 95    |
| 0-0-1                          | 30                   | 1,5                    | 96    |
| 0-1-0                          | 30                   | 1,5                    | 110   |
| 0-1-1                          | 61                   | 12                     | 180   |
| 0-2-0                          | 62                   | 12                     | 180   |
| 0-3-0                          | 94                   | 36                     | 380   |
|                                |                      |                        |       |
| 1-0-0                          | 36                   | 1,7                    | 180   |
| 1-0-1                          | 72                   | 13                     | 180   |
| 1-0-2                          | 110                  | 36                     | 380   |
| 1-1-0                          | 74                   | 13                     | 200   |
| 1-1-1                          | 110                  | 36                     | 380   |
| 1-2-0                          | 110                  | 36                     | 420   |
| 1-2-1                          | 150                  | 45                     | 420   |
| 1-3-0                          | 160                  | 45                     | 420   |
|                                |                      |                        |       |
| 2-0-0                          | 92                   | 14                     | 380   |
| 2-0-1                          | 140                  | 36                     | 420   |
| 2-0-2                          | 200                  | 45                     | 420   |
| 2-1-0                          | 150                  | 37                     | 420   |
| 2-1-1                          | 200                  | 45                     | 420   |
| 2-1-2                          | 270                  | 87                     | 940   |
| 2-2-0                          | 210                  | 45                     | 420   |
| 2-2-1                          | 280                  | 87                     | 940   |
| 2-2-2                          | 350                  | 87                     | 940   |
| 2-3-0                          | 290                  | 87                     | 940   |
| 2-3-1                          | 360                  | 87                     | 940   |
|                                |                      |                        |       |
| 3-0-0                          | 230                  | 46                     | 940   |
| 3-0-1                          | 380                  | 87                     | 1100  |
| 3-0-2                          | 640                  | 170                    | 1800  |
| 3-1-0                          | 430                  | 90                     | 1800  |
| 3-1-1                          | 750                  | 170                    | 2000  |
| 3-1-2                          | 1200                 | 370                    | 4200  |
| 3-1-3                          | 1600                 | 400                    | 4200  |
| 3-2-0                          | 930                  | 180                    | 4200  |
| 3-2-1                          | 1500                 | 370                    | 4200  |
| 3-2-2                          | 2100                 | 400                    | 4300  |
| 3-2-3                          | 2900                 | 900                    | 10000 |
| 3-3-0                          | 2400                 | 420                    | 10000 |
| 3-3-1                          | 4600                 | 900                    | 20000 |
| 3-3-2                          | 11000                | 1800                   | 41000 |
| 3-3-3                          | >11000               | 4200                   | ---   |

(MLG Appendix 2,05, MPN Table 3)

## PRILOGA C

Podatki o porabi vode za odjemalce, priključene na RČN Rakitna v času od marca do septembra 2014.

|              | <b>Marec<br/>2014</b> | <b>April<br/>2014</b> | <b>Maj 2014</b> | <b>Junij<br/>2014</b> | <b>Julij 2014</b> | <b>Avgust<br/>2014</b> | <b>September<br/>2014</b> |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| Rakitna 106  | 25                    | 25                    | 25              | 28                    | 23                | 27                     | 25                        |
| Rakitna 107  | 29                    | 26                    | 29              | 27                    | 26                | 29                     | 27                        |
| Rakitna 114a | 17                    | 17                    | 14              | 15                    | 16                | 15                     | 14                        |
| Rakitna 117  | 19                    | 16                    | 17              | 16                    | 20                | 17                     | 18                        |
| Rakitna 118  | 24                    | 21                    | 24              | 21                    | 23                | 22                     | 21                        |
| Rakitna 128  | 26                    | 25                    | 24              | 26                    | 24                | 26                     | 26                        |
| Rakitna 140  | 11                    | 13                    | 13              | 12                    | 14                | 16                     | 13                        |
| Rakitna 199  | 18                    | 20                    | 19              | 19                    | 21                | 19                     | 21                        |
| Rakitna 200  | 21                    | 19                    | 22              | 21                    | 22                | 22                     | 23                        |
| Rakitna 286  | 26                    | 27                    | 29              | 25                    | 29                | 28                     | 29                        |
| Rakitna 37   | 18                    | 19                    | 20              | 19                    | 17                | 19                     | 21                        |
| Rakitna 404  | 9                     | 12                    | 10              | 10                    | 9                 | 10                     | 11                        |
| Rakitna 405  | 23                    | 21                    | 23              | 24                    | 24                | 23                     | 22                        |
| Rakitna 406  | 13                    | 6                     | 8               | 10                    | 10                | 11                     | 9                         |
| Rakitna 45a  | 22                    | 21                    | 19              | 21                    | 19                | 20                     | 19                        |
| Rakitna 54   | 78                    | 61                    | 72              | 65                    | 31                | 33                     | 74                        |
| Rakitna 56   | 18                    | 17                    | 19              | 22                    | 19                | 18                     | 17                        |
| Rakitna 66   | 17                    | 11                    | 17              | 26                    | 34                | 43                     | 52                        |
| Rakitna 68   | 15                    | 18                    | 17              | 16                    | 20                | 18                     | 16                        |
| Rakitna 69   | 29                    | 29                    | 28              | 28                    | 28                | 29                     | 28                        |
| Rakitna 90   | 19                    | 18                    | 17              | 19                    | 18                | 17                     | 17                        |
| Rakitna 94   | 21                    | 20                    | 19              | 18                    | 19                | 18                     | 18                        |
| Rakitna 96   | 268                   | 259                   | 267             | 258                   | 268               | 267                    | 258                       |
| Rakitna 98   | 23                    | 21                    | 22              | 21                    | 23                | 19                     | 21                        |
| SKUPAJ       | 789                   | 742                   | 774             | 767                   | 757               | 766                    | 800                       |

(Mladinsko Klimatsko zdravilišče, Osnovna Šola Preserje, Javno komunalno podjetje VO-KA, Javno Komunalno podjetje Brezovica, 2014)

## PRILOGA D

Izmerjene vrednosti teže žarilnega lončka pred in po sušenju vzorca za izračun deleža SS, opravljene v dveh ponovitvah.

|             |                                        | <b>Vtok</b> | <b>Po 1. gredi</b> | <b>Po 2. gredi</b> | <b>Iztok</b> |
|-------------|----------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 18. 3. 2014 | Teža žarilnega lončka                  | 48,326      | 42,856             | 43,067             | 40,288       |
|             |                                        | 43,565      | 39,620             | 43,556             | 39,539       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 48,359      | 42,877             | 43,084             | 40,303       |
|             |                                        | 43,598      | 39,642             | 43,571             | 39,553       |
| 8. 4. 2014  | Teža žarilnega lončka                  | 39,622      | 43,561             | 48,325             | 43,571       |
|             |                                        | 42,859      | 39,544             | 40,294             | 43,071       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 39,651      | 43,584             | 48,340             | 43,586       |
|             |                                        | 42,887      | 39,569             | 40,308             | 43,088       |
| 28. 4. 2014 | Teža žarilnega lončka                  | 48,324      | 42,855             | 43,565             | 32,054       |
|             |                                        | 43,559      | 39,623             | 40,897             | 43,626       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 48,359      | 42,881             | 43,583             | 32,073       |
|             |                                        | 43,593      | 39,649             | 40,916             | 43,643       |
| 20. 5. 2014 | Teža žarilnega lončka                  | 31,659      | 43,562             | 48,325             | 43,629       |
|             |                                        | 43,561      | 39,624             | 42,856             | 40,898       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 32,087      | 43,584             | 48,340             | 43,645       |
|             |                                        | 43,590      | 39,643             | 42,872             | 40,915       |
| 10. 6. 2014 | Teža žarilnega lončka                  | 32,067      | 39,626             | 43,569             | 43,568       |
|             |                                        | 48,329      | 40,896             | 42,857             | 43,631       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 32,095      | 39,646             | 43,577             | 43,579       |
|             |                                        | 48,356      | 40,917             | 427,866            | 43,642       |
| 1. 7. 2014  | Teža žarilnega lončka                  | 42,852      | 43,567             | 32,069             | 43,571       |
|             |                                        | 43,633      | 40,897             | 39,630             | 48,332       |
|             | Teža žarilnega ločka po sušenju vzorca | 42,884      | 43,590             | 32,094             | 43,588       |
|             |                                        | 43,659      | 40,919             | 39,653             | 48,349       |

se nadaljuje...

|              |                                         | <b>Vtok</b> | <b>Po 1. gredi</b> | <b>Po 2. gredi</b> | <b>Iztok</b> |
|--------------|-----------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 22. 7. 2014  | Teža žarilnega lončka                   | 43,647      | 40,904             | 42,867             | 48,336       |
|              |                                         | 32,075      | 43,577             | 43,578             | 39,639       |
|              | Teža žarilnega lončka po sušenju vzorca | 43,679      | 40,928             | 42,886             | 48,352       |
|              |                                         | 32,109      | 43,602             | 43,596             | 39,655       |
| 12. 8. 2014  | Teža žarilnega lončka                   | 32,067      | 48,338             | 42,869             | 43,649       |
|              |                                         | 40,906      | 39,643             | 43,578             | 43,581       |
|              | Teža žarilnega lončka po sušenju vzorca | 32,084      | 48,351             | 42,877             | 43,659       |
|              |                                         | 40,920      | 39,657             | 43,585             | 43,591       |
| 2. 9. 2014   | Teža žarilnega lončka                   | 40,907      | 43,582             | 43,581             | 48,341       |
|              |                                         | 32,068      | 43,651             | 42,872             | 39,646       |
|              | Teža žarilnega lončka po sušenju vzorca | 40,929      | 43,601             | 43,601             | 48,359       |
|              |                                         | 32,091      | 43,671             | 42,892             | 39,665       |
| 23. 09. 2014 | Teža žarilnega lončka                   | 44,581      | 43,584             | 48,339             | 40,913       |
|              |                                         | 32,072      | 39,631             | 42,868             | 43,654       |
|              | Teža žarilnega lončka po sušenju vzorca | 43,60       | 43,587             | 48,346             | 40,924       |
|              |                                         | 32,091      | 39,641             | 42,876             | 43,660       |

## PRILOGA E

Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti KPK

|             | Vtok             |            | Po 1. gredi      |            | Po 2. gredi      |            | Iztok            |            |
|-------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
|             | A <sub>600</sub> | KPK (mg/L) | A <sub>600</sub> | KPK (mg/L) | A <sub>600</sub> | KPK (mg/L) | A <sub>600</sub> | KPK (mg/L) |
| 18. 3. 2014 | 0,195            | 439,06     | 0,074            | 139,45     | -0,023           | 16,80      | -0,015           | 13,0       |
|             | 0,130            |            | 0,072            |            | -0,021           |            | -0,015           |            |
| 8. 4. 2014  | 0,131            | 330,67     | 0,096            | 184,0      | 0,052            | 60,66      | 0,056            | 54         |
|             | 0,133            |            | 0,076            |            | 0,046            |            | 0,038            |            |
| 28. 4. 2014 | 0,141            | 353,56     | -0,105*          | 58,11*     | -0,101*          | 56,25*     | -0,057*          | 34,45*     |
|             | 0,132            |            | -0,090*          |            | -0,088*          |            | -0,052*          |            |
| 20. 5. 2014 | 0,202            | 439,15     | -0,057*          | 31,73*     | -0,030*          | 21,46*     | -0,045*          | 28,08*     |
|             | 0,122            |            | -0,042*          |            | -0,031*          |            | -0,043*          |            |
| 10. 6. 2014 | 0,159            | 297,72     | -0,054*          | 41,74*     | -0,044*          | 29,14*     | -0,049*          | 26,49*     |
|             | 0,081            |            | -0,081*          |            | -0,045*          |            | -0,031*          |            |
| 1. 7. 2014  | 0,036            | 59,43      | -0,059*          | 8,53*      | -0,034*          | 22,38*     | -0,008*          | 9,99*      |
|             | 0,037            |            | 0,046*           |            | -0,030*          |            | -0,011*          |            |
| 22. 7. 2014 | 0,175            | 266,34     | -0,032*          | 18,47*     | -0,014*          | 16,15*     | -0,011*          | 20,06*     |
|             | 0,046            |            | -0,018*          |            | -0,027*          |            | -0,045*          |            |
| 12. 8. 2014 | 0,057            | 33,22      | 0,018            | 20,67      | -0,009*          | 8,93*      | 0,016*           | 6,012*     |
|             | 0,024            |            | 0,056            |            | -0,006*          |            | -0,020*          |            |
| 2. 9. 2014  | -0,015*          | 12,17*     | -0,001*          | 5,22*      | 0,006*           | 3,55*      | 0,002*           | 2,44*      |
|             | -0,012*          |            | -0,001*          |            | -0,002*          |            | 0,006*           |            |
| 23. 9. 2014 | -0,007*          | 9,40*      | -0,008*          | 7,44*      | -0,003*          | 2,23*      | 0,005*           | 5,22*      |
|             | -0,010*          |            | -0,002*          |            | 0,013*           |            | -0,006*          |            |

\*Meritve pri 420 nm

## PRILOGA F

Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti koncentracije fosfatov

|             | Vtok             |                                | Po 1. gredi      |                                | Po 2. gredi      |                                | Iztok            |                                |
|-------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|             | A <sub>420</sub> | C <sub>fosfatov</sub> (mg P/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>fosfatov</sub> (mg P/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>fosfatov</sub> (mg P/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>fosfatov</sub> (mg P/L) |
| 18. 3. 2014 | 0,153            | 3,93                           | 0,057            | 1,44                           | 0,001            | Pod mejo detekcije             | 0,008            | Pod mejo detekcije             |
|             | 0,151            |                                | 0,053            |                                | 0,001            |                                | 0,005            |                                |
| 8. 4. 2014  | 0,332            | 8,51                           | 0,132            | 3,42                           | 0,002            | Pod mejo detekcije             | 0,005            | Pod mejo detekcije             |
|             | 0,329            |                                | 0,134            |                                | 0,004            |                                | 0,002            |                                |
| 28. 4. 2014 | 0,444            | 10,83                          | 0,202            | 4,72                           | 0,027            | 0,68                           | 0,014            | 0,56                           |
|             | 0,484            |                                | 0,200            |                                | 0,029            |                                | 0,032            |                                |
| 20. 5. 2014 | 0, 275           | 6,33                           | 0,070            | 1,82                           | 0,071            | 1,52                           | 0,038            | 1,00                           |
|             | 0,268            |                                | 0,084            |                                | 0,057            |                                | 0,042            |                                |
| 10. 6. 2014 | 0,681            | 15,99                          | 0,224            | 5,24                           | 0,032            | 1,01                           | 0,025            | 0,59                           |
|             | 0,694            |                                | 0,224            |                                | 0,052            |                                | 0,023            |                                |
| 1. 7. 2014  | 0,185            | 4,40                           | 0,192            | 4,53                           | 0,089            | 2,10                           | 0,040            | 0,96                           |
|             | 0,185            |                                | 0,196            |                                | 0,090            |                                | 0,041            |                                |
| 22. 7. 2014 | 0,249            | 5,81                           | 0,165            | 3,87                           | 0,079            | 1,89                           | 0,047            | 1,11                           |
|             | 0,250            |                                | 0,166            |                                | 0,081            |                                | 0,047            |                                |
| 12. 8. 2014 | 0,342            | 8,54                           | 0,113            | 2,65                           | 0,057            | 1,35                           | 0,055            | 1,40                           |
|             | 0,391            |                                | 0,113            |                                | 0,057            |                                | 0,063            |                                |
| 2. 9. 2014  | 0,067            | 1,58                           | 0,077            | 1,85                           | 0,051            | 1,21                           | 0,046            | 1,03                           |
|             | 0,066            |                                | 0,080            |                                | 0,051            |                                | 0,040            |                                |
| 23. 9. 2014 | 0,130            | 3,15                           | 0,103            | 2,39                           | 0,037            | 0,94                           | 0,027            | 0,73                           |
|             | 0,138            |                                | 0,100            |                                | 0,041            |                                | 0,033            |                                |

## PRILOGA G

Izmerjene vrednosti množine dušika po Kjeldahlu, opravljenih v dveh ponovitvah in  
 pripadajoče povprečne vrednosti

|                | Vtok                                           |                                                          | Po 1. gredi                                    |                                                          | Po 2. gredi                                    |                                                          | Iztok                                          |                                                          |
|----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                | C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>dušika</sub> po<br>Kjeldahlu<br>(mg/kg) |
| 18. 3.<br>2014 | 55,59                                          | 57,91                                                    | 48,43                                          | 45,80                                                    | 32,39                                          | 40,49                                                    | 80,44                                          | 61,80                                                    |
|                | 60,23                                          |                                                          | 43,17                                          |                                                          | 32,59                                          |                                                          | 43,16                                          |                                                          |
| 8. 4.<br>2014  | 124,29                                         | 108,61                                                   | 82,32                                          | 103,92                                                   | 21,46                                          | 19,21                                                    | 20,14                                          | 18,43                                                    |
|                | 92,94                                          |                                                          | 125,52                                         |                                                          | 16,97                                          |                                                          | 16,71                                          |                                                          |
| 28. 4.<br>2014 | 31,82                                          | 39,55                                                    | 35,51                                          | 34,10                                                    | 16,92                                          | 16,04                                                    | 15,94                                          | 14,70                                                    |
|                | 47,27                                          |                                                          | 32,69                                          |                                                          | 15,17                                          |                                                          | 13,45                                          |                                                          |
| 20. 5.<br>2014 | 35,11                                          | 34,72                                                    | 23,71                                          | 18,67                                                    | 18,49                                          | 17,48                                                    | 19,95                                          | 16,36                                                    |
|                | 34,34                                          |                                                          | 13,63                                          |                                                          | 16,47                                          |                                                          | 12,76                                          |                                                          |
| 10. 6.<br>2014 | 77,89                                          | 71,02                                                    | 52,13                                          | 48,96                                                    | 11,55                                          | 14,65                                                    | 16,09                                          | 13,49                                                    |
|                | 64,17                                          |                                                          | 45,79                                          |                                                          | 17,75                                          |                                                          | 10,89                                          |                                                          |
| 1. 7.<br>2014  | 25,64                                          | 25,24                                                    | 28,20                                          | 29,88                                                    | 35,13                                          | 33,85                                                    | 22,60                                          | 20,46                                                    |
|                | 24,85                                          |                                                          | 31,56                                          |                                                          | 32,57                                          |                                                          | 18,32                                          |                                                          |
| 22. 7.<br>2014 | 27,46                                          | 26,21                                                    | 20,89                                          | 22,42                                                    | 13,19                                          | 17,09                                                    | 16,82                                          | 15,52                                                    |
|                | 24,95                                          |                                                          | 23,97                                          |                                                          | 20,98                                          |                                                          | 14,21                                          |                                                          |
| 12. 8.<br>2014 | 25,81                                          | 26,61                                                    | 23,64                                          | 22,46                                                    | 20,53                                          | 24,30                                                    | 12,66                                          | 15,33                                                    |
|                | 27,40                                          |                                                          | 21,05                                          |                                                          | 28,06                                          |                                                          | 17,99                                          |                                                          |
| 2. 9.<br>2014  | 13,94                                          | 15,13                                                    | 18,92                                          | 18,21                                                    | 17,85                                          | 20,41                                                    | 14,19                                          | 14,55                                                    |
|                | 16,32                                          |                                                          | 17,49                                          |                                                          | 22,98                                          |                                                          | 14,91                                          |                                                          |
| 23. 9.<br>2014 | 20,60                                          | 20,01                                                    | 25,31                                          | 20,05                                                    | 13,95                                          | 14,10                                                    | 8,38                                           | 9,24                                                     |
|                | 19,42                                          |                                                          | 14,79                                          |                                                          | 14,24                                          |                                                          | 10,09                                          |                                                          |

## PRILOGA H

Izmerjene vrednosti množine amonijevega dušika, opravljenih v dveh ponovitvah in  
 pripadajoče povprečne vrednosti

|                | Vtok                        |                                       | Po 1. gredi                 |                                       | Po 2. gredi                 |                                       | Iztok                       |                                    |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
|                | C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | Povpr.<br>C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) | Povpr. C <sub>NH3</sub><br>(mg/kg) |
| 18. 3.<br>2014 | 28,41                       | 28,65                                 | 23,16                       | 23,16                                 | 6,61                        | 6,91                                  | 4,56                        | 4,29                               |
|                | 28,89                       |                                       | 23,16                       |                                       | 7,22                        |                                       | 4,02                        |                                    |
| 8. 4.<br>2014  | 40,33                       | 40,14                                 | 29,64                       | 29,57                                 | 15,67                       | 15,50                                 | 14,99                       | 14,89                              |
|                | 39,96                       |                                       | 29,50                       |                                       | 15,33                       |                                       | 14,78                       |                                    |
| 28. 4.<br>2014 | 43,40                       | 43,16                                 | 35,09                       | 35,05                                 | 17,78                       | 17,82                                 | 15,19                       | 15,02                              |
|                | 42,92                       |                                       | 35,02                       |                                       | 17,85                       |                                       | 14,85                       |                                    |
| 20. 5.<br>2014 | 23,85                       | 23,74                                 | 9,47                        | 9,37                                  | 11,45                       | 11,45                                 | 7,63                        | 7,80                               |
|                | 23,64                       |                                       | 9,26                        |                                       | 11,45                       |                                       | 7,97                        |                                    |
| 10. 6.<br>2014 | 55,46                       | 55,66                                 | 47,76                       | 48,03                                 | 11,31                       | 10,08                                 | 8,11                        | 7,70                               |
|                | 55,87                       |                                       | 48,30                       |                                       | 8,86                        |                                       | 7,29                        |                                    |
| 1. 7.<br>2014  | 20,10                       | 20,10                                 | 28,48                       | 28,51                                 | 35,43                       | 35,49                                 | 19,28                       | 19,18                              |
|                | 20,10                       |                                       | 28,55                       |                                       | 35,56                       |                                       | 19,08                       |                                    |
| 22. 7.<br>2014 | 23,50                       | 23,71                                 | 19,76                       | 19,79                                 | 11,85                       | 11,82                                 | 9,20                        | 9,40                               |
|                | 23,91                       |                                       | 19,83                       |                                       | 11,79                       |                                       | 9,61                        |                                    |
| 12. 8.<br>2014 | 17,31                       | 17,44                                 | 18,87                       | 18,87                                 | 6,27                        | 6,13                                  | 6,75                        | 6,85                               |
|                | 17,58                       |                                       | 18,87                       |                                       | 5,99                        |                                       | 6,95                        |                                    |
| 2. 9.<br>2014  | 5,79                        | 5,76                                  | 11,11                       | 11,28                                 | 11,04                       | 10,83                                 | 8,58                        | 8,38                               |
|                | 5,72                        |                                       | 11,47                       |                                       | 10,63                       |                                       | 8,18                        |                                    |
| 23. 9.<br>2014 | 6,27                        | 6,51                                  | 8,99                        | 8,86                                  | 6,27                        | 6,23                                  | 3,61                        | 3,54                               |
|                | 6,75                        |                                       | 8,72                        |                                       | 6,20                        |                                       | 3,48                        |                                    |

## PRILOGA I

Izmerjene vrednosti absorbanc, opravljenih v dveh ponovitvah in pripadajoče povprečne vrednosti koncentracij nitratnega dušika

|             | Vtok             |                           | Po 1. gredi      |                           | Po 2. gredi      |                           | Iztok            |                           |
|-------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|
|             | A <sub>420</sub> | C <sub>NH3-N</sub> (mg/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>NH3-N</sub> (mg/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>NH3-N</sub> (mg/L) | A <sub>420</sub> | C <sub>NH3-N</sub> (mg/L) |
| 18. 3. 2014 | 0,018            | 0,60                      | 0,000            | Pod mejo detekcije        | 0,005            | Pod mejo detekcije        | 0,005            | Pod mejo detekcije        |
|             | 0,037            |                           | 0,000            |                           | 0,003            |                           | 0,002            |                           |
| 8. 4. 2014  | 0,030            | 0,43                      | 0,011            | Pod mejo detekcije        | 0,002            | Pod mejo detekcije        | 0,003            | Pod mejo detekcije        |
|             | 0,013            |                           | 0,000            |                           | 0,000            |                           | 0,000            |                           |
| 28. 4. 2014 | 0,018            | 0,43                      | 0,011            | 0,60                      | 0,034            | 0,95                      | 0,025            | 0,27                      |
|             | 0,025            |                           | 0,044            |                           | 0,047            |                           | 0,006            |                           |
| 20. 5. 2014 | 0,002            | Pod mejo detekcije        | 0,014            | 0,25                      | 0,004            | 0,01                      | 0,006            | Pod mejo detekcije        |
|             | 0,002            |                           | 0,016            |                           | 0,008            |                           | 0,004            |                           |
| 10. 6. 2014 | 0,029            | 0,46                      | 0,016            | 0,61                      | 0,005            | 0,06                      | 0,003            | 0,06                      |
|             | 0,016            |                           | 0,040            |                           | 0,011            |                           | 0,013            |                           |
| 1. 7. 2014  | 0,007            | 0,27                      | 0,011            | 0,12                      | 0,009            | 0,14                      | 0,009            | 0,09                      |
|             | 0,024            |                           | 0,009            |                           | 0,013            |                           | 0,009            |                           |
| 22. 7. 2014 | 0,014            | 0,27                      | 0,009            | 0,10                      | 0,007            | 0,02                      | 0,029            | 0,65                      |
|             | 0,017            |                           | 0,010            |                           | 0,006            |                           | 0,030            |                           |
| 12. 8. 2014 | 0,013            | 0,16                      | 0,010            | 0,12                      | 0,009            | 0,06                      | 0,009            | 0,06                      |
|             | 0,010            |                           | 0,010            |                           | 0,007            |                           | 0,007            |                           |
| 2. 9. 2014  | 0,017            | 0,24                      | 0,014            | 0,14                      | 0,012            | 0,19                      | 0,008            | 0,09                      |
|             | 0,012            |                           | 0,008            |                           | 0,013            |                           | 0,010            |                           |
| 23. 9. 2014 | 0,023            | 0,57                      | 0,006            | 0,01                      | 0,033            | 0,66                      | 0,026            | 0,80                      |
|             | 0,030            |                           | 0,006            |                           | 0,027            |                           | 0,044            |                           |

## PRILOGA J

Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču LB pri temperaturi 38 °C

|                 | $A_{650}$ |        |        |       |        |        |        |        |        |
|-----------------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Vtok1</b>    | 1,300     | 0,486  | 0,500  | 0,477 | 0,001  | 0,000  | 0,000  | -0,001 | -0,001 |
| <b>Vtok2</b>    | 1,302     | 0,521  | 0,402  | 0,254 | 0,000  | -0,001 | 0,000  | 0,001  | 0,002  |
| <b>Vtok3</b>    | 1,252     | 0,569  | 0,465  | 0,352 | 0,001  | 0,001  | 0,002  | 0,004  | 0,008  |
| <b>1.greda1</b> | 1,010     | 0,499  | 0,299  | 0,006 | 0,002  | 0,002  | 0,003  | 0,003  | 0,003  |
| <b>1.greda2</b> | 0,992     | 0,479  | 0,490  | 0,004 | 0,002  | 0,003  | 0,004  | 0,005  | 0,007  |
| <b>1.greda3</b> | 1,190     | 0,526  | 0,422  | 0,001 | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,001  | 0,000  |
| <b>2.greda1</b> | 0,249     | 0,071  | 0      | 0     | 0      | -0,001 | -0,001 | -0,002 | -0,002 |
| <b>2.greda2</b> | 0,443     | 0,001  | 0      | 0,001 | -0,001 | -0,001 | 0      | -0,001 | 0      |
| <b>2.greda3</b> | 0,153     | 0,004  | 0,001  | 0     | 0,001  | 0      | 0,002  | 0,004  | 0,007  |
| <b>Iztok1</b>   | 0,312     | 0,082  | 0,002  | 0,002 | 0,003  | 0,001  | 0,002  | 0,002  | 0,001  |
| <b>Iztok2</b>   | 0,344     | 0,004  | 0,001  | 0,002 | 0,003  | 0,002  | 0,003  | 0,004  | 0,005  |
| <b>Iztok3</b>   | 0,296     | -0,001 | -0,001 | 0     | 0      | -0,001 | -0,001 | -0,001 | -0,002 |

## PRILOGA K

Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču MacConkey pri temperaturi 38 °C

|                 | <b>A<sub>650</sub></b> |        |        |        |        |        |        |       |        |
|-----------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| <b>Vtok1</b>    | 1,742                  | 1,605  | 1,263  | 0,289  | -0,002 | -0,002 | -0,001 | 0,000 | -0,003 |
| <b>Vtok2</b>    | 1,658                  | 1,729  | 1,197  | 0,833  | -0,001 | -0,001 | 0,000  | 0,000 | -0,002 |
| <b>Vtok3</b>    | 1,715                  | 1,612  | 1,084  | 0,118  | 0,000  | 0,000  | 0,002  | 0,002 | 0,001  |
| <b>1.greda1</b> | 1,800                  | 1,771  | 0,040  | 0,004  | 0,001  | 0,000  | 0,000  | 0,001 | 0,001  |
| <b>1.greda2</b> | 1,621                  | 1,627  | 0,024  | 0,057  | 0,001  | 0,001  | 0,003  | 0,003 | 0,002  |
| <b>1.greda3</b> | 1,727                  | 1,715  | 1,097  | 0,000  | -0,001 | 0,000  | -0,001 | 0,000 | -0,003 |
| <b>2.greda1</b> | 0,293                  | -0,002 | -0,002 | -0,001 | -0,001 | -0,001 | -0,002 | 0     | -0,002 |
| <b>2.greda2</b> | 0,212                  | -0,002 | -0,001 | -0,001 | 0      | -0,002 | -0,001 | 0     | -0,002 |
| <b>2.greda3</b> | 0,138                  | -0,001 | 0      | 0      | 0,001  | 0      | -0,001 | 0,001 | 0,001  |
| <b>Iztok1</b>   | 0,177                  | 0      | 0,001  | 0,001  | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,001 | 0,001  |
| <b>Iztok2</b>   | 0,239                  | 0,002  | 0,002  | 0,001  | 0,002  | 0,002  | 0,001  | 0,003 | 0,003  |
| <b>Iztok3</b>   | 0,371                  | -0,001 | -0,001 | 0,001  | 0      | 0      | 0      | 0     | -0,002 |

## PRILOGA L

Primer rezultatov absorbranc mikrobioloških analiz za ugotavljanje najverjetnejšega števila mikroorganizmov za dan 21.9.2014 po inkubaciji vzorcev 24 ur na gojišču MacConkey pri temperaturi 42 °C

|                 | <b>A<sub>650</sub></b> |       |       |       |        |        |        |        |        |
|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Vtok1</b>    | 1,594                  | 1,659 | 1,620 | 0,091 | -0,002 | -0,003 | -0,001 | -0,001 | -0,002 |
| <b>Vtok2</b>    | 1,655                  | 1,670 | 1,716 | 0,000 | 0,001  | 0,004  | 0,007  | 0,016  | 0,021  |
| <b>Vtok3</b>    | 1,601                  | 1,577 | 0,001 | 0,004 | 0,011  | 0,024  | 0,042  | 0,062  | 0,081  |
| <b>1.greda1</b> | 1,605                  | 1,686 | 0,178 | 0,003 | 0,004  | 0,010  | 0,020  | 0,031  | 0,040  |
| <b>1.greda2</b> | 1,595                  | 1,630 | 0,003 | 0,005 | 0,015  | 0,026  | 0,043  | 0,064  | 0,079  |
| <b>1.greda3</b> | 1,636                  | 1,711 | 0,002 | 0,001 | 0,000  | 0,002  | 0,004  | 0,009  | 0,011  |
| <b>2.greda1</b> | -0,003                 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001  | 0,000  | -0,001 | 0,000  | -0,001 |
| <b>2.greda2</b> | 1,664                  | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001  | -0,001 | 0,000  | 0,001  | 0,002  |
| <b>2.greda3</b> | 0,082                  | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,003  | 0,003  | 0,008  | 0,010  | 0,018  |
| <b>Iztok1</b>   | 0,000                  | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,004  | 0,003  | 0,003  | 0,004  | 0,005  |
| <b>Iztok2</b>   | 1,538                  | 0,004 | 0,002 | 0,004 | 0,005  | 0,006  | 0,011  | 0,016  | 0,024  |
| <b>Iztok3</b>   | -0,002                 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001  | 0,000  | -0,001 | 0,000  | 0,000  |

## PRILOGA M

Temperatura zraka (°C) in količina padavin (mm/h) v času izvajanja meritev na RČN  
Rakitna od marca do septembra 2014

| Datum     | Temperatura<br>(°C) | Količina padavin<br>(mm/h) |
|-----------|---------------------|----------------------------|
| 1.3.2014  | 9                   | 5                          |
| 2.3.2014  | 10                  | 0                          |
| 3.3.2014  | 11                  | 2                          |
| 4.3.2014  | 10                  | 1                          |
| 5.3.2014  | 13                  | 2                          |
| 6.3.2014  | 13                  | 0                          |
| 7.3.2014  | 13                  | 0                          |
| 8.3.2014  | 13                  | 0                          |
| 9.3.2014  | 15                  | 0                          |
| 10.3.2014 | 12                  | 0                          |
| 11.3.2014 | 15                  | 0                          |
| 12.3.2014 | 17                  | 0                          |
| 13.3.2014 | 17                  | 0                          |
| 14.3.2014 | 19                  | 0                          |
| 15.3.2014 | 15                  | 0                          |
| 16.3.2014 | 18                  | 0                          |
| 17.3.2014 | 23                  | 0                          |
| 18.3.2014 | 20                  | 0                          |
| 19.3.2014 | 19                  | 0                          |
| 20.3.2014 | 20                  | 0                          |
| 21.3.2014 | 19                  | 0                          |
| 22.3.2014 | 14                  | 1                          |
| 23.3.2014 | 11                  | 28                         |
| 24.3.2014 | 8                   | 4                          |
| 25.3.2014 | 7                   | 1                          |
| 26.3.2014 | 9                   | 4                          |
| 27.3.2014 | 11                  | 1                          |
| 28.3.2014 | 17                  | 0                          |
| 29.3.2014 | 19                  | 0                          |
| 30.3.2014 | 21                  | 0                          |
| 31.3.2014 | 21                  | 0                          |
| 1.4.2014  | 20                  | 0                          |
| 2.4.2014  | 20                  | 0                          |
| 3.4.2014  | 16                  | 0                          |
| 4.4.2014  | 20                  | 0                          |
| 5.4.2014  | 16                  | 6                          |
| 6.4.2014  | 19                  | 0                          |
| 7.4.2014  | 20                  | 0                          |
| 8.4.2014  | 22                  | 2                          |
| 9.4.2014  | 15                  | 2                          |
| 10.4.2014 | 17                  | 0                          |
| 11.4.2014 | 12                  | 1                          |
| 12.4.2014 | 16                  | 5                          |
| 13.4.2014 | 16                  | 0                          |
| 14.4.2014 | 17                  | 0                          |
| 15.4.2014 | 13                  | 0                          |
| 16.4.2014 | 12                  | 0                          |

se nadaljuje...

| <b>Datum</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Količina padavin<br/>(mm/h)</b> |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 17.4.2014    | 14                          | 0                                  |
| 18.4.2014    | 18                          | 1                                  |
| 19.4.2014    | 17                          | 1                                  |
| 20.4.2014    | 10                          | 24                                 |
| 21.4.2014    | 13                          | 16                                 |
| 22.4.2014    | 21                          | 1                                  |
| 23.4.2014    | 19                          | 1                                  |
| 24.4.2014    | 21                          | 0                                  |
| 25.4.2014    | 19                          | 0                                  |
| 26.4.2014    | 19                          | 6                                  |
| 27.4.2014    | 18                          | 12                                 |
| 28.4.2014    | 18                          | 2                                  |
| 29.4.2014    | 20                          | 1                                  |
| 30.4.2014    | 20                          | 2                                  |
| 1.5.2014     | 19                          | 1                                  |
| 2.5.2014     | 20                          | 1                                  |
| 3.5.2014     | 16                          | 1                                  |
| 4.5.2014     | 18                          | 0                                  |
| 5.5.2014     | 18                          | 0                                  |
| 6.5.2014     | 22                          | 0                                  |
| 7.5.2014     | 18                          | 5                                  |
| 8.5.2014     | 21                          | 1                                  |
| 9.5.2014     | 24                          | 0                                  |
| 10.5.2014    | 24                          | 0                                  |
| 11.5.2014    | 19                          | 13                                 |
| 12.5.2014    | 18                          | 0                                  |
| 13.5.2014    | 10                          | 16                                 |
| 14.5.2014    | 17                          | 1                                  |
| 15.5.2014    | 16                          | 0                                  |
| 16.5.2014    | 15                          | 7                                  |
| 17.5.2014    | 18                          | 2                                  |
| 18.5.2014    | 16                          | 3                                  |
| 19.5.2014    | 22                          | 0                                  |
| 20.5.2014    | 22                          | 0                                  |
| 21.5.2014    | 24                          | 0                                  |
| 22.5.2014    | 27                          | 0                                  |
| 23.5.2014    | 25                          | 1                                  |
| 24.5.2014    | 26                          | 0                                  |
| 25.5.2014    | 26                          | 0                                  |
| 26.5.2014    | 21                          | 9                                  |
| 27.5.2014    | 20                          | 4                                  |
| 28.5.2014    | 20                          | 11                                 |
| 29.5.2014    | 21                          | 1                                  |
| 30.5.2014    | 16                          | 1                                  |
| 31.5.2014    | 19                          | 0                                  |
| 1.6.2014     | 20                          | 0                                  |
| 2.6.2014     | 22                          | 1                                  |
| 3.6.2014     | 21                          | 1                                  |
| 4.6.2014     | 22                          | 0                                  |
| 5.6.2014     | 22                          | 2                                  |
| 6.6.2014     | 27                          | 0                                  |

se nadaljuje...

| <b>Datum</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Količina padavin<br/>(mm/h)</b> |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 7.6.2014     | 30                          | 0                                  |
| 8.6.2014     | 30                          | 0                                  |
| 9.6.2014     | 31                          | 0                                  |
| 10.6.2014    | 32                          | 0                                  |
| 11.6.2014    | 33                          | 0                                  |
| 12.6.2014    | 31                          | 4                                  |
| 13.6.2014    | 27                          | 4                                  |
| 14.6.2014    | 22                          | 0                                  |
| 15.6.2014    | 22                          | 0                                  |
| 16.6.2014    | 20                          | 0                                  |
| 17.6.2014    | 20                          | 0                                  |
| 18.6.2014    | 23                          | 0                                  |
| 19.6.2014    | 26                          | 0                                  |
| 20.6.2014    | 24                          | 1                                  |
| 21.6.2014    | 23                          | 0                                  |
| 22.6.2014    | 26                          | 0                                  |
| 23.6.2014    | 28                          | 10                                 |
| 24.6.2014    | 24                          | 19                                 |
| 25.6.2014    | 18                          | 26                                 |
| 26.6.2014    | 23                          | 0                                  |
| 27.6.2014    | 24                          | 0                                  |
| 28.6.2014    | 27                          | 0                                  |
| 29.6.2014    | 26                          | 4                                  |
| 30.6.2014    | 19                          | 23                                 |
| 1.7.2014     | 23                          | 2                                  |
| 2.7.2014     | 24                          | 1                                  |
| 3.7.2014     | 24                          | 4                                  |
| 4.7.2014     | 26                          | 0                                  |
| 5.7.2014     | 27                          | 0                                  |
| 6.7.2014     | 29                          | 0                                  |
| 7.7.2014     | 30                          | 0                                  |
| 8.7.2014     | 22                          | 10                                 |
| 9.7.2014     | 21                          | 15                                 |
| 10.7.2014    | 15                          | 20                                 |
| 11.7.2014    | 24                          | 0                                  |
| 12.7.2014    | 24                          | 1                                  |
| 13.7.2014    | 23                          | 2                                  |
| 14.7.2014    | 23                          | 0                                  |
| 15.7.2014    | 27                          | 0                                  |
| 16.7.2014    | 28                          | 1                                  |
| 17.7.2014    | 28                          | 1                                  |
| 18.7.2014    | 29                          | 0                                  |
| 19.7.2014    | 30                          | 0                                  |
| 20.7.2014    | 30                          | 0                                  |
| 21.7.2014    | 22                          | 4                                  |
| 22.7.2014    | 20                          | 10                                 |
| 23.7.2014    | 27                          | 4                                  |
| 24.7.2014    | 26                          | 1                                  |
| 25.7.2014    | 25                          | 1                                  |
| 26.7.2014    | 27                          | 5                                  |
| 27.7.2014    | 26                          | 4                                  |

se nadaljuje...

| <b>Datum</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Količina padavin<br/>(mm/h)</b> |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 28.7.2014    | 26                          | 4                                  |
| 29.7.2014    | 24                          | 5                                  |
| 30.7.2014    | 21                          | 15                                 |
| 31.7.2014    | 23                          | 1                                  |
| 1.8.2014     | 27                          | 1                                  |
| 2.8.2014     | 28                          | 0                                  |
| 3.8.2014     | 29                          | 0                                  |
| 4.8.2014     | 28                          | 1                                  |
| 5.8.2014     | 24                          | 19                                 |
| 6.8.2014     | 26                          | 1                                  |
| 7.8.2014     | 26                          | 0                                  |
| 8.8.2014     | 28                          | 0                                  |
| 9.8.2014     | 29                          | 0                                  |
| 10.8.2014    | 29                          | 0                                  |
| 11.8.2014    | 30                          | 1                                  |
| 12.8.2014    | 25                          | 0                                  |
| 13.8.2014    | 22                          | 12                                 |
| 14.8.2014    | 19                          | 16                                 |
| 15.8.2014    | 18                          | 0                                  |
| 16.8.2014    | 20                          | 0                                  |
| 17.8.2014    | 23                          | 0                                  |
| 18.8.2014    | 23                          | 0                                  |
| 19.8.2014    | 19                          | 13                                 |
| 20.8.2014    | 22                          | 5                                  |
| 21.8.2014    | 20                          | 7                                  |
| 22.8.2014    | 20                          | 0                                  |
| 23.8.2014    | 17                          | 16                                 |
| 24.8.2014    | 20                          | 6                                  |
| 25.8.2014    | 20                          | 1                                  |
| 26.8.2014    | 20                          | 1                                  |
| 27.8.2014    | 26                          | 9                                  |
| 28.8.2014    | 22                          | 0                                  |
| 29.8.2014    | 24                          | 0                                  |
| 30.8.2014    | 26                          | 0                                  |
| 31.8.2014    | 23                          | 6                                  |
| 1.9.2014     | 18                          | 16                                 |
| 2.9.2014     | 14                          | 11                                 |
| 3.9.2014     | 21                          | 5                                  |
| 4.9.2014     | 21                          | 4                                  |
| 5.9.2014     | 24                          | 1                                  |
| 6.9.2014     | 20                          | 8                                  |
| 7.9.2014     | 22                          | 0                                  |
| 8.9.2014     | 25                          | 0                                  |
| 9.9.2014     | 27                          | 8                                  |
| 10.9.2014    | 19                          | 22                                 |
| 11.9.2014    | 15                          | 29                                 |
| 12.9.2014    | 17                          | 22                                 |
| 13.9.2014    | 15                          | 15                                 |
| 14.9.2014    | 19                          | 0                                  |
| 15.9.2014    | 20                          | 0                                  |
| 16.9.2014    | 20                          | 1                                  |

se nadaljuje...

| <b>Datum</b>     | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Količina padavin<br/>(mm/h)</b> |
|------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| <b>17.9.2014</b> | 20                          | 0                                  |
| <b>18.9.2014</b> | 20                          | 0                                  |
| <b>19.9.2014</b> | 23                          | 0                                  |
| <b>20.9.2014</b> | 23                          | 2                                  |
| <b>21.9.2014</b> | 26                          | 1                                  |
| <b>22.9.2014</b> | 20                          | 14                                 |
| <b>23.9.2014</b> | 19                          | 0                                  |

(AccuWeather, 2015)