

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**ANALIZA DELOVANJA BIOLOŠKEGA DELA CENTRALNE
ČISTILNE NAPRAVE DOMŽALE-KAMNIK Z UPORABO
MATEMATIČNEGA MODELA**

DIPLOMSKO DELO

Anja KUCLER

Mentor: dr. Darko VREČKO

Nova Gorica, 2011

IZJAVA

Izjavljam, da je diplomsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Rezultati, ki so nastali v okviru skupnega raziskovanja z drugimi raziskovalci, ali so jih prispevali drugi raziskovalci (strokovnjaki), so eksplicitno prikazani oziroma navedeni (citirani) v diplomskem delu.

Anja Kucler

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju dr. Darku Vrečku za vso strokovno pomoč, usmerjanje in vodenje pri izdelavi diplomske naloge.

Posebna zahvala gre družini in prijateljem, ki so mi stali ob strani ter me vzpodbujali tako v času študija, kot pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvalila bi se tudi dr. Marjetki Birk-Levstek s Centralne čistilne naprave Domžale-Kamnik za vse posredovane podatke.

Za lektoriranje se zahvaljujem Zdravku Potočniku za lektoriranje.

POVZETEK

Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik (CČND) presega zakonsko dovoljene meje koncentracije parametrov skupnega in amonijevega dušika na iztoku v vodotok, zato bo podjetje moralo spremeniti trenutni proces s suspendiranim aktivnim blatom v dveh zaporednih aerobnih bioloških stopnjah, kjer je prva visoko in druga nižje obremenjena. V prvem delu diplomskega dela smo v namen analiziranja delovanja in ugotavljanja možnosti za znižanje koncentracij skupnega in amonijevega dušika na iztoku postavili matematični model CČND v programskem paketu GPS-X ter ga validirali s povprečnimi dnevnimi meritvami s čistilne naprave. Validacijski model je pokazal delno ujemanje z meritvami. Slabše ujemanje koncentracij neraztopljenih snovi ter amonijevega in skupnega dušika pa je verjetno posledica izplavljanja ter denitrifikacije v usedalnikih, česar model ne upošteva. V drugem delu diplomskega dela smo modelu dodali obtok mimo prve biološke stopnje ter poizkusili, kako se obnaša pri različnih deležih obtoka, nižji koncentraciji kisika v prezračevalnih bazenih ter spremenjenem pretoku odvečnega blata iz usedalnikov. Rezultati so pokazali, da naprava najbolje deluje pri 30 % obtoku, ki zniža amonijev dušik za 22 % glede na validacijski model, pri tem pa koncentracija skupnega dušika ostane enaka. Znižanje koncentracije kisika z 2 mg/L na 1 mg/L v obeh prezračevalnih bazenih in 30 % obtok povzročita znižanje povprečne koncentracije skupnega dušika za 12 %, vendar je pri tem povprečna koncentracija amonijevega dušika višja za 24 %. Model s 30 % obtokom, koncentracijama kisika 1 mg/L in višjem pretoku odvečnega blata iz prvega, t.j. 260 m³/dan, in nižjem iz drugega usedalnika, t.j. 25 m³/dan, pa je pokazal znižanje amonijevega dušika za 5 % in skupnega dušika za 9 %. S tako konfiguracijo pa ne moremo znižati koncentracij kemijske in biološke potrebe po kisiku ter skupnih neraztopljenih snovi. Postavili smo tudi model z reciklom iz druge v prvo biološko stopnjo in denitrifikacijo v prvi biološki stopnji, ki bi lahko bil primeren za odstranjevanje skupnega dušika, saj ga v povprečju odstrani tudi do 27 %. Takšen model pa slabo deluje pri nizkih temperaturah, saj se nitrifikacija popolnoma ustavi, zato je koncentracija amonijevega dušika v tem primeru nekajkrat višja.

Ključne besede: matematično modeliranje in simulacija, biološko čiščenje odpadne vode z aktivnim blatom, model Mantis, stehiometrija in kinetika biokemijskih procesov, programski paket GPS-X.

ABSTRACT

Domžale-Kamnik wastewater treatment plant (WWTP) exceeds the legal limit of concentration of ammonium nitrogen at the effluent into the watercourse, therefore the company will have to change the existing suspended activated sludge process with a low and a high load biological stage. The aim of the first part of this thesis was analysis and identification of opportunities for reducing concentrations of total and ammonia nitrogen at the effluent of the plant. For this reason mathematical model of Domžale-Kamnik WWTP was built in the software package GPS-X. Model validation showed partial agreement with the daily averaged measurements. Lower agreement in measurements of ammonia and total nitrogen is probably due to bulking and denitrification in the secondary settlers which the model does not take into account. In the second part of this thesis a bypass of the first biological stage was added to the model and various percentages of the bypass, oxygen concentration in aeration tanks and waste sludge flow rate from secondary settlers were tested. The results showed that the plant works best with the bypass of 30%, which reduces ammonia nitrogen at the effluent by 22 % according to the validation model, whereas the concentration of total nitrogen remains the same. The reduction of the oxygen concentration to 1mg/L in both aeration tanks and bypass of 30 % cause the total nitrogen concentration to decrease by 12 %, although the concentration of ammonia nitrogen increases by 24 %. The model with the bypass of 30 %, oxygen concentration of 1 mg/L and increased waste sludge flow rate in the first settler to 260 m³/day and decreased in the second settler to 25 m³/day showed a reduction of total nitrogen concentration by 5 % and an ammonia nitrogen by 9 %. With such a configuration, concentrations of chemical and biological oxygen demand and total suspended solids cannot be reduced. A model with a recycle from the second to the first aeration stage has also been built, which may be suitable for removing the total nitrogen. With such a configuration total nitrogen can be reduced by up to 27 %. However, this configuration works poorly at low temperatures, since nitrification process entirely stops and the concentration of ammonia nitrogen is several times higher than in the validation model.

Key words: mathematical modelling and simulation, biological wastewater treatment with activated sludge, Mantis model, stoichiometry and kinetics of the biochemical processes, software package GPS-X.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD.....	1
1.1 Opredelitev problema.....	1
1.2 Namen diplomskega dela	2
2 TEORETIČNI DEL.....	3
2.1 Biološki proces čiščenja odpadnih voda.....	3
2.1.1 Postopek biološkega čiščenja z aktivnim blatom	4
2.1.2 Mikroorganizmi v aktivnem blatu	4
2.1.3 Biološko odstranjevanje organskih snovi.....	4
2.1.4 Biološko odstranjevanje dušikovih spojin.....	5
2.2 Matematično modeliranje in simulacija bioloških procesov na čistilni napravi.....	7
2.2.1 Uporaba profesionalnega računalniškega paketa <i>GPS-X</i>	9
2.2.2 Mantis model prezračevalnega bazena	11
2.2.3 Simple 1d model usedalnika.....	15
3 PRAKTIČNI DEL	18
3.1 Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik.....	18
3.2 Biološki del Centralne čistilne naprave Domžale-Kamnik.....	20
3.3 Razvoj in kalibracija modela v programu <i>GPS-X</i>	20
3.3.1 Izbira objektov	21
3.3.2 Izbira strukture modela za posamezen objekt ČN	22
3.3.3 Določitev fizičnih in obratovalnih parametrov naprave	22
3.3.4 Karakterizacija dotoka	25
3.3.5 Določitev stehiometričnih parametrov.....	30
3.3.6 Določitev kinetičnih parametrov.....	30
3.3.7 Ujemanje z meritvami dinamičnega obratovanja	31
4 REZULTATI IN DISKUSIJA	35
4.1 Simulacijski poizkusi modela z obtokom prve biološke stopnje	35
4.1.1 Simulacijski poizkusi pri različnem obtoku prve biološke stopnje	35
4.1.2 Simulacijski poizkus pri 30 % obtoku prve biološke stopnje in različni koncentraciji kisika v prezračevalnih bazenih	39
4.1.3 Simulacijski poizkus pri 30 % obtoku prve biološke stopnje in koncentraciji kisika 1 mg/L v prezračevalnih bazenih ter različnih pretokih odvečnega blata.....	42
4.2 Simulacijski poizkusi recikla iz druge v prvo biološko stopnjo.....	46
5 ZAKLJUČKI.....	50
VIRI IN LITERATURA.....	51
PRILOGA A: MERITVE KONCENTRACIJ ONESNAŽEVAL NA IZTOKU IZ MEHANSKE STOPNJE CČND ZA OBDOBJE OD 11. 9. 2009 DO 21. 3. 2010	53

SEZNAM SLIK

Slika 1: Shema čistilne naprave (Lindberg C.F., 1997)	1
Slika 2: Shematski prikaz vrste biološkega čiščenja (Roš M. in Zupančič G.D, 2010)	3
Slika 3: Značilni postopek biološkega čiščenja z aktivnim blatom (Roš M. in Zupančič G.D., 2010)	4
Slika 4: Nitratni cikel v odpadni vodi (Roš M., 2001)	5
Slika 5: Shema popolnoma premešanega prezračevalnega bazena	8
Slika 6: Dušikove komponente Mantis modela v <i>CNLIB</i> knjižnici in njihove povezave z meritvami	11
Slika 7: Ogljikove komponente Mantis modela v <i>CNLIB</i> knjižnici in njihove povezave z meritvami	12
Slika 8: Bločna shema komponent in procesov v Mantis modelu (Bavdaž G., 1998)	14
Slika 9: Shema usedalnika (Topkaya P., 2008)	16
Slika 10: Primer funkcije hitrosti usedanja neraztopljenega snovi (Vrečko D., 2003)	17
Slika 11: Zračni posnetek <i>CČND</i>	18
Slika 12: Shema <i>CČND</i>	19
Slika 13: Postopek razvoja simulacijskega modela <i>ČN</i> (Zec M., 1999)	21
Slika 14: Shema simulacijskega modela biološke stopnje na obstoječi <i>CČND</i> v programskem paketu <i>GPS-X</i>	22
Slika 15: Povprečna dnevna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu prve biološke stopnje <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	23
Slika 16: Povprečna dnevna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu druge biološke stopnje <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	23
Slika 17: Povprečni dnevni pretok odvečnega blata iz usedalnika prve biološke stopnje <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	24
Slika 18: Povprečni dnevni pretok odvečnega blata iz usedalnika druge biološke stopnje <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	24
Slika 19: Povprečna dnevna temperatura odpadne vode na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	26
Slika 20: Povprečen dnevni pretok odpadne vode na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	26
Slika 21: Povprečna dnevna koncentracija <i>KPK</i> na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	27
Slika 22: Povprečna dnevna koncentracija <i>TKN</i> na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	27
Slika 23: Povprečna dnevna koncentracija <i>NH₄-N</i> na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	28
Slika 24: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>TN</i> po prvi biološki stopnji (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	31
Slika 25: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>KPK</i> po prvi biološki stopnji (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)	32

Slika 26: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>TN</i> na iztoku iz <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	32
Slika 27: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>NH₄-N</i> na iztoku iz <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	33
Slika 28: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>TSS</i> na iztoku iz <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	33
Slika 29: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije <i>KPK</i> na iztoku iz <i>CČND</i> (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	34
Slika 30: Shema simulacijskega modela biološke stopnje <i>CČND</i> z obtokom	35
Slika 31: Koncentracije <i>TN</i> na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	36
Slika 32: Koncentracije <i>NH₄-N</i> na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	37
Slika 33: Koncentracije <i>TSS</i> na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	37
Slika 34: Koncentracije <i>KPK</i> na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	38
Slika 35: Koncentracije <i>BPK₅</i> na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	38
Slika 36: Koncentracije <i>TN</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami raztopljenega kisika v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	40
Slika 37: Koncentracije <i>NH₄-N</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami <i>RK</i> v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	40
Slika 38: Koncentracije <i>TSS</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami <i>RK</i> v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	41
Slika 39: Koncentracije <i>KPK</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami <i>RK</i> v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	41
Slika 40: Koncentracije <i>BPK₅</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami <i>RK</i> v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	42
Slika 41: Koncentracije <i>TN</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	44
Slika 42: Koncentracije <i>NH₄-N</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	44
Slika 43: Koncentracije <i>TSS</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	45
Slika 44: Koncentracije <i>KPK</i> na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	45

Slika 45: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).	46
Slika 46: Shema simulacijskega modela biološkega dela $C\check{C}ND$ z reciklom	46
Slika 47: Koncentracije TN na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	47
Slika 48: Koncentracije NH_4-N na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	48
Slika 49: Koncentracije TSS na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	48
Slika 50: Koncentracije KPK na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	49
Slika 51: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).....	49

SEZNAM PREGLEDNIC

Tabela 1: Spremenljivke stanja Mantis modela v <i>CNLIB</i> knjižnici (Hydromantis Inc., 2006) .11	
Tabela 2: Matrika Mantis matematičnega modela (Hydromantis, 2006)13	
Tabela 3: Stehiometrični parametri Mantis modela14	
Tabela 4: Kinetični parametri Mantis modela14	
Tabela 5: Parametri usedanja Simple 1d modela.....17	
Tabela 6: Zakonske meje za onesnaževala pri izpustu odpadne vode v vodotoke za čistilne naprave z obremenitvijo več kot 100.000 <i>PE</i> (Ur. l. RS št. 45/2007).....20	
Tabela 7: Povprečne vrednosti parametrov na dotoku na biološko stopnjo za 200 dni pred simulacijo (od 23.2.2009 do 10.9.2009).....25	
Tabela 8: Povprečni letni podatki za izračun stehiometričnih parametrov.....29	
Tabela 9: Vrednosti stehiometričnih parametrov na dotoku na biološko stopnjo <i>CČND</i>30	
Tabela 10: Sestavljene spremenljivke Mantis modela v <i>CNLIB</i> knjižnici (Hydromantis, 2006).30	
Tabela 11: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu obtoka prve biološke stopnje 35	
Tabela 12: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu različnih koncentracij kisika ..39	
Tabela 13: Pretoki odvečnega blata iz usedalnika prve in druge stopnje ter povprečne koncentracije neraztopljene snovi v prezračevalnih bazenih pri simulacijskih poizkusih43	
Tabela 14: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu pri spremenjenem pretoku odvečnega blata43	
Tabela 15: Dnevne vrednosti parametrov na dotoku in obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu z reciklom47	

SEZNAM POMEMBNEJŠIH OZNAK, KRATIC, SIMBOLOV

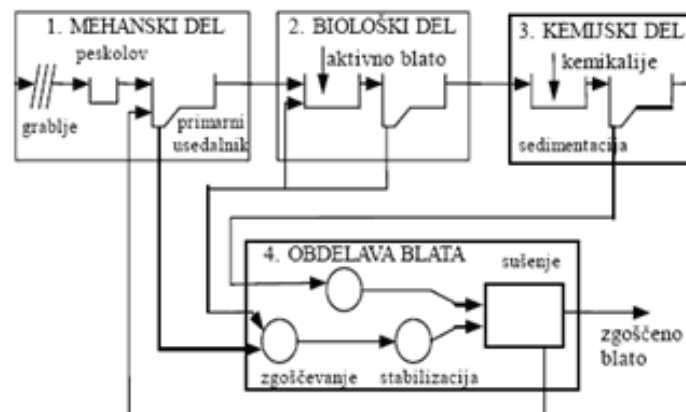
<i>ASM1</i>	Activated sludge model No. 1
<i>ASM2</i>	Activated sludge model No. 2
<i>BPK₅</i>	Biološka potreba po kisiku v petih dneh
<i>TBPK₅</i>	Topni del biološke potrebe po kisiku v petih dneh
<i>CČND</i>	Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik
<i>CN2IPLIB</i>	Knjižnica Napredno – Ogljik – Dušik – Industrijski polutanti
<i>CN2LIB</i>	Knjižnica Napredno – Ogljik – Dušik
<i>CNIPLIB</i>	Knjižnica Ogljik – Dušik – Industrijski polutanti
<i>CNLIB</i>	Knjižnica Ogljik – Dušik
<i>CNPIPLIB</i>	Knjižnica Ogljik – Dušik – Fosfor – Industrijski polutanti
<i>CNPLIB</i>	Knjižnica Ogljik – Dušik – Fosfor
<i>ČN</i>	čistilna naprava
<i>GPS-X</i>	Programski paket GPS-X (Hydromantis Inc.)
<i>KPK</i>	Kemijska potreba po kisiku
<i>NH₄-N</i>	Amonijev dušik
<i>NO-N</i>	Nitratni in nitritni dušik
<i>OSS</i>	Hlapne organske snovi
<i>PE</i>	Populacijska enota (enota za obremenitev vode ustrezna onesnaževanju, ki ga povzroči en prebivalec na dan, to je 60 g BPK ₅ /dan
<i>TKN</i>	Skupni Kjeldahlov dušik
<i>TKPK</i>	Topni del kemijske potrebe po kisiku
<i>TN</i>	Skupni dušik
<i>TOC</i>	Skupni organski ogljik
<i>TSS</i>	Skupne neraztopljene snovi
<i>TTKN</i>	Topni skupni Kjeldahlov dušik

Simbol	Pomen	Enota
Q_{dot}	Pretok na dotoku v reaktor (volumen/enoto časa)	m ³ /dan
<i>si</i>	Koncentracija raztopljenih inertnih organskih snovi	gKPK/m ³
<i>ss</i>	Koncentracija hitro biorazgradljivega substrata	gKPK/m ³
<i>xi</i>	Koncentracija neraztopljenih inertnih organskih snovi	gKPK/m ³
<i>xs</i>	Koncentracija počasi razgradljivega substrata	gKPK/m ³
<i>xbh</i>	Koncentracija aktivne heterotrofne biomase	gKPK/m ³
<i>xba</i>	Koncentracija aktivne avtotrofne biomase	gKPK/m ³
<i>xu</i>	Koncentracija nerazgradljivega dela odmrlih celic	gKPK/m ³
<i>xsto</i>	Koncentracija internih produktov celic	gKPK/m ³
<i>so</i>	Koncentracija raztopljenega kisika	gO ₂ /m ³
<i>sno</i>	Koncentracija nitratnega dušika	gN/m ³
<i>snh</i>	Koncentracija amonijevega dušika	gN/m ³
<i>snd</i>	Koncentracija biorazgradljivega organskega dušika	gN/m ³
<i>xnd</i>	Koncentracija neraztopljenega biorazgradljivega organskega dušika	gN/m ³
<i>snn</i>	Koncentracija didušika	gN/m ³
<i>salk</i>	Alkaliteta	kmolHCO ₃ ⁻ /m ³
<i>xii</i>	Koncentracija inertnih anorganskih suspendiranih snovi	g/m ³
Y_H	Izplen heterotrofov	gKPK/gKPK
f_{UH}	Heterotrofi, ki se pretvorijo v neraztopljene delce	gKPK/gKPK
i_{BH}	MasaN/Masa KPK pri heterotrofih	gN/gKPK
i_{UH}	MasaN/Masa KPK v produktih heterotrofov	gN/gKPK
Y_A	Izplen avtotrofov	gKPK/gN
f_{UA}	Avtotrofi, ki se pretvorijo v neraztopljene delce	gKPK/gKPK
i_{BA}	MasaN/Masa KPK pri avtotrofih	gN/gKPK

i_{UA}	MasaN/Masa <i>KPK</i> v produktih avtotrofov	gN/g <i>KPK</i>
μ_H	Maksimalna specifična hitrost rasti heterotrofne biomase	1/dan
K_{SH}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja organskega substrata za heterotrofno biomaso	g <i>KPK</i> /m ³
b_H	Specifična hitrost izgube heterotrofne biomase	1/dan
η_h	Delež heterotrofnih bakterij	-
η_a	Korekcijski faktor za hidrolizo v anoksičnih razmerah	-
K_H	Maksimalna specifična hitrost hidrolize	1/dan
K_X	Koeficient polovične hitrosti nasičenja za hidrolizo neraztopljenega biorazgradljivega substrata	h <i>KPK</i> /g <i>KPK</i>
k_a	Koeficient reakcijske hitrosti za amonifikacijo	m ³ /g <i>KPK</i> /dan
μ_A	Maksimalna specifična hitrost rasti avtotrofne biomase	1/dan
K_{NA}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja amonijevega dušika (kot substrat) za avtotrofno biomaso	gN/m ³
b_A	Specifična hitrost izgube avtotrofne biomase	1/dan
$K_{O,H}$	Koeficient polovične hitrosti nasičenja kisika za heterotrofno biomaso	gO ₂ /m ³
$K_{O,A}$	Koeficient polovične hitrosti nasičenja kisika za avtotrofno biomaso	gO ₂ /m ³
K_{NH}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja amonijevega dušika (kot hranivo) za heterotrofno biomaso	gN/m ³
K_{NO}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja nitratnega dušika za heterotrofno biomaso	gN/m ³
$t\mu_H$	Temperaturni koeficient za μ_H	-
tb_H	Temperaturni koeficient za b_H	-
$t\mu_A$	Temperaturni koeficient za μ_A	-
tb_A	Temperaturni koeficient za b_A	-
tk_a	Temperaturni koeficient za k_a	-
tK_H	Temperaturni koeficient za K_H	-
$vbnd$	Maksimalna hitrost usedanja	m/dan
$vmax$	Maksimalna hitrost usedanja Vesilind	m/dan
$rhin$	Parameter usedanja v področju oviranega usedanja	m ³ /g <i>TSS</i>
$rfloc$	Parameter usedanja v področju flokulacije	m ³ /g <i>TSS</i>
fns	Neusedljiva frakcija	-
$xminmax$	Maksimalna koncentracija neusedljivih snovi	mg <i>TSS</i> /L
$vumi$	Maksimalna hitrost toka navzgor v mirnem področju	m/dan
$vuma$	Maksimalna hitrost toka navzgor v celotnem področju usedalnika	m/dan

1 UVOD

Ozaveščenost o kvaliteti vode je relativno mlada, saj smo se ljudje šele v poznem 19. stoletju začeli zavedati, kako pomembna je čista voda za zdravje človeka (Wiesmann in sod., 2006). Odpadno vodo je potrebno obdelati, saj v nasprotnem primeru predstavlja grožnjo za zdravje ljudi in za okolje. Odpadna voda, ki je produkt človeškega zadovoljevanja higienskih, prehranskih in ostalih potreb, se na koncu vedno vrača v vodni krog. Pri tem pa povzroča degradacijo okolja in negativne zdravstvene posledice za človeka, čemur pa se izognemo s čiščenjem odpadne vode. Danes se odpadno vodo obdeluje s čistilnimi napravami (ČN), kjer potekajo procesi, ki so podobni naravnim, le da so pospešeni. Odpadne vode, ki pritečejo na ČN, imajo zelo raznolike fizikalne, biološke in kemijske lastnosti ter vsebujejo topne in netopne organske in anorganske snovi, zato so potrebni tudi različni postopki obdelave takih voda. Osnovni namen čistilnih naprav je odstranjevanje suspendiranih snovi, organskih snovi ter hraniv, kot sta dušik in fosfor. V sodobnih ČN poteka čiščenje vode v več stopnjah (Birk-Levstek M., 2002; Roš M., 2001; Lindberg C.F., 1997). Kot vidimo na Sliki 1, je ČN običajno sestavljena iz mehanskega, biološkega in kemijskega dela ter procesa obdelave blata. V mehanski stopnji se iz odpadne vode odstrani večje delce ter maščobe in plavajoče delce, šele nato se iz odpadne vode na biološki način odstrani organske snovi ter hraniva.



Slika 1: Shema čistilne naprave (Lindberg C.F., 1997)

Pri snovanju in analiziranju delovanja čistilnih naprav so v pomoč matematični modeli, saj lahko hitro prikažejo delovanje neke čistilne naprave. Seveda so rezultati simulacij le približni in poenostavljeni. Opisovanje posameznih procesov čiščenja odpadne vode se je začelo v začetku 20. stoletja, danes pa poznamo že celo vrsto konceptualnih modelov, kot so Mantis model, Activated sludge model No. 1 (ASM1) in Activated sludge model No. 2 (ASM2). Matematične modele se uporablja za modeliranje celotnih čistilnih naprav (Topkaya P., 2008; Nuhoglu A. in sod., 2005) ali le določenih procesov na čistilni napravi (Birk-Levstek M., 2002). Simulacijske analize so pomembne predvsem zaradi kompleksnosti procesov čiščenja. Matematični modeli omogočajo razumevanje teh procesov ter preučevanje vseh tistih situacij, ki jih v realnosti zaradi različnih vzrokov ne bi bilo mogoče izvesti.

1.1 Opredelitev problema

Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik (CČND) ne presega zakonsko določenih mej za kemijsko potrebo po kisiku (KPK) in biološko potrebo po kisiku (BPK_5), čezmerno pa obremenjuje okolje s skupnimi neraztopljenimi snovmi ter z amonijevim in skupnim dušikom. CČND je v fazi priprave rekonstrukcije naprave, do takrat pa želijo na napravi znižati izpuste v okolje, da bodo v čim večji meri ustrezali zakonskim omejitvam.

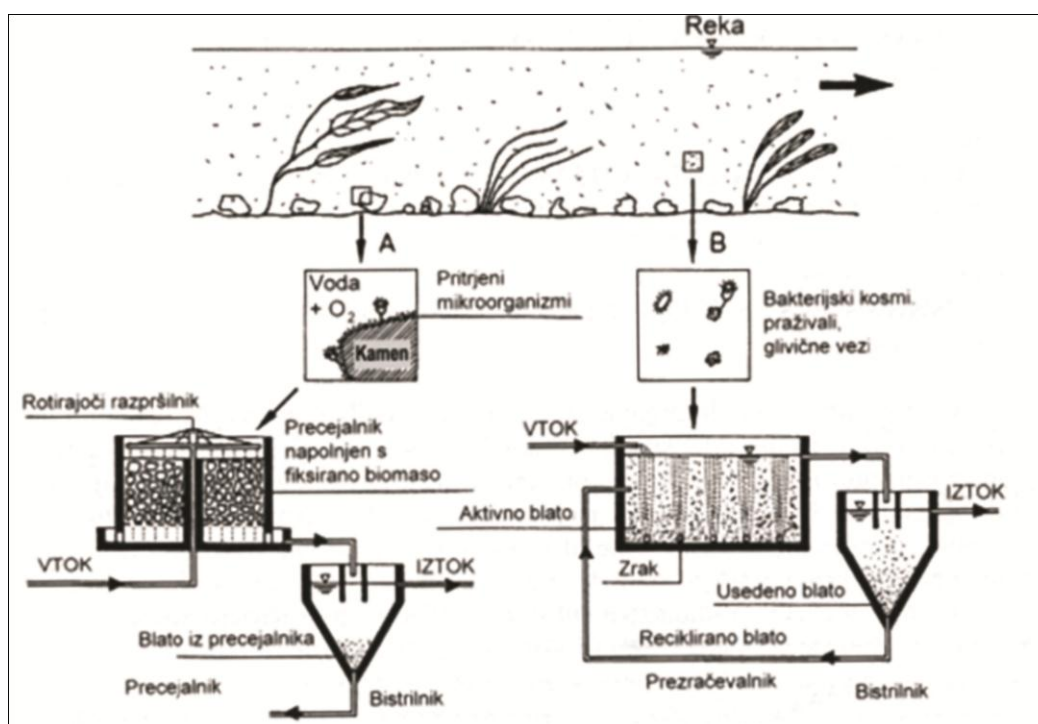
1.2 Namen diplomskega dela

Namen tega diplomskega dela je analizirati delovanje biološkega dela CČND ter ugotoviti, kako bi ga lahko izboljšali, da bi do rekonstrukcije deloval bolje. Analizo delovanja biološkega dela smo izvedli z uporabo matematičnega modela. Matematični model biološkega dela CČND smo postavili s profesionalnim računalniškim paketom *GPS-X* (Hydromantis, 2006). Obnašanje matematičnega modela smo validirali na meritvah iz naprave. Z modelom smo izvedli različne simulacijske poizkuse, s katerimi smo raziskali možnosti za izboljšanje odstranjevanja dušikovih komponent. Pri tem smo se osredotočili na optimalni obtok odpadne vode na drugo biološko stopnjo, na koncentracijo kisika v prezračevalnih bazenih in na pretok odvečnega blata iz usedalnikov. Preverili smo tudi učinek recikla iz drugega v prvi prezračevalni bazen.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Biološki proces čiščenja odpadnih voda

Biološko čiščenje običajno sledi mehanski stopnji, pri kateri se že odstranijo večji delci, plavajoče snovi in maščobe. V osnovi je biološko čiščenje tehnično izpopolnjeno in intenzivirano samoočiščenje, ki poteka v naravi in temelji na delovanju raznolikih organizmov, ki vršijo procese pretvorbe. Na Sliki 2 je prikazan prenos procesa naravnega čiščenja, ki poteka v rekah, na umetne sisteme, tako sisteme z aktivnim blatom, kot na sisteme s pritrjeno biomaso. Biološko čiščenje odpadnih voda lahko poteka na naraven ali umeten način. Naravni sistemi so lagune, namakalna polja in rastlinske čistilne naprave (Roš M. in Zupančič G.D., 2010). Bolj običajni pa so umetni sistemi z aktivnim blatom, pri čemer je biomasa lahko razpršena ali pritrjena. Stranski produkt pri biološkem procesu je novo nastalo odpadno blato. Najpogostejši procesi so rast organizmov, hidroliza ter razgradnja (Henze M. in sod., 2002). Mikroorganizmi v aktivnem blatu na ČN pretvarjajo pretežno organske snovi v CO_2 in H_2O , poleg njih pa se v biološkem procesu lahko odstranjujejo še dušikove in fosforjeve spojine.



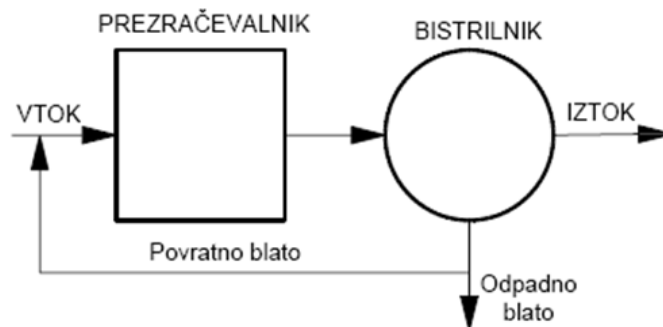
Slika 2: Shematski prikaz vrste biološkega čiščenja (Roš M. in Zupančič G.D., 2010)

Biološko čiščenje odpadnih voda lahko poteka pri različnih oksidacijsko-redukcijskih pogojih (Roš M. in Zupančič G.D., 2010; Roš M., 2001):

- **aerobni pogoji** so tisti, pri katerih mikroorganizmi kot akceptor elektronov uporabljajo raztopljeni kisik za razkroj organskih spojin, zato mora biti koncentracija le-tega nad $0,5 \text{ mg/L}$;
- **anaerobni pogoji** so pogoji brez raztopljenega kisika, pri katerih mikroorganizmi dobijo kisik iz organskih snovi ali iz sulfatnega iona (SO_3^{2-}), kot elektronski akceptor pa uporabljajo nitritne in nitratne ione, pri tem pa organske snovi v prvi stopnji pretvorijo v nižje maščobne kisline, te pa se v drugi stopnji pretvorijo v metan;
- **anoksični pogoji**, kjer se ob odsotnosti raztopljenega kisika nitritni in nitratni ioni pretvorijo v elementarni dušik.

2.1.1 Postopek biološkega čiščenja z aktivnim blatom

Na Sliki 3 je prikazan običajen enostopenjski proces čiščenja z aktivnim blatom. Odpadna voda, očiščena neraztopljenih delcev priteče kontinuirno ali šaržno iz mehanskega dela v prezračevalnik na biološkem delu čistilne naprave. Aktivno blato v prezračevalnem bazenu je lahko v suspenziji ali na nosilcih. Kot pove že ime je prezračevalni bazen stalno prezračevan, da mikroorganizmi v aktivnem blatu lahko normalno delujejo. Ob presežku kisika kosmi aktivnega blata iz predhodnih postopkov pridejo v stik z organsko snovjo v odpadni vodi ter jo mineralizirajo in vgradijo v novonastalo biomaso. V reaktorju lahko suspenzija aktivnega blata kroži različno dolgo, vendar so zaželeni daljši zadrževalni časi. Po reakciji v prezračevalnem bazenu voda odteka v sekundarni usedalnik ali bistrilnik, kjer se neraztopljene snovi, vključno z biomaso posedajo, naprej pa čista voda odteka v vodotok ali nadaljnje postopke obdelave. Koncentrirana suspenzija aktivnega blata se vrača nazaj v prezračevalni bazen kot inokulant. Kadar je koncentracija skupnih neraztopljenih snovi v prezračevalnem bazenu previsoka, pa se lahko del suspenzije aktivnega blata odvaja v zgoščevalnik in zalogovnik blata, kjer se vršijo nadaljnji postopki obdelave (Roš M. in Zupančič G.D., 2010).



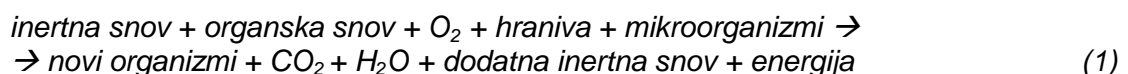
Slika 3: Značilni postopek biološkega čiščenja z aktivnim blatom (Roš M. in Zupančič G.D., 2010)

2.1.2 Mikroorganizmi v aktivnem blatu

V aktivnem blatu se nahajajo predvsem bakterije, pa tudi glive, protozoji, metazoji, alge in praživali (Henze M. in sod., 2002). Deloma se mikroorganizmi skupaj s suspendiranimi snovmi združujejo v flokule, preostali pa prosto plavajo v vodi. Najpogostejše vrste bakterij v aktivnem blatu so *Zooglea*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Alcaligenus*, *Achromobacter*, *Corynebacterium*, *Comomonas*, *Brevibacterium*, *Acinetobacter* in *Bacillus* spp. ter filamentni mikroorganizmi, kot so *Sphaerotilus*, *Beggiatoa* in *Vitreoscilla* (Bitton G., 2011). Pri procesu nitrifikacije sodelujeta samo aerobni bakteriji *Nitrosomonas* in *Nitrobacter*, s skupnim imenom poimenovani nitrifikatorji.

2.1.3 Biološko odstranjevanje organskih snovi

V bioloških čistilnih napravah se običajno najprej odstranjuje organsko snov iz odpadne vode v prezračevalnih pogojih. Pri tem sodelujejo heterotrofni mikroorganizmi, katerim je organska snov vir ogljika, pri tem pa porabljajo kisik kot elektronski akceptor. Biokemijsko reakcijo za stabilizacijo (mineralizacijo) organskih snovi v procesu aktivnega blata lahko poenostavljeno izrazimo kot:



Organska snov se odstranjuje tudi pri anoksičnih pogojih (Enačba 4).

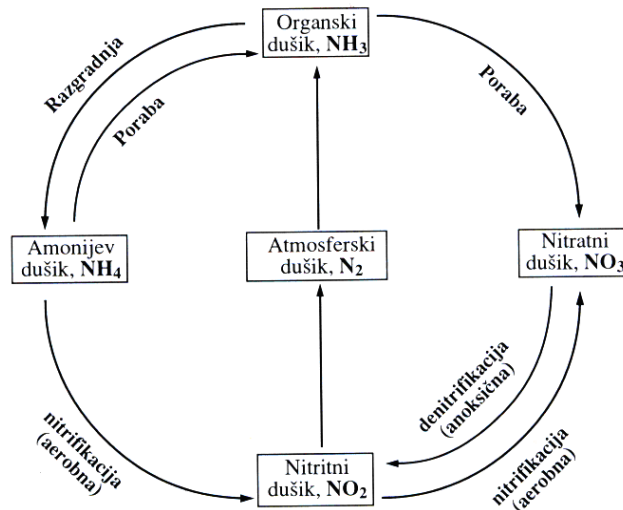
Sinteza nove biomase je reverzibilna, saj jo celice lahko uporabljajo kot hrano, za preskrbo potrebne energije za vzdrževanje življenja. Temu procesu pravimo endogeno dihanje. Kadar prevladuje endogeno dihanje, se preneha rast mikroorganizmov in poveča celična razgradnja.

2.1.4 Biološko odstranjevanje dušikovih spojin

Dušikove spojine v vodi obstajajo v več oksidacijskih stanjih v raztopljeni in v plinasti obliki. Transformacijske reakcije med temi oblikami so prikazane na Sliki 4, in so sledeče:

- fiksacija,
- amonifikacija,
- asimilacija,
- nitrifikacija in
- denitrifikacija.

Atmosferski dušik služi kot plinasti rezervoar dušika, ki se lahko naravno pretvarja v organski dušik ob razelektritvah in s pomočjo dušik-fiksirajočih organizmov, možna pa je tudi fiksacija s Haber-Bosch sinteznim procesom (Wiesmann U. in sod, 2007). Ko se organski dušik metabolizira, nastaja v prvi stopnji amonijev dušik (NH_4-N), sledi pa nitrifikacija. Biološko odstranjevanje dušikovih spojin iz odpadne vode poteka v dveh stopnjah. V prvi stopnji (nitrifikacija) avtotrofni organizmi pri prezračevalnih pogojih NH_4-N oksidirajo v nitritni in nato nitratni dušik, v drugi stopnji (denitrifikacija) pa heterotrofni organizmi le-te pri anoksičnih pogojih reducirajo do plinastega dušika.

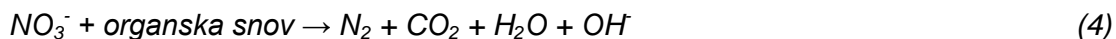


Slika 4: Nitratni cikel v odpadni vodi (Roš M., 2001)

Proces nitrifikacije lahko poenostavljeno izrazimo z enačbama:



Proces denitrifikacije pa lahko prikažemo z enačbo:



Kinetika nitrifikacije je odvisna od različnih pogojev v okolju. Nitrifikacijske bakterije in kemoavtotrofi energijo pridobivajo iz amonijevega iona, vir ogljika pa je ogljikov dioksid. Rast teh bakterij je navadno 10-20 krat nižja od hitrosti rasti heterotrofov (Birk-Levstek M., 2002).

Starost blata. Daljša starost blata povzroči porast nitrifikatorjev in nitrofikatorje tako zaščiti pred propadom, ko se pojavi onesnaženje. Vendar pa previsoka starost blata lahko vodi do težav pri usedanju zaradi onesnaženega zraka ali zaradi endogenega dihanja (Roš M. in Zupančič G.D., 2010).

Temperatura. Shammas K. (1986) navaja, da je optimalna temperatura za nitrifikacijo v popolnoma premešanem biološkem reaktorju med 25 in 33 °C, vendar je zmanjšanje temperature manj problematično kot starost blata (Roš M. in Zupančič G.D., 2010). Vseeno pa sta starost blata in temperatura bistvena faktorja za nitrifikacijo (Komorowska-Kaufman M. in sod., 2006).

Koncentracija amonijevih ionov. Proces nitrifikacije je ničelnega reda in je neodvisen od koncentracije amonijevega dušika, razen v primeru, ko koncentracija pade pod 1 mg/L (Birk-Levstek M., 2002).

Razmerje KPK/N. Proces nitrifikacije je najbolj učinkovit, če je razmerje *KPK/N* nižje od 4, saj višje razmerje povzroča destabilizacijo procesa, še posebno pri temperaturah nižjih od 15 °C (Komorowska-Kaufman M., 2006).

pH. Shammas N.K. (1986) navaja, da je optimalen pH za nitrifikacijo v popolnoma premešanem biološkem reaktorju 8,3, Antoniou P. (1990) pa pravi, da je optimum 7,8.

Biomasa. Shammas K. (1986) je pokazal, da se s koncentracijo biomase v reaktorju spreminja pH in temperaturna odvisnost procesa.

Koncentracija raztopljenega kisika (RK). Orhon D. in Artan N. (1994, cit. po Birk-Levstek M., 2002) ter Roš M. in Zupančič G.D. (2010) navajajo, da je spodnja koncentracija kisika v bazenu s suspendirano biomaso 2 mg/L.

Inhibitorne snovi. Orhon D. in Artan N. (1994, cit. po Birk-Levstek M., 2002) in Henze M. in sod., (1995, cit po Birk-Levstek M., 2002) pravijo, da se ob izpostavljenosti več različnim toksičnim snovem njihov vpliv lahko poveča.

Tudi denitrifikacija je močno odvisna od pogojev v okolju. Birk-Levstek M. (2002) navaja, da je nitrat limitni substrat ter da na denitrifikacijo vplivata tudi koncentracija organskih snovi in koncentracija kisika, medtem ko temperatura, pH in inhibitorne snovi nimajo tako velikega vpliva na ta proces (Bever J. in sod., 1995, cit. po Birk-Levstek M., 2002; Henze M. in sod, 1995, cit. po Birk-Levstek M., 2002; Grady L. in sod. 1999, cit. po Birk-Levstek M., 2002).

2.2 Matematično modeliranje in simulacija bioloških procesov na čistilni napravi

Matematični modeli so pomembno orodje pri delu s čistilnimi napravami, saj jih lahko uporabimo za (Matko D., 1992, Henze M. in sod., 2000):

- dimenzioniranje naprav,
- nadzorovanje naprav,
- napovedovanje odziva naprav,
- izobraževanje, saj pridobivamo nova znanja in izkušnje,
- raziskovanje, saj z modeli testiramo in raziskujemo razvoj hipotez.

S pomočjo matematičnih modelov torej lahko preverimo vse tiste situacije, predpostavke in eksperimente, ki jih v realnosti zaradi različnih vzrokov ni mogoče izvesti (Zec M., 1999). Vendar pa moramo upoštevati, da se rezultati simulacij z realnimi vrednostmi ujemajo le do neke mere, iz sledečih razlogov (Birk-Levstek M., 2002):

- preveč splošen opis kompleksnih mikrobioloških procesov z matematičnimi enačbami in konstantami,
- zaradi napak eksperimentov in
- merilne negotovosti analiznih rezultatov.

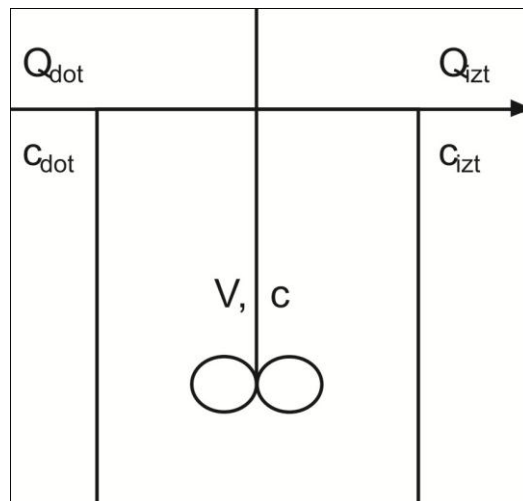
Z današnjimi simulacijskimi programskimi orodji je mogoče interaktivno razviti matematične modele. S primerjavo simulacijskih in eksperimentalnih rezultatov lahko razvijemo modele, ki opisujejo kompleksne dinamične procese na čistilnih napravah. Deterministični matematični modeli opisujejo sisteme z aktivnim blatom na podlagi enačb masne bilance (Gujer W. in Henze M., 1991). Te enačbe opisujejo spremembe v sistemu zaradi transporta in transformacije:

$$\underbrace{\frac{\text{sprememba shranjene mase } v}{\text{časovnem intervalu}}}_{\text{AKUMULACIJA}} = \underbrace{\frac{\text{pritekajoča masa na časovni interval} - \text{odtekajoča masa na časovni interval}}{\text{časovni interval}}}_{\text{TRANSPORT}} + \underbrace{\frac{\text{generirana masa na časovni interval} - \text{porabljena masa na časovni interval}}{\text{časovni interval}}}_{\text{TRANSFORMACIJA}}$$

(5)

Transportni procesi so vsi procesi, ki ohranjajo kemijsko strukturo vseh snovi, medtem ko so procesi transformacije tisti, pri katerih se kemijska struktura snovi spremeni (Gujer W. in Henze M., 1991). Najpomembnejša zakona, s katerima opisujemo spremembe v naravi, sta zakona o ohranitvi mase in energije. Čeprav se oblika mase in energije spreminja v naravnih procesih, pa se skupna masa in energija vedno ohranja. Enako se na čistilnih napravah celotna masa vseh komponent nenehno ohranja, masa pa med transformacijo ne zapusti sistema niti ne vstopa vanj. Vendar pa je proces na čistilni napravi, tako kot večina naravnih sistemov, odprt sistem, zato lahko neto transport in transformacijske procese zapišemo, kot je prikazano v Enačbi 6.

Običajno se modeli nanašajo na popolnoma premešane reaktorje, kot shematsko lahko prikažemo na Sliki 5. V bazen z volumnom V priteka odpadna voda s pretokom Q_{dot} in koncentracijo c_{dot} in se v trenutku popolnoma premeša, zato je koncentracija po celotnem volumnu bazena enaka c . Odpadna voda izteka iz bazena s pretokom Q_{izt} in koncentracijo c_{izt} , ki je enaka c (kot je v tistem trenutku v bazenu).



Slika 5: Shema popolnoma premešanega prezračevalnega bazena

Na podlagi zgoraj omenjenih predvidevanj lahko zapišemo osnovno enačbo masne bilance:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{V} \cdot (Q_{dot} \cdot c_{dot} - Q_{izt} \cdot c_{izt}) \pm r, \quad (6)$$

kjer so:

- Q_{dot} pretok na dotoku v reaktor,
- c_{dot} koncentracija snovi v dotoku,
- Q_{izt} pretok na iztoku iz reaktorja,
- c_{izt} koncentracija v iztoku,
- r stopnja pretvorbe oziroma hitrost pretvorbe posamezne komponente (masa celic/enota volumna*čas),
- V volumen reaktorja (enota volumna).

Ena najpomembnejših relacij pri modelih, ki obravnavajo aktivno blato kot skupek organizmov, ki raste in odmira, je Monodova nelinearna enačba iz leta 1942. Ta opisuje odvisnost rasti biomase od koncentracije za rast omejevalnega hraniva (substrata), pri čemer je specifična stopnja rasti biomase:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S_n}{K_{sn} + S_n}, \quad (7)$$

kjer so:

- μ_{max} maksimalna specifična stopnja rasti biomase,
- S_n koncentracija hranila, ki omejuje stopnjo rasti,
- K_{sn} Monodova konstanta nasičenja hranila (angl. half saturation coefficient), ki je enaka koncentraciji hranila, pri kateri je $\mu = 1/2 \mu_{max}$.

Z naraščanjem koncentracije substrata pride najprej do faze eksponentne rasti biomase, ki pa se pri določeni koncentraciji ustavi. Takrat je dosežena maksimalna stopnja rasti celic (stacionarna faza rasti), kjer se rast celic aktivnega blata ustali.

Če je proces omejen z več hranivi, pa dobimo:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_1}{K_{s1} + S_1} \frac{S_2}{K_{s2} + S_2} \dots \frac{S_n}{K_{sn} + S_n}, \quad (8)$$

kjer z indeksi 1 do n ločimo posamezna omejevalna hraniva. Spremembo koncentracije biomase lahko zapišemo kot:

$$\frac{dc}{dt} = r_x = \mu_{\max} \frac{S_n}{K_{sn} + S_n} c; \quad (9)$$

Monod pa je pokazal, da obstaja stalno razmerje med količino porabljenega substrata in količino proizvedene biomase, ki je določeno z:

$$\frac{dc}{dt} = -Y_x \frac{dS}{dt}, \quad (10)$$

pri čemer je Y_x stehiometrični koeficient prirastka biomase. Tako dobimo še enačbo spremembe koncentracije substrata zaradi porabe biomase:

$$\frac{dS_n}{dt} = -\frac{1}{Y_{xn}} \mu_{\max} \frac{S_n}{K_{sn} + S_n} c. \quad (11)$$

Odmiranje biomase je določeno z relacijo:

$$\frac{dc}{dt} = r_x = -bc, \quad (12)$$

pri čemer je b koeficient stopnje odmiranja mikroorganizmov. Enačbe vseh bioloških procesov v Mantis modelu, ki temeljijo na Monodovi nelinearni enačbi, so predstavljene v Tabeli 2.

Opisane diferencialne enačbe se običajno rešujejo numerično. Na voljo je veliko različnih numeričnih metod, s katerimi jih lahko rešimo.

2.2.1 Uporaba profesionalnega računalniškega paketa *GPS-X*

Programski paket *GPS-X* je modularno, večnamensko orodje za simulacijo komunalnih in industrijskih čistilnih naprav. Za namene te diplomske naloge smo uporabljali najnovejšo verzijo programa *GPS-X*, ver. 6.0. Program uporablja najnovejše simulacijske tehnologije in orodja za postavitev modela, simulacije in interpretacije rezultatov (Hydromantis Inc., 2006). Program ima na voljo šest knjižnic, ki so pravzaprav zbirke modelov, ki uporabljajo določene osnovne komponente ali spremenljivke stanja odpadnih voda (Hydromantis Inc., 2006; Topkaya P., 2008):

- Ogljik – Dušik (*CNLIB*),
- Ogljik – Dušik – Industrijski polutanti (*CNIPLIB*),
- Ogljik – Dušik – Fosfor (*CNPLIB*),
- Ogljik – Dušik – Fosfor – Industrijski polutanti (*CNPIPLIB*),
- Napredno – Ogljik – Dušik (*CN2LIB*),
- Napredno – Ogljik – Dušik – Industrijski polutanti (*CN2IPLIB*).

Program uporablja dve vrsti spremenljivk. Spremenljivke stanja so tiste spremenljivke, ki jih program nenehno integrira, sestavljene spremenljivke pa so tiste, ki jih program izračuna iz spremenljivk stanja (Hydromantis Inc., 2006).

Program GPS-X omogoča uporabo različnih numeričnih metod za reševanje diferencialnih enačb modelov. V našem primeru smo uporabili metodo Runge-Kutta Felberg.

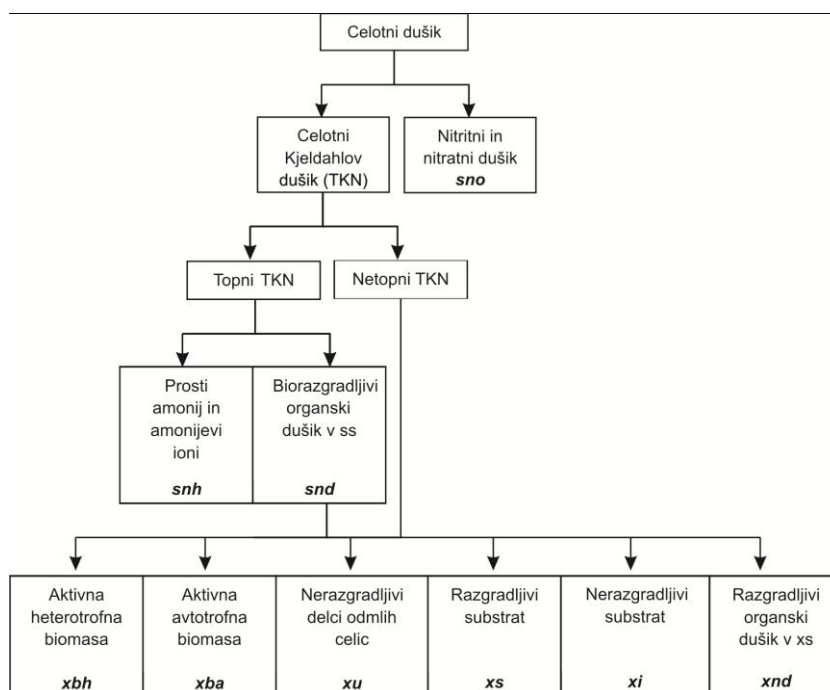
2.2.2 Mantis model prezračevalnega bazena

Mantis model v ČN knjižnici uporablja šestnajst spremenljivk stanja (Hydromantis Inc., 2006), ki so opisane v Tabeli 1.

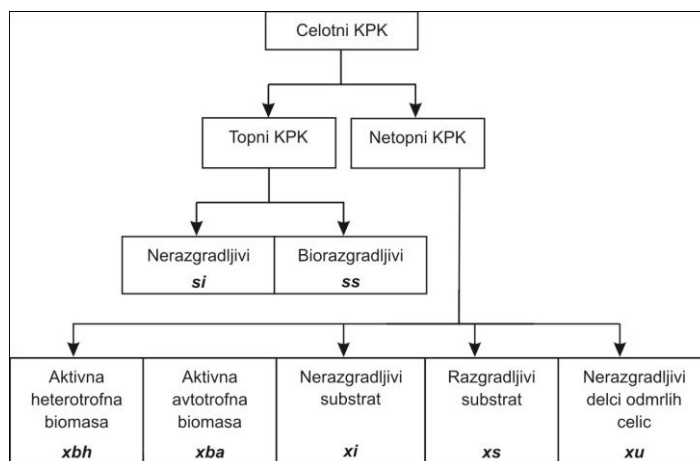
Tabela 1: Spremenljivke stanja Mantis modela v CNLIB knjižnici (Hydromantis Inc., 2006)

Spremenljivke stanja	GPS-X simbol	Enota
Koncentracija raztopljene inertne organske snovi	<i>si</i>	gKPK/m ³
Koncentracija hitro biorazgradljivega substrata	<i>ss</i>	gKPK/m ³
Koncentracija neraztopljene inertne organske snovi	<i>xi</i>	gKPK/m ³
Koncentracija počasi razgradljivega substrata	<i>xs</i>	gKPK/m ³
Koncentracija aktivne heterotrofne biomase	<i>xbh</i>	gKPK/m ³
Koncentracija aktivne avtotrofne biomase	<i>xba</i>	gKPK/m ³
Koncentracija nerazgradljivega dela odmrlih celic	<i>xu</i>	gKPK/m ³
Koncentracija internih produktov celic	<i>xsto</i>	gKPK/m ³
Koncentracija raztopljenega kisika	<i>so</i>	gO ₂ /m ³
Koncentracija nitratnega dušika	<i>sno</i>	gN/m ³
Koncentracija amonijevega dušika	<i>snh</i>	gN/m ³
Koncentracija biorazgradljivega organskega dušika	<i>snd</i>	gN/m ³
Koncentracija neraztopljenega biorazgradljivega organskega dušika	<i>xnd</i>	gN/m ³
Koncentracija didušika	<i>snn</i>	gN/m ³
Alkaliteta	<i>salk</i>	kmolHCO ₃ ⁻ /m ³
Koncentracija inertnih anorganskih suspendiranih snovi	<i>xii</i>	g/m ³

Ogljikove in dušikove spojine v odpadni vodi se ločijo na topne in neraztopljene ter na razgradljive in inertne. Ogljikove in dušikove komponente Mantis modela v knjižnici CNLIB in njihove medsebojne povezave vključno z GPS-X simboli so prikazane na Sliki 6 in 7.



Slika 6: Dušikove komponente Mantis modela v CNLIB knjižnici in njihove povezave z meritvami



Slika 7: Ogljikove komponente Mantis modela v *CNLIB* knjižnici in njihove povezave z meritvami

Modeliranje čiščenja odpadnih vod zahteva poenostavitve in predpostavke. Ker je model Mantis podoben kot model *ASM1*, je večina poenostavitev (Henze M. in sod., 1987) enakih, z nekaj modifikacijami. Te modifikacije so (Hydromantis, Inc., 2006):

1. dodana sta dva dodatna procesa rasti; eden za avtotrofne organizme in drugi za heterotrofne,
2. kinetični parametri so odvisni od temperature,
3. vpeljana je aerobna denitrifikacija.

Poenostavitve, ki veljajo za oba modela, so naslednje (Hydromantis, Inc., 2006):

4. topna, hitro razgradljiva organska snov je substrat samo za heterotrofno biomaso,
5. neraztopljena, počasi razgradljiva organska snov se iz sistema odstranjuje akumulirana v kosme v obliki suspenzije. Kosem je nadalje podvržen hidrolizi oziroma reakcijam do hitro razgradljivega materiala,
6. razkroj biomase predvidimo kot preobrazbo aktivne biomase v inertne suspendirane produkte in v počasi razgradljivi substrat, ki ponovno vstopa v proces hidrolize, rasti,
7. model bioloških procesov temelji na predpostavki, da so vsi bazeni naprave idealno premešani, tako da so koncentracije posameznih spremenljivk enake povsod v bazenu,
8. pH je konstanten ter blizu nevtralnosti,
9. narava organskih snovi v odpadni vodi je konstantna in lahko niha v koncentraciji,
10. prisotnih je dovolj hraniv za normalno rast mikroorganizmov,
11. korekcijska faktorja η_g in η_h za denitrifikacijo sta konstantna ter se ne spreminjata s časom,
12. heterotrofna biomasa je homogena in njena sestava se ne spreminja s časom,
13. predvideno je takojšnje ujetje suspendiranega organskega materiala v biomaso,
14. hidroliza organsko vezanega ogljika in dušika poteka istočasno in z enako hitrostjo,
15. vrsta elektronskega akceptorja ne vpliva na hitrost odmiranja in s tem na izgubo aktivne biomase.

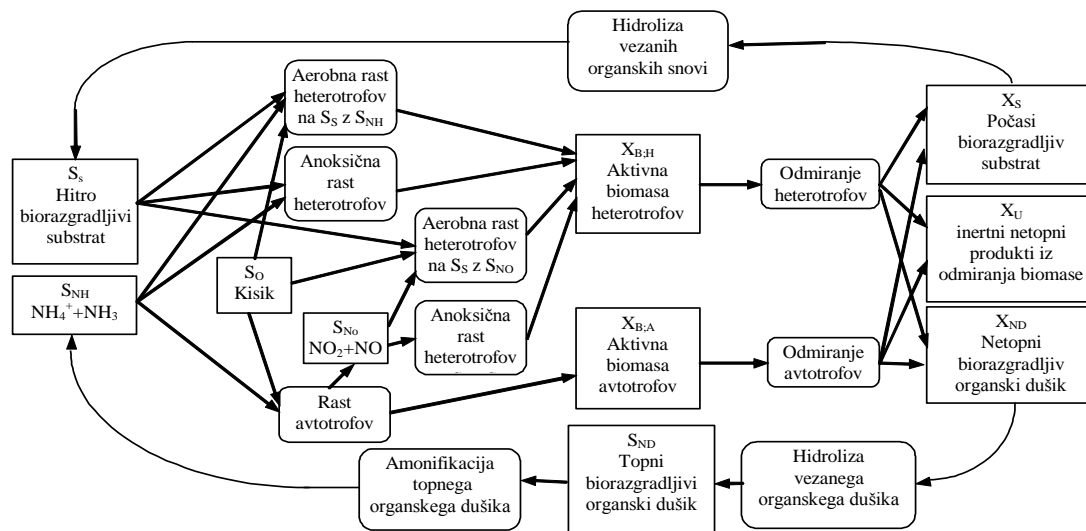
Podroben matematičen zapis Mantis modela prikazuje Tabela 2, kjer so povezave med procesi in komponentami predstavljene v obliki t.i. Petersonove matrike. Matematični izraz za stopnjo spremembe koncentracije posamezne komponente dobimo tako, da pomnožimo enačbe procesov s faktorji v pripadajočem stolpcu. Za primer si oglejmo koncentracijo aktivnih avtotrofnih organizmov $X_{B,A}$, kjer se stopnja spremembe koncentracije $r_{x_{b,a}}$ spreminja po naslednji enačbi:

$$r_{X_{B,A}} = \frac{dX_{B,A}}{dt} = 1 * \left[\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NA} + S_{NH}} \right) X_{B,A} \right] - 1 * [b_A X_{B,A}] \quad (13)$$

Tabela 2: Matrika Mantis matematičnega modela (Hydromantis Inc., 2006)

Komponenta →	i	1 S ₁	2 S _S	3 X ₁	4 X _S	5 X _{B,H}	6 X _{B,A}	7 X _P	8 X _{ND}	9 S _O	10 S _{NO}	11 S _{NN}	12 S _{NH}	13 S _{ND}	14 S _{AL,K}	Kinetika procesa, φ _j [ML ⁻³ T ⁻¹]
j	Proces ↓															
1	Aerobna rast heterotrofnih organizmov pri nitrifikaciji		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$			<i>-ibhn</i>		$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) X_{B,H}$
2	Anoksična rast heterotrofnih organizmov pri nitrifikaciji		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$	$\frac{1-Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$		<i>-ibhn</i>		$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2,86 \cdot Y_H}$ $-\frac{1_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$
3	Aerobna rast heterotrofnih organizmov pri denitrifikaciji		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$	<i>-ibhn</i>				$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) X_{B,H}$
4	Anoksična rast heterotrofnih organizmov pri denitrifikaciji		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$ $-\frac{1-Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$	$\frac{1-Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$				$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2,86 \cdot Y_H}$ $-\frac{1_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$
5	Aerobna rast avtotrofnih organizmov						1			$-\frac{4,57-Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$		<i>-iban</i> $-\frac{1}{Y_A}$		$-\frac{i_{XB}}{14} \cdot \frac{1}{7 \cdot Y_A}$	$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NA}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A}$
6	Razkroj heterotrofnih organizmov				1- <i>fuh</i>	-1		<i>fuh</i>	<i>ibhn</i> <i>- fuh * iuhn</i>							$b_H \cdot X_{B,H}$
7	Razkroj avtotrofnih organizmov				1- <i>fua</i>			<i>fua</i>	<i>iban</i> <i>- fua * iuan</i>							$b_A \cdot X_{B,A}$
8	Amonifikacija raztopljenega organskega dušika												1	-1	$\frac{1}{14}$	$k_a \cdot S_{ND} \cdot X_{B,H}$
9	Hidroliza ujetega organskega substrata		1		-1											$k_h \cdot \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) + \eta_h \cdot \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \cdot \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \right] \cdot X_{B,H}$
10	Hidroliza vezanega organskega dušika								-1					1		$r6 \cdot (X_{ND}/X_S)$
Stehiometrični		Raztopljena inertna organska snov [mg(KPK)L ⁻³]	Hidro biorazgradljiva organska snov [mg(KPK)L ⁻³]	Suspendirana inertna organska snov [mg(KPK)L ⁻³]	Počasi biorazgradljiva organska snov [mg(KPK)L ⁻³]	Aktivna heterotrofna biomasa [mg(KPK)L ⁻³]	Aktivna avtotrofna biomasa [mg(KPK)L ⁻³]	Suspendirani produkti, ki nastanejo v procesu razkroja bimoase [mg(KPK)L ⁻³]	Kisik (negativen KPK) [mg(-KPK)L ⁻³]	Suspendiran biorazgradljivi organski dušik [mg(N)L ⁻³]	Nitrat in nitrit [mg(N)L ⁻³]	Dišušik [mg(N)L ⁻³]	Amonijev ion NH ₄ ⁺ [mg(N)L ⁻³]	Raztopljeni biorazgradljivi organski dušik [mg(N)L ⁻³]	Totalna alkaliteta [kmolHCO ₃ ⁻ /m ³]	

Povezave med komponentami in procesi v Mantis modelu so prikazane na Sliki 8. Slika prikazuje tudi principe delovanja modela. Model predpostavlja, da se topne organske in dušikove spojine pretvarjajo v netopne snovi v obliki biomase avtotrofnih in heterotrofnih organizmov. Organizmi nato odmirajo, njihova biomasa pa se s hidrolizo in amonifikacijo pretvarja nazaj v topne komponente, preostali del pa ostaja inerten.



Slika 8: Bločna shema komponent in procesov v Mantis modelu (Bavdaž G., 1998)

Za pravilno delovanje modela je potrebno določiti vrednosti parametrov modela. Mantis model vsebuje 8 stehiometričnih, in 21 kinetičnih parametrov (Tabeli 3 in 4).

Tabela 3: Stehiometrični parametri Mantis modela

Parameter	Pomen	Enota	Vrednost
Heterotrofi:			
Y_H	Izplen heterotrofov	gKPK/gKPK	0,666
f_{UH}	Heterotrofi, ki se pretvorijo v neraztopljene delce	gKPK/gKPK	0,08
i_{BH}	MasaN/Masa KPK pri heterotrofih	gN/gKPK	0,068
i_{UH}	MasaN/Masa KPK v produktih heterotrofov	gN/gKPK	0,068
Avtotrofi:			
Y_A	Izplen avtotrofov	gKPK/gN	0,24
f_{UA}	Avtotrofi, ki se pretvorijo v neraztopljene delce	gKPK/gKPK	0,08
i_{BA}	MasaN/Masa KPK pri avtotrofih	gN/gKPK	0,068
i_{UA}	MasaN/Masa KPK v produktih avtotrofov	gN/gKPK	0,068

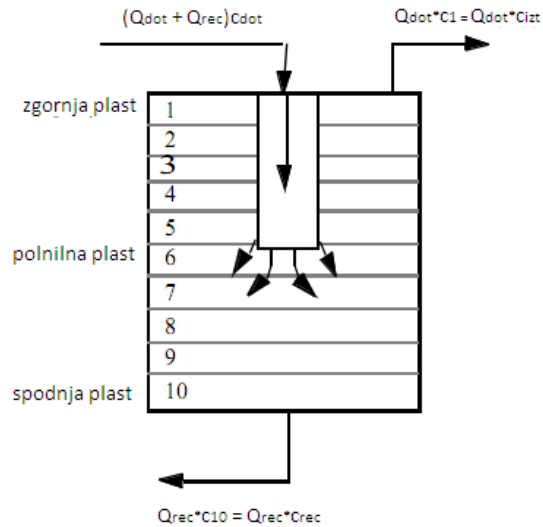
Tabela 4: Kinetični parametri Mantis modela

Parameter	Pomen	Enota	Vrednost
Heterotrofi:			
μ_H	Maksimalna specifična hitrost rasti heterotrofne biomase	1/dan	3,2
K_{SH}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja organskega substrata za heterotrofno biomaso	gKPK/m ³	5,0
b_H	Specifična hitrost izgube heterotrofne biomase	1/dan	0,62
η_h	Delež heterotrofnih bakterij	-	0,6
η_g	Korekcijski faktor za hidrolizo v anoksičnih razmerah	-	0,5
K_H	Maksimalna specifična hitrost hidrolize	1/dan	3,0

K_X	Koeficient polovične hitrosti nasičenja za hidrolizo neraztopljenega biorazgradljivega substrata	gKPK/gKPK	0,1
k_a	Koeficient reakcijske hitrosti za amonifikacijo	m ³ /gKPK dan ⁻¹	0,08
Avtotrofi:			
μ_A	Maksimalna specifična hitrost rasti avtotrofne biomase	1/dan	0,9
K_{NA}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja amonijevega dušika (kot substrat) za avtotrofno biomaso	gN/m ³	0,7
b_A	Specifična hitrost izgube avtotrofne biomase	1/dan	0,17
Preklopne funkcije:			
$K_{O,H}$	Koeficient polovične hitrosti nasičenja kisika za heterotrofno biomaso	gO ₂ /m ³	0,2
$K_{O,A}$	Koeficient polovične hitrosti nasičenja kisika za avtotrofno biomaso	gO ₂ /m ³	0,25
K_{NH}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja amonijevega dušika (kot hranivo) za heterotrofno biomaso	gN/m ³	0,05
K_{NO}	Koeficient polovične hitrosti nasičenja nitratnega dušika za heterotrofno biomaso	gN/m ³	0,1
Temperaturni faktorji:			
$t\mu_H$	Temperaturni koeficient za μ_H	-	1,072
tb_H	Temperaturni koeficient za b_H	-	1,029
$t\mu_A$	Temperaturni koeficient za μ_A	-	1,072
tb_A	Temperaturni koeficient za b_A	-	1,029
tk_a	Temperaturni koeficient za k_a	-	1,072
tK_H	Temperaturni koeficient za K_H	-	1,072

2.2.3 Simple 1d model usedalnika

V modelu Simple1d je edina numerično integrirana spremenljivka koncentracija suspendiranih snovi, uporablja pa se, kadar za usedalnik lahko rečemo, da je biološka aktivnost zanemarljiva, koncentracije topnih snovi pa se ne spreminjajo (Hydromantis, Inc., 2006). V našem modelu Simple 1d je usedalnik razdeljen na deset enako velikih in debelih slojev, pri čemer obstaja le vertikalni tok, pritekajoče neraztopljene snovi pa se v trenutku enakomerno razporedijo po celotni površini plasti (Topkaya P., 2008). Model temelji na masni bilanci v vsaki posamezni plasti. Tok odpadne vode v usedalniku je usmerjen navzgor za vse plasti, višje od polnilne plasti, in navzdol za vse plasti pod njo. V vseh plasteh pa se neraztopljene snovi premikajo vertikalno navzdol zaradi gravitacijske sile. Shema usedalnika je prikazana na Sliki 9.



Slika 9: Shema usedalnika (Topkaya P., 2008)

Koncentracijo neraztopljenih snovi v vsaki plasti opisuje diferencialna enačba, ki upošteva dotoke in odtoke (gibanje odplake in blata) ter usedanje blata (Zec M., 1999):

$$h \frac{dc_j}{dt} = \frac{Q_i}{A_i} (c_{j-1} - c_j) + \min(v_{j-1}c_{j-1}, v_j c_j) - \min(v_j c_j, v_{j+1}c_{j+1}), \quad (14)$$

$$j=1, \dots, n,$$

pri tem je:

- h višina plasti,
- c_j koncentracija neraztopljenih snovi v j -ti plasti,
- Q_i volumski pretok,
- A_i površina plasti.

Modifikacije te enačbe so potrebne pri zgornji, spodnji in polnilni plasti. Hitrost usedanja neraztopljenih snovi zaradi težnostne sile se modelira z dvojno eksponencialno funkcijo (Takács in sod., 1991):

$$v_{sj} = v_{\max} e^{-rhin \cdot c_j^o} - v_{\max} e^{-rfloc \cdot c_j^o}, \quad (15)$$

pri tem je:

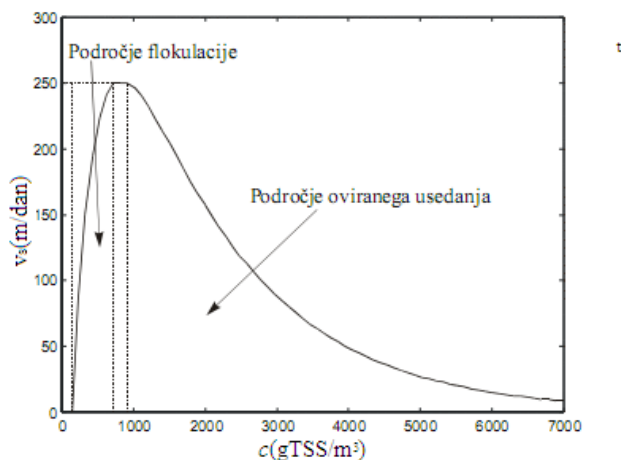
- v_{sj} hitrost usedanja v j -ti plasti (m/dan),
- v_{\max} maksimalna Vesilindova hitrost usedanja (m/dan),
- $rhin$ parameter usedanja v področju oviranega usedanja ($m^3/gTSS$),
- $rfloc$ parameter usedanja v področju flokulacije ($m^3/gTSS$),
- $c_j^o = c_j - c_{min}$ koncentracija neraztopljenih snovi, pri čemer je c_{min} minimalna dosegljiva koncentracija neraztopljenih snovi in jo c_{min} izračunamo po sledeči enačbi:

$$c_{min} = fns \cdot c_{in}, \quad (16)$$

kjer je fns neusedljiva frakcija.

Hitrost usedanja je odvisna od koncentracije, kot lahko vidimo na Sliki 10. Dokler delci ne dosežejo določene minimalne koncentracije za usedanje, je hitrost usedanja enaka nič; nato jo dominira flokulacija. Ko delci dosežejo maksimalno velikost, pa se flokulacija

ustavi in hitrost usedanja ni več odvisna od koncentracije delcev, vendar le do neke koncentracije, od tam naprej pa se delci ovirano usedajo, zato hitrost usedanja pada.



Slika 10: Primer funkcije hitrosti usedanja neraztopljene snovi (Vrečko D., 2003)

V Tabeli 5 so predstavljeni parametri usedanja Simple 1d modela s prednastavljenimi vrednostmi v programskem paketu *GPS-X*, katerih v našem modelu nismo spreminjali.

Tabela 5: Parametri usedanja Simple 1d modela

Parameter	Pomen	Enota	Vrednost
<i>vbnd</i>	Maksimalna hitrost usedanja	m/dan	274,0
<i>vmax</i>	Maksimalna Vesilindova hitrost usedanja	m/dan	410,0
<i>rhin</i>	Parameter usedanja v področju oviranega usedanja	m ³ /g TSS	0,0004
<i>rfloc</i>	Parameter usedanja v področju flokulacije	m ³ /g TSS	0,0025
<i>fns</i>	Neusedljiva frakcija	-	0,001
<i>xminmax</i>	Maksimalna koncentracija neusedljivih snovi	mg TSS/L	20,0
<i>vumi</i>	Maksimalna hitrost toka navzgor v mirnem področju	m/dan	100,0
<i>vuma</i>	Maksimalna hitrost toka navzgor v celotnem področju usedalnika	m/dan	300,0

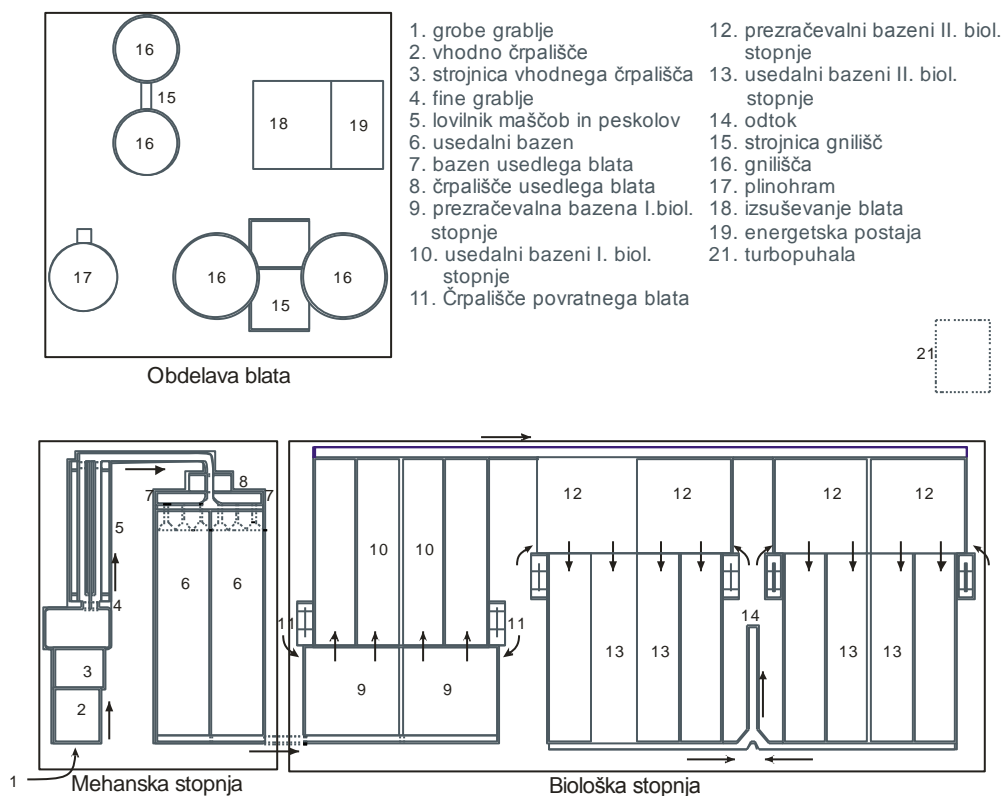
3 PRAKTIČNI DEL

3.1 Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik

Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik (CČND) (Slika 11 in 12) že od leta 1980 čisti tako komunalne kot tudi industrijske odpadne vode. Dimenzionirana je na obremenitev 200.000 PE, čeprav je dejanska obremenitev nižja. Leta 2008 je ta znašala 130.000 PE (Birk-Levstek M., 2009). Naprava je konvencionalnega tipa in je projektirana za odstranjevanje ogljikovih spojin iz odpadne vode ter delno nitrifikacijo. Je klasična mehanska – dvostopenjska biološka naprava z anaerobno predelavo odpadnega blata in uporabo bioplina na plinskih motorjih.



Slika 11: Zračni posnetek CČND



Slika 12: Shema CČND

Na CČND priteče komunalna voda, ki se na dotoku zmeša z industrijskimi odpadnimi vodami in se nato mehansko očisti na grobih in finih grabljah, maščobniku in peskolovu in primarnem usedalniku. Pri tem se iz odpadne vode odstranijo lebdeči delci, maščobe in neraztopljeni delci večji od 1mm (spletna stran CČND: <http://www.ccn-domzale.si>). Iz mehanske stopnje nato voda priteče na biološki del ČN. Ta je sestavljen iz dveh stopenj. Prva, visoko obremenjena stopnja je sestavljena iz dveh vzporednih prezračevalnih reaktorjev in dveh vzporednih sekundarnih usedalnikov. Druga, manj obremenjena stopnja pa je sestavljena iz štirih vzporednih prezračevalnih bazenov in štirih vzporednih usedalnikov. Očiščena voda odteče v Kamniško Bistrico, odpadno blato se obdela v anaerobnih reaktorjih, kjer pregnije, nato pa se centrifugira in odloži na deponijo. Nastali bioplin se uporabi za proizvodnjo električne energije in za ogrevanje.

Zaradi mešanja industrijskih in komunalnih voda se sestava odpadne vode, ki priteče na čistilno napravo, lahko zelo spreminja. Kljub temu pa dosega čiščenje ogljika okoli 90 % po KPK, 95 % po BPK₅ in okoli 98 % po skupnih neraztopljenih snoveh (TSS), odstranjevanje hraniv pa je nekoliko slabše. Skupnega dušika se odstrani le okoli 50 %.

Na CČND načrtujejo spremembo procesa, ki bo izboljšala odstranjevanje tako dušikovih kot fosforjevih spojin iz odpadne vode, do takrat pa je potrebno trenutne procese prilagoditi, da bodo v čim večji meri ustrezali zakonsko določenim mejam za onesnaževala na iztoku iz CČND. Mejne vrednosti so zapisane v Tabeli 6. Maksimalne vrednosti za amonijev dušik (NH₄-N) in skupni dušik (TN) veljajo pri temperaturi odpadne vode nad 12 °C. Zahteva se, da so 24 urna povprečja koncentracij na iztoku vsaj 80 % časa pod zakonsko določenimi maksimalnimi vrednostmi.

Tabela 6: Zakonske meje za onesnaževala pri izpustu odpadne vode v vodotoke za čistilne naprave z obremenitvijo več kot 100.000 PE (Ur. l. RS št. 45/2007)

Parameter	Izražen kot	Enota	Zakonsko določena najvišja vrednost
KPK	O ₂	mg/L	100
BPK ₅	O ₂	mg/L	20
TSS	-	mg/L	35
NH ₄ -N	N	mg/L	5
TN*	N	mg/L	10

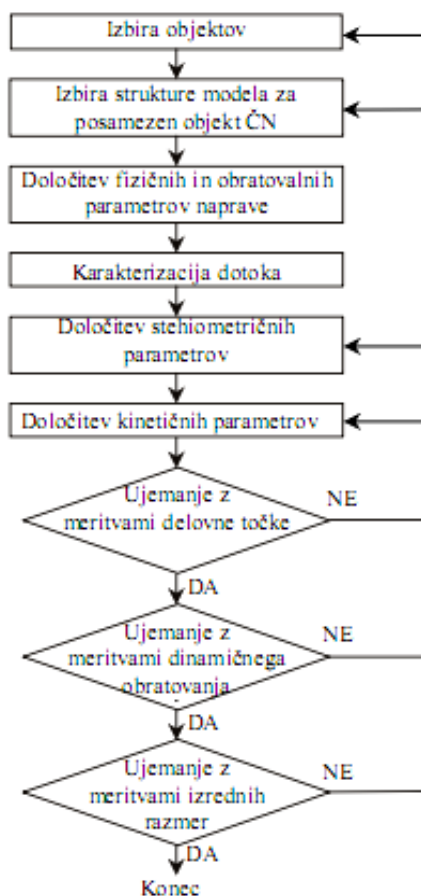
* TN je vsota dušika po Kjeldalhu (N-organski + NH₄-N), nitratnega dušika (NO₃-N) in nitritnega dušika (NO₂-N)

3.2 Biološki del Centralne čistilne naprave Domžale-Kamnik

Na Sliki 12 je prikazan tudi biološki del CCND. Iz mehanske stopnje se voda črpa v prvo biološko stopnjo, kjer se tok razdeli na dva dela, sestavljena iz enega popolnoma premešanega prezračevalnega (oksidacijskega) bazena s suspendirano biomaso in enega sekundarnega usedalnika. Odpadna voda se na koncu obeh linij prve biološke stopnje združi ter v drugi biološki stopnji razdeli na štiri dele, ki so prav tako sestavljeni iz enega popolnoma premešanega prezračevalnega (oksidacijskega) bazena s suspendirano biomaso in enega sekundarnega usedalnika. Vsi prezračevalni bazeni imajo volumen 1000 m³, globoki so 4 m in se prezračujejo s pomočjo talnih fino perforiranih blazin na globini 4 m. Površina usedalnikov je 400 m², globina 3 m, voda iz prezračevalnih bazenov pa vanje priteka na višini 1,6 m od dna usedalnika. Povprečen pretok povratnega blata v prvi biološki stopnji je okoli 15000 m³/dan, v drugi pa 7869 m³/dan (Zec M. in sod., 1997).

3.3 Razvoj in kalibracija modela v programu GPS-X

Eksperimentalni del diplomskega dela predstavlja postavitve matematičnega modela v programu GPS-X, pri čemer smo za prezračevalne bazene uporabili Mantis model, ki je nadgrajen model ASM1, za usedalnike pa smo uporabili Simple 1d model, ki predpostavlja, da v usedalniku ne poteka nobena biološka reakcija. Postavitve in kalibracija modela je potekala po stopnjah, ki jih opisuje Zec M. (1999), in jih prikazuje Slika 13, vendar smo izpustili preverjanje ujemanja z meritvami delovne točke in ujemanja z meritvami izrednih razmer, ki jih nismo imeli na voljo. Obnašanje simulacijskega modela CCND smo validirali na meritvah obratovanja naprave za 192 dni, od 1. 9. 2009 do 21. 3. 2010.



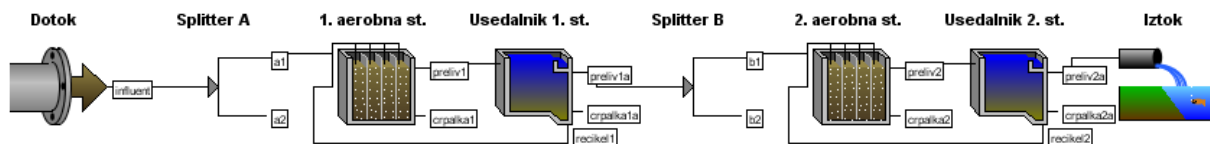
Slika 13: Postopek razvoja simulacijskega modela ČN (Zec M., 1999)

3.3.1 Izbira objektov

Prva stopnja priprave modela je izbira objektov, ki so na napravi, ki jo modeliramo (Zec M., 1999). Včasih pa je smiselno tudi združevanje več objektov ČN v en objekt ali pa simulacija enega objekta ČN z več objekti simulacijskega modela (Zec M., 1999).

Model obstoječe CČND smo poenostavili ter postavili le eno linijo prezračevalnega bazena in usedalnika za vsako stopnjo. Na realni čistilni napravi na vsak prezračevalni bazen pride par usedalnikov, vendar smo v modelu to poenostavili in par usedalnikov modelirali kot enega. S tem smo zmanjšali kompleksnost modela. Za prezračevalne bazene smo izbrali model Plug-Flow Tank z enim prekatom, za usedalnik pa model Rectangular Secondary Clarifier.

Simulacijski model je torej sestavljen iz bloka neprekinjenega dotoka odpadne vode (Dotok), razdelilnika pretoka A (Splitter A), prezračevalnega bazena prve biološke stopnje (1. aerobna st.), usedalnika prve biološke stopnje (Usedalnik 1.st.), razdelilnika pretoka B (Splitter B), prezračevalnega bazena druge biološke stopnje (2. aerobna st.), usedalnika druge biološke stopnje (Usedalnik 2. st.) in bloka iztoka iz čistilne naprave (Iztok). Shemo modela v programskem paketu GPS-X prikazuje Slika 14. Razdelilnik pretoka A je nastavljen na vrednost 0.5, kar pomeni, da polovica toka teče po liniji a1, druga polovica pa po liniji a2. Enako velja za razdelilnik pretoka B. Linija a2 teče v vzporeden bazen prve biološke stopnje, ki ga nismo modelirali, podobno linija b2 teče v vzporeden bazen druge biološke stopnje, ki ga prav tako nismo modelirali zaradi poenostavitve modela. Tok na iztoku modela ja enak četrtini pretoka na dotoku.



Slika 14: Shema simulacijskega modela biološke stopnje na obstoječi CČND v programskem paketu GPS-X

3.3.2 Izbira strukture modela za posamezen objekt ČN

Za modeliranje CČND smo uporabili knjižnico *CNLIB*, ki je osnovna knjižnica za modeliranje oksidacije ogljika, nitrifikacije in denitrifikacije. Model dotoka smo nastavili na Cod fractions model. Izbira modela dotoka je odvisna od razpoložljivosti podatkov na čistilni napravi. Cod fractions model omogoča vnos meritev *KPK*, *TKN*, NH_4-N na dotoku. Za model prezračevalnega reaktorja smo izbrali Mantis model (Hydromantis, 2006), saj za razliko od *ASM1* modela (Henze M. in sod., 1987) omogoča temperaturno odvisnost parametrov, ki je na primeru CČND zelo pomembna, saj temperature med letom zelo variirajo. Za model usedalnika smo izbrali Simple 1d model, ki predvideva, da v usedalniku ne potekajo biološke reakcije. Izbrali smo *CN* knjižnico (*CNLIB*), ki vključuje modele za odstranjevanje ogljikovih in dušikovih komponent, ne pa tudi fosforjevih.

3.3.3 Določitev fizičnih in obratovalnih parametrov naprave

Ko so bili objekti postavljeni, je bilo potrebno določiti površine in višine bazenov, višine in mesta dotokov in odtokov v bazene, smeri dotokov, količine odvzema ter mesta dotoka povratnih pretokov (notranji povratni pretok in povratni pretok blata), količine in način odvzema odvečnega blata.

Na CČND so fizikalne lastnosti bazenov in usedalnikov v prvi in drugi biološki stopnji enake in so sledeče (Zec M. in sod., 1997):

- Površina posameznih bazenov: 250 m²
- Višina posameznih bazenov: 4 m
- Površina posameznih usedalnikov: 400 m²
- Višina posameznih usedalnikov: 3 m
- Višina od tal na dotoku v usedalnik: 1,6 m

Povprečen pretok recikla se razlikuje med posameznimi biološkimi stopnjami (Zec M. in sod., 1997):

- Povprečen pretok recikla v prvi biološki stopnji: 15000 m³/dan
- Povprečen pretok recikla v drugi biološki stopnji: 7869 m³/dan

Za namen diplomske naloge smo izračunali povprečne vrednosti za pretoke odvečnega blata (Q_{odv}) v prvi in drugi biološki stopnji za 200 dni pred simulacijo (od 23.2.2009 do 10.9.2009):

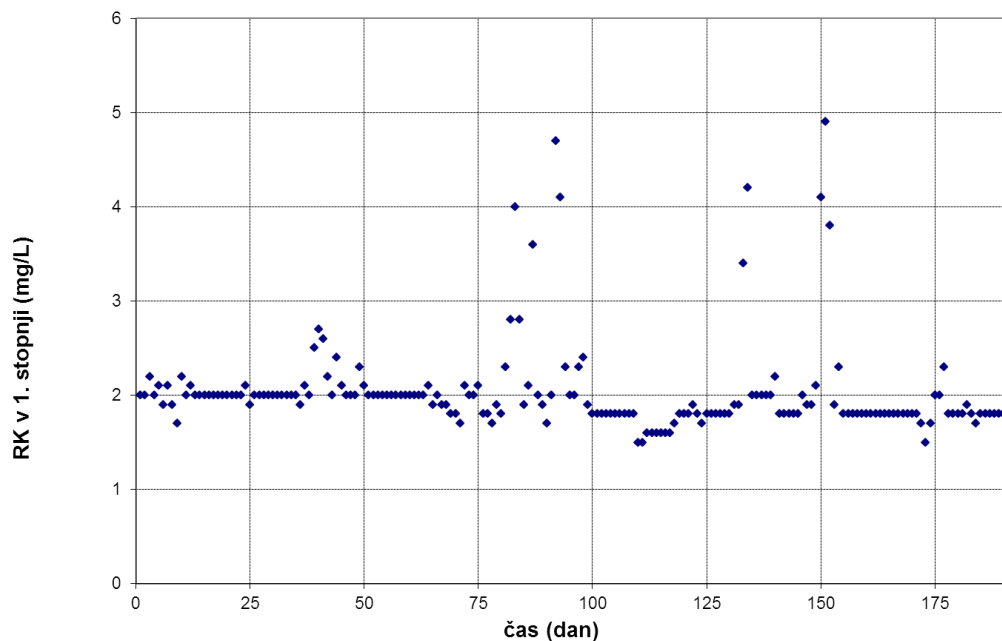
- Količine odvzetega odvečnega blata v prvi biološki stopnji: 55,3 m³/dan
- Količine odvzetega odvečnega blata v drugi biološki stopnji: 60,1 m³/dan

Tako kot za pretoke odvečnega blata smo izračunali povprečni koncentraciji raztopljenega kisika (*RK*) v prvi in drugi stopnji za 200 dni pred simulacijo (od 23.2.2009 do 10.9.2009):

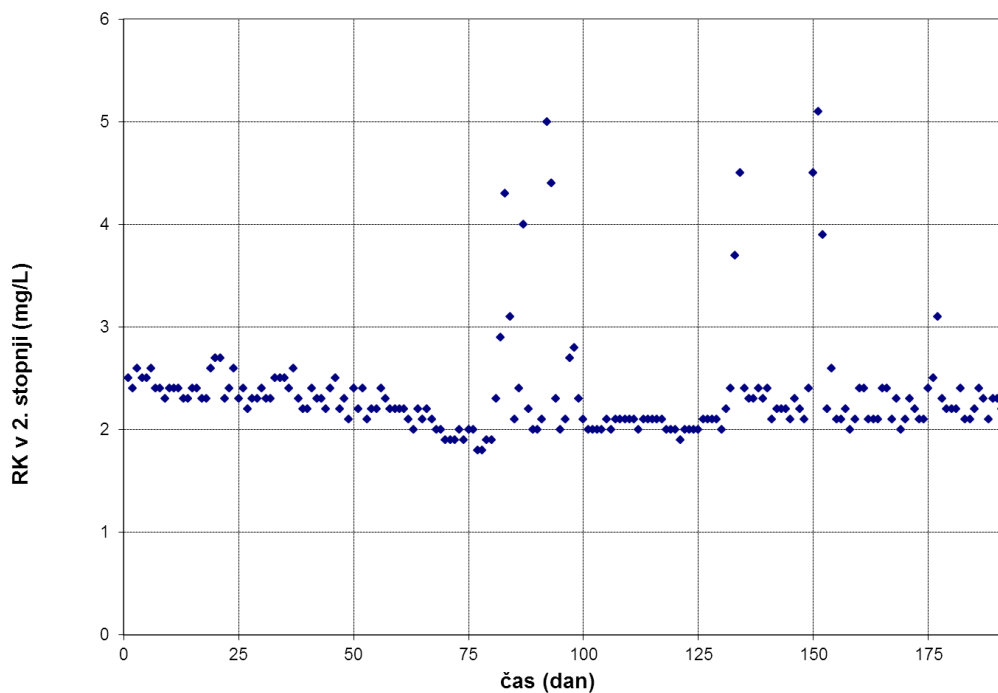
- Povprečna koncentracija *RK* v prvi biološki stopnji: 2,2 mg/L
- Povprečna koncentracija *RK* v drugi biološki stopnji: 2,2 mg/L

Izračunana povprečja koncentracij *RK* in Q_{odv} smo uporabili za določitev začetnega stanja modela, za validacijo modela pa smo uporabili dinamične podatke za *RK* in Q_{dot} za 192 dni

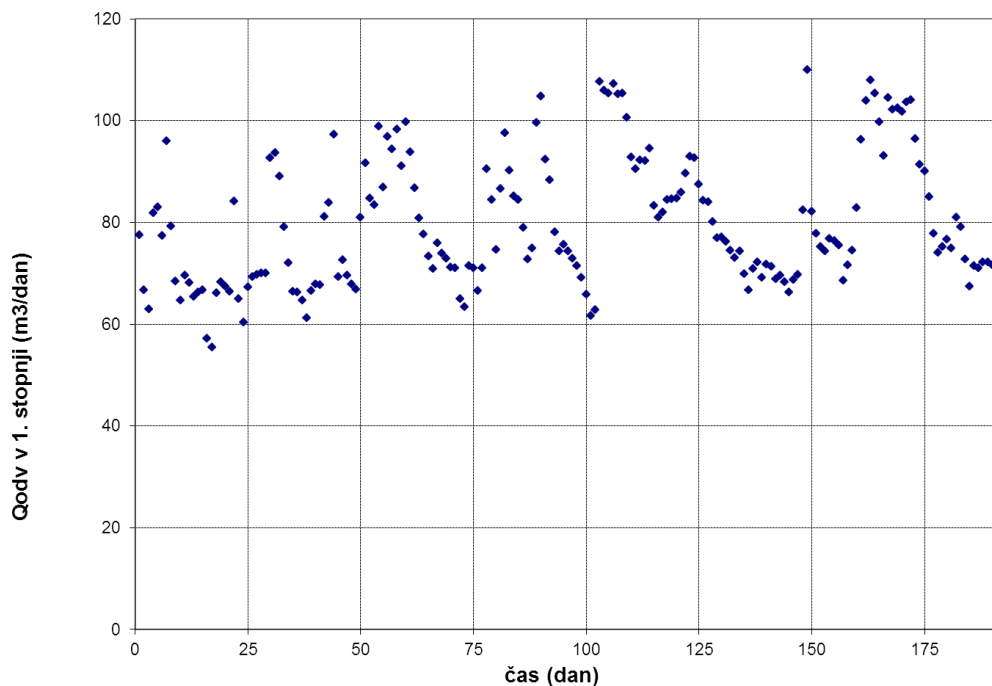
(od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010), ki so prikazani na Slikah 15 do 18. Meritve na CČND za 192 dni, od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010, so podane v Prilogi A.



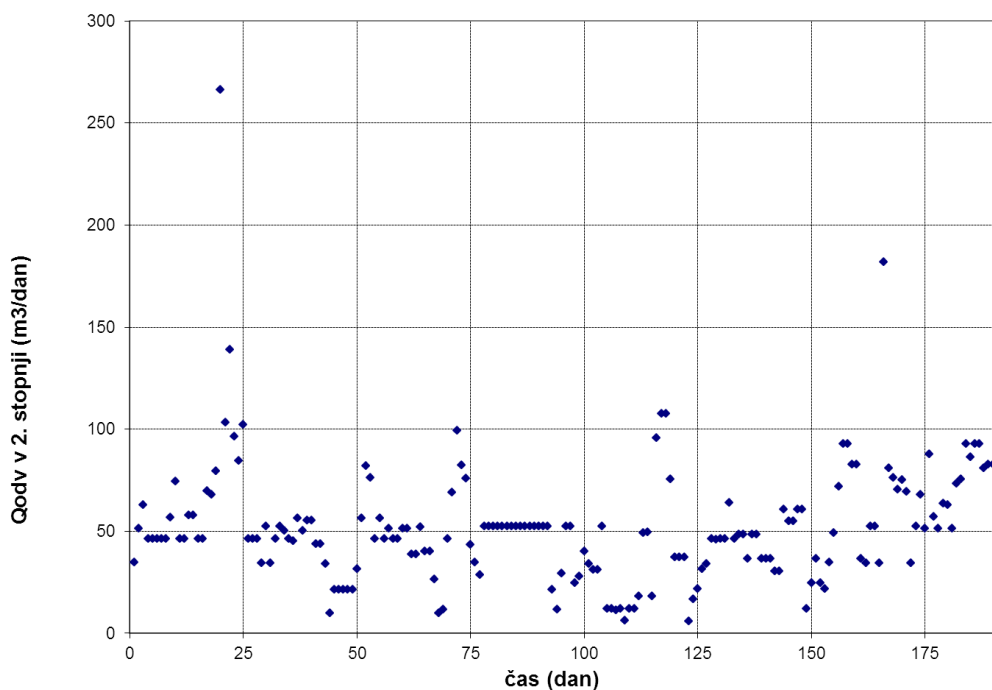
Slika 15: Povprečna dnevna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu prve biološke stopnje CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 16: Povprečna dnevna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu druge biološke stopnje CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 17: Povprečni dnevni pretok odvečnega blata iz usedalnika prve biološke stopnje CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 18: Povprečni dnevni pretok odvečnega blata iz usedalnika druge biološke stopnje CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)

3.3.4 Karakterizacija dotoka

Ko so bili objekti postavljeni in definirani, je bilo potrebno oceniti koncentracije posameznih komponent dotoka (pritoka iz mehanske stopnje na biološko stopnjo) oziroma razmerja med komponentami, od katerih je odvisna hitrost in tip razgradnje odplake (Zec M., 1999). Za karakterizacijo dotoka smo uporabili podatke s CCND za 192 dni, in sicer od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010:

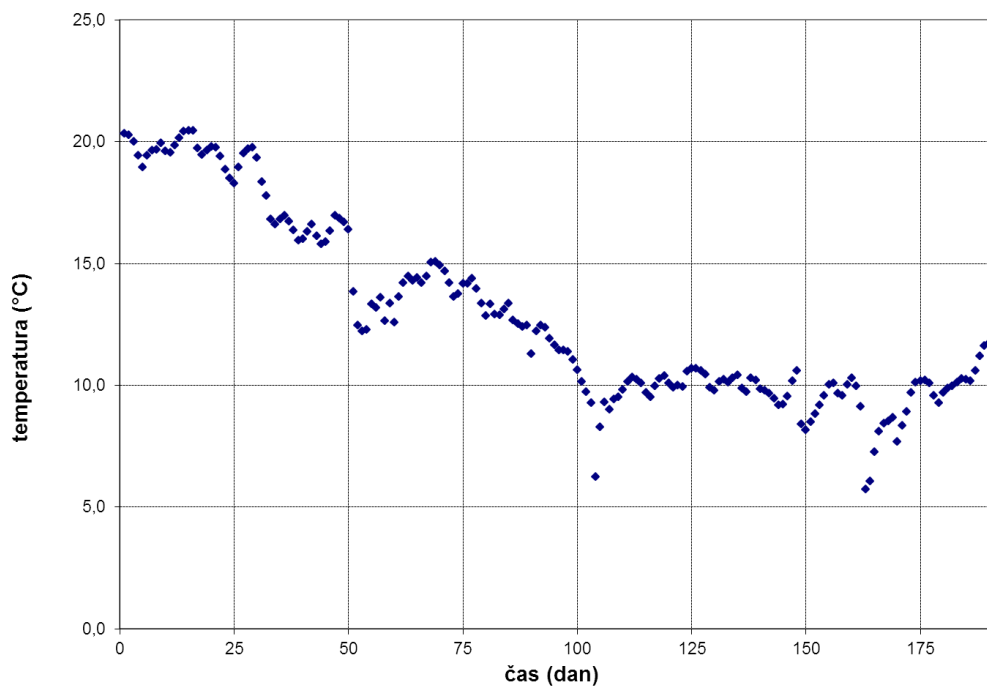
- Temperaturo T
- Pretok odvečnega blata po mehanski stopnji Q_{dot}
- TSS
- TOC
- NH_4-N

Pri nekaj komponentah za nekatere dneve podatki niso bili na voljo, zato smo vrednosti za te dni nastavili na povprečno vrednost koncentracije v dneh, za katere so podatki obstajali. Prirejeni podatki so prikazani tabelarično v Prilogi A ter grafično na Slikah 19 do 23. Začetno stanje modela dobimo z zagonom modela v ustaljeno stanje (Steady state), kar pomeni, da program iz prednastavljenih začetnih vrednosti izračuna, kakšne bi bile koncentracije komponent v ustaljenem stanju pri konstantnih pogojih. Ustaljeno stanje bi sicer pomenilo, da so pogoji konstantni, vendar vemo, da taki pogoji ne obstajajo. Olsson G. in Newell B. (1999) tako pravita, da je to le neko povprečno stanje. Za ta namen smo v program vstavili povprečne podatke za 200 dni pred simulacijo (Tabela 7), to je od 23.2.2009 do 10.9.2009.

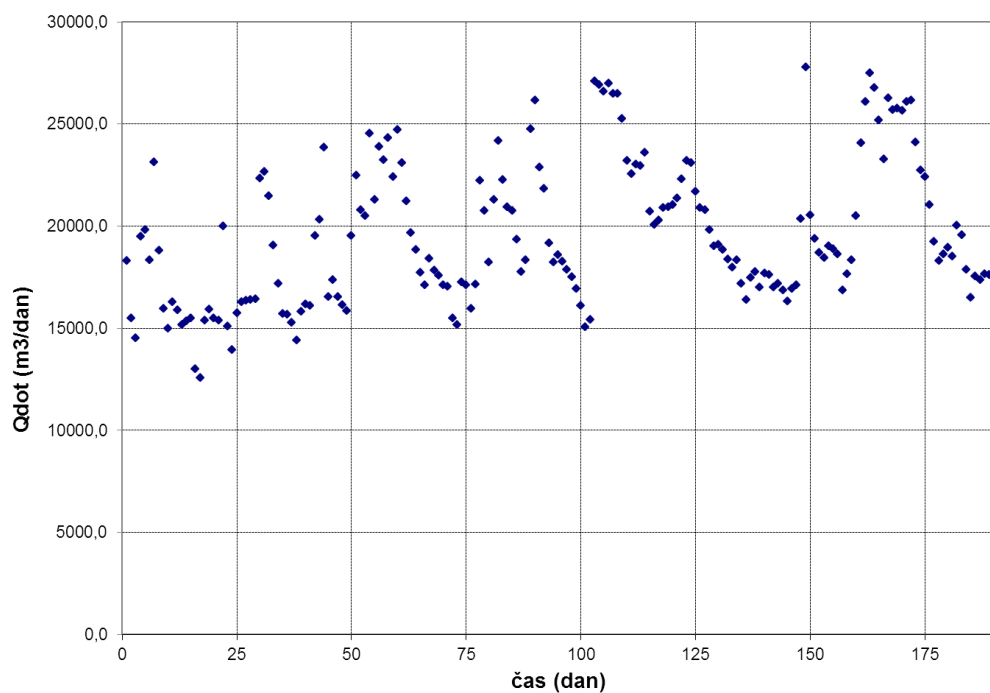
Tabela 7: Povprečne vrednosti parametrov na dotoku na biološko stopnjo za 200 dni pred simulacijo (od 23.2.2009 do 10.9.2009)

Parameter	Koncentracija	Enota
Q_{dot}	19509	m^3/dan
Skupni KPK	413	gO_2/m^3
Skupni TKN	44	gN/m^3
Prosti in ioniziran NH_4-N	30	gN/m^3
RK	0	gO_2/m^3
Nitratni in nitritni dušik $NO-N$	0	gN/m^3
Didušik	0	gN/m^3

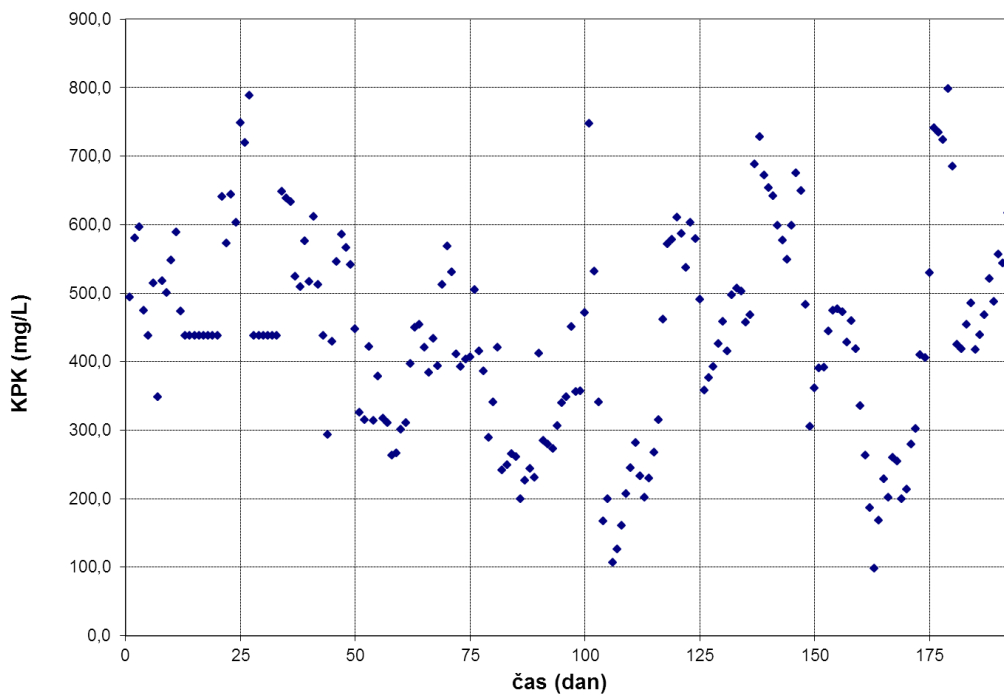
Na voljo ni bilo vseh podatkov, ki jih za simulacije zahteva program, zato smo TOC preračunali v KPK tako, da smo vrednosti TOC množili s faktorjem $KPK/TOC = 3$ (Birk-Levstek M., 2009). Na voljo pa tudi ni bilo podatkov o TKN , le o TN . Ker smo predpostavili, da je vrednost $NO-N$ na dotoku na biološko stopnjo enaka nič, smo vrednosti TKN enačili z vrednostmi TN .



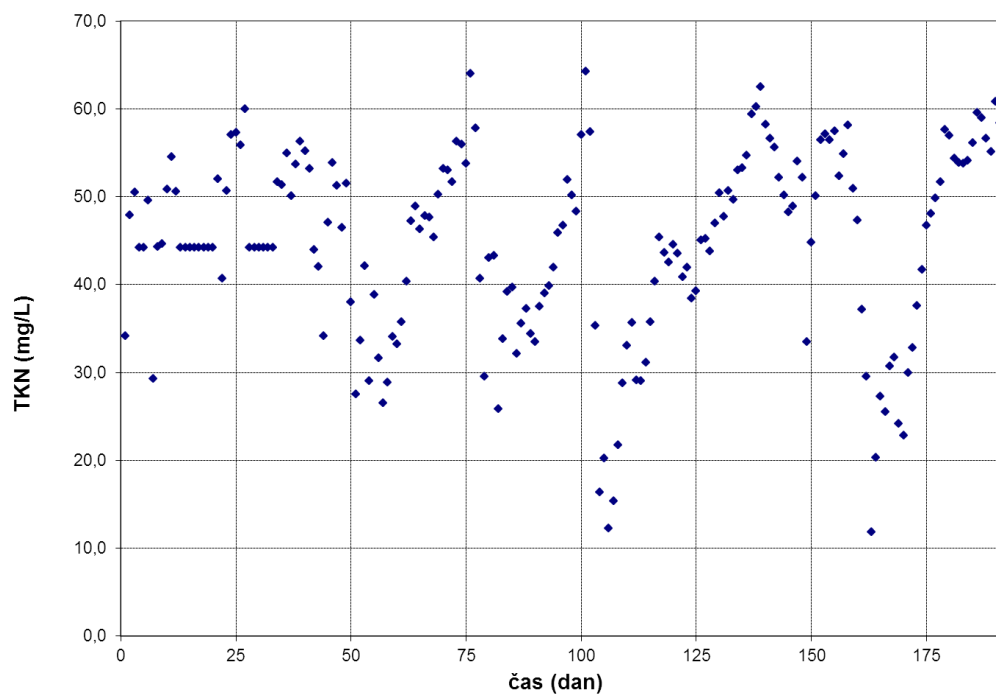
Slika 19: Povprečna dnevna temperatura odpadne vode na dotoku na biološko stopnjo CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



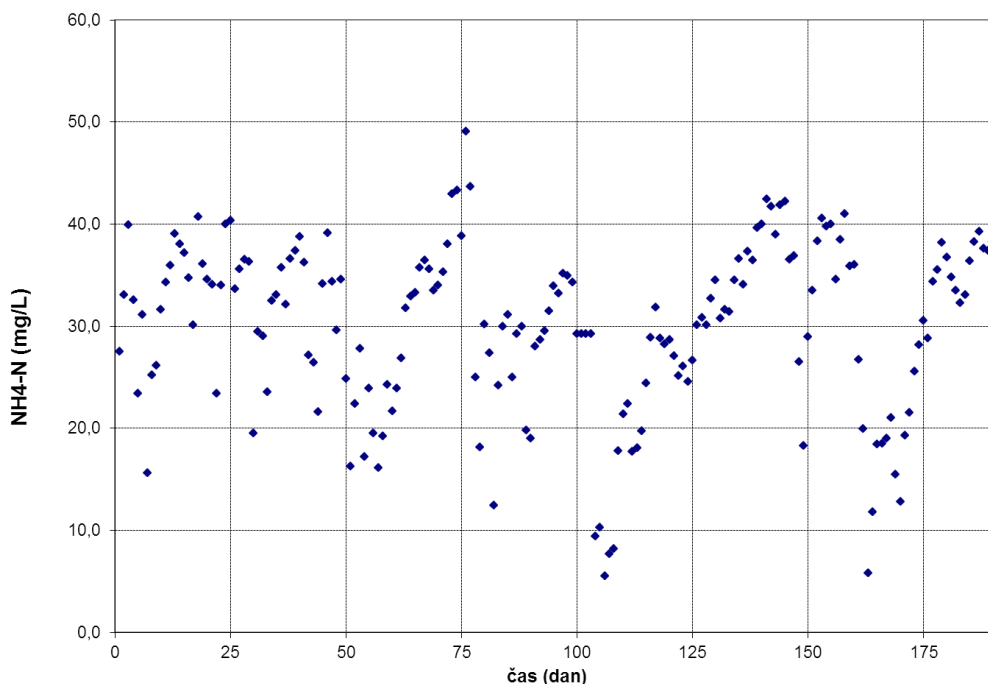
Slika 20: Povprečen dnevni pretok odpadne vode na dotoku na biološko stopnjo CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 21: Povprečna dnevna koncentracija *KPK* na dotoku na biološko stopnjo *CČND* (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 22: Povprečna dnevna koncentracija *TKN* na dotoku na biološko stopnjo *CČND* (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 23: Povprečna dnevna koncentracija NH_4-N na dotoku na biološko stopnjo CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)

V biološko stopnjo priteče povprečno $19566 \text{ m}^3/\text{dan}$ odpadne vode, vrednost pa se giblje med 12586 in $27786 \text{ m}^3/\text{dan}$. Koncentracija *KPK* na dotoku na biološko stopnjo se giblje med 99 in 798 mg/L , njena povprečna vrednost znaša 438 mg/L , v napravo pa priteče v povprečju 8570 kg KPK/dan . Vrednost *TKN* na dotoku na biološko stopnjo niha od 12 do 64 mg/L in v povprečju znaša 45 mg/L , v napravo priteče povprečno 880 kg TKN/dan . Koncentracija NH_4-N se giblje med 6 in 49 mg/L , njena povprečna vrednost je 30 mg/L , v povprečju pa na napravo priteče $587 \text{ kg } NH_4-N/\text{dan}$. Temperatura odpadne vode se spreminja od 6 do $21 \text{ }^\circ\text{C}$, njena povprečna vrednost znaša $13 \text{ }^\circ\text{C}$.

Stehiometrični parametri opisujejo masna razmerja med komponentami v procesu (Henze M. in sod., 1987) in so neodvisna od tipov organizmov in dinamike, ki so ji podvrženi, zato so relativno konstantni (Zec M., 1999). Program *GPS-X* omogoča uporabniku, da v model vstavi podatke o nekaterih koncentracijah snovi na dotoku (*KPK*, *TKN*, NH_4-N , *RK*, *NO-N* in alkaliteta) ter podatke stehiometričnih parametrov. Na osnovi teh vrednosti program izračuna ostale koncentracije in frakcije.

Stehiometrične parametre na dotoku (Tabela 9) smo izračunali iz povprečnih letnih podatkov o dotoku odpadne vode na biološko stopnjo na CČND za leto 2009 (Pirnat in sod., 2010), manjkajoči podatki (*OSS*, *TTKM*) pa so iz leta 1997 (Zec M. in sod., 1997). Podatki so predstavljeni v Tabeli 8.

Tabela 8: Povprečni letni podatki za izračun stehiometričnih parametrov.

Oznaka	Enota	Koncentracija po mehanski stopnji
Pretok na dotoku Q_{dot}	m ³ /dan	20008
TSS	mg/l	144,2
OSS	mg/l	120 ¹
TKN	mg/l	39,3
TTKN	mg/l	34,9 ¹
NH ₄ -N	mg/l	32,3
NO ₃ -N	mg/l	0,12
NO ₂ -N	mg/l	0,13
TKPK	mg/l	157,4
KPK	mg/l	392,4
BPK ₅	mg/l	212,4
BPK _n	mg/l	268,7
TBPK ₅	mg/l	99,9
TBPK _n	mg/l	121,9

Za izračun stehiometričnih parametrov na dotoku smo uporabili sledeče enačbe (Vrečko D. in Hvala N., 2000):

$$fbod = \frac{BPK_5}{BPK_{20}}, \quad (17)$$

$$ivt = \frac{OSS}{TSS}, \quad (18)$$

$$icv = \frac{KPK - TKPK}{OSS}, \quad (19)$$

$$frscod = \frac{TKPK}{KPK}, \quad (20)$$

$$frsi = \frac{TKPK - S_s}{TKPK}, \quad (21)$$

$$frsnh = \frac{NH_4N}{TTKN}, \quad (22)$$

$$S_s = \frac{TBPK_5}{fbpk}, \quad (23)$$

$$S_I = TKPK - S_s. \quad (24)$$

¹ Podatki za OSS in TTKN iz leta 1997

Tabela 9: Vrednosti stehiometričnih parametrov na dotoku na biološko stopnjo CČND

Parameter	Oznaka v GPS-X	Izračunana vrednost	Enota
netopni <i>KPK/OSS</i>	icv	2,0	g <i>KPK</i> /g <i>OSS</i>
<i>BPK₅/BPK₂₀</i>	fbod	0,79	/
<i>OSS/TSS</i>	ivt	0,8	g <i>OSS</i> /g <i>TSS</i>
frakcija raztopljenega <i>KPK</i>	frscod	0,4	/
inertna frakcija topnega <i>KPK</i>	frsi	0,25	/
substratna frakcija partikularnega <i>KPK</i>	frxs	0,61	/
delež nerazgradljivih delcev odmrlih celic v partikularnem <i>KPK</i>	frxu	0 ²	/
frakcija heterotrofne biomase v partikularni <i>KPK</i>	frxbh	0 ²	/
frakcija avtotrofne biomase v partikularni <i>KPK</i>	frxba	0 ²	/
frakcija amonijevega dušika v topnem <i>TKN</i>	frsnh	0,93	/
vsebnost dušika v aktivni biomasi	ibhn	0,068 ²	gN/g <i>KPK</i>
vsebnost dušika v endogeni/inertni masi	iuhn	0,068 ²	gN/g <i>KPK</i>

Iz spremenljivk stanja se izračunajo sestavljene spremenljivke Mantis modela, to so *TBPK₂₀*, netopni *BPK₂₀*, *BPK₂₀*, *TBPK₅*, netopni *BPK₅*, *BPK₅*, *TKPK*, netopni *KPK*, *KPK*, *OSS*, neraztopljene inertne snovi in *TSS*. Izračuni so predstavljeni v Tabeli 10. Za izračun sta potrebna dva faktorja, in sicer razmerje *BPK₅/BPK₂₀* (*fbod*) in netopni *KPK/OSS* (*icv*).

Za primer izračuna sestavljenih spremenljivk v Tabeli 10 si oglejmo koncentracijo *TBPK₅*:

$$TBPK_5 = ss * fbod \quad (23)$$

Tabela 10: Sestavljene spremenljivke Mantis modela v *CNLIB* knjižnici (Hydromantis, 2006).

	<i>TBPK₂₀</i>	netopni <i>BPK₂₀</i>	<i>BPK₂₀</i>	<i>TBPK₅</i>	netopni <i>BPK₅</i>	<i>BPK₅</i>	<i>TKPK</i>	netopni <i>KPK</i>	<i>KPK</i>	<i>OSS</i>	neraztopljene inertne snovi	<i>TSS</i>
<i>si</i>							1		1			
<i>ss</i>	1		1	<i>fbod</i>		<i>fbod</i>	1		1			
<i>xi</i>								1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>xs</i>		1	1		<i>fbod</i>	<i>fbod</i>		1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>xbh</i>		1	1		<i>fbod</i>	<i>fbod</i>		1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>xba</i>		1	1		<i>fbod</i>	<i>fbod</i>		1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>Xu</i>								1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>Xsto</i>		1	1		<i>fbod</i>	<i>fbod</i>		1	1	<i>lcv⁻¹</i>		<i>lcv⁻¹</i>
<i>xii</i>											1	1

3.3.5 Določitev stehiometričnih parametrov

Večina vrednosti stehiometričnih parametrov bioloških procesov se med napravami malo spreminja, zato smo za stehiometrične parametre v svojem modelu izbrali kar privzete vrednosti (Tabela 3).

3.3.6 Določitev kinetičnih parametrov

Kinetični parametri so odvisni od hitrosti reakcij v procesu čiščenja odpadnih voda in od vrste organizmov, zato se razlikujejo med napravami, prav tako pa se spreminjajo s časom (Zec

² Predpostavimo, da so vrednosti na CČND enake prednastavljenim v programskem paketu GPS-X.

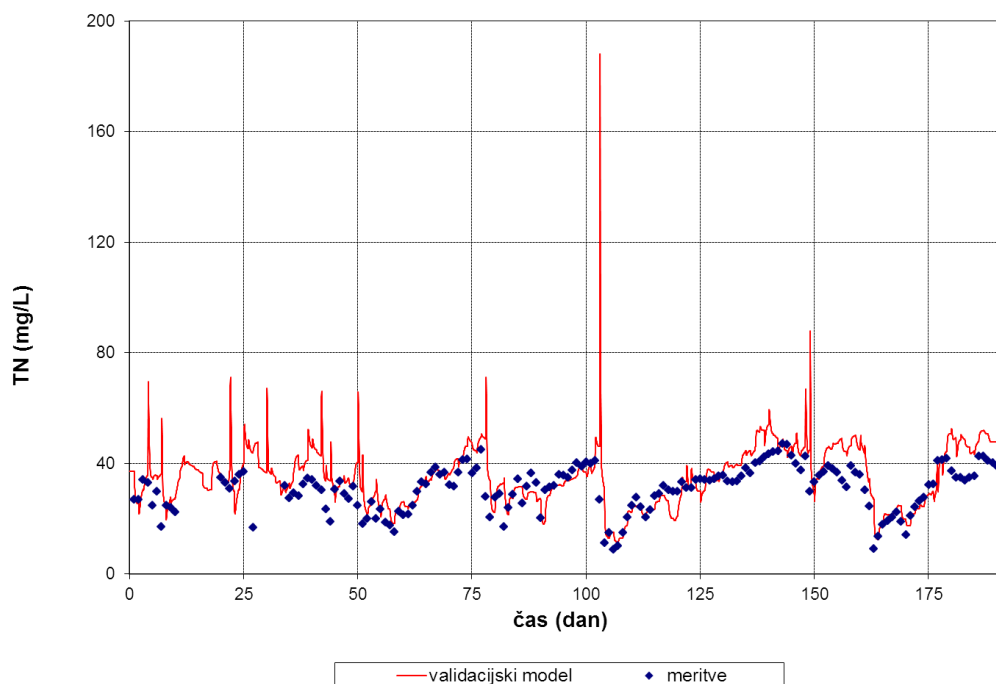
M., 1999). Program *GPS-X* vsebuje tudi prednastavljene vrednosti kinetičnih parametrov. Ker podatkov o kinetičnih parametrih nismo imeli, smo te pustili na prednastavljenih vrednostih (Tabela 4).

3.3.7 Ujemanje z meritvami dinamičnega obratovanja

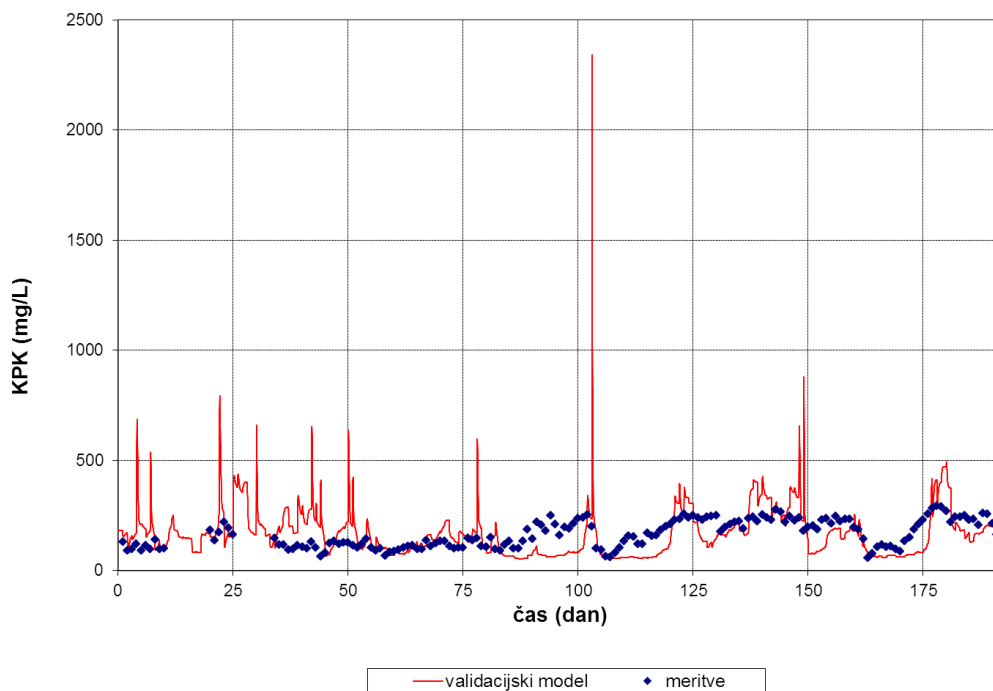
Z validacijo matematičnega modela preverimo, ali naš model uspešno napoveduje koncentracije procesnih spremenljivk pri dinamičnih pogojih. Za dinamično simulacijo modela *CČND* smo uporabili podatke med 11.9.2009 in 21.3.2010 (192 dni), saj takrat na *CČND* še ni bilo obtoka odpadne vode iz mehanske stopnje na drugo biološko stopnjo.

Rezultate simulacije smo primerjali s povprečnimi dnevnimi vrednostmi na iztoku iz prve biološke stopnje ter na iztoku iz druge biološke stopnje oziroma na iztoku iz *CČND* (Slike 24 do 27):

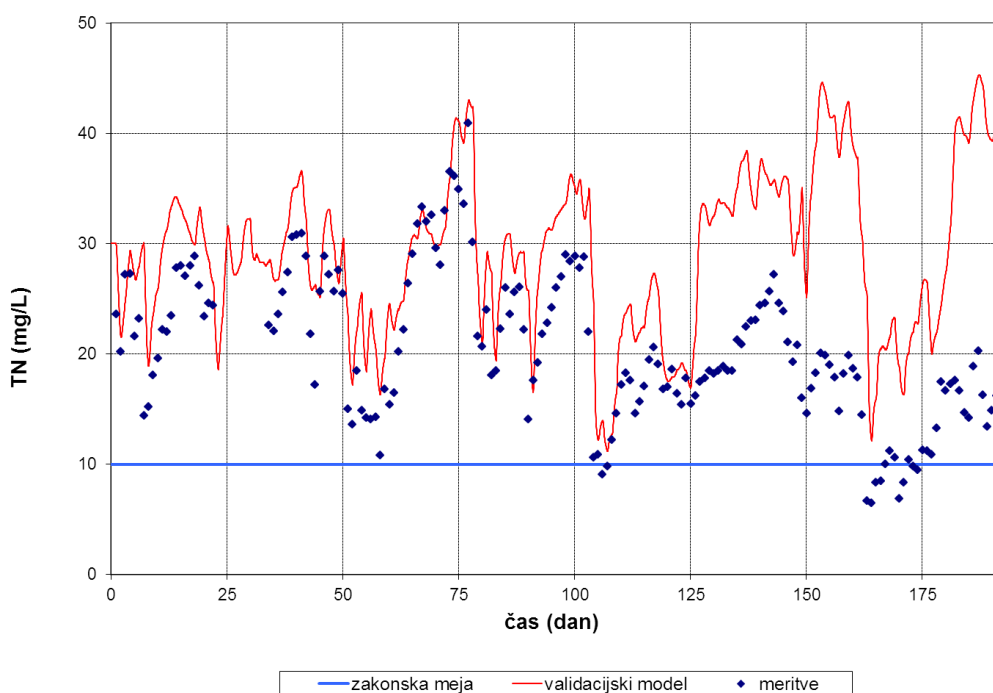
- *KPK* (po prvi in drugi stopnji)
- *TN* (po prvi in drugi stopnji)
- *TSS* (po drugi stopnji)
- *NH₄-N* (po drugi stopnji)



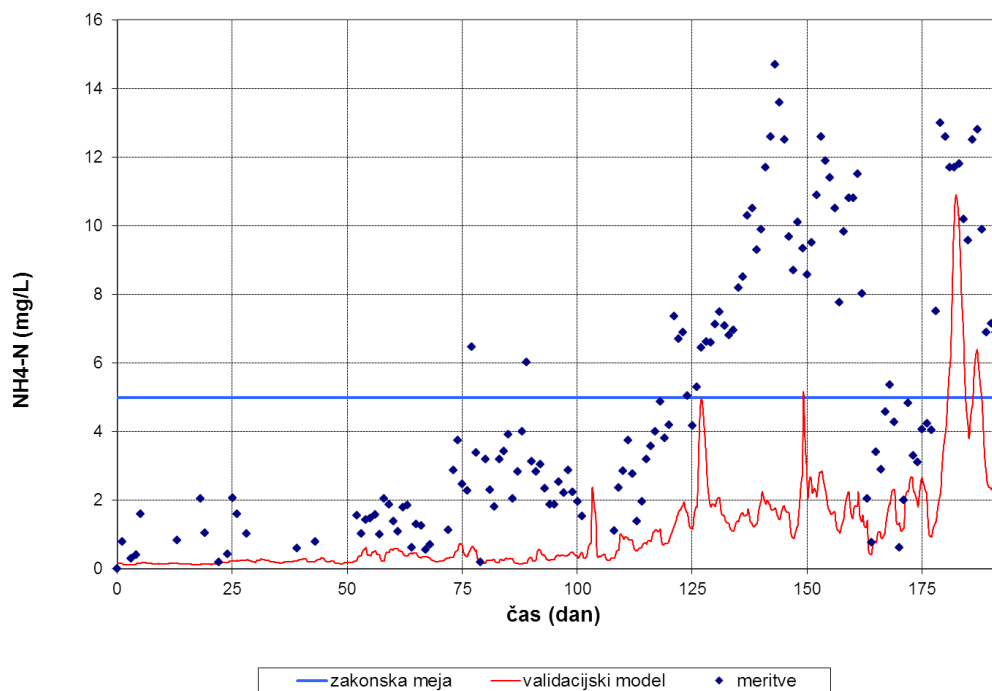
Slika 24: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije *TN* po prvi biološki stopnji (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



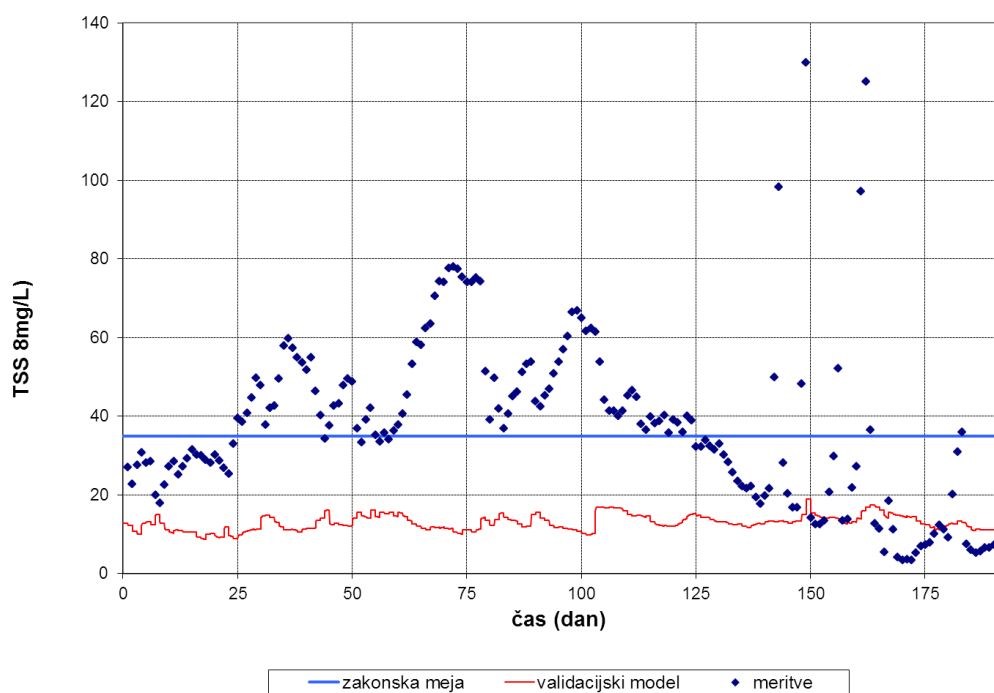
Slika 25: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije *KPK* po prvi biološki stopnji (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



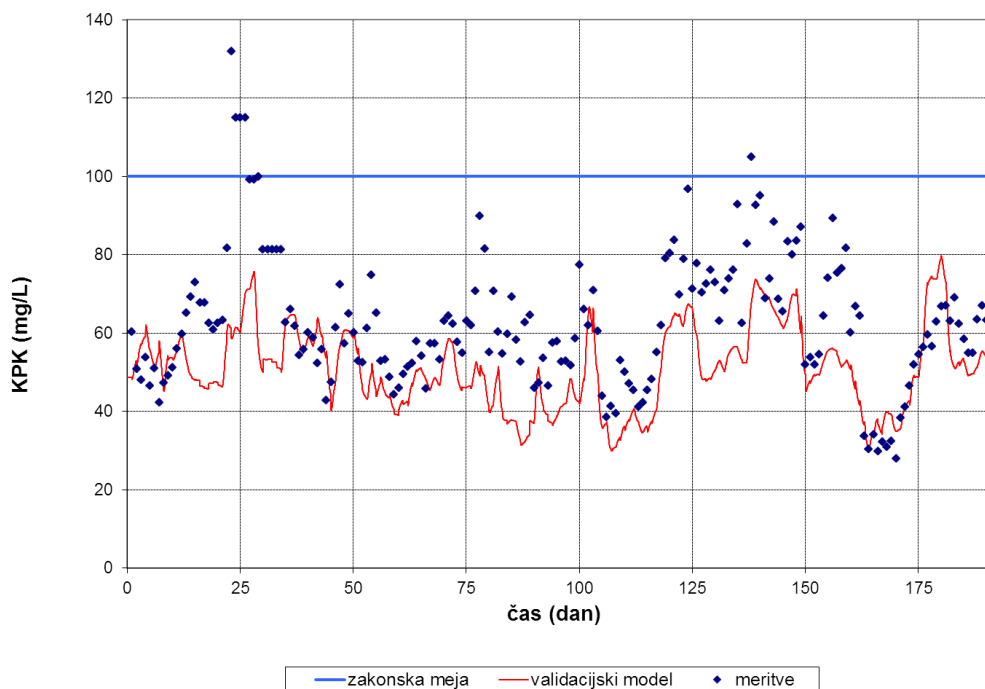
Slika 26: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije *TN* na iztoku iz CČND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 27: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije NH_4-N na iztoku iz CCND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 28: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije TSS na iztoku iz CCND (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 29: Ujemanje simulacijskih rezultatov s povprečnimi dnevnimi meritvami koncentracije *KPK* na iztoku iz *CCND* (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)

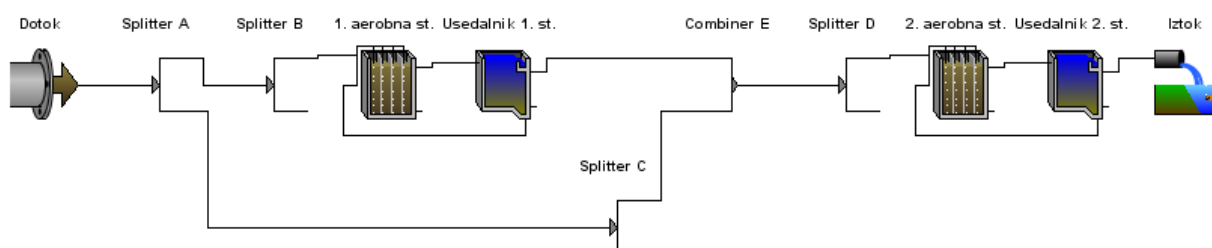
Po prvi biološki stopnji se v modelu pojavljajo nenadni vrhovi koncentracij *TN* in *KPK*. Ti vrhovi so verjetno posledica večjih nenadnih sprememb v meritvah dnevnih povprečnih koncentracij *KPK* in pretoka Q_{dot} na dotoku, ki ju pripeljemo v model. Na napravi pa se dotok spreminja mnogo počasneje in takšnih nenadnih vrhov ne dobimo. Razlike med meritvami in odzivi modela nastajajo tudi zaradi tega, ker so meritve dnevno povprečene odzivi modela pa niso. Validacijski model je pokazal tudi, da so vrednosti *TSS* na iztoku v modelu nižje, kot so izmerjene vrednosti. To je verjetno posledica pojava nitastih bakterij in izplavljanja biomase na *CCND*, česar pa model ne upošteva. Nitaste bakterije so lažje od vode, zato priplavajo na gladino ter se izlivajo v naslednjo stopnjo. Do odstopanj prihaja tudi pri amonijevem dušiku in *TN* na iztoku. V zimskem času je izmerjena koncentracija amonijevega dušika na iztoku iz *CCND* višja ter koncentracija *TN* nižja kot koncentracija, izračunana po simulacijskem modelu. Kot pravita Olsson G. in Newell B. (1999), je lahko tako odstopanje indikator denitrifikacije v usedalnikih. *CCND* ne dosega zakonskih mej predvsem za *TN* in NH_4-N , prav tako pa zaradi izplavljanja biomase *TSS* večkrat presega zakonsko mejo, čeprav model tega ne pokaže. Kljub nekaterim odstopanjem modela od izmerjenih vrednosti smo predpostavili, da je model primeren za izvedbo simulacijskih poizkusov delovanja biološkega dela *CCND*.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

S simulacijskimi poizkusi smo želeli preveriti, kako bi lahko s koncentracijo kisika v prvi in drugi biološki stopnji ter obtokom mimo prve biološke stopnje in pretokom odvečnega blata zmanjšali koncentracijo dušikovih spojin na iztoku iz CČND. Poleg tega smo želeli preveriti, kako bi na koncentracije onesnaževal na iztoku vplival recikel odpadne vode iz bazena druge v bazen prve stopnje. Pri tem smo upoštevali zakonsko določene mejne vrednosti za onesnaževala za čistilne naprave z obremenjenostjo več kot 100.000 PE, ki so prikazane v Tabeli 6.

4.1 Simulacijski poizkusi modela z obtokom prve biološke stopnje

Simulacijski model obstoječe naprave smo spremenili tako, da vključuje tudi deleža obtoka odpadne vode iz mehanske stopnje direktno na drugo biološko stopnjo, pri čemer smo lahko nastavili, kolikšen delež vode bo obšel prvo biološko stopnjo (Slika 30).



Slika 30: Shema simulacijskega modela biološke stopnje CČND z obtokom

4.1.1 Simulacijski poizkusi pri različnem obtoku prve biološke stopnje

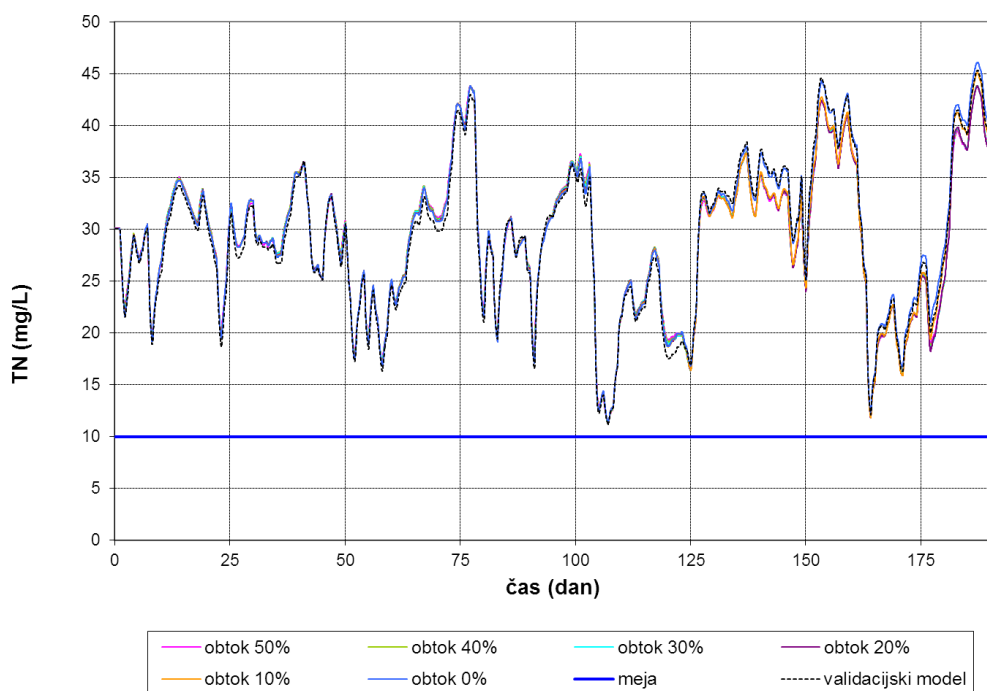
S prvo serijo simulacijskih poizkusov smo želeli ugotoviti, kako različne količine obtoka vplivajo na delovanje naprave ter ali bi bilo z obtokom mogoče znižati koncentracije onesnaževal na iztoku CČND. Preverili smo delovanje naprave pri obtokih 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % in 50 % ter rezultate primerjali z delovanjem validacijskega modela. Za koncentracije parametrov na dotoku smo uporabili dinamične podatke za 192 dni, od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010. V Tabeli 11 so predstavljene vrednosti obratovalnih parametrov (koncentraciji kisika v obeh bazenih ter pretok odvečnega blata v obeh stopnjah). Obratovalni parametri so bili konstantni in enaki povprečnim vrednostim v obdobju od 23.2.2009 do 10.9.2009.

Tabela 11: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu obtoka prve biološke stopnje

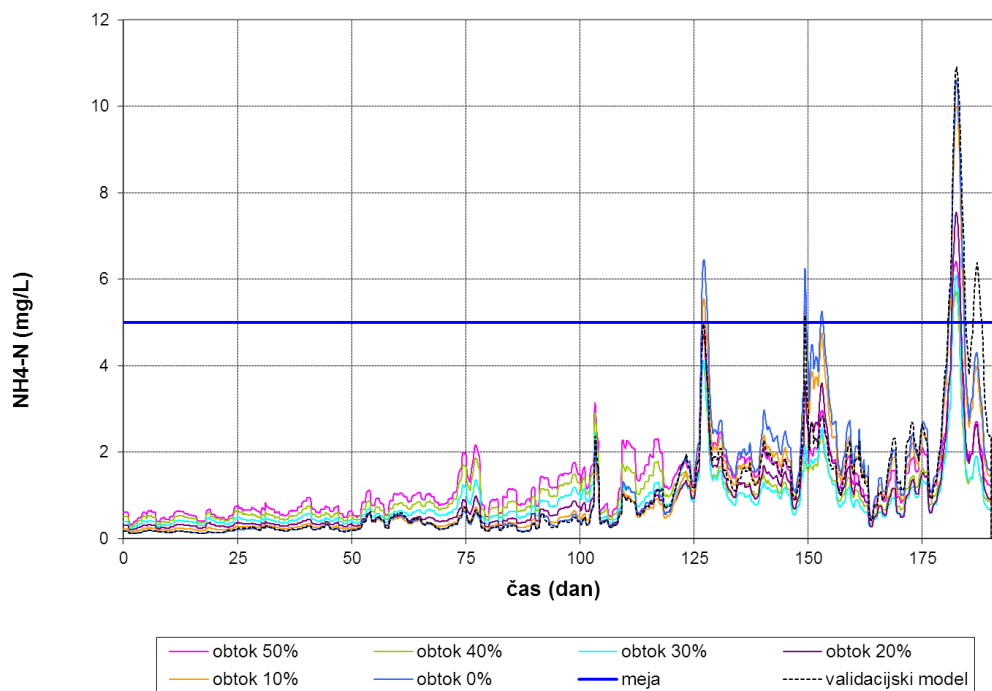
Obratovalni parameter	Vrednost
Koncentracija RK v prvem bazenu	2.2 mg/L
Koncentracija RK v drugem bazenu	2.2 mg/L
Q_{odv} v prvem usedalniku	55.3 m ³ /dan
Q_{odv} v drugem usedalniku	60.1 m ³ /dan

Kot vidimo na Slikah 31 do 35, se s spreminjanjem obtoka koncentracije na iztoku iz naprave ne spreminjajo dosti. Malo večje razlike dobimo pri koncentracijah amonijevega dušika, še posebno v zimskem času, ko so temperature nižje. Koncentracija amonijevega dušika se sicer s povečevanjem deleža obtoka nekoliko zvišuje, vendar lahko opazimo, da se s

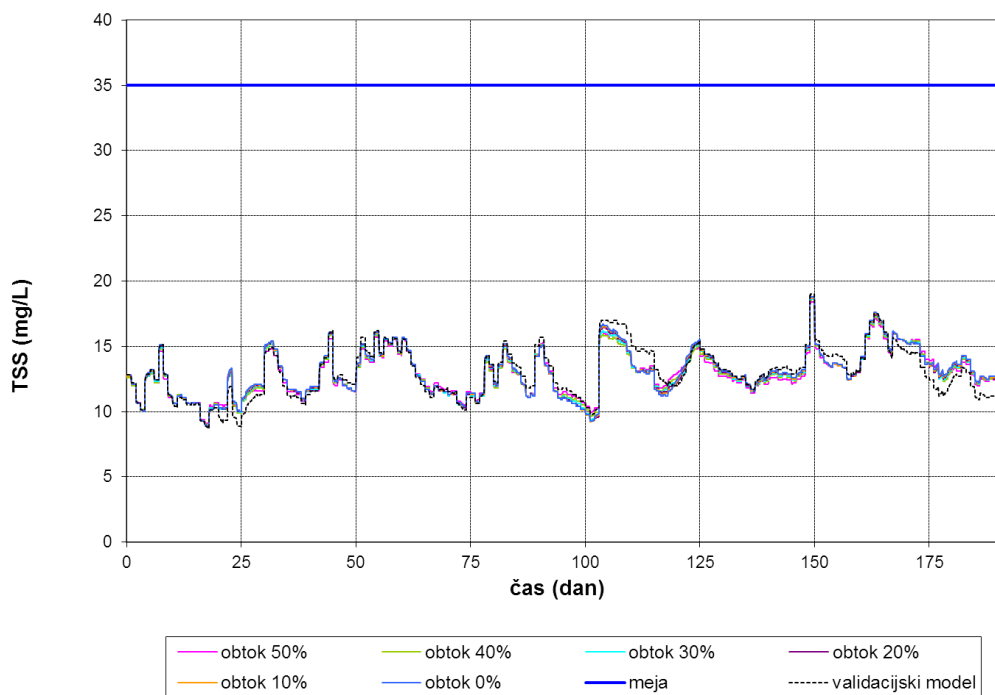
povečanjem deleža obtoka do okoli 30 % ali 40 % celo znižuje, nato pa zopet zvišuje. Obtok tako služi kot vir ogljika za nitrifikacijske bakterije v drugi biološki stopnji. Koncentracije skupnega dušika se ne spreminjajo dosti, v zimskih mesecih pa vidimo, da se nekoliko znižajo pri deležih obtoka 30 %, 40 % in 50 %. Koncentracija BPK_5 se s povečanjem obtoka rahlo povečuje, saj gre del odpadne vode direktno na drugo biološko stopnjo, kjer se *organska snov* ne razgradi popolnoma. Vseeno pa so koncentracije BPK_5 na iztoku vedno pod mejo. Prav tako se koncentracije KPK rahlo povečujejo s povečevanjem deleža obtoka, vendar se ne spreminjajo dosti ter ostajajo pod zakonsko določeno mejo. Spreminjanje obtoka ne vpliva bistveno na koncentracijo TSS .



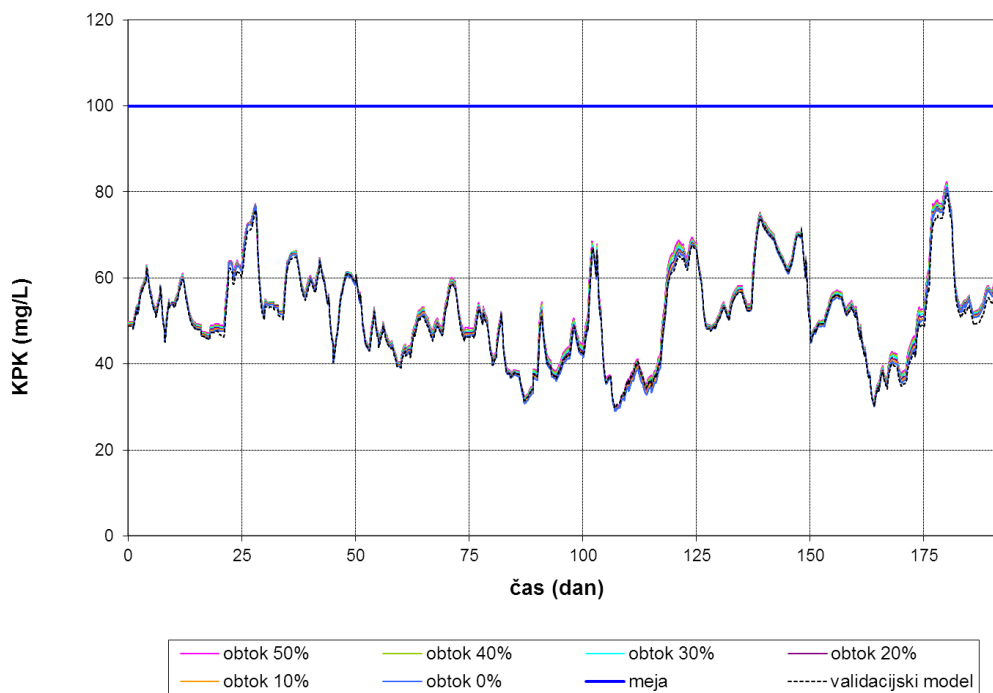
Slika 31: Koncentracije TN na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



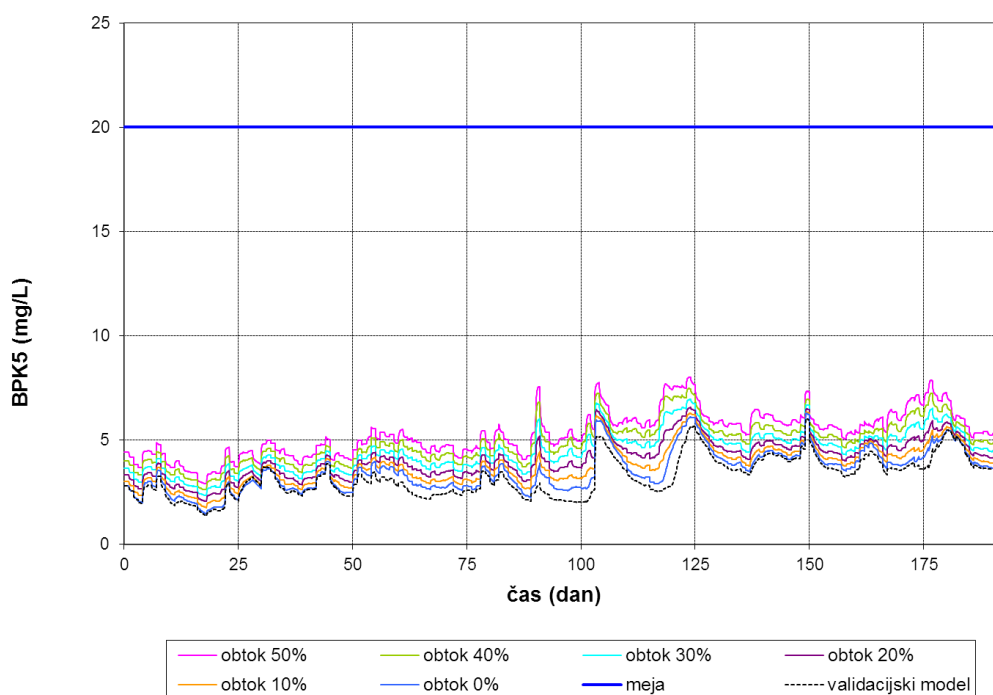
Slika 32: Koncentracije NH_4-N na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 33: Koncentracije TSS na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 34: Koncentracije KPK na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)



Slika 35: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri različnih obtokih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)

Za optimalen obtok smo izbrali 30 % obtok, saj pri tem obtoku dosegamo nižje koncentracije *TN* in *NH₄-N* kot pri nižjih obtokih in validacijskem modelu ter primerljive rezultate z modeli kot pri višjih obtokih; v primeru višjih pretokov bi porabili več energije za črpanje odpadne vode v drugo biološko stopnjo. Povprečna koncentracija *NH₄-N* se pri 30 % obtoku zniža za 22 %, medtem ko je povprečje *TN* enako kot pri validacijskem modelu.

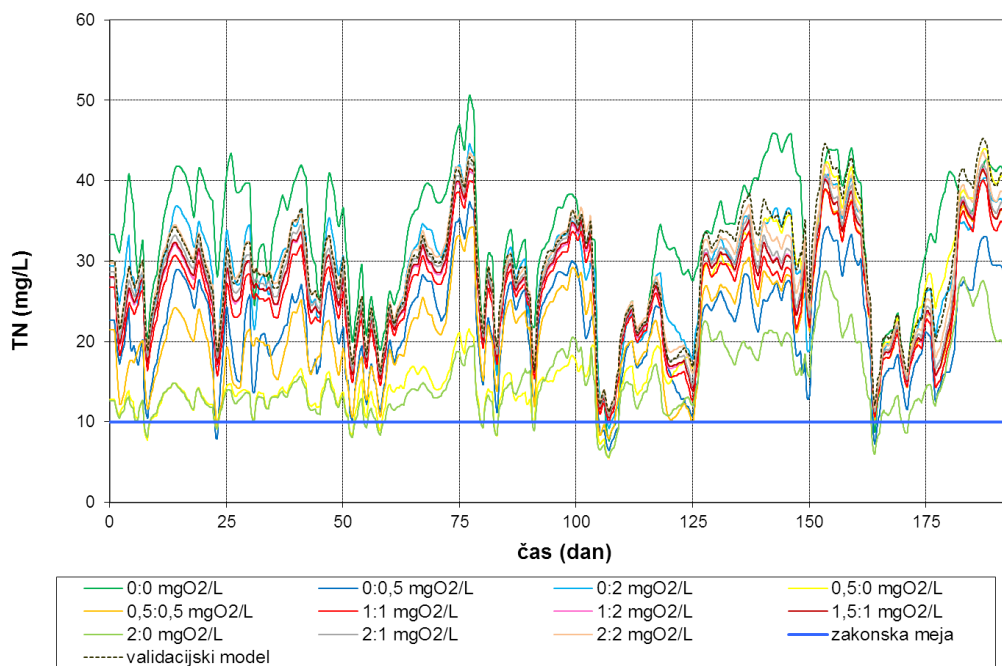
4.1.2 Simulacijski poizkus pri 30 % obtoku prve biološke stopnje in različni koncentraciji kisika v prezračevalnih bazenih

Za nadaljnje simulacijske poizkuse smo uporabili model s 30 % obtokom. V drugi seriji simulacijskih poizkusov smo želeli preveriti, kako bi različne koncentracije kisika v prezračevalnih bazenih vplivale na delovanje *CČND*. Poizkusili smo vrednosti 0 mg/L, 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L in 2 mg/L ter naredili simulacije za vseh 25 kombinacij vrednosti kisika v obeh prezračevalnih bazenih. Pri tem smo zopet uporabili dinamične podatke za koncentracije na dotoku in konstantne vrednosti za obratovalne parametre, ki jih lahko vidimo v Tabeli 12.

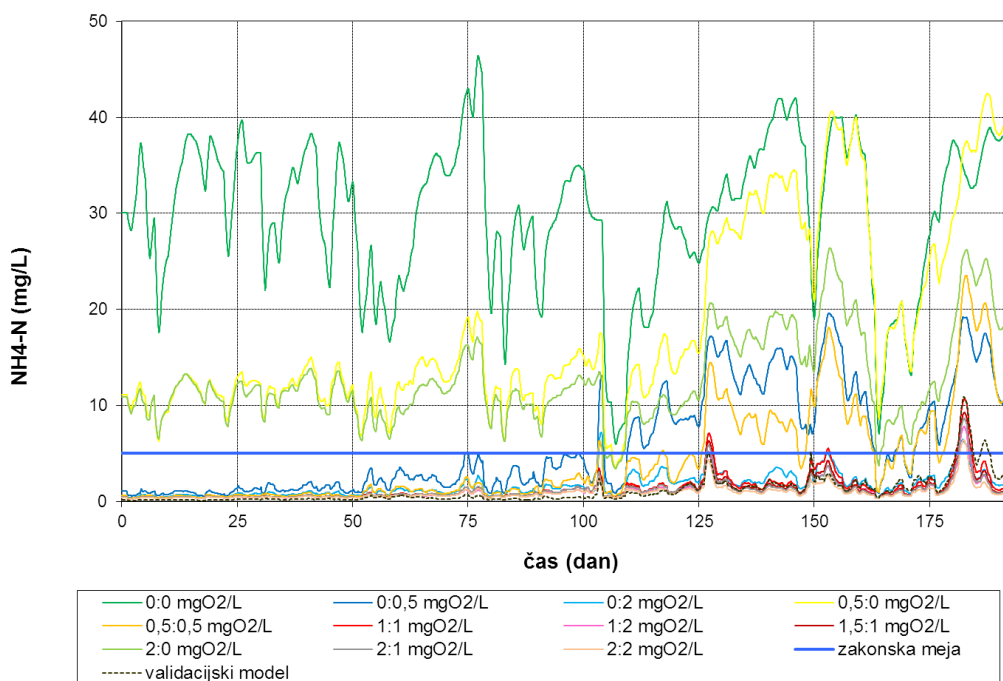
Tabela 12: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu različnih koncentracij kisika

Obratovalni parameter	Vrednost
Delež obtoka	30 %
Q_{odv} v prvem usedalniku	55.3 m ³ /dan
Q_{odv} v drugem usedalniku	60.1 m ³ /dan

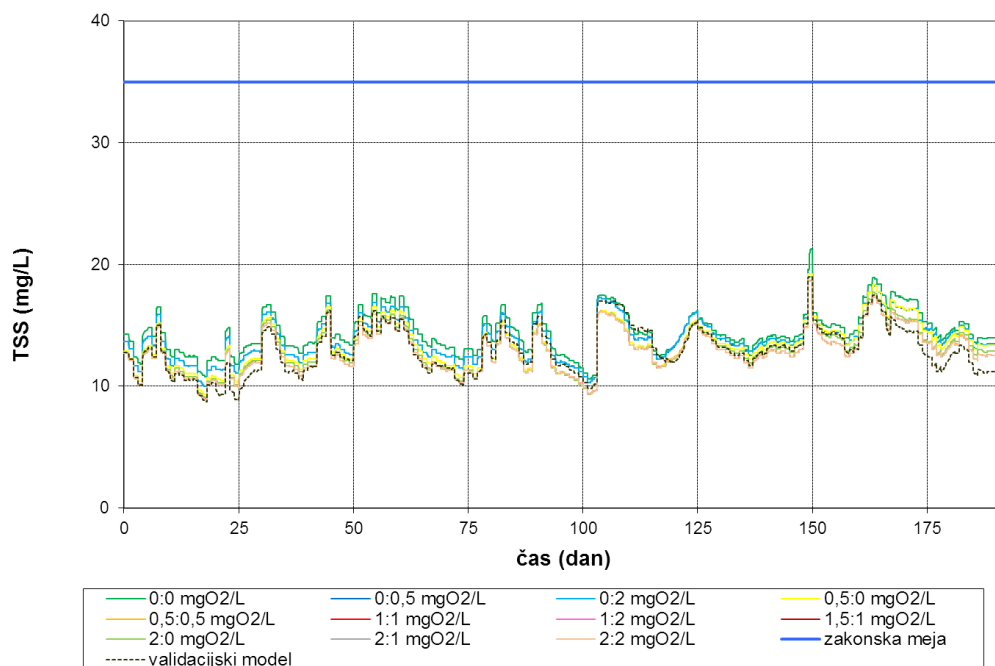
Na Slikah 36 do 40 so prikazani rezultati simulacijskih poizkusov pri različni koncentraciji kisika v prezračevalnih bazenih. Zaradi preglednosti so prikazani le nekateri simulacijski poizkusi. Razlaga: črta 1:2 mgO₂/L prikazuje simulacijske rezultate pri koncentraciji *RK* v prvem prezračevalnem bazenu 1 mg/L in v drugem 2 mg/L. Simulacije kažejo, da mora biti koncentracija *RK* v drugem bazenu najmanj 1 mg/L, saj so koncentracije *NH₄-N* pri nižjih koncentracijah kisika v drugem bazenu precej visoke. Koncentracija kisika, višja od 1 mg/L pa je nesmiselna, saj so razlike v koncentracijah *NH₄-N* v tem primeru majhne. Koncentracija kisika v prvem bazenu mora biti višja od 0,5 mg/L, saj dobimo drugače visoke koncentracije *NH₄-N*. Če ne upoštevamo simulacij s koncentracijama 0 mg/L in 0,5 mg/L v drugem bazenu, je koncentracija skupnega dušika najbolj optimalna pri koncentraciji *RK* 1 mg/L tako v prvem kot v drugem bazenu. Koncentracije *BPK₅* in *KPK* so nekoliko višje le v primeru, ko je koncentracija *RK* v prvem bazenu 0 mg/L. Koncentracija *TSS* se zvišuje z nižanjem koncentracije kisika v obeh bazenih. Pri koncentraciji *RK* 1 mg/L v prezračevalnih bazenih so koncentracije *KPK*, *BPK₅* in *TSS* ves čas pod zakonsko določeno mejo. Koncentracija *NH₄-N* jo presega manj kot 3 % časa, koncentracija *TN* pa ne pade pod mejo.



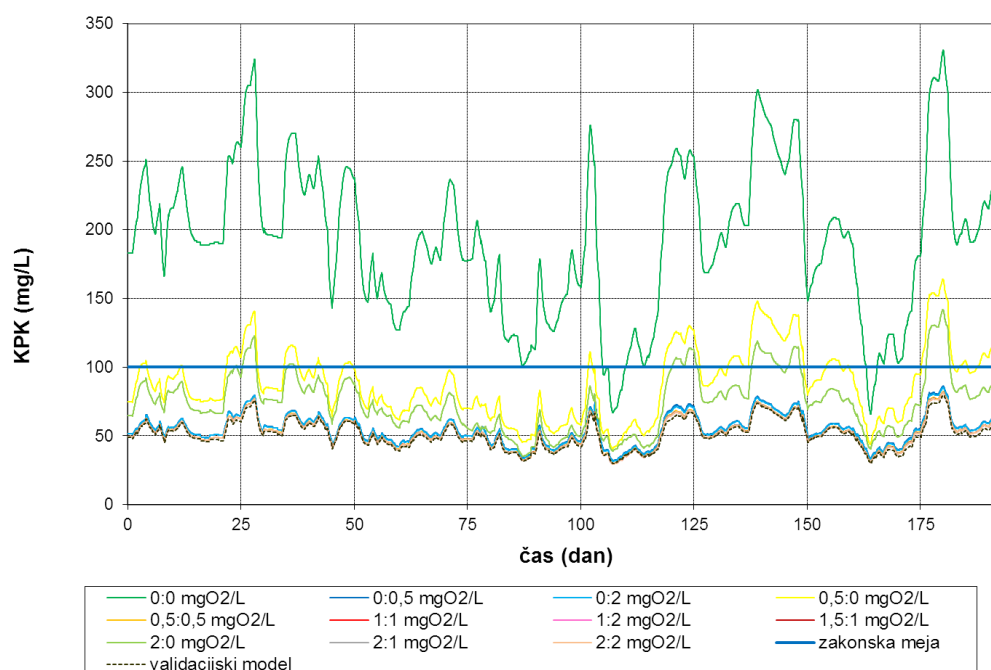
Slika 36: Koncentracije TN na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami raztopljenega kisika v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



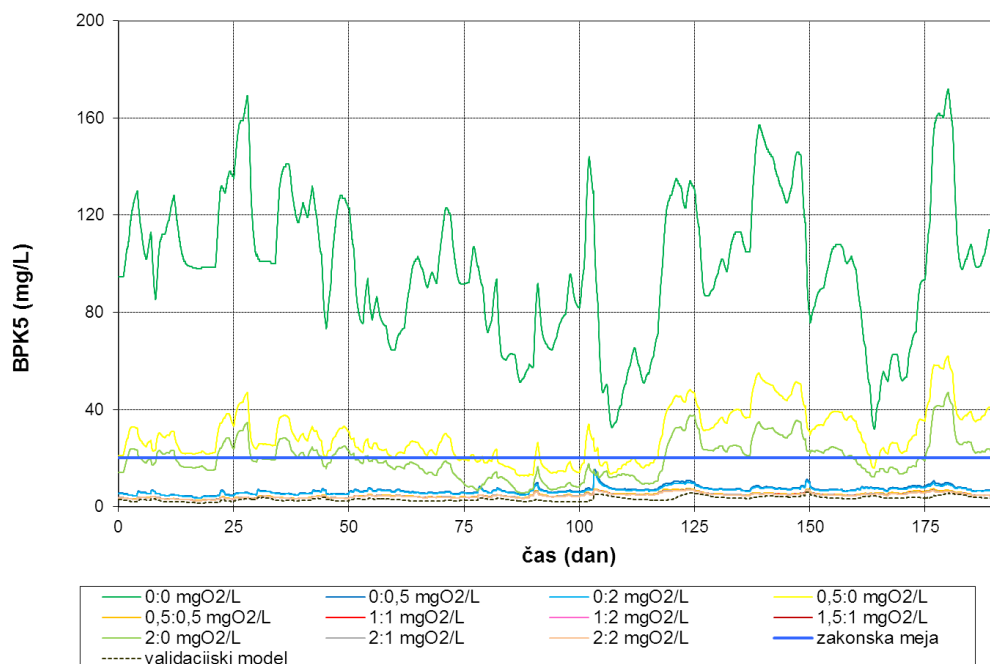
Slika 37: Koncentracije NH_4-N na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami RK v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 38: Koncentracije *TSS* na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami *RK* v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 39: Koncentracije *KPK* na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami *RK* v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 40: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi koncentracijami RK v bazenih v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).

Na podlagi simulacijskih rezultatov smo izbrali optimalno vrednost raztopljenega kisika 1 mg/L v obeh bazenih. Pri teh vrednostih RK in 30 % deležu obtoka se zviša povprečna vrednost NH_4-N za 24 % glede na validacijski model predvsem na račun delovanja pri višjih temperaturah. Povprečna vrednost TN se glede na rezultate z validacijskim modelom zniža za 12 %.

4.1.3 Simulacijski poizkus pri 30 % obtoku prve biološke stopnje in koncentraciji kisika 1 mg/L v prezračevalnih bazenih ter različnih pretokih odvečnega blata

V tem primeru smo koncentracijo kisika v bazenih nastavili na 1 mg/L, deleže obtoka prve biološke stopnje na 30 %, pretok odvečnega blata iz bioloških stopenj pa smo spreminjali. Pretok odvečnega blata vpliva na koncentracijo neraztopljenih snovi v bazenih. S poizkušanjem različnih pretokov odvečnega blata v prvi in drugi stopnji smo želeli doseči povprečne vrednosti neraztopljenih snovi okoli 3000 mg/L, 4000 mg/L, 5000 mg/L, 6000 mg/L in 7000 mg/L (Tabela 13).

Tabela 13: Pretoki odvečnega blata iz usedalnika prve in druge stopnje ter povprečne koncentracije neraztopljenih snovi v prezračevalnih bazenih pri simulacijskih poizkusih

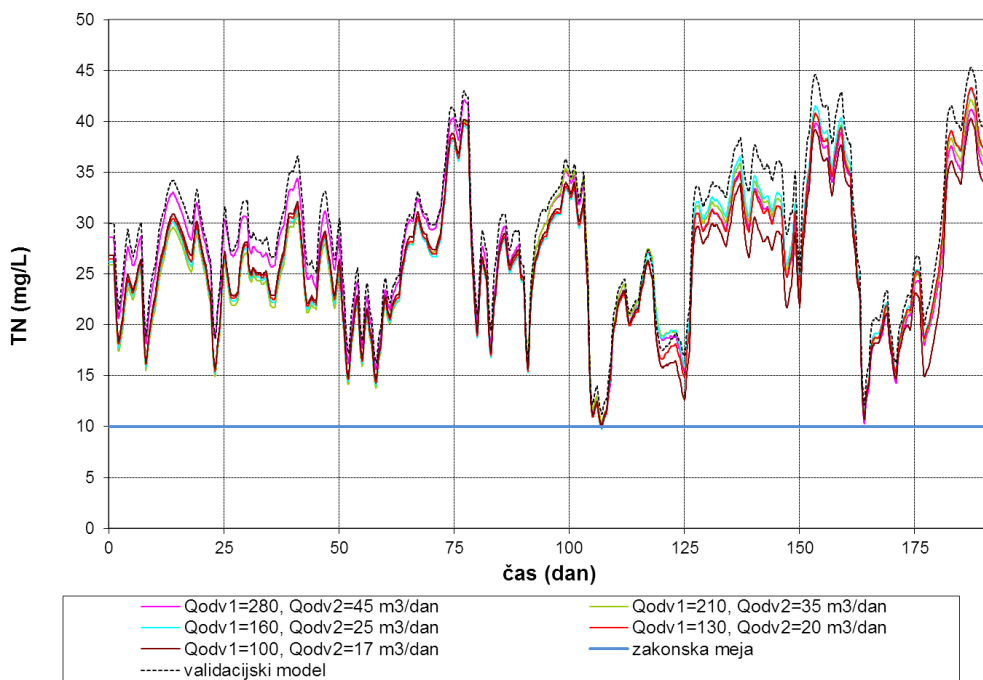
Številka poizkusa	Pretok odvečnega blata iz prve stopnje (m ³ /dan)	Pretok odvečnega blata iz druge stopnje (m ³ /dan)	Povprečna koncentracija TSS v prvem bazenu (mg/L)	Povprečna koncentracija TSS v drugem bazenu (mg/L)
1	280	45	3161	3226
2	210	35	4027	3885
3	160	25	5027	5036
4	130	20	5924	6041
5	100	17	7091	7101

Pri simulacijah smo uporabili pretoke odvečnega blata iz Tabele 13, ostali obratovalni parametri pa so bili enaki kot v Tabeli 14.

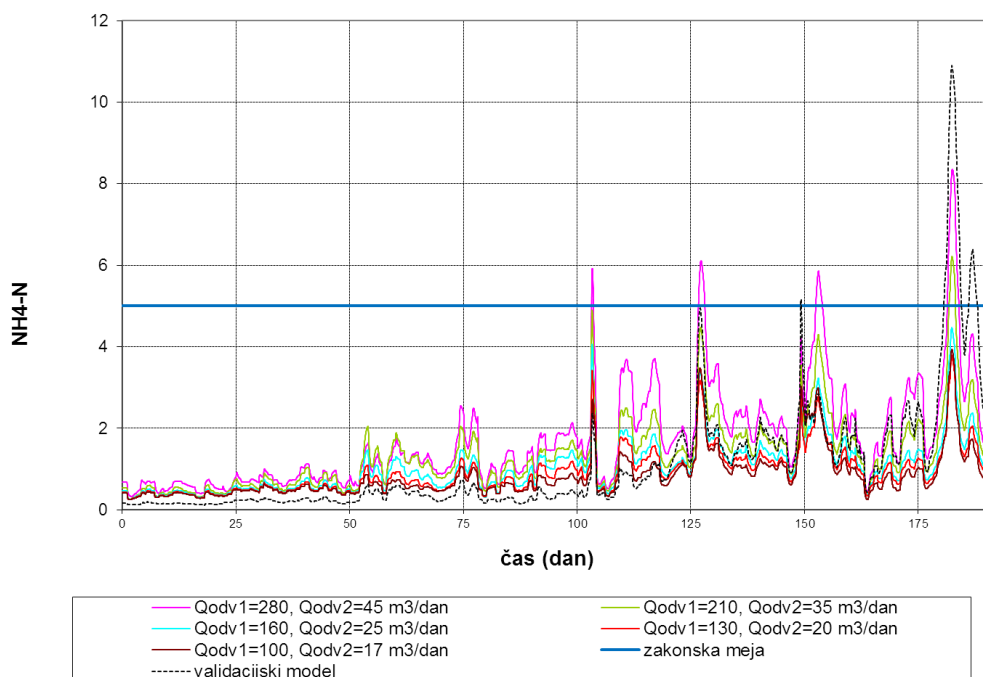
Tabela 14: Obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu pri spremenjenem pretoku odvečnega blata

Obratovalni parameter	Vrednost
Koncentracija <i>RK</i> v prvem bazenu	1 mg/L
Koncentracija <i>RK</i> v drugem bazenu	1 mg/L
Delež obtoka	30 %

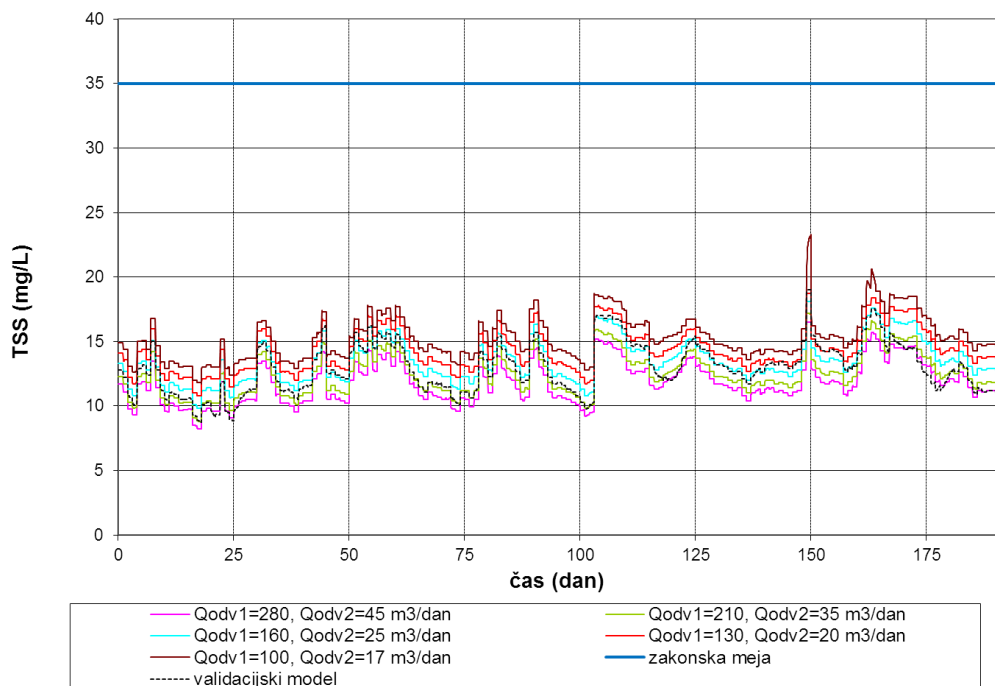
Simulacijski poizkusi pri različnih pretokih odvečnega blata so prikazani na Slikah 41 do 45. Razlaga: črta Qodv1=280, Qodv2=45 m³/dan prikazuje simulacijski rezultat pri pretoku odvečnega blata 280 m³/dan iz prve stopnje in 45 m³/dan iz druge stopnje. Simulacije kažejo, da se koncentracije *TN* nekoliko znižajo z višanjem koncentracije neraztopljenih snovi, vendar ne padejo pod zakonsko določeno mejo. Koncentracije *NH₄-N* se nižajo z višanjem koncentracije neraztopljenih snovi in pri koncentraciji 5000 mg/L ne presežejo več zakonsko določene meje 5 mg/L. Koncentracija *TSS* na iztoku se povečuje s povečevanjem koncentracije neraztopljenih snovi v prezračevalnih bazenih. Po pričakovanju se koncentraciji *BPK₅* in *KPK* tudi nižata z višanjem koncentracije neraztopljenih snovi. Izkaže se, da je optimalna koncentracija neraztopljenih snovi v bazenih okoli 5000 mg/L, to je pri pretokih odvečnega blata 160 m³/dan v prvi stopnji in 25 m³/dan v drugi stopnji.



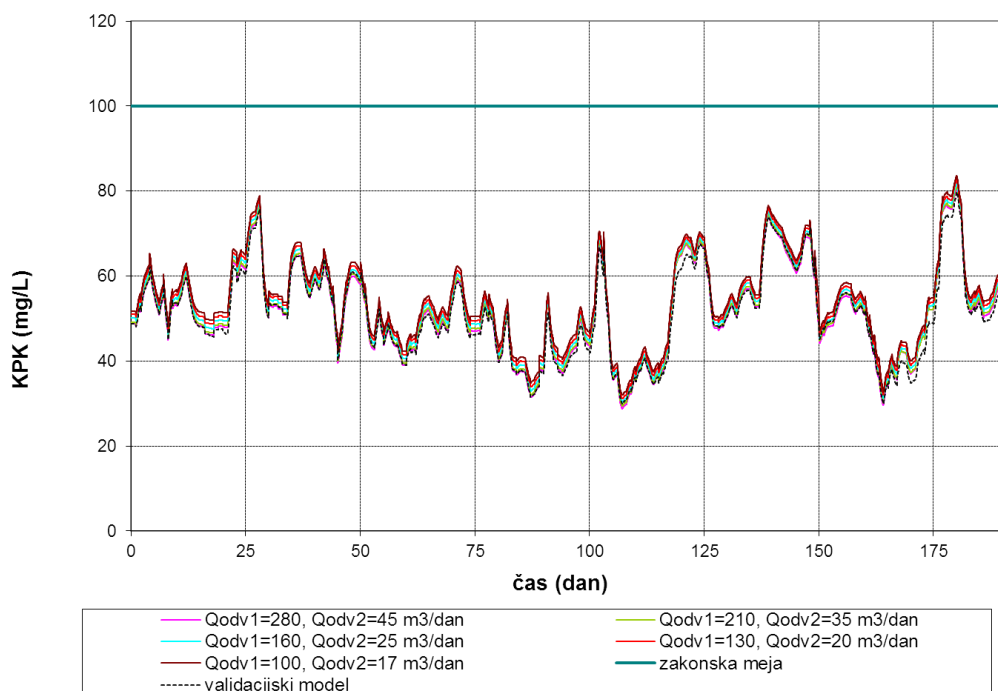
Slika 41: Koncentracije TN na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



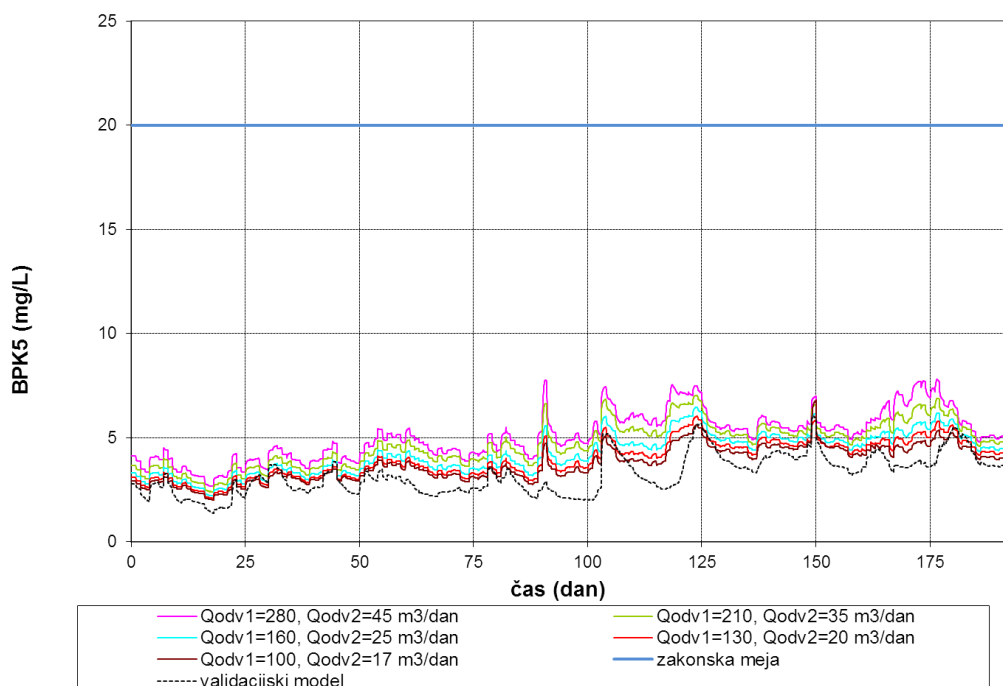
Slika 42: Koncentracije NH_4-N na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 43: Koncentracije TSS na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 44: Koncentracije KPK na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



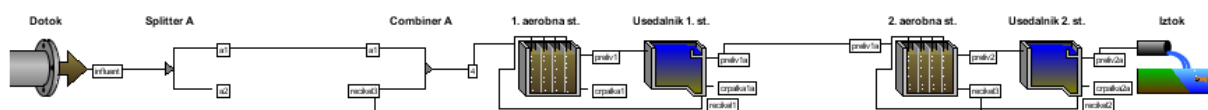
Slika 45: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki odvečnega blata iz obeh stopenj v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).

Čeprav se koncentracije KPK , BPK_5 in TSS nekoliko zvišajo, je povprečna koncentracija skupnega dušika v tem primeru nižja za 9 %, koncentracija amonijevega dušika pa za 5 % v primerjavi z validacijskim modelom in ne preseže zakonske meje.

4.2 Simulacijski poizkusi recikla iz druge v prvo biološko stopnjo

Želeli smo preveriti, ali bi bilo mogoče z manjšimi posegi v obstoječo ČN, da bi omogočala denitrifikacijo, znižati vrednosti skupnega dušika pod zakonsko določeno mejo (10 mg/N/L). V ta namen smo model naprave spremenili tako, da se je del odpadne vode iz prezračevalnega bazena druge stopnje vračal v prezračevalni bazen prve stopnje (Slika 46). Koncentracijo raztopljenega kisika v prvi stopnji smo nastavili na 0 mg/L, da so bili zagotovljeni pogoji za denitrifikacijo, v drugi stopnji pa na 2 mg/L, kar je pogoj za nitrifikacijo.

Pred drugo biološko stopnjo nismo uporabili razdelilnika pretoka, saj smo v tem primeru simulirali celotno polovico druge biološke stopnje. V ta namen smo povečali površino prezračevalnega bazena na 500 m² in površino usedalnika na 800 m², globina pa je ostala nespremenjena. Pretok recikla blata iz usedalnika v prezračevalni bazen druge stopnje smo prav tako podvojili na 15738 m³/dan. Količino odvečnega blata v drugi biološki stopnji pa smo povečali na 120 m³/dan.



Slika 46: Shema simulacijskega modela biološkega dela CČND z reciklom

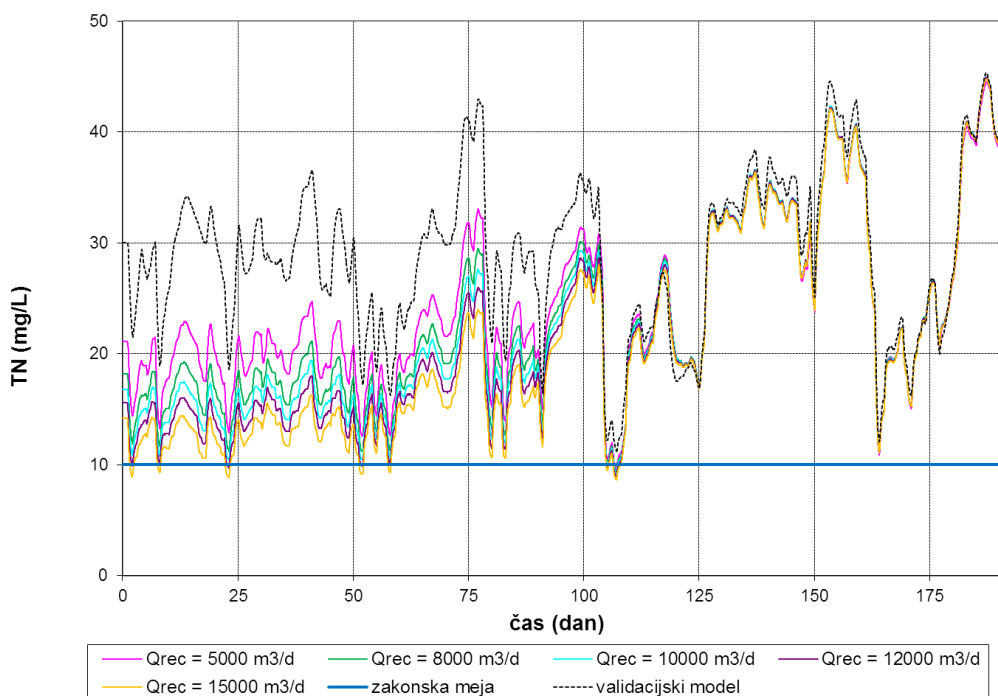
S simulacijskimi poizkusi z reciklom smo želeli preveriti, pri kakšnem pretoku recikla dobimo najboljše rezultate ter ali sploh pride do znižanja skupnega dušika na iztoku. Pri tem smo uporabili dinamične podatke za koncentracije na dotoku kot pri ostalih poizkusih in

konstantne vrednosti za obratovalne parametre (Tabela 15). Poizkusili smo naslednje vrednosti pretoka recikla: 5000, 8000, 10000, 12000 in 15000 m³/dan.

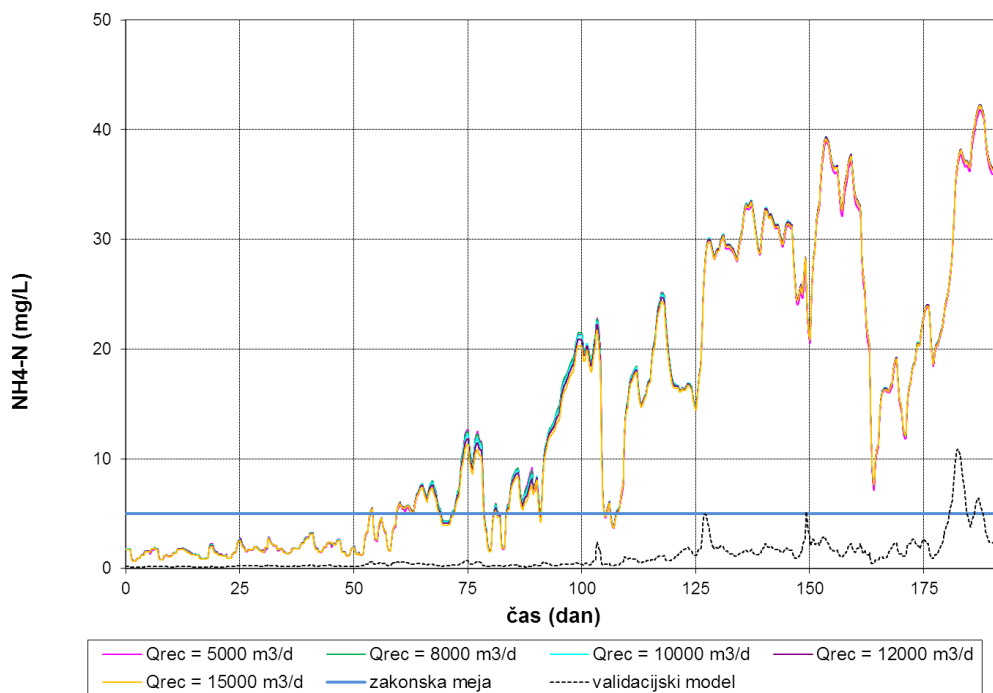
Tabela 15: Dnevne vrednosti parametrov na dotoku in obratovalni parametri pri simulacijskem poizkusu z reciklom

Obratovalni parameter	Vrednost
Koncentracija <i>RK</i> v prvem bazenu	0 mg/L
Koncentracija <i>RK</i> v drugem bazenu	2 mg/L
Q_{odv} v prvem usedalniku	55,3 m ³ /dan
Q_{odv} v drugem usedalniku	120,2 m ³ /dan

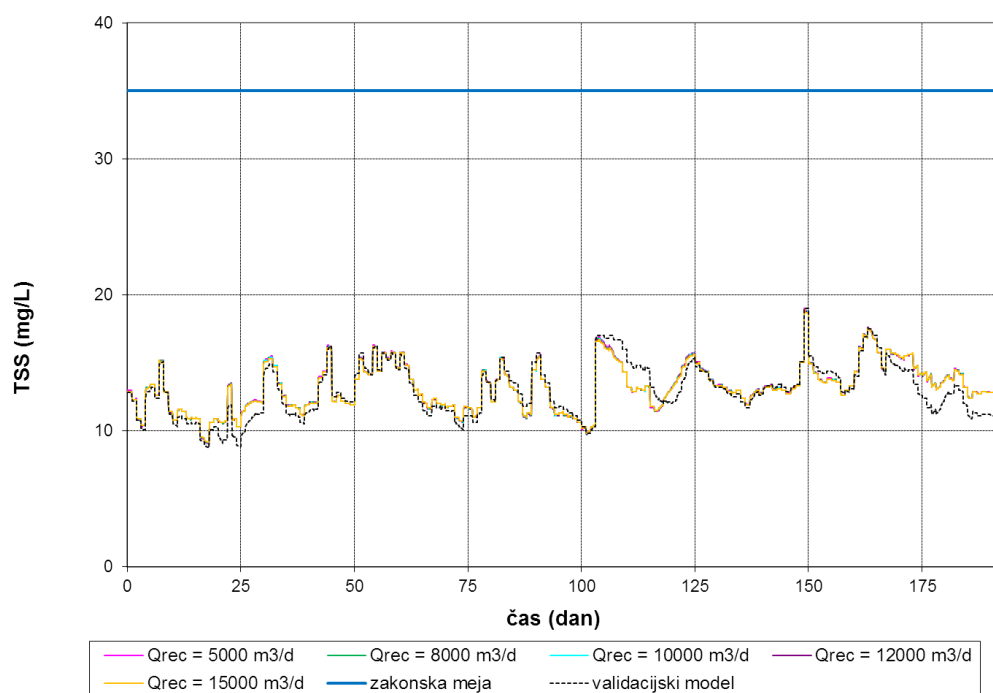
Simulacijski poizkusi pri različnih pretokih recikla so prikazani na Slikah 47 do 51. Simulacije kažejo, da je koncentracija *TSS* na iztoku približno enaka kot pri validacijskem modelu, saj recikel ne vpliva bistveno na usedanje neraztopljenih snovi. Odstranjevanje ogljikovih spojin je slabše, kar je pokazala koncentracija *BPK*₆, ki je v vseh primerih veliko višja kot pri validacijskem modelu in celo občasno preseže zakonsko mejo (20 mg/L). Posledično je višja tudi koncentracija *KPK*. Večje razlike so pri koncentraciji *TN*, ki se niža s povečevanjem pretoka recikla, vendar to ne velja za zimski čas, ko so koncentracije primerljive. Rezultati tako kažejo, da denitrifikacija dobro poteka do 105. dneva, nato pa se poslabša. Proces nitrifikacije je slabši v primerjavi z validacijskim modelom, v zimskem času pa se celo popolnoma ustavi.



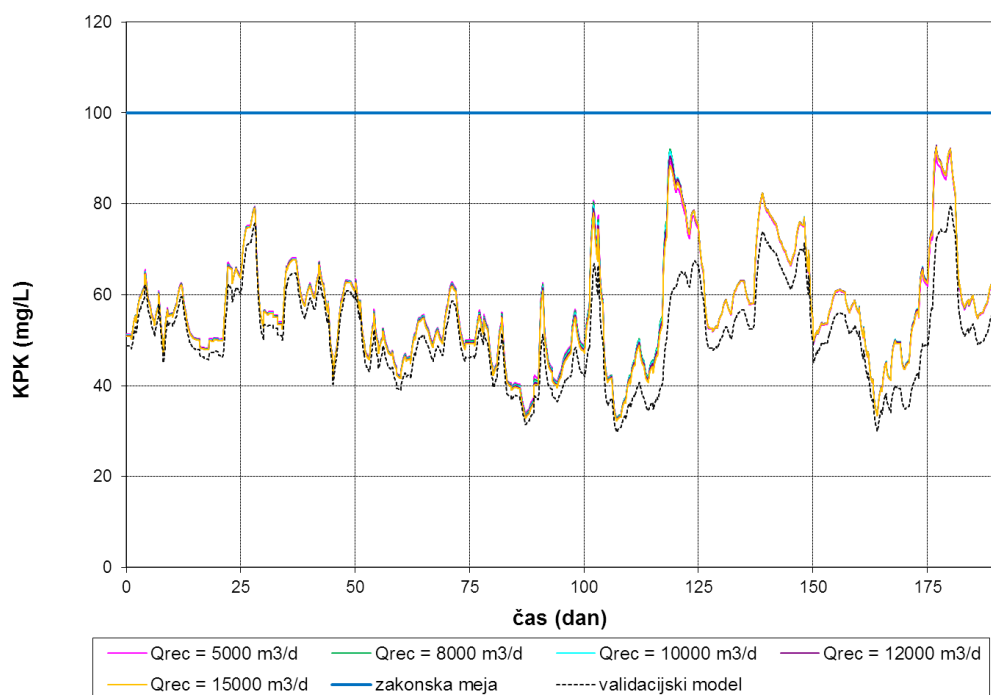
Slika 47: Koncentracije *TN* na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



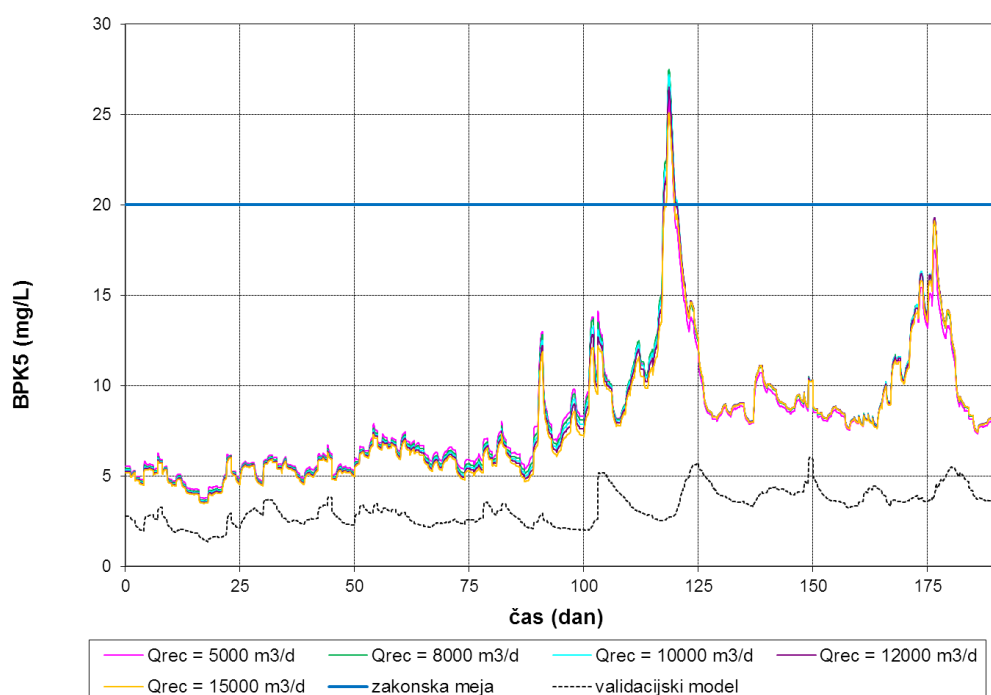
Slika 48: Koncentracije NH_4-N na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 49: Koncentracije TSS na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 50: Koncentracije KPK na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).



Slika 51: Koncentracije BPK_5 na iztoku pri simulacijskih poizkusih z različnimi pretoki recikla v primerjavi z rezultati validacijskega modela (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010).

Glede na dobljene rezultate lahko zaključimo, da taka konfiguracija ni dobra, saj odpove predvsem v zimskem času, ko so temperature prenizke za delovanje nitrifikacijskih bakterij. Amonijev dušik se tako ne pretvarja v nitratni dušik, ki je potreben za denitrifikacijo, zato je pri vseh pretokih recikla nekajkrat višji kot pri validacijskem modelu. Koncentracija TN je v povprečju do 27 % nižja, predvsem zaradi boljšega delovanja naprave pri višjih temperaturah. Poleg temperatur verjetno na proces vpliva tudi nižji zadrževalni čas odpadne vode v bazenih zaradi recikla, zato nitrifikacija ne poteka optimalno.

5 ZAKLJUČKI

V diplomskem delu je prikazana postavitve matematičnega modela biološkega dela CČND, s katerim smo želeli ugotoviti, ali bi bilo mogoče z manjšimi posegi v obstoječo napravo znižati koncentracije dušikovih spojin na iztoku ter do kakšne mere.

Matematični model smo postavili v programskem paketu *GPS-X* in ga validirali z dnevnimi povprečnimi meritvami koncentracij *TN*, *NH₄-N*, *TSS*, *KPK* in *BPK₅* po prvi biološki stopnji in na iztoku za 192 dni obratovanja, in sicer od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010. Pri višjih temperaturah je bilo ujemanje validacijskega modela z meritvami dobro, medtem ko je model v času nižjih temperatur pokazal višjo stopnjo odstranjevanja *NH₄-N* ter nižjo stopnjo odstranjevanja *TN*. To je lahko posledica denitrifikacije v usedalnikih, ki je model ne upošteva. Meritev koncentracije *TSS* na iztoku je bila večja kot pri validacijskem modelu, kar je lahko posledica pojava nitastih bakterij v sistemu, ki izplavljajo in jih model ne upošteva. Ujemanje *KPK* in *BPK₅* z meritvami je bilo dobro v celotnem obdobju.

Kljub delnemu odstopanju validacijskega modela od meritev smo model sprejeli kot zadovoljiv in ga uporabili za izvajanje simulacijskih poizkusov. Naredili smo simulacijski poizkus vpliva različnih deležev obtoka prve biološke stopnje, vpliva koncentracije raztopljenega kisika v prezračevalnih bazenih, pretoka odvečnega blata iz usedalnikov in recikla iz drugega v prvi prezračevalni bazen.

Ugotovili smo, da je najprimernejši 30 % obtok prve stopnje, pri katerem se povprečna koncentracija *NH₄-N* na iztoku zniža za 22 % v primerjavi z validacijskim modelom, koncentracija *TN* na iztoku pa se praktično ne spremeni. Rezultati simulacijskih poizkusov pri različnih koncentracijah kisika v bazenih so pokazali, da je pri 30 % obtoku prve stopnje najprimernejša koncentracija *RK* v obeh bazenih okoli 1 mg/L. V tem primeru se koncentracija *NH₄-N* na iztoku sicer zviša za okoli 24 %, vendar se pri tem koncentracija *TN* na iztoku zniža za okoli 12 %. Simulacijski poizkusi so pokazali, da pri 30 % obtoku prve stopnje in koncentraciji *RK* 1 mg/L v prvem in drugem bazenu dosežemo najugodnejše delovanje naprave pri povečanju pretoka odvečnega blata iz prve stopnje na 160 m³/dan in zmanjšanju pretoka odvečnega blata iz druge stopnje na 25 m³/dan. V tem primeru se glede na validacijski model zniža *NH₄-N* na iztoku za 5 % in *TN* za 9 %. Z reciklom iz drugega v prvi prezračevalni bazen je bilo mogoče zmanjšati koncentracijo *TN* na iztoku do 27 %, vendar se je pri tem koncentracija *NH₄-N* kar nekajkrat zvišala. Simulacijski poizkusi so tako pokazali, da je mogoče z manjšimi posegi v napravo za nekaj procentov znižati koncentraciji *TN* in *NH₄-N* na iztoku.

Model naprave je mogoče še izboljšati tako, da bi npr. popravili stehiometrične in kinetične parametre. Na ta način bi izboljšali ujemanje modela z meritvami ter povečali zaupanje v rezultate simulacijskih analiz. Vredno bi bilo poizkusiti še kakšno drugo konfiguracijo ČN z denitrifikacijo, s katero bi poskusili doseči nižje vrednosti skupnega dušika na iztoku.

VIRI IN LITERATURA

1. Antoniou P., Hamilton J., Koopman B., Jain R., Holloway B., Lyberatos G., Svoronos S.A. 1990. *Effect of temperature and ph on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria*. Water Research, Vol. 24, 1: 97-101
2. Bavdaž G. 1998. *Metode ocenjevanja vrednosti spremenljivk in parametrov pri vodenju biološkega procesa*. Diplomsko delo. Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
3. Birk-Levstek M. 2002. *Modeliranje dinamičnega delovanja pilotne biološke čistilne naprave za odstranjevanje ogljikovih in dušikovih spojin*. Magistrsko delo. Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
4. Bitton G. 2011. *Wastewater Microbiology*. 4.ed. Wiley-Blackwell
5. Burica O., Stražar M., Mahne I. 1996. *Nitrogen removal from wastewater in a pilot plant operated in the recirculation anoxic-oxic activated sludge mode*. Wat. Sci. Vol.33, No. 12: 255-258
6. Dochain D., Vanrolleghem P. 2001. *Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes*. London, IWA Publishing, UK
7. Gerardi M.H. 2002. *Nitrification and denitrification in the activated sludge process*. New York, John Wiley and Sons, Inc.
8. Gernay K. V., van Loosdrecht M. C. M., Henze M., Lind M., Jørgensen S. B. 2004. *Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of art*. Environmental Modelling & Software, 19: 763-783
9. Gujer W., Henze M. 1991. *Activated Sludge Modelling and Simulation*. Water Science Technology, 23: 1011-1023
10. Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T. 1987. *Activated sludge model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1*. IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, England.
11. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. 2000. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. London. IWA Publishing, UK
12. Henze M., Harremoës P., Arvin E., la Cour Jansen J. 2002. *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany
13. Henze M., van Loosdrecht M.C.M. 2008. *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*. London, IWA Publishing
14. Hydromantis, Inc. 2006. *GPS-X Version 2.4, Tehnical Reference*. Ontario, Canada
15. Komorowska-Kaufman M., Majcherek H. in Klaczyński E. 2006. *Factors affecting the biological nitrogen removal from wastewater*. Process Biochemistry, 41: 1015-1021
16. Lindberg C.F. 1997. *Control and estimation strategies applied to the activated sludge processes*. Doctoral thesis. Uppsala university, Sweden

17. Matko D. 1992. *Identifikacije*. Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.
18. Nuhoglu A., Keskinler B., Yildiz E. 2005. *Mathematical modelling of the activated sludge process—the Erzincan case*. Process Biochemistry, 40: 2467-2473
19. Olsson G., Newell B. 1999. *Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control*. London, IWA Publishing, London, UK
20. Pirnat R., Cerar P., Stražar M. 2010. *Poročilo o delu centralne čistilne naprave Domžale – Kamnik d.o.o. v letu 2009*. JP Centralna čistilna naprava Domžale Kamnik d.o.o., Domžale
21. Roš M. 2001. *Biološko čiščenje odpadne vode*. GV Založba, Ljubljana.
22. Roš M., Zupančič G.D. 2010. *Čiščenje odpadnih voda*. Velenje, Visoka šola za varstvo okolja
23. Shammam N.K. 1986. *Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process*. Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 58, No.1: 52-58
24. Takács I., Patry G.G., Nolasco D. 1991. *A dynamic model of the clarification-thickening process*. Water research, Volume 25, Number 10, str. 1263-1271
25. Topkaya P. 2008. *Computer simulation of a complete biological treatment plant*. A thesis submitted to the Graduate school of natural and applied sciences of Middle East Technical University
26. *Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav*, Ur. l. RS št. 45/2007
27. Vanhooren H., Meirlaen J., Amerlinck, Y. Claeys, F. Vangheluwe, H, Vanrolleghem P. A. 2003. *WEST: modelling biological wastewater treatment*. IWA Publishing, UK
28. Von Sperling M. 2006. *Biological Wastewater Treatment – Basic Principles of Wastewater Treatment*, IWA Publishing, London, UK
29. Vrečko D. 2003. *Razvoj in primerjava strategij vodenja bioloških čistilnih naprav*. Doktorska dizertacija. Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
30. Vrečko, D., Hvala N. 2000. *Simulacija pilotnih čistilnih naprav klasične in MBBR tehnologije v CČND*. Zaključno poročilo. Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana
31. Wiesmann, U., Choi, I. S., Dombrowski, E. M. 2006. *Biological wastewater treatment: fundamentals, microbiology, industrial process integration*. WILEY VCH, Weinheim, Germany
32. Zec M. 1999. *Vrednotenje in uporaba matematičnih modelov biološkega čiščenja odpadnih voda*. Doktorska dizertacija. Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
33. Zec M., Hvala N., Šubelj M., Burica O., Stražar M., Birk M., Cerar P. 1997. *Modeliranje in simulacija čistilne naprave CČND*. Delovno poročilo IJS DP-7833. Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana

PRILOGA A: MERITVE KONCENTRACIJ ONESNAŽEVAL NA IZTOKU IZ MEHANSKE STOPNJE ČČND ZA OBDOBJE OD 11. 9. 2009 DO 21. 3. 2010

Čas (dan)	KPK (mgCOD/l)	TKN (mgN/l)	NH ₄ -N (mgN/l)	Q _{dot} (l/s)	Temperatura (°C)	RK v 1. stopnji (mg/l)	RK v 2. stopnji (mg/l)	Q _{odv} v 1. stopnji (m ³ /dan)	Q _{odv} v 2. stopnji (m ³ /dan)
1	493,6	34,1	27,5	211,8	20,3	2	2,5	77,5	34,7
2	580,9	47,9	33,1	179,4	20,3	2	2,4	66,7	51,3
3	596,6	50,5	39,9	168,0	20,0	2,2	2,6	62,9	62,9
4	474,8	44,3	32,6	225,6	19,4	2	2,5	81,8	46,3
5	437,6*	44,3	23,4	229,4	19,0	2,1	2,5	83,0	46,3
6	514,7	49,6	31,1	212,1	19,4	1,9	2,6	77,4	46,3
7	348,1	29,3	15,6	267,8	19,6	2,1	2,4	96,0	46,3
8	518,3	44,3	25,2	217,8	19,7	1,9	2,4	79,3	46,3
9	501,1	44,7	26,2	184,9	20,0	1,7	2,3	68,5	56,7
10	548,3	50,9	31,7	173,5	19,6	2,2	2,4	64,6	74,5
11	588,6	54,6	34,3	188,7	19,6	2	2,4	69,6	46,3
12	473,9	50,6	35,9	183,9	19,9	2,1	2,4	68,1	46,3
13	437,6*	44,3*	39,1	175,6	20,2	2	2,3	65,5	58,0
14	437,6*	44,3*	38,0	177,8	20,4	2	2,3	66,3	58,0
15	437,6*	44,3*	37,2	179,3	20,5	2	2,4	66,8	46,3
16	437,6*	44,3*	34,8	150,6	20,4	2	2,4	57,2	46,3
17	437,6*	44,3*	30,1*	145,7	19,7	2	2,3	55,4	69,6
18	437,6*	44,3*	40,7	178,0	19,5	2	2,3	66,1	67,9
19	437,6*	44,3*	36,1	184,2	19,6	2	2,6	68,3	79,5
20	437,6*	44,3*	34,6	179,4	19,8	2	2,7	67,4	266,3
21	640,6	52,0	34,1	178,2	19,8	2	2,7	66,4	103,4
22	573,1	40,7	23,4	231,5	19,4	2	2,3	84,2	139,0
23	644,2	50,7	34,0	175,0	18,9	2	2,4	65,0	96,4
24	602,9	57,0	40,0	161,6	18,5	2,1	2,6	60,4	84,5
25	748,8	57,3	40,4	182,2	18,3	1,9	2,3	67,2	102,2
26	720,0	55,9	33,7	188,6	19,0	2	2,4	69,4	46,3
27	789,0	60,0	35,6	189,2	19,5	2	2,2	69,8	46,3
28	437,6	44,3	36,5	189,7	19,7	2	2,3	70,0	46,3
29	437,6	44,3	36,3	190,1	19,8	2	2,3	70,1	34,3
30	437,6	44,3	19,5	258,5	19,3	2	2,4	92,6	52,3
31	437,6	44,3	29,5	262,3	18,3	2	2,3	93,7	34,5
32	437,6	44,3	29,1	248,8	17,8	2	2,3	89,0	46,3
33	437,6	44,3	23,6	220,7	16,8	2	2,5	79,2	52,3
34	648,7	51,7	32,5	199,0	16,6	2	2,5	72,1	50,3
35	638,3	51,3	33,1	181,9	16,8	2	2,5	66,4	46,3
36	633,5	54,9	35,7	181,4	17,0	1,9	2,4	66,3	45,3
37	524,5	50,1	32,1	176,9	16,7	2,1	2,6	64,8	56,3
38	509,5	53,7	36,6	166,9	16,4	2	2,3	61,3	50,3
39	576,4	56,3	37,4	183,0	15,9	2,5	2,2	66,5	55,2
40	517,1	55,2	38,8	187,1	16,0	2,7	2,2	67,9	55,2
41	611,9	53,2	36,3	186,4	16,3	2,6	2,4	67,7	43,9
42	512,9	44,0	27,2	226,1	16,6	2,2	2,3	81,1	43,9
43	438,1	42,0	26,5	235,2	16,1	2	2,3	83,9	34,0
44	293,9	34,1	21,6	276,1	15,8	2,4	2,2	97,4	9,9
45	429,2	47,1	34,2	191,6	15,9	2,1	2,4	69,3	21,6
46	545,8	53,8	39,1	201,1	16,3	2	2,5	72,6	21,6
47	585,9	51,3	34,4	191,6	17,0	2	2,2	69,6	21,6
48	566,1	46,5	29,6	186,7	16,8	2	2,3	67,9	21,6
49	541,6	51,5	34,6	183,7	16,7	2,3	2,1	66,9	21,6
50	447,7	38,0	24,9	226,2	16,4	2,1	2,4	81,0	31,5
51	325,7	27,5	16,3	260,5	13,9	2	2,2	91,7	56,3
52	315,0	33,6	22,4	240,9	12,5	2	2,4	84,8	81,9
53	422,3	42,1	27,8	237,2	12,2	2	2,1	83,4	76,1

54	313,7	29,1	17,2	284,0	12,3	2	2,2	98,9	46,3
55	378,3	38,9	23,9	246,6	13,3	2	2,2	86,9	56,3
56	316,8	31,6	19,5	276,7	13,2	2	2,4	96,8	46,3
57	310,6	26,5	16,1	269,1	13,6	2	2,3	94,4	51,3
58	263,4	28,9	19,2	281,6	12,6	2	2,2	98,3	46,3
59	266,5	34,1	24,3	259,5	13,4	2	2,2	91,1	46,3
60	301,3	33,2	21,7	286,0	12,6	2	2,2	99,7	51,3
61	310,5	35,7	23,9	267,4	13,6	2	2,2	93,9	51,3
62	396,6	40,4	26,9	245,8	14,2	2	2,1	86,8	38,9
63	449,7	47,2	31,8	227,7	14,5	2	2	80,9	38,9
64	454,4	48,9	33,0	218,3	14,3	2,1	2,2	77,7	52,0
65	421,1	46,4	33,3	205,2	14,4	1,9	2,1	73,4	40,3
66	383,9	47,8	35,7	198,2	14,2	2	2,2	70,9	40,3
67	434,0	47,6	36,5	213,3	14,5	1,9	2,1	76,0	26,5
68	394,4	45,4	35,6	206,6	15,0	1,9	2	73,9	9,9
69	512,1	50,3	33,5	203,5	15,1	1,8	2	72,9	11,6
70	568,1	53,2	34,0	198,0	14,9	1,8	1,9	71,1	46,3
71	530,6	53,1	35,3	197,5	14,7	1,7	1,9	71,0	69,1
72	411,5	51,7	38,0	179,5	14,2	2,1	1,9	65,0	99,5
73	392,9	56,3	43,0	175,8	13,6	2	2	63,5	82,3
74	403,7	56,0	43,3	199,6	13,7	2	1,9	71,4	75,9
75	407,1	53,8	38,8	198,3	14,2	2,1	2	71,0	43,5
76	505,1	64,1	49,1	185,0	14,2	1,8	2	66,5	34,8
77	415,3	57,8	43,7	198,5	14,4	1,8	1,8	71,1	28,6
78	386,5	40,7	25,0	257,4	14,0	1,7	1,8	90,5	52,3
79	289,4	29,5	18,1	240,1	13,4	1,9	1,9	84,5	52,3
80	340,6	43,0	30,2	211,1	12,9	1,8	1,9	74,7	52,3
81	420,8	43,3	27,3	246,4	13,3	2,3	2,3	86,6	52,3
82	241,7	25,8	12,4	279,9	12,9	2,8	2,9	97,6	52,3
83	249,1	33,8	24,2	257,6	12,9	4	4,3	90,2	52,3
84	265,5	39,2	30,0	242,4	13,1	2,8	3,1	85,2	52,3
85	261,4	39,7	31,1	240,2	13,4	1,9	2,1	84,5	52,3
86	200,0	32,1	25,0	224,2	12,7	2,1	2,4	79,0	52,3
87	226,7	35,6	29,3	205,7	12,5	3,6	4	72,7	52,3
88	244,2	37,2	30,0	212,4	12,4	2	2,2	74,9	52,3
89	231,0	34,4	19,8	286,6	12,5	1,9	2	99,7	52,3
90	412,4	33,5	19,1	303,0	11,3	1,7	2	104,7	52,3
91	285,4	37,5	28,0	265,0	12,2	2	2,1	92,4	52,3
92	279,3	39,0	28,7	252,8	12,5	4,7	5	88,4	52,3
93	272,7	39,9	29,6	221,8	12,4	4,1	4,4	78,1	21,6
94	306,9	42,0	31,5	211,1	11,9	2,3	2,3	74,4	11,6
95	340,3	45,9	34,0	215,0	11,6	2	2	75,7	29,4
96	348,1	46,8	33,2	211,5	11,4	2	2,1	74,3	52,3
97	450,7	51,9	35,2	207,1	11,4	2,3	2,7	72,8	52,3
98	355,8	50,2	35,0	202,6	11,4	2,4	2,8	71,4	24,8
99	357,4	48,4	34,3	196,1	11,0	1,9	2,3	69,2	27,8
100	471,2	57,0	29,3*	186,6	10,6	1,8	2,1	65,9	40,1
101	747,4	64,2	29,3*	174,5	10,1	1,8	2	61,7	34,0
102	531,9	57,4	29,3*	178,3	9,7	1,8	2	62,8	31,0
103	341,0	35,3	29,3	313,6	9,3	1,8	2	107,7	31,0
104	167,4	16,4	9,4	311,7	6,2	1,8	2	106,0	52,3
105	199,9	20,2	10,3	307,8	8,3	1,8	2,1	105,4	12,2
106	106,8	12,2	5,6	312,5	9,3	1,8	2	107,3	12,2
107	126,5	15,3	7,7	306,6	9,0	1,8	2,1	105,2	11,4
108	160,8	21,7	8,2	306,6	9,4	1,8	2,1	105,4	12,2
109	207,4	28,8	17,8	292,3	9,5	1,8	2,1	100,6	6,4
110	244,7	33,0	21,4	268,6	9,8	1,5	2,1	92,8	12,2
111	281,9	35,6	22,4	261,2	10,2	1,5	2,1	90,5	12,2
112	233,0	29,1	17,7	266,4	10,3	1,6	2	92,3	18,2

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

113	201,9	29,0	18,1	265,6	10,2	1,6	2,1	92,1	49,2
114	229,9	31,1	19,7	273,1	10,1	1,6	2,1	94,6	49,6
115	267,9	35,8	24,4	240,0	9,7	1,6	2,1	83,3	18,2
116	315,6	40,4	28,9	232,4	9,5	1,6	2,1	81,0	95,9
117	462,3	45,4	31,9	234,7	10,0	1,6	2,1	82,0	107,7
118	572,3	43,6	28,8	241,9	10,3	1,7	2	84,5	107,7
119	578,6	42,5	28,2	242,5	10,4	1,8	2	84,6	75,7
120	610,2	44,6	28,7	243,5	10,1	1,8	2	84,7	37,4
121	586,5	43,5	27,1	247,5	9,9	1,8	1,9	86,0	37,4
122	537,1	40,9	25,1	258,4	10,0	1,9	2	89,6	37,4
123	603,2	41,9	26,1	268,7	9,9	1,8	2	92,9	5,8
124	579,3	38,4	24,6	267,2	10,6	1,7	2	92,6	16,8
125	490,6	39,3	26,6	251,3	10,7	1,8	2	87,4	21,7
126	358,6	45,0	30,1	241,8	10,7	1,8	2,1	84,3	31,7
127	376,7	45,3	30,8	240,9	10,6	1,8	2,1	84,0	34,0
128	392,5	43,8	30,1	229,3	10,5	1,8	2,1	80,1	46,3
129	426,7	47,0	32,8	220,3	9,9	1,8	2,1	76,9	46,0
130	458,2	50,4	34,6	221,1	9,8	1,8	2	77,2	46,3
131	415,9	47,8	30,8	218,1	10,1	1,9	2,2	76,2	46,3
132	497,8	50,7	31,6	212,6	10,2	1,9	2,4	74,5	64,2
133	506,8	49,7	31,4	208,3	10,1	3,4	3,7	73,0	46,3
134	502,9	53,0	34,5	212,2	10,3	4,2	4,5	74,3	48,6
135	457,1	53,3	36,6	198,8	10,4	2	2,4	69,9	48,6
136	468,5	54,7	34,1	189,9	9,9	2	2,3	66,7	36,4
137	688,3	59,4	37,3	202,4	9,7	2	2,3	70,9	48,6
138	728,4	60,2	36,5	205,7	10,3	2	2,4	72,2	48,6
139	672,2	62,5	39,6	196,9	10,2	2	2,3	69,2	36,4
140	653,9	58,2	40,0	204,9	9,9	2,2	2,4	71,7	36,4
141	642,4	56,6	42,4	203,8	9,8	1,8	2,1	71,3	36,4
142	598,3	55,6	41,8	196,7	9,7	1,8	2,2	68,9	30,4
143	577,3	52,2	39,0	198,9	9,5	1,8	2,2	69,6	30,4
144	549,2	50,2	41,9	195,2	9,2	1,8	2,2	68,4	60,8
145	598,5	48,2	42,2	189,0	9,2	1,8	2,1	66,3	55,0
146	675,2	48,9	36,5	195,9	9,5	2	2,3	68,7	55,0
147	649,3	54,0	36,9	198,3	10,2	1,9	2,2	69,7	60,8
148	483,1	52,2	26,5	235,9	10,6	1,9	2,1	82,4	60,8
149	305,7	33,5	18,3	321,6	8,4	2,1	2,4	110,1	12,2
150	361,2	44,8	29,0	237,8	8,2	4,1	4,5	82,1	24,8
151	390,7	50,1	33,5	224,3	8,5	4,9	5,1	77,8	36,4
152	391,8	56,5	38,3	216,5	8,8	3,8	3,9	75,2	24,8
153	444,1	57,2	40,6	213,7	9,2	1,9	2,2	74,4	21,9
154	474,4	56,5	39,8	220,3	9,6	2,3	2,6	76,8	34,7
155	477,0	57,5	40,0	218,6	10,0	1,8	2,1	76,4	49,2
156	472,5	52,4	34,6	215,6	10,1	1,8	2,1	75,5	72,0
157	428,3	54,8	38,5	195,2	9,7	1,8	2,2	68,6	92,7
158	459,4	58,1	41,0	204,4	9,6	1,8	2	71,7	92,7
159	418,4	50,9	35,9	212,5	10,0	1,8	2,1	74,5	82,8
160	335,8	47,3	36,0	237,5	10,3	1,8	2,4	82,9	82,8
161	263,1	37,1	26,7	278,5	10,0	1,8	2,4	96,3	36,4
162	186,3	29,5	19,9	302,2	9,1	1,8	2,1	103,9	34,3
163	98,7	11,8	5,8	318,4	5,7	1,8	2,1	108,0	52,3
164	168,4	20,3	11,8	310,0	6,1	1,8	2,1	105,4	52,3
165	228,7	27,3	18,4	291,4	7,3	1,8	2,4	99,7	34,3
166	201,8	25,5	18,5	269,3	8,1	1,8	2,4	93,2	181,9
167	259,6	30,7	19,0	304,1	8,4	1,8	2,1	104,5	80,8
168	254,4	31,7	21,1	297,4	8,5	1,8	2,3	102,3	76,2
169	199,9	24,2	15,5	298,1	8,7	1,8	2	102,5	70,4
170	213,4	22,8	12,8	296,8	7,7	1,8	2,1	101,8	75,3
171	279,7	29,9	19,3	301,8	8,4	1,8	2,3	103,7	69,5

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

172	302,5	32,9	21,5	302,7	8,9	1,7	2,2	104,0	34,3
173	409,5	37,6	25,6	278,9	9,7	1,5	2,1	96,4	52,3
174	405,9	41,7	28,2	263,2	10,1	1,7	2,1	91,4	67,9
175	530,0	46,7	30,6	259,3	10,2	2	2,4	90,0	51,3
176	741,4	48,0	28,9	243,7	10,2	2	2,5	85,0	87,7
177	735,2	49,8	34,4	222,8	10,1	2,3	3,1	77,8	57,1
178	723,5	51,7	35,5	212,0	9,6	1,8	2,3	74,1	51,3
179	798,1	57,6	38,2	215,8	9,3	1,8	2,2	75,3	63,5
180	685,6	57,0	36,7	219,4	9,7	1,8	2,2	76,6	62,9
181	424,7	54,3	34,8	214,3	9,9	1,8	2,2	74,9	51,3
182	418,2	53,9	33,5	232,1	10,0	1,9	2,4	81,0	73,2
183	454,7	53,8	32,3	226,5	10,1	1,8	2,1	79,2	75,5
184	485,1	54,1	33,1	206,9	10,3	1,7	2,1	72,8	92,7
185	417,8	56,1	36,4	191,1	10,2	1,8	2,2	67,4	86,3
186	439,2	59,6	38,3	203,1	10,2	1,8	2,4	71,5	92,7
187	468,8	59,0	39,3	201,3	10,6	1,8	2,3	71,0	92,7
188	521,1	56,7	37,6	204,6	11,2	1,8	2,1	72,2	81,1
189	488,0	55,1	37,4	203,8	11,6	1,8	2,3	72,1	82,8
190	557,3	60,8	38,3	202,1	11,7	1,8	2,3	71,6	82,8
191	544,0	58,4	36,9	200,7	11,6	1,8	2,2	71,0	71,1
192	616,7	53,7	37,7	198,4	11,3	1,8	2,1	70,2	82,8

*manjkajoče podatke koncentracij smo nadomestili s povprečnimi vrednostmi vseh dosegljivih podatkov za posamezen parameter za 192 dni (od 11. 9. 2009 do 21. 3. 2010)