

Regulacija nitratov na pilotni napravi Centralne čistilne naprave Domžale-Kamnik

Aljaž Stare, Darko Vrečko, Damir Vrančič, Nadja Hvala, Barbara Brajer Humar*
Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana
*Centralna čistilna naprava Domžale-Kamnik, Študljanska 91, 1230 Domžale
aljaz.stare@ijs.si, darko.vrecko@ijs.si, damir.vrancic@ijs.si, nadja.hvala@ijs.si,
barbara@ccn-domzale.si

Control of nitrate nitrogen in Domžale-Kamnik wastewater treatment pilot plant

The paper addresses the design of PI controller for control of denitrification process. During normal operating conditions the controller increases the internal recirculation flow-rate to achieve high denitrification rate. During abnormal operating conditions (rain, holidays) it keeps internal recirculation low because of low influent C/N ratio. Testing on the real pilot plant showed that in this way lower effluent total nitrogen concentration can be achieved.

1 Uvod

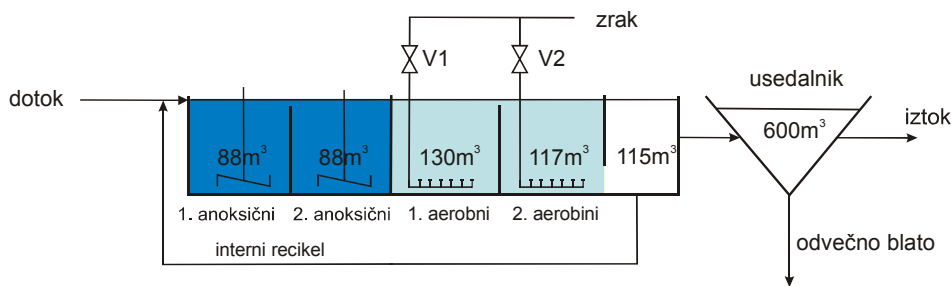
Sodoben trend čiščenja odpadnih voda zahteva kvalitetno odstranjevanje nutrientov (dušikovih snovi) v odpadni vodi. Odstranjevanje nutrientov dosežemo v aerobnih in anoksičnih bazenih čistilne naprave pri procesih nitrifikacije in denitrifikacije. Procesa sta medsebojno povezana ter stroškovno zahtevna zaradi porabe električne energije pri prezračevanju in črpanju odpadne vode iz aerobnih v anoksične bazene ter zaradi dodajanja kemikalij (vira ogljika) pri procesu denitrifikacije. Vodenje procesa nitrifikacije smo že predstavili [1]. V tem prispevku podrobneje obravnavamo vodenje procesa denitrifikacije predvsem s stališča vpliva tega procesa na skupni dušik na iztoku.

Vodenje procesa denitrifikacije lahko poteka na različne načine v smislu izbranih reguliranih

in reguliranih veličin, kot tudi izbranega algoritma vodenja. Regulirne veličine so lahko interni recikel [2] ali zunanji vir ogljika [3], regulirane veličine pa so koncentracija nitratov v zadnjem aerobnem bazenu ali zadnjem anoksičnem bazenu [4]. Postopki vodenja so lahko enostavni PI algoritmi ali bolj zahtevni algoritmi vodenja, kot je krmiljenje z upoštevanjem motnje [5] in prediktivno vodenje [6]. Medtem ko so v literaturi predlagani različni pristopi vodenja procesa denitrifikacije, pa sta v praksi interni recikel in dodajanje vira ogljika pogosto kar konstantna in se dinamično ne spreminjata. V prispevku smo s simulacijo analizirali vpliv internega recikla na proces denitrifikacije in načrtali PI regulator, ki smo ga preizkusili na pilotni čistilni napravi v Centralni čistilni napravi Domžale-Kamnik.

2 Opis procesa

Shema pilotne čistilne naprave prikazuje Slika 1. Biološka razgradnja dušikovih snovi poteka v anoksičnih in aerobnih bazenih čistilne naprave. Pri procesu nitrifikacije se amonijev dušik ($\text{NH}_4\text{-N}$) v aerobnih bazenih s pomočjo avtotrofnih mikroorganizmov pretvori v nitratni dušik ($\text{NO}_3\text{-N}$). Pri procesu denitrifikacije pa se nitratni dušik v anoksičnih bazenih pretvori v plinasto dušikovo obliko s pomočjo heterotrofnih mikro-organizmov. Poleg nitratnega dušika pa heterotrofi za svojo rast potrebujejo tudi organske snovi, ki dotekajo v napravo. Če teh snovi na dotoku primanjkuje, je potrebno dodajati zunanji vir ogljika.



Slika 1: Pilotna čistilna naprava.

Uspešnost čiščenja odpadne vode ocenjujemo preko koncentracije skupnega dušika na iztoku (TN), katere maksimalna vrednost je tudi zakonsko predpisana. Pomembnejši komponenti skupnega dušika na iztoku sta amonijev in nitratni dušik. V našem primeru nas je zanimalo, ali z učinkovitejšim vodenjem procesa denitrifikacije lahko izboljšamo koncentracijo nitratnega dušika in s tem tudi skupnega dušika na iztoku. Izbrana krmilna veličina procesa je interni recikel, ki dovaja nitratni dušik iz aerobnih v anoksične bazene.

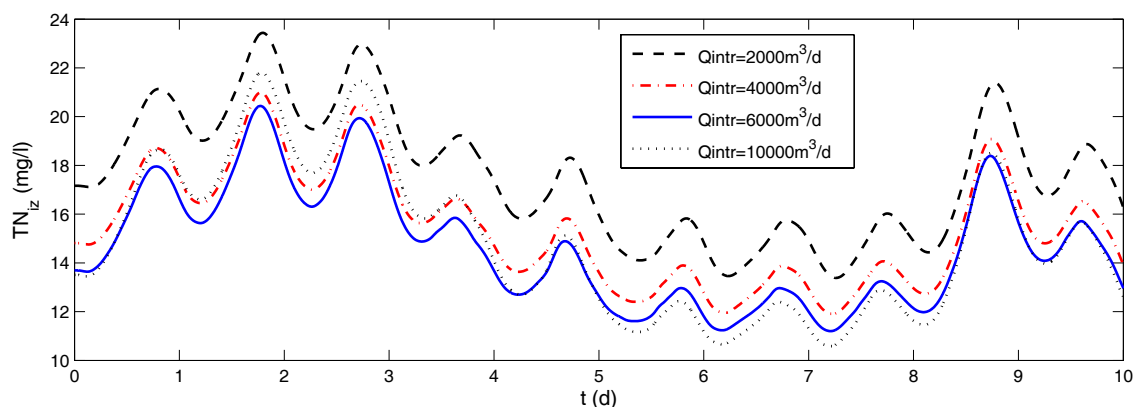
3 Načrtovanje regulacije s simulacijo

S simulacijo smo na modelu procesa ugotavljali vpliv internega recikla (Q_{intr}) na proces denitrifikacije in skupni dušik na iztoku naprave ter načrtali dinamični PI regulator, ki regulira koncentracijo nitratov v zadnjem anoksičnem bazenu z vplivanjem na interni recikel.

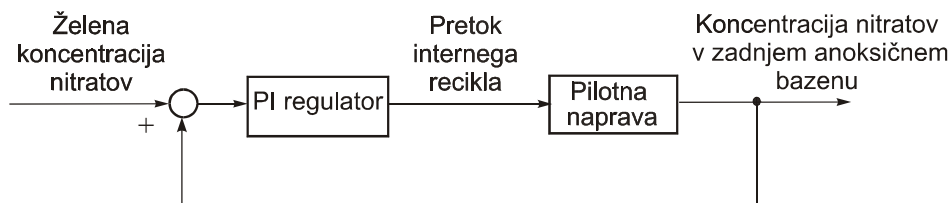
3.1 Simulacijske analize

Simulacijske analize smo izvedli na modelu procesa, ki smo ga predhodno kalibrirali na osnovi realnih meritev na napravi v obdobju od 14.-24.10.2006. Analize smo izvedli pri enakih pogojih obratovanja, spreminjali smo le pretok internega recikla.

Slika 2. prikazuje vpliv internega recikla na skupni dušik na iztoku naprave pri različnih pretokih internega recikla. Iz rezultatov opazimo, da v obdobju od 5.-8. dne dosežemo najnižjo koncentracijo skupnega dušika pri maksimalnem internem reciklu. V obdobju od 1.-3. dne pa prevelik Q_{intr} ni smiselno. Analize dotoka so pokazale, da v tem obdobju primanjkuje organskih snovi na dotoku, zato se pri maksimalnem internem reciklu nitrat, ki ga povračamo iz aerobnih bazenov, ne razgradi v celoti. Ker visok interni recikel še dodatno razredči organsko snov na dotoku, je v tem obdobju smiselno znižati interni recikel. Rezultati torej kažejo, da je potrebno interni recikel dinamično spreminjati v skladu s pogoji



Slika 2: Skupni dušik na iztoku naprave pri različnih pretokih internega recikla Q_{intr} .



Slika 3: Regulacija nitratov v zadnjem anoksičnem bazenu z vplivanjem na pretok internega recikla.

obratovanja procesa.

3.2 PI regulator nitratov

Za dinamično vodenje procesa denitrifikacije smo načrtali PI regulator. Regulirna veličina je interni recikel, regulirana veličina pa koncentracija nitratov v zadnjem anoksičnem bazenu (S_{NO_2}) (Slika 3). Ob spremljanju obratovanja pilotne naprave se je pokazalo, da je izbira slednje bolj smiselna kot izbira koncentracije nitratov v zadnjem aerobnem bazenu, saj koncentracija nitratov v zadnjem anoksičnem bazenu direktno kaže, v kolikšni meri so se nitrati odstranili pri procesu denitrifikacije. Visoka koncentracija S_{NO_2} pomeni, da nitratov ni možno odstraniti v celoti zaradi pomanjkanja vira ogljika na dotoku. Takrat se interni recikel zniža, saj visok interni recikel še dodatno redči organsko snov na dotoku. Z vzdrževanjem S_{NO_2} blizu določene nizke vrednosti tako dosežemo povračanje nitratov v anoksične bazene, ki je skladno z razpoložljivim virom ogljika na dotoku.

Regulator nitratov smo načrtali kot diskretni PI regulator z zaščito pred integralskim pobegom [4], saj je interni recikel na napravi omejen med minimalno in maksimalno vrednostjo. Enačba regulatorja je:

$$u(k) = K_p \left(e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=1}^k e(j) \right) - \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} (u(j) - u_{lim}(j)) \quad (1)$$

$$u_{lim}(k) = \begin{cases} u_{min}, & \text{če } u(k) < u_{min} \\ u(k), & \text{če } u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \\ u_{max}, & \text{če } u(k) > u_{max} \end{cases} \quad (2)$$

Parameter K_p je proporcionalno ojačenje regulatorja, T_i je integrirna časovna konstanta, T_s čas vzorčenja, e regulacijski pogrešek

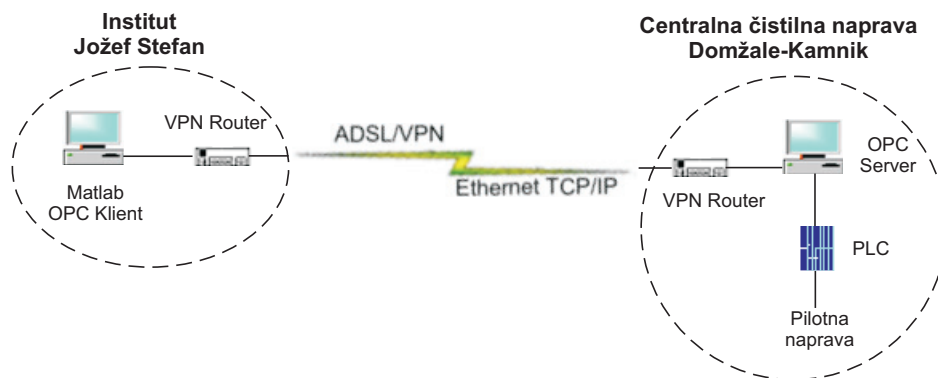
(razlika med referenčno in izmerjeno vrednostjo koncentracije nitratov v zadnjem anoksičnem bazenu), u_{min} in u_{max} pa sta minimalna in maksimalna vrednost regulirne veličine (pretoka internega recikla). Prvi člen v enačbi (1) opisuje PI algoritem in drugi zaščito pred integralskim pobegom. Ta zaščita preprečuje oscilacije PI regulatorja, ki lahko nastanejo zaradi omejitev regulirne veličine [7].

Pri vodenju na realni pilotni napravi je regulirna veličina frekvenca črpalke internega recikla. Ta je omejena med 20-50 Hz, kar je ekvivalentno pretoku internega recikla med 500-5200 m³/d. Pri danem zadrževalnem času v času testiranja 8 ur (vhodni pretok Q_{in} 1272 m³/d) se torej interni recikel giblje med 0.4-4 kratnim vhodnim pretokom. Izbrani parametri regulatorja so bili $K_p=2$, $T_i=3600s$, zelena vrednost S_{NO_2} pa 1 mg/l.

4 Implementacija vodenja na napravi

Regulacijo smo testirali s pomočjo podatkovne povezave med Institutom Jožef Stefan (IJS) in Centralno čistilno napravo Domžale-Kamnik (CČND), ki je prikazana na sliki 4. Kot vidimo smo IJS in CČND medsebojno povezali z VPN (Virtual Private Network) povezavo. Program, ki teče v Matlabu na računalniku na IJS, uporablja OPC (OLE for Process Control) za Matlab, s katerim komunicira preko interneta z OPC strežnikom na računalniku na CČND.

OPC strežnik na CČND je povezan s pilotno napravo preko PLC (Programmable Logical Controller) krmilnika. V Matlabu je bil sprogramiran regulator nitratov, ki je preko OPC strežnika v krmilnik posredoval frekvenco črpalke internega recikla. Komunikacija med



Slika 4: Podatkovna poveza med IJS in CČND.

IJS in CČND je potekala v realnem času, pri čemer se vsakih 20 sekund preberejo podatki iz pilotne naprave ter izračuna nova vrednost frekvence internega recikla.

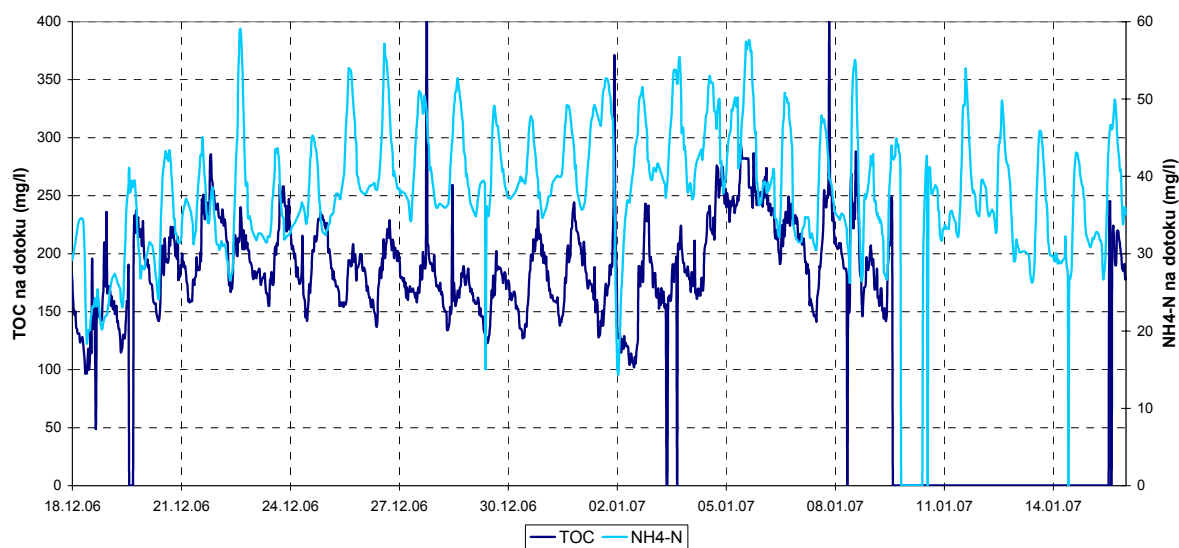
5 Testiranje na pilotni napravi

Delovanje regulatorja smo preizkusili na realni pilotni napravi. Sliki 5 in 6 prikazujeta rezultate regulacij v obdobju od 18.12.2006-16.1.2007. Slika 5 prikazuje koncentracije na dotoku, slika 6 pa dosežene rezultate vodenja in potek regulirne veličine. Iz slike 6 vidimo, da se je ob vklopu regulatorja interni recikel povečal na maksimalno vrednost, s tem pa se je koncentracija nitratov v anoksičnem bazenu znižala na vrednost 0. Zaradi omejitve regulirne veličine regulator ni uspel regulirati koncentracije nitratov na 1mg/l. V tem obdobju je bil skupni dušik na iztoku približno enak 10 mg/l, kar je zakonsko predpisana maksimalna vrednost za čistilne naprave na občutljivem področju.

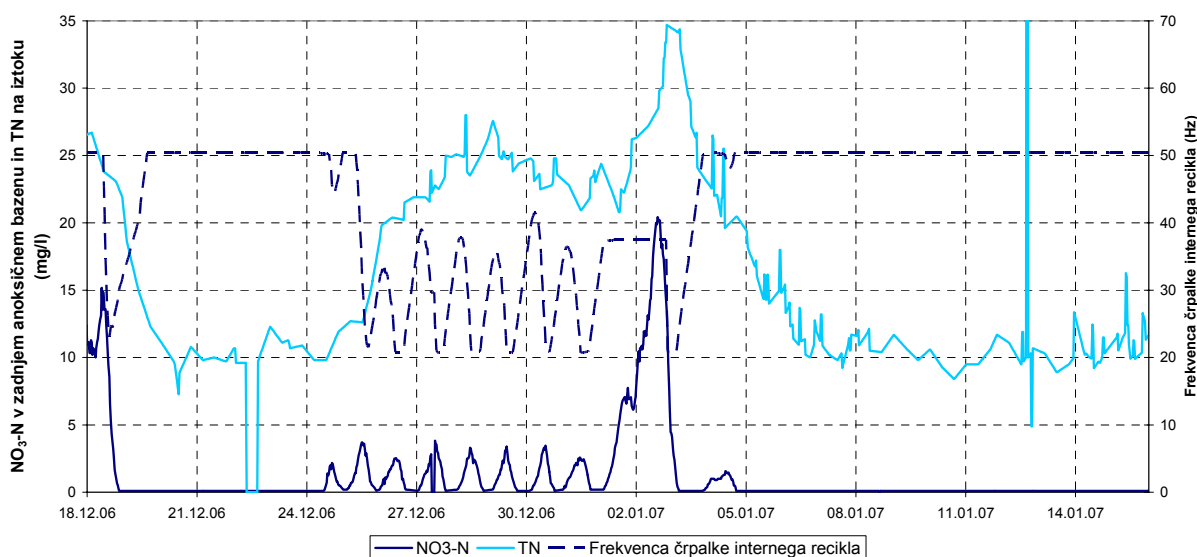
V obdobju od 24.12.2006 do 5.1.2007 je regulator znižal pretok internega recikla in ga spreminjal tako, da je bila dosežena zelena vrednost koncentracije nitratnega dušika 1 mg/l. Kot je razvidno iz slike 6, se je ob tem koncentracija skupnega dušika na iztoku zvišala do vrednosti 20-25 mg/l. Vzrok za to je neugodno razmerje C/N na dotoku, saj vidimo (slika 5), da je bila v tem obdobju koncentracija amonijevega dušika na dotoku visoka, koncentracija organskega ogljika (TOC) pa nizka. Vzrok za tako spremembo razmerja so novoletni prazniki, ko nekateri onesnaževalci ne

obratujejo, podobno razredčenje organskih snovi na dotoku pa se občasno pojavlja tudi ob dežju in drugih izrednih dogodkih. V obdobju praznikov tudi opazimo, da je prišlo do izpada regulacije (okoli 2.1.2007) in je bil pretok internega recikla dalj časa konstanten (37.5 Hz oz. 3600 m³/d, kar je približno 3-kratna vrednost vhodnega pretoka). V tem obdobju je koncentracija skupnega dušika na iztoku narasla do vrednosti 35 mg/l, koncentracija nitratnega dušika v zadnjem anoksičnem bazenu pa do vrednosti 20 mg/l, kar kaže na to, da je bil pretok internega recikla previsok. Zaradi višjega internega recikla in posledično razredčene koncentracije TOC v anoksičnih bazenih se je v tem obdobju odstranilo zelo malo nitratnega dušika. Iz tega lahko sklepamo, da je vpeljava vodenja nitratnega dušika na napravi pomembna.

V zadnjem obdobju (po praznikih) se je pretok internega recikla zaradi višjega C/N razmerja na dotoku ponovno povečal (v odboju od 10.1.2007 dalje ni podatkov za amonijev dušik na dotoku zaradi izpada senzorja), koncentracija TN na iztoku pa znižala do vrednosti 10 mg/l. Primerjava z obratovanjem pri podobnih vhodnih obremenitvah in obratovalnih pogojih ter nižjem 2.3 kratnem konstantnem vhodnem pretoku v novembru 2006 kaže, da se je na ta način skupni dušik na iztoku v povprečju zmanjšal za približno 3 mg/l (Tabela 1). Primerjalni podatki o pretoku zraka za prezračevanje aerobnih bazenov tudi nakazujejo, da se ob vodenju procesa denitrifikacije zmanjša pretok zraka, s tem pa znižajo stroški porabe električne energije za



Slika 5: Koncentracija skupnega organskega ogljika (TOC) in amonijevega dušika (NH₄-N) na dotoku.



Slika 6: Koncentracija nitratov (NO₃-N) v zadnjem aerobnem bazenu, skupni dušik (TN) na iztoku naprave in frekvenca črpalke internega recikla.

prezračevanje aerobnih bazenov. Z dinamičnim vodenjem procesa denitrifikacije se namreč organska snov v večji meri porabi v anoksičnih razmerah in ne prehaja v aerobne bazene, kjer je za njihovo razgradnjo potreben tudi kisik. Navedenih ugotovitev pri testiranju na napravi doslej še nismo mogli povsem potrditi, saj na pretok zraka vplivajo tudi drugi pogoji (koncentracija amonijevega dušika na dotoku, koncentracija kisika v aerobnih razmerah, temperatura), zato je težko zagotoviti povsem

enakovredne pogoje za primerjavo. V danem primeru v Tabeli 1 je lahko nižji pretok zraka posledica tudi nižje temperature odplake, ki poveča topnost kisika v vodi.

6 Zaključek

V prispevku smo obravnavali vodenje procesa denitrifikacije s ciljem izboljšanja skupnega dušika na iztoku čistilne naprave. S simulacijo smo analizirali vpliv internega recikla na odstranjevanje skupnega dušika in

Tabela 1. Primerjalni rezultati (povprečne vrednosti) obratovanja pilotne naprave pri dveh različnih vrednostih internih reciklov.

Obdobje	Temp. [°C]	Frekvenca internega recikla [Hz]	Konc. kisika v 1. aerobnem bazenu [mg/l]	Konc. kisika v 2. aerobnem bazenu [mg/l]	NH ₄ -N na dotoku [mg/l]	Pretok zraka [m ³ /h]	NO ₃ -N v zadnjem anoksičnem bazenu [mg/l]	NH ₄ -N v zadnjem aerobnem bazenu [mg/l]	TN na iztoku [mg/l]
24.11.-1.12.2006	16.51	33 (2.3 Q_{in})	5.96	7.93	37.20	1727	0.42	0.07	13.06
8.1.-15.1.2007	13.48	52 (4 Q_{in})	6.01	7.96	36.41	1307	0.10	0.17	10.30

načrtali PI regulator, ki regulira koncentracijo nitratov v anoksičnih bazenih in s tem skrbi za čim bolj optimalni potek denitrifikacije.

Tako simulacija kot tudi testiranje na realni pilotni čistilni napravi so pokazali na potrebo po dinamičnem vodenju internega recikla zaradi spremenljive sestave odpadne vode na dotoku. Sestava vhodne odplake (t.j. pomanjkanje vira ogljika v odpadni vodi) je problematična ob določenih dogodkih na napravi, ko zaradi vremenskih razmer (dež) ali izpada določenih onesnaževalcev (prazniki) pride do znižanja C/N razmerja na dotoku. V takem primeru PI regulator poskrbi za znižanje internega recikla, saj visok interni recikel v tem primeru povzroči še dodatno znižanje tega razmerja. V normalnih obratovalnih razmerah pa regulator poveča interni recikel in s tem zagotovi zadostno povračanje nitratov iz aerobnih v anoksične bazene. V danem primeru čistilne naprave smo na ta način v obdobju normalnih obratovalnih pogojev zmanjšali skupni dušik na iztoku za približno 4 mg/l in dosegli ciljno koncentracijo 10 mg/l, ki je tudi zakonsko predpisana. Odstranjevanje skupnega dušika bi lahko še nekoliko izboljšali, če bi bila zgornja meja pretoka internega recikla nekoliko višja.

Rezultati torej kažejo, da je potrebno dinamično vodenje procesa denitrifikacije, za še boljše učinke v smislu znatnega znižanja skupnega dušika na iztoku pa bi bilo potrebno tudi dodajanje vira ogljika na dotoku, saj pri nizkem C/N razmerju z dinamičnim spreminjanjem pretoka internega recikla le

omilimo zvišanje izhodne koncentracije TN, ne moremo pa ga preprečiti. Delovanje regulacijskih algoritmov bi ob velikih časovnih zakasnitvah v procesu in zakasnitvah senzorjev lahko dodatno izboljšali s krmiljenjem z upoštevanjem merljivih motenj na dotoku.

7 Literatura

- [1] Vrečko, D., Hvala, N., Stare, A., Burica, O., Stražar, M., Levstek, M., Podbevšek, S., Cerar, P. (2004). Optimizacija odstranjevanja amonijevega dušika v čistilni napravi z uporabo novih merilnikov in postopkov vodenja. Zbornik referatov Vodni dnevi, str. 70-79.
- [2] Yuan, Z., Oehmen, A. in Ingildsen, P. (2002). Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems. Water Science and Technology 45(4-5), 29-36.
- [3] Samuelsson, P. in Carlsson, B. (2001). Feedforward control of the external carbon flow rate in an activated sludge process. Water Science and Technology, 43, 1, 115-122.
- [4] Sotomayor, O.A.Z., Park, S.W. in Garcia, C. (2000). Nitrate concentration-based control of a predenitrifying activated sludge systems. Proc. ADCHEM 2000, Pisa, 213-218.
- [5] Vrečko, D., Hvala, N. and Carlsson, B. (2001). Feedforward-feedback control of an activated sludge process-a simulation study. Water Science and Technology, 47, 12, 19-26.
- [6] Stare, A., Vrečko, D., Hvala, N. in Strmčnik, S. (2007). Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs. Water Research (to be published).
- [7] Peng, Y., Vrančić, D. in Hanus, R. (1996). Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers. Control syst. mag., 16, 48-57.