

AVVÄGNING MELLAN VATTENKVALITET, VÄXTHUSGASUTSLÄPP OCH DRIFTSKOSTNAD – UTVECKLING AV DYNAMISKA MODELLER FÖR INTEGRERAD BENCHMARKING AV AVLOPPSRENINGSVRK

Balancing effluent quality, greenhouse gas emissions and operational cost – developing dynamical models for integrated benchmarking of wastewater treatment plants

av MAGNUS ARNELL^{1,2}, ULF JEPSSON¹

1 Institutionen för Mätteknik och Industriell Elektroteknik, Avdelningen för Industriell Elektroteknik & Automation, Lunds Universitet, Box 118, 221 00 Lund, Sverige, e-post: ulf.jepsson@iea.lth.se

2 Urban Water Management AB, Gjuterigatan 1D, 582 73 Linköping, Sverige, e-post: magnus.arnell@urbanwater.se



Abstract

The scope for wastewater treatment plants (WWTPs) widens to consider not only water quality and cost, but also energy efficiency and greenhouse gas (GHG) emissions. The on-going research project, "Development and dynamic analysis of operational strategies for enhanced energy efficiency of wastewater treatment systems" aims to develop a tool for integrated evaluation of energy efficiency and greenhouse gas (GHG) emissions with effluent quality and operational costs. The tool will build on the comprehensive Benchmark Simulation Model no. 2. It will be extended with models for: *i*) production and emission of CO₂, N₂O and CH₄ and *ii*) calculation of energy consumption and production at the plant. Here, a first attempt is presented together with a case where different set-points of dissolved oxygen, DO, in the aeration-tanks are simulated. The simulation results show that lowering the DO set-point from 2 mg l⁻¹ to 1 mg l⁻¹ reduces the CO₂-emissions by 570 kg d⁻¹, a reduction from 30,500 kg CO₂ d⁻¹ emitted from the plant at 2 mg DO l⁻¹. However, at the same time this slightly increases the effluent discharge. Moreover, due to increased nitrite accumulation in the aeration tank, the N₂O emissions increase by 12,500 kg carbon dioxide equivalents, CO_{2e} d⁻¹, which dramatically exceeds the reduction due to lowered power generation. Accordingly the total GHG-emissions are reduced by an increase of the DO set-point to 3 mg l⁻¹, but the reduction is insignificant and the increased operational cost disproportional to the improvements in the emissions. The conclusion is that, to meet multi-objective goals, integrated benchmarking of the three criteria is essential.

Key words – wastewater treatment, benchmarking, automatic control, greenhouse gas emissions, modelling, simulation, energy efficiency

Sammanfattning

Kraven ökar på avloppsreningsverken att, utöver att uppfylla befintliga och ständigt strängare reningskrav, också effektivisera anläggningarna med avseende på energi och driftskostnader. Klimatdebatten sätter nu också fokus på reningsverkens växthusgasutsläpp. Ett pågående forskningsprojekt, »Utveckling av operationella strategier och dynamiskt analysverktyg med fokus på energieffektivisering av avloppsreningsverk», har som mål att utveckla dynamiska metoder och modeller för att utvärdera energieffektivitet och växthusgasutsläpp integrerat med utgående vattenkvalitet och driftskostnader för avloppsreningsverk. Den omfattande Benchmark Simulation Model no.2, som beskriver ett standardiserat avloppsreningsverk, ska utvecklas med mekanistiska modeller för: *i*) produktion och utsläpp av CO₂, N₂O och CH₄ och *ii*) detaljerad beräkning och utvärdering av energieffektivitet. En första ansats av modellen presenteras här tillsammans med ett exempel där simuleringar har gjorts med olika börvärden för syre i aktivslamsteget. Resultaten visar att en minskad syrehalt från 2 mg l⁻¹ till 1 mg l⁻¹ reducerar CO₂-utsläppen från energiproduktion med 570 kg CO₂ d⁻¹, att jämföra med 30 500 kg CO₂ d⁻¹ för hela reningsverket vid 2 mg O₂ l⁻¹. Det medför dock en något försämrad kvalitet på utgående vatten. Minskningen överskuggas emellertid helt av lustgasutsläppen som ökar med 12 500 kg koldioxidekvivalenter, CO_{2e}, per dygn beroende på förhöjd nitritihalt i luftningsbassängerna. En ökning av syrebörvärdet till 3 mg l⁻¹ minskar analogt totalutsläppen av CO_{2e} men skillnaden är liten och ökningen i driftskostnad oproportionerligt stor. Studien visar på potentialen i att utföra integrerad utvärdering baserad på tre olika kriterier genom simuleringsstudier över långa tidsserier.

1 Inledning

Avloppsreningsverkens huvudsakliga fokus har traditionellt varit hygien och vattenkvalitet, begränsat av vad som varit tekniskt möjligt och ekonomiskt försvarbart. Det gäller fortfarande men de senaste åren har ökat fokus också riktats mot frågor om energieffektivitet, energiproduktion, växthusgasutsläpp och hållbarhet i vid bemärkelse (Lingsten et al., 2011; Foley et al., 2010; Hofman et al., 2011). Detta har vidgat utmaningarna för avloppsreningsverken som tvingas försöka minska klimatpåverkan samtidigt som kraven på utgående vatten ökar. Det krävs nya verktyg och angreppssätt för att mäta och utvärdera dessa variabler integrerat.

Innehåll och kvalitet på inkommande avloppsvatten varierar ständigt och går inte att styra, tillsammans med skiftande omgivande villkor, såsom temperatur och nederbörd, blir avloppsrening en i högsta grad dynamisk process. Därtill gör komplexiteten i moderna avloppsreningsverk med många sammankopplade delprocesser, returflöden m.m., att det är nödvändigt att beakta hela verket för att undvika suboptimering och oönskade följdverkningar (Olsson och Newell, 1999; Nopens et al., 2010). Denna osäkerhet och komplexitet gör avloppsreningsverk särskilt lämpade för automatisk reglering, vilket har visats i omfattande studier och fullskaleförsök. För att göra jämförelser (benchmarking) av styr- och reglerstrategier och utvärdera resultaten av dessa har matematiska modeller av avloppsreningsverk använts (Spanjers et al., 1998; Corominas et al., 2006). Även för utvärdering inför fullskaleimplementationer har modellering och simulering av avloppsreningsverk framgångsrikt använts (Ayesa et al., 2006). Nämda studier fokuserar i huvudsak på vattenkvalitet och ekonomi medan det är få studier som också väger in energieffektivitet och klimatpåverkan i utvärderingen. En första ansats har publicerats av Flores-Alsina et al. (2011) och resultat med den modellen av Flores-Alsina et al. (2012a;b).

Denna artikel ämnar dra upp huvuddragen för det pågående forskningsprojekt, »Utveckling av operationella strategier och dynamiskt analysverktyg med fokus på energieffektivisering av avloppsreningsverk», där vi tillsammans med Uppsala Universitet och IVL Svenska Miljöinstitutet ämnar utveckla metoder och modeller för att utvärdera utgående vattenkvalitet, växthusgasutsläpp, energieffektivitet och driftskostnader för avloppsreningsverk. Vår forskningsgrupp är också delaktiga i det nystartade EU-forskningsprojektet SANITAS som finansierar två doktorander vid Lunds universitet inom närliggande forskningsområden.

Första versionen av plattformen presenteras här tillsammans med ett enkelt exempel som visar på den motsägelse som ibland finns och avvägning som måste göras för att nå optimal drift. Vi vill här visa på möjligheterna

med att använda modellering som ett verktyg för att minska växthusgasutsläpp utan att ge avkall på vattenkvalitet och kostnads- och energieffektivitet.

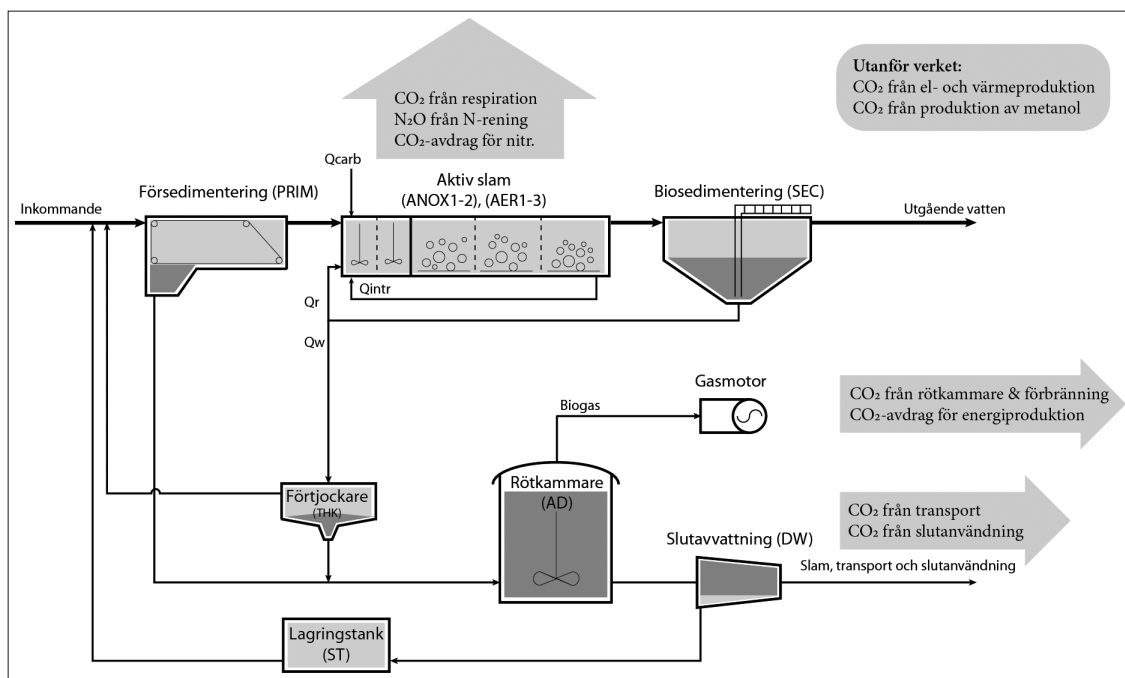
2 Metod

Benchmark Simulation Model no. 2 (BSM2) är ett omfattande protokoll för att implementera, analysera och utvärdera existerande och nya styrstrategier för avloppsreningsverk. BSM2 består av en komplett uppsättning dynamiska matematiska modeller för ett generellt reningsverk, ett standardiserat simuleringsförfarande och en uppsättning utvärderingskriterier. Detta möjliggör rättvisa och objektiva jämförelser av styr- och reglerstrategier. Nedan följer en beskrivning av en utveckling av BSM2 där modeller och utvärderingsmetoder för växthusgasutsläpp inkluderats, BSM2G, där G noterar greenhouse gas.

2.1 Beskrivning av reningsverket

Reningsverket i systemet (BSM2G) har samma utformning som reningsverket i BSM2, beskrivet av Nopens et al. (2010), figur 1. Aktivtamlanläggningen är en traditionell fördenitrifikationsanläggning med fem tankar i serie. Tank 1 och 2 (ANOX 1 & 2) är anoxiska med en volym på $2 \times 1500 \text{ m}^3$, tank 3, 4 och 5 (AER 1–3) är aeroba med en total volym på 9000 m^3 . AER3 och ANOX1 är sammankopplade med en nitratreturpumpning. I vattenlinjen ingår också en försedimentering (PRIM) och en cirkulär sedimentering av bioslam (SEC) på 6000 m^3 med en area på 1500 m^2 . I slamlinjen förtjockas bioslammet i en förtjockare (THK) och rötas sedan tillsammans med primärslammet i en rötkammare (AD), rötresten avvattnas i en avvattningsenhet (DW) och rejektet återförs till vattenlinjen med möjlighet till mellanlagring i en rejektvattentank (ST). Biogasen förbränns i en gasmotor med kombinerad el- och värmeproduktion.

Originaluppsättningen av modeller med Activated Sludge Model no. 1 (ASM1) (Henze et al., 2000) har byggts på med modeller för att beskriva lustgasproduktionen i biologin. Hiatt och Gradys (2008) modell med tvåstegsnitrifikation (ammoniumoxidation och nitritoxidation, som modelleras med två mikrobiologiska populationer) och fyrstegs sekventiell denitrifikation, från nitrat till kvävgas med kväveoxid och lustgas som intermediärer, utnyttjas. Även modellen i Mampaey et al. (2011) som beskriver NO och N_2O produktion vid nitrifikation är inkluderad med NH_3 som substrat. För närmare beskrivning av växthusgasmodellerna se Flores-Alsina et al. (2011) och för övriga modeller, Nopens et al. (2010).



Figur 1. Principiell utformning av reningsverket i BSM2G. Inkluderade växthusgasutsläpp markerade i grått.

Simuleringarna har i denna studie genomförts med aktiv reglering av syrehalten i luftningsbassängerna. En PI-regulator styr syrehalten i AER2 mot ett fast börvärde (standard 2 mg/l) genom att reglera syretillförseln ($K_L a$ i modellen). $K_L a$ i AER1 och AER3 sätts sedan proportionellt mot AER2 med en faktor 1 respektive 0,5. Överskottsslamuttaget skiftas mellan sommar och vintersäsong för att upprätthålla nitrifikation under året, $Q_w = 450 \text{ m}^3/\text{d}$ respektive $Q_w = 300 \text{ m}^3/\text{d}$.

2.2 Utvärdering av utgående vattenkvalitet och driftskostnad

Simuleringarna körs under 609 dagar med dynamiska indata som innefattar dygnsvariationer, torr- och regnperioder (låg- resp. högflöde) och säsongsmässiga variationer i temperatur och belastning. Den långa simuleringsperioden medger att även styrstrategier med långa tidsskalor går att utvärdera. Utvärderingen görs baserat på resultaten från perioden dag 245 till 609, dvs. ett år.

Den totala reningsgraden mäts i ett samlat viktat index för utgående vattenkvalitet (EQI, *Effluent Quality Index*) enligt samma premisser som i BSM2 (Nopens et al., 2010). Där ingår alla föroreningsmängder i utgående vatten, viktfaktor (baserat på massa) inom parentes: TSS (2), COD (1), BOD₅ (2), Kjeldahlkväve (TKN, 30) och NO_x (10). Driftskostnaderna utvärderas med hjälp av

ett kostnadsindex (OCI, *Operational Cost Index*) där alla betydande kostnadsposter för verket summeras: luftningsenergi, pumpenergi, energi för mixning, slamproduktion, förbrukning av kolkälla, biogasproduktion och netto värmebehov för uppvärmning av rötkammaren.

2.3 Utvärdering av växthusgasutsläpp

De växthusgasutsläpp som är inkluderade i BSM2G är markerade i figur 1. Till dags dato är det direkta och indirekta utsläpp av CO₂ och N₂O som ingår. Den metod som används här har presenterats av Flores-Alsina et al. (2011). Utsläppen konverteras för jämförelse till CO₂-ekvivalenter (CO_{2e}). N₂O har en potentiell global uppvärmningsfaktor på 298 gånger CO₂ (Forster et al., 2007). Utsläppen delas in i följande kategorier.

Direkta utsläpp från aktiv slamsteget – Inkluderar CO₂-produktion från respiration och BOD oxidation, N₂O-produktion från kväverening och ett CO₂-avdrag för ackumulation vid nitrifiering.

Slambehandling – All producerad biogas förbränns i en gasmotor och den samlade koldioxiden räknas med i växthusgasutsläppen.

Netto energi växthusgasutsläpp – Differensen mellan energianvändning (luftning, pumpning, mixning och uppvärmning) och energiproduktion i gasmotorn. För extern elproduktion används ett värde för kol-

kondenskraft på 0,94 kg CO₂ kWh⁻¹ (Bridle et al., 2008).

Kemikalier – Växthusgasutsläpp från produktion av kolkälla är inkluderade. Som kolkälla används industriellt producerad metanol (Dong och Steinberg, 1997).

Slamtransport och avsättning – CO₂-utsläpp från transport och från mineralisering av återstående organiskt material vid avsättningsplatsen.

BSM2G inte komplett med hänsyn till potentiella klimatpåverkande utsläpp. Till listan ovan kan fogas: i) strippning av metan vid reningsverkets inloppsdelar (Guisasola et al., 2009); ii) produktion av metan i försedimentering och förtjockare; iii) diffusa utsläpp av metan i slambehandlingen (rötkammare, avvattning, slamlager etc.) (Czepl et al., 1993; Daelman et al., 2012); iv) lustgasproduktion i sidoströmsprocesser såsom rejektvattenrening och v) metan och lustgasproduktion vid avsättning av slamm.

2.4 Fallstudie

Luftningen utgör lejonparten av energiförbrukningen på ett avloppsreningsverk med nitrifikation och operationella strategier för att spara energi på luftning föreslås ofta. Ett vanligt exempel är att minska på syrehalten vilket skulle påverka kvävereningen något lite men minska energiåtgången för luftning betydligt. Ett av motiven som ofta anges är att en vinst i minskad klimatpåverkan då uppnås genom motsvarande minskning av koldioxidutsläpp vid energiproduktionen.

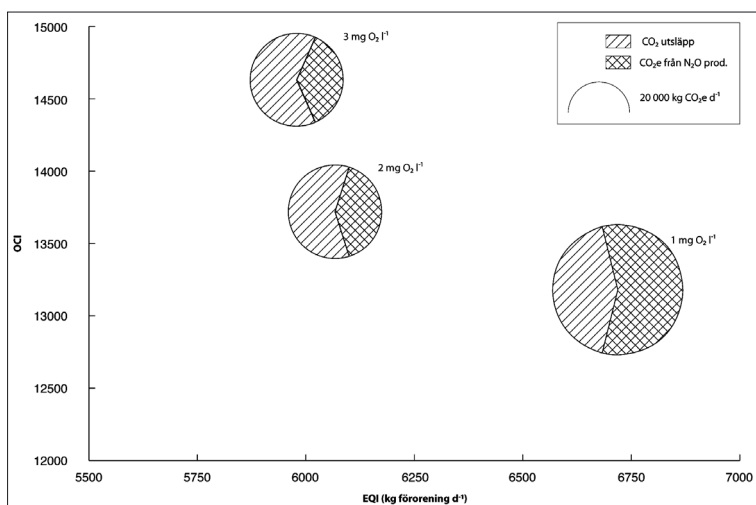
Simuleringar har gjorts med BSM2G för tre olika börvärden på syre i AER2: 1, 2 och 3 mg l⁻¹. Utvärderingen omfattar EQI, OCI och växthusgasutsläpp.

3 Resultat

I figur 2 visas de samlade effekterna av den varierade syrehalten avseende EQI, OCI och växthusgasutsläpp. EQI försämras (ökar) vid minskad syrehalt vilket framförallt beror på försämrade nitrifikation med ökad ammoniumhalt i utgående vatten som följd, se figur 3a. Däremot minskar OCI eftersom energibehovet för luftning minskar. Det medför att CO₂-utsläppen från energiproduktion utanför reningsverket minskar proportionerligt, se tabell 1. Sammantaget ökar dock växthusgasutsläppen eftersom produktionen av lustgas i biosteg ökar när syrehalten minskas. Detta beror till största delen på att den försämrade nitrifikationen medför en ackumulation av NO₂⁻ som i de använda modellerna kraftigt bidrar till ökad lustgasproduktion, se figur 3b. Övriga kategorier av växthusgasutsläpp varierar marginellt eller inte alls eftersom de inte påverkas av syrehalten i luftningsbassängerna.

4 Diskussion

Fallstudien visar att BSM2G är användbar för att dynamiskt simulera verket med såväl vattenkvalitetsparametrar som parametrar för växthusgasutsläpp. Den integrerade utvärderingen av EQI, OCI och växthusgasutsläpp synliggör den avvägning som måste göras för att undvika suboptimering. Resultaten ovan visar att en sänkt syrehalt för att spara luftningsenergi med motivet att minska CO₂-utsläppen från energiproduktion är en vanskelig metod. Minskningen i CO₂-utsläpp överskuggas i detta exempel helt av ökade lustgasutsläpp som utgör den största delen av de totala växthusgasutsläppen. Analogt ökar CO₂-utsläppen från elanvändning vid en ökning av



Figur 2. Kvalitetsindex på utgående vatten (EQI), kostnadsindex (OCI) och växthusgasutsläpp för de simulerade fallen. Diametern på cirkeln motsvarar det totala växthusgasutsläppen. Sektorerna i cirkelarna motsvarar andelen av olika växthusgaser. Det är positivt med låg EQI, låg OCI och låga växthusgasutsläpp (liten cirkel).

Tabell 1. Kvalitetsindex på utgående vatten (EQI), kostnadsindex (OCI) och växthusgasutsläpp per kategori för de simulerade fallen.

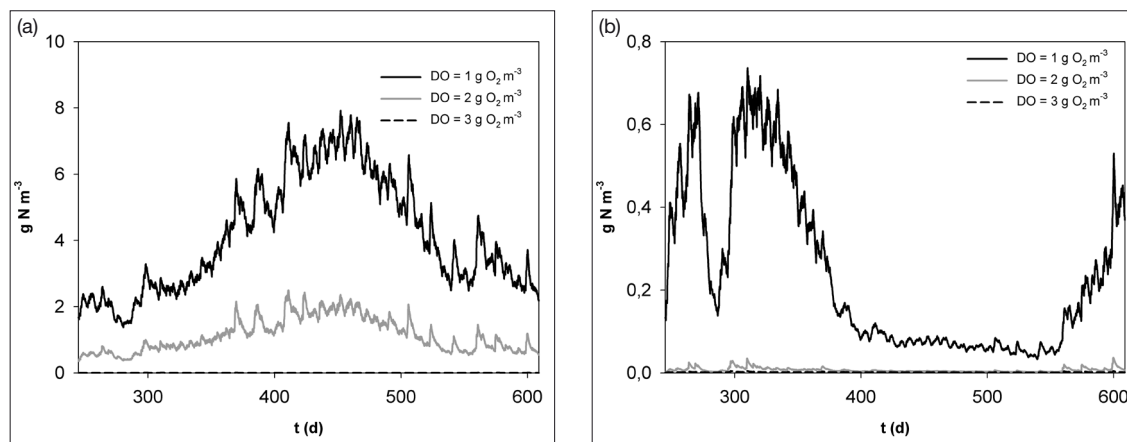
Parameter / Syrehalt	1 [mg/l]	2 [mg/l]	3 [mg/l]
EQI [kg förorening d ⁻¹]	6700	6100	6000
OCI	13200	13800	14600
CO ₂ biosteg [kg CO ₂ d ⁻¹]	3700	3700	3700
CO ₂ e N ₂ O [kg CO ₂ e d ⁻¹]	24700	12100	11100
CO ₂ netto energi [kg CO ₂ d ⁻¹]	-830	-260	520
CO ₂ slambehandling [kg CO ₂ d ⁻¹]	4700	4700	4700
CO ₂ Kemikalier [kg CO ₂ d ⁻¹]	2100	2100	2100
CO ₂ slamavsättning [kg CO ₂ d ⁻¹]	4000	4000	4000
Växthusgaser totalt [kg CO ₂ e d ⁻¹]	42500	30500	30300

syrehalten till 3 mg l⁻¹ men lustgasproduktionen minskar inte lika dramatiskt som mellan 1 och 2 mg l⁻¹. Följaktligen tar förändringarna ut varandra och totalutsläppen av växthusgaser är i samma storleksordning som vid 2 mg l⁻¹. Författarna är medvetna om att det i uppräknningen av växthusgasutsläpp ingår både utsläpp med och utan negativ påverkan på växthuseffekten. Till de negativa hör lustgasutsläpp och fossil CO₂ från extern energiproduktionen. Andra inkluderade utsläpp har en kort cykel såsom mikrobiell oxidation av organiskt material och CO₂ från förbränning av biogas. Att summera dessa ökat det är missvisande och ett klargörande av skillnaderna hör till framtida arbete.

Resultaten visar tydligt hur säsongsmässiga variationer fångas av de dynamiska modellerna. Det är viktigt vid optimering eftersom förenklade linjäriserade modeller som inte beskriver detta riskerar att grovt felkalkyler effekterna av vissa förlopp. De stora svängningarna mellan säsongerna visar också på betydelsen av att utvärdera systemet under långa perioder.

Resultaten vi presenterar här kan tyckas specifika för verket i BSM2G men metoden är enkel att generalisera. Reningsverkets utformning (Nopens et al., 2010) och inkommande vatten (Gernaey et al., 2011) kan anpassas till ett specifikt reningsverk med aktivtslamanläggning. För att få en helt anpassad modell måste vikt faktorerna ändras i enlighet med lokala förutsättningar för utsläppen inkluderade i EQI och kostnader för energi, kemikalier m.m. i OCI. För utvärderingen av växthusgaser enl. modellen måste också några parametrar anpassas: i) specifika utsläppsvärden för extern produktion av energi (t.ex. kg CO₂ per kWh); ii) användningen av biogas och dess specifika utsläppsvärden och iii) transportavstånd och avsättning av slammet. Med dessa anpassningar kan metoden användas som beslutsstöd för processingenjörer, driftschefer, myndigheter m.fl. vid utvärderingen av hållbarheten i olika applikationer såsom t.ex.: i) design av processteg; ii) processoptimering och iii) vid uppgradering eller utbyggnad av reningsverk.

Klimatpåverkan från avloppsreningsverk är ett mycket



Figur 3. Effekten av syrehalten på nitrifikationen, (a) NH₄⁺ och (b) NO₂⁻ i utgående vatten. DO betecknar syreöverskott i luftningsbassängen (Dissolved Oxygen).

hett forskningsområde och många olika aktiviteter pågår på olika håll i världen. Modellerna som använts i detta arbete är under snabb utveckling. Modellen som beskriver lustgasproduktion vid nitrifierares denitrifikation (Mampaey et al., 2011) har NH_3 som substrat och NO_2^- som elektronacceptor. Det finns studier som indikerar andra reaktionsvägar som till exempel N_2O som biprodukt vid oxidation av hydroxylamin (NH_2OH) till NO_2^- eller som restprodukt vid kemisk nedbrytning av intermediärer i nitrifikationsreaktionerna (Ni et al., 2012). Dessa reaktioner är inte inkluderade i denna implementation. Till dags dato saknas en samlad modell som beskriver alla reaktionsvägar för N_2O -produktion och vilka betingelser som gynnar respektive. Under 2.3 ovan listas ett antal potentiella växthusgasutsläpp som ännu inte är inkluderade i BSM2G. Det fortsatta arbetet kommer att fokusera på att utvärdera dessa brister och inkludera modeller för de utsläpp som är av signifikant betydelse. Som forskare inom detta område är vi aktiva och samarbetar med flera grupper inom modellering av lustgasproduktion och kommer uppdatera modellerna i plattformen när bättre alternativ finns tillgängliga. Målet är en samlad metodik för utvärdering av EQI, OCI och växthusgasutsläpp där det sista är lika komplett och underbyggt som de två första redan är.

5 Slutsatser

En uppsättning dynamiska modeller och en utvärderingsmetod för att kvantifiera växthusgasutsläpp från avloppsreningsverk har presenterats. Dessa har inkorporerats i BSM2 för integrerad utvärdering med EQI och OCI. En simuleringsstudie där syrehalten i luftningsbasängerna varierats visar att det kan finnas avsevärda motsättningar mellan energieffektivisering och klimatpåverkan vilket riskerar att leda till suboptimering om inte helhetsperspektivet beaktas. Studien visar på potentialen i att utföra integrerad utvärdering baserat på flera kriterier genom simuleringsstudier över långa tidsperioder. Vidare forskning behövs för att ytterligare öka tillförlitligheten i modellerna och få ett verktyg för att beräkna växthusgasutsläpp från avloppsreningsverk.

Tack

Arbetet är finansierat av Svenskt Vatten Utveckling (avtal nr. 211-2010-141) och Formas (avtal nr 10-106) inom projektet, *Utveckling av operationella strategier och dynamiskt analysverktyg med fokus på energieffektivisering av avloppsreningsverk*. Projektet beräknas pågå fram till och med 2014.

Referenser

- Ayasa E., De la Sota A., Grau P., Sagarna J.M., Salterain A. and Suescun J. (2006) Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: The long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. *Water Sci. Techn.*, 53(4–5), 193–201.
- Bridle T., Shaw A., Cooper S., Yap K.C., Third K. and Domurad M. (2008) Estimation of greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants. In: *Proceedings IWA World Water Congress 2008*, Vienna, Austria, September 7–12 2008.
- Corominas L., Sin G., Puig S., Traore A., Balaguer M., Colprim J. and Vanrolleghem P.A. (2006) Model-based evaluation of an on-line control strategy for SBRs based on OUR and ORP measurements. *Water Sci. Techn.*, 53(4–5), 161–169.
- Czepiel P.M., Crill P.M. and Harris R.C. (1993) Methane emissions from municipal wastewater treatment processes. *Env. Sci. Tech.*, 27, 2472–2477.
- Daelman M.R.J., van Voorthuizen E.M., van Dongen U. G.J.M., Volcke, E.I.P. and van Loosdrecht M.C.M. (2012) Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water Res.*, 46(11), 3657–3670.
- Dong Y. and Steinberg M. (1997) Hynol: an economical process for methanol production from biomass and natural gas with reduced CO_2 emission. *Int. J. Hydrogen Energy*, 22(10–11), 971–977.
- Flores-Alsina X., Corominas L., Snip L. and Vanrolleghem P.A. (2011) Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Res.*, 45(16), 4700–4710.
- Flores-Alsina X., Arnell M., Amerlinck Y., Corominas L., Gernaey K.V., Guo L., Lindblom E., Nopens I., Porro J., Shaw A., Vanrolleghem P.A. and Jeppsson U. (2012a) A dynamic modelling approach to evaluate GHG emissions from wastewater treatment plants. *IWA World Congress on Water, Climate and Energy (WCE2012)*, Dublin, Ireland, May 13–18, 2012.
- Flores-Alsina X., Arnell M., Amerlinck Y., Corominas L., Gernaey K.V., Guo L., Lindblom E., Nopens I., Porro J., Shaw A., Vanrolleghem P.A. and Jeppsson U. (2012b) Balancing effluent quality, economical cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of plant-wide wastewater treatment control strategies. *IWA Conference on Nutrient Removal and Recovery 2012: Trends in NRR*, Harbin, China, Sept. 23–25, 2012.
- Foley J., de Haas D., Hartley K. and Lant P. (2010) Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Res.*, 44(5), 1654–1666.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M. and Van Dorland R. (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Gernaey K.V., Flores-Alsina X., Rosen C., Benedetti L. and Jeppsson U. (2011) Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach. *Env. Mod & Soft.*, 26(11), 1255–1267.
- Guisasola A., Sharma K.R., Keller J. and Yuan Y. (2009) Development of a model for assessing methane formation in rising main sewers. *Water Res.*, 43(11), 2874–2884.
- Henze M., Gujer W., Mino T. and van Loosdrecht M.C.M. (2000) Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No 9, IWA Publishing, London, UK.
- Hiatt W.C. and Grady C.P.L.Jr. (2008) An updated process model for carbon oxidation, nitrification, and denitrification. *Water Environ. Res.*, 80, 2145–2156.
- Hofman J., Hofman-Caris R., Nederlof M., Frijns J. and van Loosdrecht M.C.M. (2011) Water and energy an inseparable twins for sustainable solutions. *Water Sci. Techn.*, 63(1), 88–92.
- Lingsten A., Lundkvist M., Hellström D. och Balmér P. (2011) VA-verkens energianvändning 2008. Svenskt Vatten AB Rapport 2011-04, Stockholm, Sverige.
- Mampaey K.E., Beuckels B., Kampschreur M.J., Kleerebezem R., van Loosdrecht M.C.M. and Volcke E.I.P. (2011) Modelling nitrous and nitric oxide emissions by autotrophic ammonium oxidizing bacteria. In: *Proceedings IWA/WEF Nutrient Recovery and Management Conference*, Miami, FL, USA, January 9–12 2011.
- Ni B.J., Yuan Z., Chandran K., Vanrolleghem P.A. and Murthy S. (2012) Evaluating mathematical models for N₂O production by ammonia-oxidizing bacteria: towards a unified model. In: *Proceedings 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar (WWTmod2012)*, Mont-Sainte-Anne, Québec, Canada, February 27–29 2012.
- Nopens I., Benedetti L., Jeppsson U., Pons M.-N., Alex J., Copp J.B., Gernaey K.V., Rosen C., Steyer J.-P. and Vanrolleghem P.A. (2010) Benchmark simulation model No 2: Finalisation of plant layout and default control strategy. *Water Sci. Techn.*, 62(9), 1967–1974.
- Olsson G. and Newell B. (1999) *Wastewater Treatment Systems – Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Publishing, London, UK.
- Spanjers H., Vanrolleghem P.A., Nguyen K., Vanhooren H. and Patry, G.G. (1998) Towards a simulation-benchmark for evaluating respirometry-based control strategies. *Water Sci. Techn.*, 37(12), 219–226.

