



Peter Koenders, Witteveen+Bos
 Arie de Niet, Witteveen+Bos
 Sabrina Koning, Waternet
 Synco Tee, Waternet

Rwzi Westpoort bespaart energie en kosten met WOMBAT

De beluchting van rioolwaterzuivering Westpoort in Amsterdam wordt sinds september 2009 aangestuurd door WOMBAT: een innovatieve modelgebaseerde regeling, die stuurt op temperatuur en debiet. Ze is door Witteveen+Bos in samenwerking met Waternet ontwikkeld en moet zorgen voor een optimale sturing van het actiefslibproces: maximale stikstofverwijdering tegen minimale beluchting. Deze belangen zijn tegenstrijdig. De regeling zoekt daarom continu naar de zuurstofconcentratie waarbij optimaal wordt gezuiverd zonder lucht en daarmee energie te verspillen. Na twee jaar kan een eerste balans opgemaakt worden: met een 20 procent lagere zuurstofrichtwaarde wordt tien tot 20 procent reductie gerealiseerd in ammonium, nitraat en fosfaat. Op energie wordt drie procent bespaard. Doordat het fosfaat lager is, hoeft minder ijzer te worden gedoseerd, wat een forse kostenbesparing oplevert. Waternet zuivert beter met minder energie.

In een artikel in H₂O van mei 2008 is de eerste aanzet voor de modelgebaseerde regeling beschreven. Sindsdien is veel veranderd in de opzet van die regeling. Zoals vaker het geval is met innovaties, blijkt de praktijk weerbarstiger dan de theorie.

Optimalisatie beluchting rwzi Westpoort

Energiebesparing en optimalisatie
 Energiebesparing staat volop in de belangstelling van de waterschappen. Zo is in de

zogeheten Meerjarenaafspraken van de Unie van Waterschappen en het ministerie van Economische Zaken afgesproken jaarlijks twee procent energie-efficiëntieverbetering te realiseren. De energie-efficiëntie wordt uitgedrukt in kWh per verwijderd inwoner-equivalent. Dit quotiënt is te verbeteren door energiebesparing (minder kWh) of het verhogen van de effluentkwaliteit (meer verwijderde i.e.). Omdat op een rwzi gemiddeld 50-60 procent van de totale energieconsumptie is toe te schrijven aan het beluchtingsproces, leidt een optimalisatie

van de beluchting direct tot besparing van energie en verbetering van de effluentkwaliteit. Met dit doel voor ogen werkten Witteveen+Bos en Waternet sinds 2007 samen aan de ontwikkeling van een modelgebaseerde regeling op rwzi Westpoort.

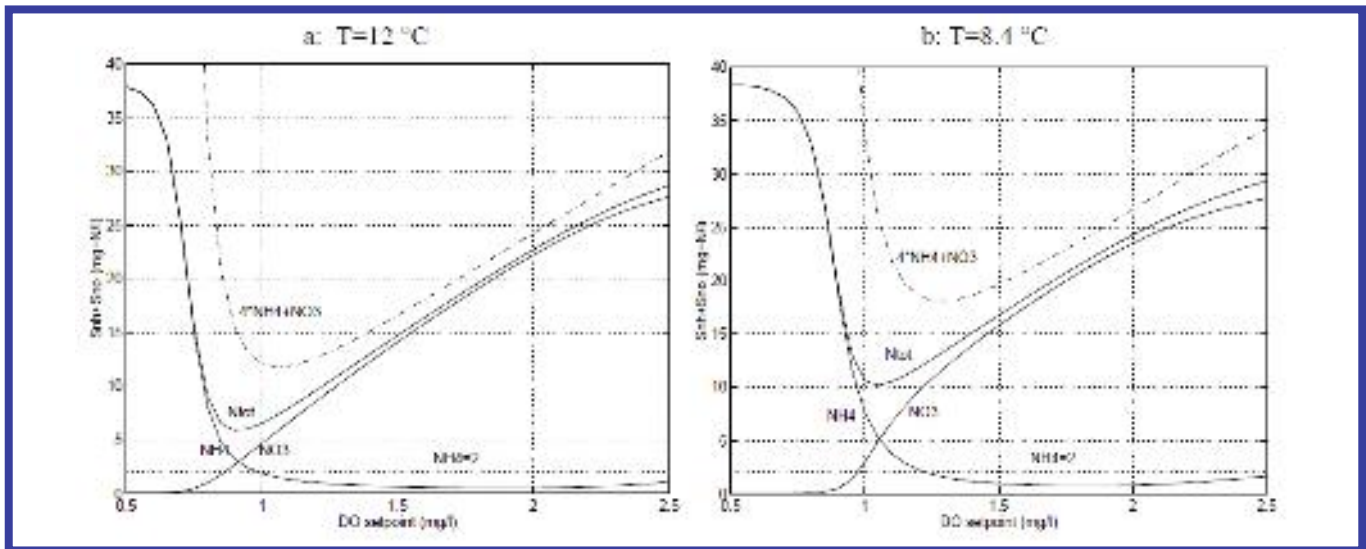
Rwzi Westpoort

Rwzi Westpoort is een zuivering van Waternet in het westelijk havengebied van Amsterdam. De zuivering behandelt het afvalwater van 400.000 inwoners van Amsterdam en Zaanstad en enkele bedrijven in het havengebied. De zuivering is van het m-UCT-type, wat de biologische verwijdering van stikstof en fosfaat inhoudt. Restfosfaten worden met een aanvulling van ijzerdosering geprecipiteerd. Rwzi Westpoort heeft vier parallelle straten, die twee aan twee vergelijkbaar zijn.

Modelgebaseerd regelen

Op rwzi's wordt veel gebruik gemaakt van een beslistabel voor de beluchting, zo ook op Westpoort. Een beslistabel regelt zuurstof op basis van de gemeten concentraties ammonium en nitraat. Doordat het zuiveringsproces behoorlijk traag reageert op veranderende omstandigheden, dus ook op de toevoer van de lucht, loopt de beslistabel altijd achter de feiten aan. Het gevolg is dat de zuurstofconcentratie zich vrijwel altijd in de onder- of bovengrens van de beluchting bevindt. Dat is niet energie-efficiënt en heeft een negatieve invloed op de stuurbaarheid





Afb. 1: Verband tussen N_{totaal} en de zuurstofrichtwaarde (bron: *Modelling, identification and control of activated sludge plants for nitrogen removal*. S. Weijers).

van het proces. Dit gegeven was aanleiding te zoeken naar een regeling die niet alleen kan reageren op de huidige situatie in de actiefslibtank, maar ook vooruitkijkt en -stuurt. Hiervoor is een model nodig dat de toekomstige situatie voldoende betrouwbaar voorspelt.

Modelgebaseerd regelen op rwzi Westpoort

Het eerste ontwerp was gebaseerd op een regressiemodel dat de verandering in ammonium kon voorspellen op basis van procesvariabelen, zoals de zuurstofconcentratie. Om het model flexibel te maken, werd een Kalmanfilter ingebouwd, dat continu de parameters bijstelt. De regeling is in de zomer van 2008 geïmplementeerd op Westpoort. Bij de ingebruikname bleek de praktijk weerbarstiger dan de theorie. In passieve modus was het model heel goed in staat de ammoniumconcentratie te voorspellen. De problemen ontstonden bij het bepalen van de zuurstofconcentratie. Het Kalmanfilter stuurde de parameters consequent naar waarden die leidden tot een minimale zuurstofconcentratie. Qua energie heel efficiënt, maar de oplopende ammoniumwaarden waren niet acceptabel.

Dit was aanleiding de regeling *offline* te halen en de uitgangspunten van het model en de regeling nog eens goed te bestuderen. In een SIMBA-model van Westpoort was het mogelijk de gebeurtenissen rond de ingebruikname te reconstrueren. Op basis daarvan is het model grondig aangepast en de automatische parameteraanpassing losgelaten. De aangepaste modelgebaseerde regeling is uitgebreid getest in SIMBA en bleek in staat

een beter zuiveringsresultaat te behalen en tegelijk energie te besparen. Vanwege de goede SIMBA-resultaten is besloten de aangepaste regeling in de praktijk toe te passen op rwzi Westpoort. In september 2009 is de nieuwe modelgebaseerde regeling geactiveerd. De regeling ging lang door het leven onder de wat abstracte naam 'modelgebaseerde regeling Westpoort', maar heeft uiteindelijk een naam gekregen: WOMBAT (een acroniem voor Witteveen+Bos Optimal Model Based AeraTion).

Modelgebaseerd regelen beluchting Model en keuze zuurstofrichtwaarde

De kern van WOMBAT is een model dat de concentratie ammonium voorspelt op basis van de zuurstofconcentratie en robuuste metingen van debiet en temperatuur. Het model wordt gebruikt om de optimale zuurstofconcentratie te bepalen. WOMBAT is een anticiperende regeling, omdat met het model vooruit wordt gekeken. Dit in tegenstelling tot klassieke regelaars die een verschil tussen gemeten en gewenst ammonium achteraf proberen te regelen en dus functioneren als *feedback*regelaar. Het model is gebaseerd op een eenvoudige beschrijving van de fysische en kinetische eigenschappen van het actiefslibproces. Deze kunnen worden gepresenteerd door de concentratie totaalstikstof uit te zetten tegen de concentratie zuurstof. In afbeelding 1 is die verhouding tussen de concentratie zuurstof en totaalstikstof te zien voor een constante aanvoer bij twee verschillende temperaturen. Waarbij N_{totaal} de som is van de ammonium- en nitraatconcentratie. Uit de afbeelding blijkt dat N_{totaal} minimaal

wordt bij een bepaalde zuurstofconcentratie. Hierbij verloopt het actiefslibproces optimaal. Alle ingebrachte lucht wordt goed benut. WOMBAT stuurt de beluchting naar deze optimale waarde en houdt daarbij rekening met wisselende invloeden van aanvoerdebiet en temperatuur.

Implementatie modelgebaseerde regelaar

De modelgebaseerde regelaar is geïnstalleerd op beluchtingsstraat 4 van rwzi Westpoort. De prestaties zijn vergeleken met de beslistabel die is geïnstalleerd op de parallelle identieke beluchtingsstraat 3. De primaire regelaar - beslistabel of WOMBAT - berekent de zuurstofconcentratie en de zuurstofregelaar stuurt de luchttoevoer zodanig dat de gewenste zuurstofconcentratie wordt gerealiseerd in het actiefslibstelsysteem.

Resultaten

Vanaf eind 2009 tot en met begin 2011 is WOMBAT in de praktijk getest. Er is bijvoorbeeld onderzocht wat de effecten zijn van het wijzigen van parameterinstellingen. Zie de tabel voor de resultaten van een periode waarin vrijwel geen parameterwijzigingen zijn doorgevoerd en sprake was van een stabiele bedrijfssituatie. Het betreft gemiddelde concentraties en de standaarddeviatie over de periode van 21 maart tot en met 25 augustus 2010.

De waarden zijn gebaseerd op een dataset van 30-minutengemiddelden van gemeten concentraties in beluchtingsstraten 3 en 4. De periode 21 maart tot 25 augustus 2010 beslaat 157 dagen en omvat in totaal

Prestaties WOMBAT versus beslistabel.

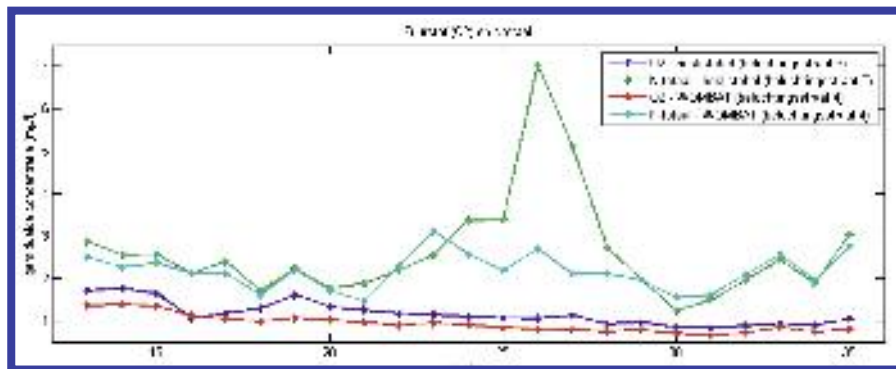
parameter	eenheid	N	beslistabel (straat 3)		WOMBAT (straat 4)		WOMBAT t.o.v. beslistabel	
			gem	std	gem	std	absoluut	relatief
NH ₄	mg/l	7543	0,44	0,76	0,39	0,78	-0,05	-11%
NO ₃	mg/l	7543	2,17	1,75	1,76	1,04	-0,42	-19%
N _{totaal}	mg/l	7543	2,61	1,91	2,15	1,32	-0,46	-18%
PO ₄	mg/l	7543	0,39	0,42	0,31	0,38	-0,08	-21%
O ₂	mg/l	7543	1,17	0,52	0,93	0,33	-0,23	-20%

7543 metingen. De metingen zijn gedaan met online *analysers* voor ammonium (nauwkeurigheid drie procent of 0,05 mg/l), nitraat (vijf procent of 0,2 mg/l), fosfaat (twee procent of 0,05 mg/l) en zuurstof (vier procent of 0,1 mg/l). Vanwege de grote hoeveelheid beschikbare metingen is de meetonzekerheid van individuele metingen van beperkte invloed op de berekende waarden. Uit de tabel blijkt dat de ammoniumconcentratie bij WOMBAT ongeveer elf procent lager ligt dan bij de beslistabel, de concentraties zuurstof, nitraat, totaalstikstof en fosfaat liggen ongeveer 20 procent lager. Verder valt op dat de standaarddeviatie van de concentraties met WOMBAT in de meeste gevallen kleiner is. Dat duidt op een minder grote variatie in de concentratie.

In afbeelding 2 is het verloop van de concentratie zuurstof en totaalstikstof in beide beluchtungsstraten te zien. Uit de grafiek blijkt dat de zuurstofconcentratie structureel lager is in AT4 dan in AT3. De dalende zuurstofconcentratie in beide tanks wordt veroorzaakt door de stijgende temperatuur.

De totale stikstofconcentratie ligt bij WOMBAT gemiddeld 18 procent lager dan bij de beslistabel. De piek in N_{totaal} van beluchtungsstraat 3 in week 26 en 27 wordt veroorzaakt door een sterke toename van nitraat. Dat heeft zeer waarschijnlijk te maken met de verlaging van het droge stofgehalte van 4 naar 3 mg/l. Hoewel de verlaging van de slibconcentratie beide beluchtungsstraten betreft, leidt het alleen bij beluchtungsstraat 3 tot een sterke toename van nitraat. Het is aannemelijk dat de samenstelling van het actiefslib in de beluchtungsstraten verschilt als gevolg van een verschil in beluchting. Dat kan verklaren waarom beluchtungsstraat 4 beter reageert op de aanpassing van de slibconcentratie dan beluchtungsstraat 3. De piek draagt voor N_{totaal} en nitraat sterk bij aan de prestaties van Wombat ten opzichte van de beslistabel. Maar ook als deze weken buiten beschouwing worden gelaten, ligt N_{totaal} bij WOMBAT nog altijd 9 procent lager dan bij de beslistabel.

WOMBAT is ontworpen voor het sturen van de zuurstofconcentratie voor een efficiënte verwijdering van stikstof en houdt geen rekening met fosfaat. Desalniettemin blijkt dat de regeling een positief effect heeft op de biologische fosfaatverwijdering. In beluchtungsstraat 4 ligt zowel de concentratie fosfaat als het aantal pieken significant lager dan in beluchtungsstraat 3. Dat leidt tot een besparing op de ijzerdosering die wordt geschat op 50 kubieke meter $FeSO_4$ per jaar. De verbeterde fosfaatverwijdering wordt verklaard door minder verstoring van de biologische fosfaatverwijdering. Afwezigheid van nitraat en zuurstof in de anaerobe zone is een voorwaarde voor een optimaal proces. De zuurstofconcentratie in de actiefslibtank is lager, waardoor minder zuurstof teruggaat naar de voordennitrificatie en er meer makkelijk afbreekbaar BZV overblijft. Doordat vanuit de denitrificatie wordt gerecirculeerd over de anaerobe tank, gaat meer voeding naar de biologische fosfaatverwijdering met bovendien een lagere nitraatconcentratie. Naast de betere condities in de anaerobe



Afb. 2: Zuurstofconcentratie in AT3 en AT4.

tank is biologische fosfaatverwijdering ook in andere zuiveringen met een carousel-systeem waargenomen, als deze bedreven worden bij lage zuurstofgehalten.

Het verschil in de sturing in beide beluchtungsstraten leidt ook tot een andere regelgedrag. Dat blijkt uit de weergave van het gemiddeld dagpatroon van de concentraties in beide straten in afbeelding 3.

Het valt op dat de zuurstofconcentratie (blauw) in beluchtungsstraat 4 veel minder variatie vertoont dan in beluchtungsstraat 3. WOMBAT stuurt een gematigder zuurstofrichtwaarde uit, waardoor het verschil tussen maximale en minimale zuurstofconcentratie op een dag in beluchtungsstraat 4 slechts 0,44 mg/l is tegen 0,96 mg/l in beluchtungsstraat 3. De gematigde variatie in zuurstof heeft een positief effect op de andere concentraties in beluchtungsstraat 4 die ook minder variatie vertonen en lager liggen dan in beluchtungsstraat 3. De modelgebaseerde regeling is dus stabiel dan de regeling op basis van de beslistabel.

Doordat de beschikbare gegevens van het energieverbruik van de beluchters te onnauwkeurig zijn, wordt het energieverbruik indirect bepaald via de gemeten zuurstofconcentratie en de (temperatuursafhankelijke) verzadigingsconstante van zuurstof in water. Uit de berekeningen blijkt dat de energiebesparing consistent is gedurende het jaar en schommelt rond drie procent. Bij een jaarverbruik van 800.000 Kwh per straat per jaar levert WOMBAT dus een besparing op van 24.000 Kwh per straat per jaar. Bij een prijs van 0,10 euro per Kwh levert dat een

voordeel op van 2.400 euro per straat per jaar. Daar komt een significante besparing in de ijzerdosering bij van 7.500 euro per jaar. In totaal wordt de kostenbesparing geschat op 9.900 euro per straat per jaar. Voor de hele zuivering kan dit oplopen tot bijna 40.000 euro per jaar. Hoewel de WOMBAT is ontwikkeld met het oog op besparing van energie en verlaging van totaalstikstof, blijkt het grootste financiële voordeel te komen door een lager fosfaatgehalte en de daarmee verbonden lagere ijzerdosering.

Conclusie

WOMBAT is nu ongeveer twee jaar actief op rwzi Westpoort. In vergelijking met de beslistabel is de balans bijzonder positief. De modelgebaseerde regeling zorgt voor een stabiel regelgedrag en realiseert een flinke reductie in ammonium, nitraat én fosfaat. Tegelijk ligt de zuurstofconcentratie 20 procent lager, wat een energiebesparing van drie procent oplevert. Doordat het fosfaat lager is, hoeft minder ijzer te worden gedoseerd wat eveneens een forse kostenreductie betekent. Er is sprake van een win-winsituatie: met minder energie wordt beter gezuiverd. De proef toont aan dat WOMBAT een goed alternatief vormt voor de huidige beluchtungsregelaars op veel rwzi's. WOMBAT is stabiel en presteert in alle opzichten goed, waardoor de investering in een paar jaar is terugverdiend. De modelgebaseerde regelaar wordt verder ontwikkeld door Witteveen+Bos. In WOMBAT II worden parameters automatisch aangepast aan wisselende bedrijfssituaties. Deze variant is met goed gevolg getest en wordt binnenkort geïmplementeerd op rwzi Westpoort.

Afb. 3: Gemiddeld dagpatroon in concentraties met de beslistabel (links) en WOMBAT (rechts).

