



Fuzzy Control op de rwzi Utrecht

IR. A. VAN BENTEM, DHV WATER
IR. O. DUIN, HOOGHEEMRAADSCHAP DE STICHTSE RIJNLANDEN
ING. P. NIJDAM, DHV WATER

Bedrijfsvoerders van rioolwaterzuiveringsinstallaties worden vandaag de dag geconfronteerd met tegenstrijdige eisen; het effluent moet aan strenge eisen voldoen en de operationele kosten moeten zo laag mogelijk zijn. Daar komt nog bij dat het toegenomen aantal zuiveringsprocessen en hun interactie rwzi's tot complexe systemen maken. Een intelligente en begrijpelijke regeling van de processen kan de bedrijfsvoerders helpen bij het verwezenlijken van bovengenoemde doelstellingen. Voor de bedrijfsvoerders van de rwzi Utrecht is de opgave nog uitdagender. De rwzi Utrecht is namelijk een AB-systeem, een tweetraps actiefslibsysteem waarmee het halen van lage stikstofgehaltes in het effluent over het algemeen niet eenvoudig is. Met behulp van een beluchterregeling die is gebaseerd op 'fuzzy logic' is het vorig jaar echter gelukt om jaargemiddelde effluentkwaliteit van lager dan acht milligram totaalstikstof per liter te bereiken. In dit artikel zal worden ingegaan op de toepassing van 'fuzzy control' in de waterzuivering, met speciale aandacht voor de toegevoegde waarde die de 'fuzzy-regelaar' heeft op de rwzi Utrecht.

In het najaar van 1991 werd de rwzi Utrecht na een grote verbouwing heropend. De rwzi had vanaf dat moment een capaciteit van 400.000 i.e. en was uitgelegd voor BZV-verwijdering en nitrificatie. Denitrificatie en fosfaatverwijdering waren niet mogelijk. In de loop van de jaren negentig werd duidelijk dat op grond van het Lozingsbesluit stedelijk afvalwater maatregelen noodzakelijk waren om in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden aan het gebiedsverwijderingsrendement van 75 procent stikstof te kunnen gaan voldoen. Aangezien de rwzi Utrecht een groot gedeelte van het afvalwater van De Stichtse Rijnlanden zuivert, lag een verdere aanpassing van deze rwzi voor de hand. In de afgelopen tien jaar is op de rwzi Utrecht een scala aan maatregelen getroffen ter verbetering van de stikstof- en fosfaatverwijdering. Sinds 1 januari 2003 geldt voor de rwzi Utrecht een vergunningseis van tien milligram totaalstikstof per liter. Voor een tweetraps systeem is daarmee de lat hoog gelegd. De optimalisatie van de beluchterregeling door het toepassen van een intelligente regelaar is een essentiële maatregel om deze doelstelling te kunnen realiseren. Op de rwzi Utrecht is hiertoe gekozen voor 'fuzzy control', een geavanceerd regelconcept dat tot nu toe nog niet veel op rwzi's is toegepast.

'Fuzzy control'

'Fuzzy control' is een regeltechnische toepassing van 'fuzzy logic', waarbij processen worden geregeld op basis van beschikbare kennis die rechtstreeks in de regelaar wordt geïmplementeerd. Fuzzy logic is in staat om te gaan met niet-lineaire processen, dit in tegenstelling tot de meeste andere geavanceerde regeltechnieken. Er wordt geen gebruik gemaakt van complexe wiskundige modellen, maar van op de praktijk gebaseerde kennisregels. De eenvoudige opzet maakt fuzzy logic inzichtelijk, efficiënt en flexibel.

Ten opzichte van conventionele (PID) regelaars heeft een fuzzyregelaar een aantal voordelen. Het belangrijkste voordeel is dat de regelaar onder verschillende procescondities anders kan reageren. Daar waar een PID-regelaar het moet doen met vaste parameters, kan bij een fuzzyregelaar de mate waarop de regelaar reageert afgestemd worden op het werkpunt waar het proces zich op dat moment bevindt. Hierdoor kan beter worden ingespeeld op veranderingen in de procesomstandigheden, zoals het aanvoerdebiet en de procestemperatuur.

Een ander verschil tussen een conventionele regelaar en een fuzzyregelaar is dat de laatste meerdere meetwaarden gelijktijdig kan verwerken tot een stuurwaarde of zelfs tot meerdere stuurwaarden.

Een fuzzyregelaar werkt met kennisregels. Voor het bepalen hiervan kan in eerste aanvang worden volstaan met op het proces gebaseerde vuistregels. De kennisregels kunnen verder worden verfijnd door verdere waarneming van het proces in combinatie met het gedrag van de regelaar. Vaak kan een fuzzyregelaar een sterke meerwaarde opleveren voor die situaties waarbij met een conventionele regelaar geen bevredigend resultaat bereikt kan worden (zie ook het kader).

Rioolwaterzuivering

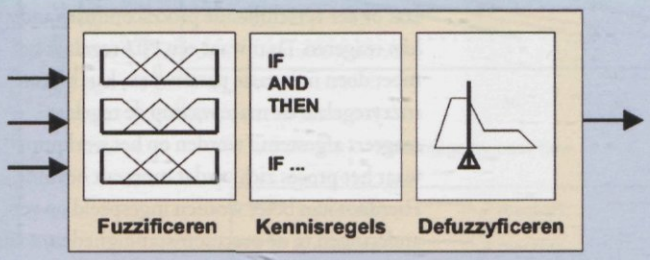
In 1997 heeft de STOWA de toepasbaarheid van fuzzy control bij het zuiveren van stedelijk afvalwater onderzocht[1),2)]. Hierbij is gebleken dat een fuzzyregeling, als onderdeel van een multivariabele beluchtingsregeling ten behoe-

De rioolwaterzuiveringsinstallatie van Utrecht.

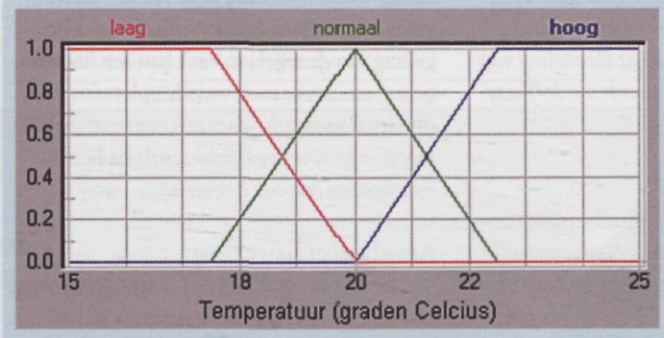


Opbouw fuzzy regelaar

Een fuzzyregelaar bestaat uit drie gedeelten. Het eerste deel zorgt voor het 'fuzzyficeren' van de meetwaarden. Daarna evalueren kennisregels de 'fuzzy' meetwaarden. Het uitgangssignaal ontstaat door 'defuzzyficeren', waarbij de uitkomst van de kennisregels vertaald wordt naar een scherpe stuurwaarde. De eerste illustratie geeft de opbouw schematisch weer.



Bij het 'fuzzyficeren' worden de meetwaarden uit het proces omgezet in vage termen. Een voorbeeld is de vertaling van temperatuur naar een waardering van laag, normaal en hoog. De mate waarin de temperatuur laag, normaal of hoog is, wordt bepaald via lidmaatschapsfuncties. In de tweede illustratie is hieraan een invulling gegeven. Hieruit is af te lezen dat een temperatuur van 24°C als hoog kan worden opgevat. De term hoog heeft bij 24°C de waarde 1 oftewel 100 procent. Bij 21°C is de term hoog nog ongeveer 40 procent, maar de term normaal ongeveer 60 procent. Het resultaat van de 'fuzzyficatie' is een vertaling van de meetwaarde naar de mate waarin deze past bij de gedefinieerde termen.



De kennis van het te regelen proces wordt vastgelegd in kennisregels. Met de algemene kennis van een centrale verwarming in een woonhuis zou de volgende kennisregel kunnen worden gedefinieerd: 'ALS de temperatuur laag is, DAN zet men de verwarming hoger'.
Kennisregels waarbij meerdere situaties worden gecombineerd worden hieronder als voorbeeld gegeven.

1. ALS de binnentemperatuur laag is EN de buitentemperatuur gemiddeld, dan moet de verwarming een beetje hoger.
2. ALS de binnentemperatuur laag is EN het buiten koud is, DAN moet de verwarming hoger.

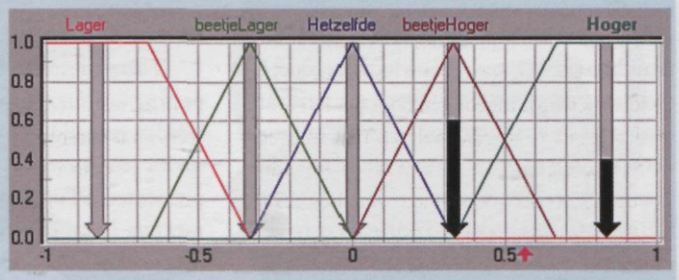
Om de uitkomst van een kennisregel te bepalen wordt voor de 'EN'-functie de minimumoperatie toegepast: de laagste van de twee termen bepaalt de uitkomst. Wanneer we de eerste regel uit bovenstaand voorbeeld nemen en aannemen dat 'de binnentemperatuur is laag' voor 80 procent geldt en 'de buitentemperatuur is gemiddeld' voor 60 procent, dan zal het resultaat van deze regel voor 60 procent gelden, namelijk 60 procent een 'beetje hoger'.
Voorbeeld:

1. min (0,8; 0,6) = 0,6 (beetje hoger)
2. min (0,8; 0,4) = 0,4 (hoger)

Het 'defuzzyficeren' zet de uitkomst van de kennisregels weer om naar een scherp stuursignaal. Wanneer meerdere kennisregels aan dezelfde actie bijdragen (bijvoorbeeld 'verwarming een beetje hoger'), dan wordt die kennisregel gebruikt waarvan de bijdrage het grootst is. Vanuit het voorgaande voorbeeld zijn de volgende uitkomsten van de kennisregels van toepassing:

1. beetje hoger = 0,6
2. hoger = 0,4

De vertaling naar een scherpe stuurwaarde ontstaat door het nemen van het gewogen gemiddelde. De derde illustratie geeft deze situatie weer. De stuurwaarde bedraagt in dat geval iets meer dan 0,5.



ve van de stikstofverwijdering, kan leiden tot een verbetering van de effluentkwaliteit en een verlaging van het energieverbruik. In dit onderzoek worden de volgende specifieke eigenschappen van fuzzy control genoemd, die dit type regelaar aantrekkelijk maken voor toepassing op een rwzi:

- de mogelijkheid om ervaringskennis op te nemen in regelingen,
- de mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag,
- de inzichtelijkheid voor niet-regeltechnici,
- de mogelijkheid aan te sluiten bij bestaande regelingen.

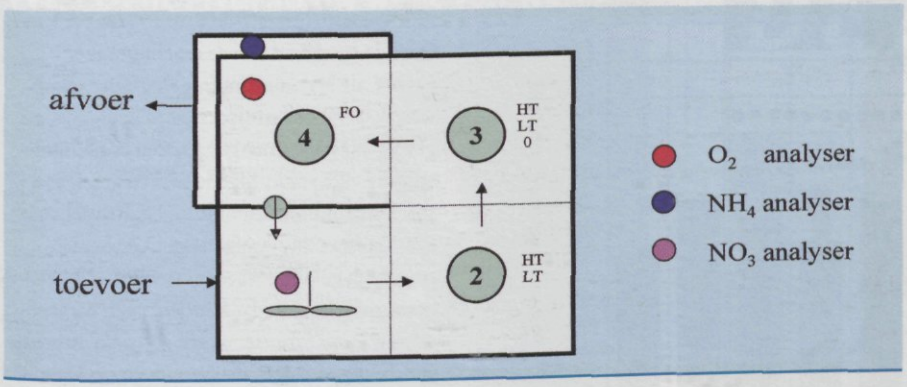
Als vervolg op deze studie heeft de STOWA een onderzoek uitgevoerd om de effecten van fuzzy control in meer detail te kwantificeren. Uit deze simulatiestudie[3] bleek onder andere dat door de implementatie van een fuzzyregeling een significante reductie van de schakelfrequentie van de beluchters kon worden gerealiseerd.

In de praktijk

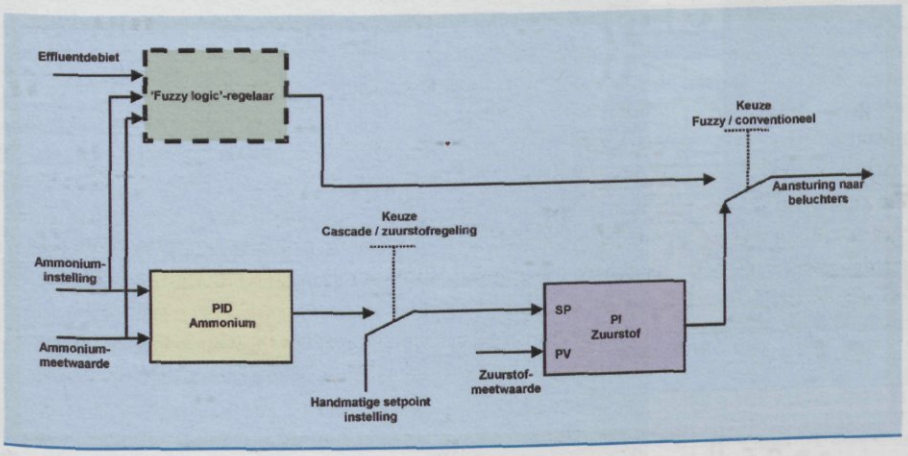
Het Waterschap Regge en Dinkel neemt als partner deel aan een Europees onderzoeksproject naar de toepassing van fuzzy control op rwzi's. Het praktijkonderzoek vindt plaats op de Nederlandse rwzi Nijverdal en de Duitse rwzi Rheine-Nord. In de eerste fase van dit project is op beide rwzi's de werking van een fuzzyregelaar vergeleken met een conventionele regelaar. De resultaten van de rwzi Rheine-Nord, een systeem met intermitterende beluchting, zijn zeer goed[4]. De processtabiliteit is verbeterd en het energieverbruik tot wel 35 procent verlaagd bij een bijna gelijkblijvende effluentkwaliteit. In Duitsland is met fuzzy logic met name ervaring bij intermitterend beluchte systemen[5], een type procesvoering dat in Nederland niet veel wordt toegepast.

Op de rwzi Nijverdal, bestaande uit twee parallelle oxidatiesloten, zijn de ervaringen met 'fuzzy' eveneens positief[4],[6]. De energiewinst was weliswaar beperkt, doordat de rwzi in de jaren ervoor reeds was aangepast volgens de laatste stand der techniek. De verhoging van de processtabiliteit wordt echter als belangrijk voordeel genoemd. De belangrijkste conclusie van beide onderzoeken is dat de technologie geschikt is voor praktische toepassingen en leidt tot een betere benutting van de capaciteit van de installaties.

In de tweede fase van het project zal de komende jaren de gehele waterlijn van beide



Afb. 1: Schematische weergave van de tweede trap van de rwzi Utrecht.



Afb. 2: Schematische weergave van de beluchtingsregeling van de rwzi Utrecht.

rwzi's worden uitgerust met fuzzy logic-besturing. Daarnaast zal op de rwzi Rheine-Nord een demonstratie- en ontwikkelingscentrum worden ingericht. Specialistische kennis bij het onderzoek wordt ingebracht door het INFA-instituut van de Hogeschool in Münster. Evenals bij de eerste projectfase wordt een groot deel van dit onderzoek gefinancierd door EUREGIO (in het kader van het Interreg-IIIa-programma van de EU) en door het Duitse en Nederlandse Ministerie van Economische Zaken.

Op de rwzi Utrecht wordt sinds eind 2002 de fuzzyregeling als multivariabele beluchtingsregeling ten behoeve van de stikstofverwijdering toegepast. In 2004 is ook op de rwzi Harderwijk van het Waterschap Veluwe een fuzzyregelaar geïmplementeerd. De opzet hiervan vertoont veel gelijkenis met die van de rwzi Utrecht. Een verschil tussen beide fuzzyregelaars betreft de technische implementatie. In Utrecht is de regelaar (vooralsnog) in de PLC van de bestaande besturingsinstallatie geprogrammeerd. Dit is uit oogpunt van de bediening niet optimaal. Op de rwzi Harderwijk is de regelaar gerealiseerd op een aparte PC, welke communiceert met het PLC/SCADA-systeem. Hierbij kan de bedrijfsvoerder de fuzzyregelaar vanuit de standaard procesvisualisatie in en uit bedrijf zetten en de belangrijkste procesinstellingen aanpassen. DHV heeft de mogelijkheid om vanaf afstand in te bellen, zodat de het gedrag van de fuzzyregelaar kan worden geanalyseerd.

Rwzi Utrecht

De rwzi Utrecht is een zogeheten AB-systeem en is oorspronkelijk ontworpen voor BZV-verwijdering en nitrificatie. Het systeem bestaat uit twee zuiveringsstappen. De eerste trap bestaat uit twee hoogbelaste beluchtingstanks, gevolgd door tussenbezinktanks. In deze eerste trap vindt chemicaliëndosering plaats ten behoeve van de fosfaatverwijdering. De tweede trap bestaat uit drie aparte beluchtingstanks gevolgd door 14 nabezinktanks. Elke beluchtingstank bestaat uit vier compartimenten (zie afbeelding 1). In het eerste compartiment vindt alleen menging plaats; in de andere drie compartiment kan worden belucht door middel van schotelbeluchters. Vanuit het vierde compartiment vindt recirculatie plaats naar het eerste compartiment, ten behoeve van de denitrificatie. In het eerste compartiment kan een koolstofbron worden gedoseerd om de denitrificatie te verbeteren.

Optimalisatie stikstofverwijdering

Om te kunnen voldoen aan de veranderende effluenteisen, is op de rwzi Utrecht in de loop der jaren een aantal verschillende maatregelen getroffen ter verbetering van de stikstofverwijdering. In 1996 is op basis van een optimalisatiestudie[7] de configuratie van de beluchtingstanks aangepast ter verbetering van de denitrificatie. Hierbij is het eerste compartiment ingericht als voordenitrificatietank en is een interne recirculatiepomp geplaatst.

In 1997 is vervolgens de rejectiewaterbehandeling in bedrijf genomen, waardoor de stikstofvracht van de waterlijn met 10 tot 15 procent werd gereduceerd. In 2002 is de nieuwe geavanceerde regeling geïmplementeerd en in gebruik genomen. Hierbij zijn tevens de beluchters in het vierde compartiment van elke beluchtingstank met frequentie-omvormers uitgerust. In 2003 is tenslotte de mogelijkheid van koolstofbrondosering aangebracht, die echter pas vanaf afgelopen november wordt gebruikt.

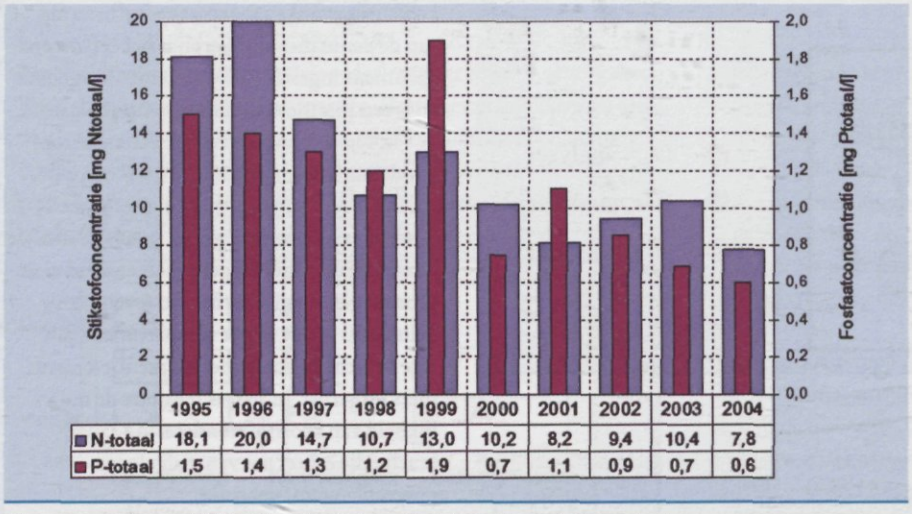
Beluchterregeling

In 2002 is op de rwzi Utrecht op de drie zuiveringsstraten van de tweede trap de beluchterregeling aangepast. Die bestaat vanaf dat moment uit twee parallelle regelingen (zie afbeelding 2) waartussen de bedrijfsvoerder kan kiezen. De eerste regelaar is een cascaderegeling op basis van ammonium en zuurstof. Het zuurstofsetpoint wordt bepaald door de ammoniumregeling. De cascaderegeling kan ook als zuurstofregeling worden toegepast. Hierbij wordt de ammoniumregeling uitgeschakeld en kan de zuurstofsetpoint door de bedrijfsvoerder worden ingesteld. Daarnaast is er de fuzzyregelaar, welke hierna verder wordt toegelicht. Bij een storing van de ammoniummeting wordt automatisch op de zuurstofregelaar overgeschakeld.

De kennisregels van de fuzzyregelaar zijn in overleg met de technologen van de rwzi Utrecht vastgesteld. Op basis hiervan kunnen meerdere meetwaarden gelijktijdig worden verwerkt tot een stuurwaarde. De meetwaarden die in de fuzzyregelaar van de rwzi Utrecht als ingang worden gebruikt, zijn de ammoniumconcentratie, het effluentdebiet en de zuurstofconcentratie. Het effluentdebiet bepaalt mede de snelheid van de regelaar. Bij een hoger debiet moet de regelaar sneller reageren op een hoog ammoniumgehalte dan bij een lager debiet. Het zuurstofgehalte begrenst de aansturing van de beluchters. Boven een bepaald zuurstofgehalte heeft het verder verhogen van de luchtinbreng geen zin. Alle ingangsvariabelen worden via de kennisregels omgezet in een stuurwaarde voor de beluchting. De uitsturing van de fuzzyregelaar wordt aan het snelheidssetpoint van de regelbare beluchter 4 gekoppeld (zie afbeelding 2). Indien de uitsturing van de fuzzyregelaar een bepaalde waarde overschrijdt of onderschrijdt, wordt één van de andere beluchters (2 of 3) naar een hoger of lager toerental geschakeld.

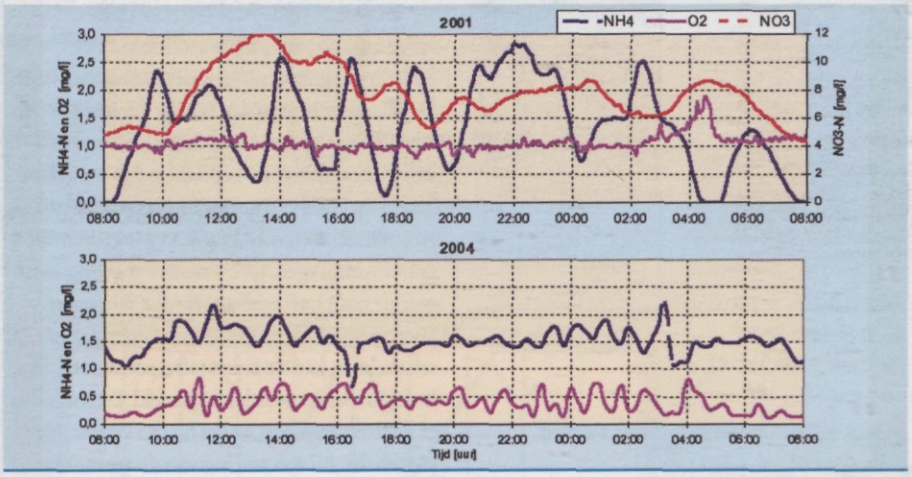
Resultaten

In het eerste jaar (2003) heeft de fuzzyrege-



	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
N-totaal	18,1	20,0	14,7	10,7	13,0	10,2	8,2	9,4	10,4	7,8
P-totaal	1,5	1,4	1,3	1,2	1,9	0,7	1,1	0,9	0,7	0,6

Afb. 3: De jaargemiddelde effluentkwaliteit van de rwzi Utrecht over de laatste tien jaar.



Afb. 4: Het verloop van het ammonium- en zuurstofgehalte in de beluchtingstank.

laar door een aantal technische problemen niet optimaal gefunctioneerd. Hierbij is onder andere gebleken dat de continuïteit en betrouwbaarheid van het ammoniumsignaal van groot belang is voor de goede werking van de regelaar. In de loop van 2004 zijn deze problemen verholpen en heeft de regelaar goed gefunctioneerd. Bij de beoordeling worden daarom de resultaten van 2004 nader beschouwd.

De fuzzyregelaar is in 2004 op alledrie de beluchtingstanks toegepast, waardoor een onderlinge vergelijking tussen de verschillende straten niet mogelijk is. Een andere manier om het effect te toetsen is door de werking van de rwzi met fuzzyregelaar te vergelijken met een periode waarin de fuzzyregelaar nog niet in werking was. Zoals aangegeven zijn op de rwzi Utrecht in de afgelopen jaren echter verschillende maatregelen getroffen die tot doel hebben om de stikstofverwijdering te verbeteren. Daarnaast is gelijktijdig met de introductie van de fuzzyregelaar een aantal kleinere aanpassingen in de bedrijfsvoering doorgevoerd. Het kwantificeren van het effect van de fuzzyregelaar op de resultaten van de rwzi Utrecht dient daarom met enige terughoudendheid te worden betracht.

Uit afbeelding 3 blijkt dat de effluentkwaliteit van de rwzi Utrecht in 2004 beter is dan ooit, met een jaargemiddeld stikstofgehalte van 7,8 milligram per liter en een fosfaatgehalte van 0,6 milligram per liter. In 2001 was de effluentkwaliteit vergelijkbaar, maar was sprake van een zeer nat jaar.

Op basis van de beschikbare gegevens over de afgelopen jaren is geen uitspraak te doen over het effect van de fuzzyregelaar op het energieverbruik van de beluchting.

Het belangrijkste verschil tussen de conventionele regeling en de fuzzyregelaar is de wijze waarop de meetsignalen worden geïnterpreteerd en worden vertaald in regelacties. Met behulp van de fuzzyregelaar kan sneller en adequater op wisselingen in de aanvoer of de procescondities worden gereageerd. Het gevolg hiervan is dat bij de fuzzyregelaar het verloop van de ammoniumconcentratie in de beluchtingstank veel gelijkmatiger is als bij de conventionele regeling. Dit is weergegeven in afbeelding 4, waarbij het verloop van de ammonium-, zuurstof en nitraatconcentratie (alleen in 2001) in compartiment 4 op een gemiddelde droge dag is weergegeven. Met de conventionele regelaar varieerde het ammoniumgehalte tussen 0 en 3 milligram per liter. Door de traagheid van de regeling was 's nachts, als het ammoniumgehalte zeer laag was, de beluchtingscapaciteit te hoog, met als gevolg dat het nitraatgehalte een onnodige stijging vertoonde. Met de fuzzyregelaar is de spreiding in het ammoniumgehalte veel kleiner. Voor het zuurstofgehalte in de beluchtingstank geldt het tegengestelde. Dit is een gevolg van het feit dat zuurstof geen parameter is waarop expliciet wordt geregeld. Inbreng van zuurstof is geen doel maar een middel om de stikstofverwijdering te bewerkstelligen. De meting van het zuurstofgehalte dient daarom slechts als bewaking tegen overbeluchting.

Evaluatie

Op de rwzi Utrecht is circa twee jaar ervaring opgedaan met de fuzzyregelaar. De rwzi Utrecht is daarmee de eerste rwzi in Nederland waarmee op praktijkschaal deze regelaar wordt toegepast. Gezien de specifieke situatie is het op dit moment niet mogelijk om de verbetering van de effluentkwaliteit of een verlaging van het energieverbruik enkel toe te schrijven aan deze beluchterregeling. Wel kan worden geconcludeerd dat de fuzzyregelaar leidt tot een stabielere procesvoering, welke met name tot uiting komt in de geringe fluctuaties in het ammoniumgehalte in de beluchtingstank. Doordat de fuzzyregelaar zowel informatie over het ammonium- als het zuurstofgehalte en het effluentdebiet meeneemt in de regelacties, is de regelaar in staat om snel en adequaat te anticiperen op procesfluctuaties. Uiteindelijk heeft dit er mede toe geleidt dat de rwzi Utrecht in 2004 een effluentkwaliteit heeft bereikt die tot voor kort niet voor mogelijk werd gehouden voor een tweetrapssysteem.

LITERATUUR

1) STOWA (1997). De toepasbaarheid van fuzzy control bij het zuiveren van stedelijk afvalwater. Rapport 97-32.
2) Kalker T., C. van Goor, P. Roeleveld, M. Ruland en R. Babuska (1999). Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: design, simulation and evaluation. Water Science and Technology nr. 4, pag. 71-78.
3) STOWA (1999). Perspectieven van de toepassing van Fuzzy Control op de rwzi Nieuwveer. Rapport 99-w-02.
4) Hegeman G., T. Böning, M. Lohse, L. Wessendorf, E. Weiner, H. Ellenbroek en U. Eggert (2003). Einsatz von Fuzzy-Logik in Belebungsstufen. KA-Abwasser, Abfall nr. 7, pag. 894-900.
5) Langaki G. (2003). Energie-besparing d.m.v. een revolutionaire beluchtingsregeling. Neerslag nr. 3.
6) Mondelinge mededelingen van Hans Ellenbroek, Waterschap Regge en Dinkel (januari 2005).
7) STOWA (1997). Optimalisatie van de stikstofverwijdering in de waterlijn van de rwzi Utrecht - Regeling van de interne recirculatie. Rapport 97-w05.