

Inleiding

In het kader van de aangescherpte effluent-eisen is de laatste jaren in Nederland veel aandacht uitgegaan naar de uitbreiding en aanpassing van bestaande rioolwater-zuiveringsinstallaties (rwzi's). Nu de daaruit voortvloeiende bouwactiviteiten voor een groot deel achter de rug zijn, wordt de aandacht meer en meer gericht op de beheerstaak. Hierbij wordt gestreefd naar een optimaal milieurendement en kosten-efficiency, wat in de praktijk betekent het voldoen aan de gestelde eisen tegen

Samenvatting

Nu bouwprogramma's in het kader van de aangescherpte effluenteisen voor een groot deel zijn geïmplementeerd, krijgen milieurendement en kostenefficiëntie steeds meer aandacht. In dit kader worden dynamische simulatiemodellen steeds vaker als een effectief hulpmiddel gezien. De praktische toepassing ervan in geavanceerde regelaars voor het sturen van het beluchtingproces wordt in onderhavig artikel uiteengezet. De resultaten van een eerste praktijkonderzoek op de rwzi Zwijndrecht met de multivariabele QUTE-regelaar worden gepresenteerd. Vooral op het vlak van procesbeheersing c.q. sturing van effluentkwaliteit en op het vlak van energiebesparing zijn veelbelovende resultaten bereikt. Hiermee zijn de potenties van de QUTE-regelaar voor milieurendement en kostenefficiëntie aangetoond.



IR. A. M. J. VEERSMA
DHV Water BV



IR. K. MEINEMA
DHV Water BV



IR. H. F. VAN DER ROEST
DHV Water BV



ING F. L. G. BESTEN
Zuiveringsschap Hollandse
Eilanden en Waarden

minimale kosten. Binnen deze doelstelling worden dynamische simulatiemodellen steeds vaker als een effectief hulpmiddel ervaren. Met behulp van hiermee verkregen inzicht wordt het zuiveringsproces geoptimaliseerd en kunnen procestechnische maatregelen vooraf op hun effect worden getoetst. De waarde hiervan voor de praktijk is in een eerste artikel van een drieluik [1] aan de hand van verschillende voorbeelden geïllustreerd. In het voorliggende tweede artikel wordt de volgende stap gezet in de toepassing van dynamische simulatiemodellen. Hiertoe wordt het regelen van het zuiveringsproces door de inzet van modellen in geavanceerde regelaars in beschouwing genomen. In één van de artikelen van een eerder gepubliceerd drieluik [2] werden de theoretische mogelijkheden hiervan voor de beluchterregeling al aangegeven. Hiertoe werd de zogeheten multivariabele QUTE-regelaar geïntroduceerd. In het voorliggende artikel worden de resultaten van de eerste praktijktoepassing van deze regelaar gepresenteerd. In het laatste artikel van het drieluik zal worden ingegaan op het afvalwatersysteem, waarbij de waarde van dynamische modellen in een bredere scope zal worden geplaatst.

De QUTE-regelaar

De ontwikkelingen op het gebied van multivariabele regeltechniek hebben geleid tot geavanceerde regelaars. De bekendste daarvan zijn Fuzzy Control, Model Predictive Control (MPC) en Linear Quadratic

Gaussian Control (LQG). In tegenstelling tot de PID-regelaar wordt bij de opzet van multivariabele regelaars gebruik gemaakt van kennis van het te regelen proces, hetzij in de vorm van een model, hetzij in de vorm van kennisregels. Vanwege de beschikbaarheid van een goed beschrijvend model (IAWQ nr. 1) heeft DHV

Water BV de QUTE-regelaar ontwikkeld. Deze regelaar is gebaseerd op de LQG methodiek.

De twee belangrijkste onderdelen van de QUTE-regelaar zijn het Kalman Filter en de Linear Quadratic regelaar. Het Kalman Filter schat de toestand van het zuiveringsproces in (toestandschatter) en gebruikt daarvoor zowel meetsignalen van 'procesverstoringen' (influentdebiet, beluchting), alsook meetsignalen van het zuiveringsproces (bijvoorbeeld $\text{NH}_4\text{-N}$ - en $\text{NO}_3\text{-N}$ concentratie). De zogenaamde Linear Quadratic regelaar berekent op basis van de geschatte toestand de stuursignalen. Deze signalen worden vastgesteld via een minimalisatie van een kwadratische weegfunctie, die wordt bepaald door een na te streven doel. In het kader van de toenemende aandacht voor milieurendement en kostenefficiëntie, kan deze doelfunctie bijvoorbeeld worden gesteld als de maxi-

Afb. 1 - Overzichtsfoto van de rwzi Zwijndrecht.



male N_{totaal} -verwijdering bij een zo laag mogelijke energieinbreng. Ook kan binnen de doelfunctie een eventuele heffing op de effluentlozing worden betrokken. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de QUTE-regelaar wordt verwezen naar [2].

De rwzi Zwijndrecht

In samenwerking met het Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden en met subsidie van de NOVEM zijn de potenties van de QUTE-regelaar op de rwzi Zwijndrecht (zie afb. 1) getest.

Deze rwzi is sedert 1993 in bedrijf en heeft een ontwerpcapaciteit van 130.000 i.e. (à 50 g BZV) en 5.200 m³/h. Het zuiveringsconcept is gebaseerd op een zeer laag belast actief-slibstelsel van het type Carroussel met een ontwerp slibbelasting van 0,045 kg BZV/(kg DS.d) en toepassing van chemische defosfatering. Met een belasting van circa 70% van de ontwerpcapaciteit wordt een jaargemiddelde N_{totaal} - en P_{totaal} -effluentconcentratie (1996) bereikt van respectievelijk 3,4 en 0,6 mg/l.

Mede op grond van deze uitstekende effluentkwaliteit is gekozen voor de rwzi Zwijndrecht als onderzoeklocatie.

Hiermee wordt voorkomen dat een eventuele verbetering van het zuiveringsresultaat zou kunnen worden veroorzaakt door de extra aandacht, die een onderzoek impliciet met zich meebrengt. Daarnaast beschikt de rwzi Zwijndrecht over twee identieke zuiveringsstraten, waardoor één straat gedurende de testperiode als referentie kon fungeren.

De zuurstofinbreng wordt in elk Carrousselcircuit gerealiseerd met drie puntbeluchters, waarvan er één is uitgerust met een frequentie omvormer, één met een twee toeren motor en de derde een vast toeren-tal heeft. Deze beluchters worden aangestuurd via een enkelvoudige zuurstofregeling. Het zuurstof setpoint en de plaats van de zuurstofopnemer worden door de bedrijfsvoering aangepast op basis van de gemeten daggemiddelde NO_3 -N en NH_4 -N-concentraties. Voor het onderzoek is de QUTE-regelaar in de beluchtersturing van één van de twee zuiveringsstraten (A) geïmplementeerd.

Het onderzoek

Als meetsignalen voor de QUTE regelaar is gebruik gemaakt van het influentdebiet en het zuurstofgehalte, alsmede van de NO_3 -N en NH_4 -N-concentratie in de afloop van het beluchtingscircuit. De stikstofparameters van beide Carrouselcircuits zijn intermitterend bemeaten, waardoor de meetwaarde van één circuit eens per 20 minuten kon worden bepaald. Voor de QUTE-regeling is dit afdoende gezien de responsniveaus van het beluchtings-

circuit voor deze procesvariabelen.

Voor de aansturing van de beluchters door de QUTE-regelaar is dezelfde schakelvolg-orde aangehouden als bij de bestaande zuurstofregeling in de referentiestraat. Na de aanloophase waarin de QUTE-regelaar is afgestemd op de rwzi Zwijndrecht, is gedurende het onderzoek een tweetal perioden te onderscheiden. Deze zijn gekenmerkt door verschillende doelfuncties.

Periode 1 – 3 april 1997 t/m 14 mei 1997

Minimalisatie van de energieinbreng uitgaande van een gelijkblijvende effluentkwaliteit.

Periode 2 – 15 mei 1997 t/m 8 juni 1997

Maximalisatie van de energiebesparing uitgaande van de gestelde effluenteisen. Na periode 2 is de QUTE-regelaar vervangen door de bestaande zuurstofregeling en zijn beide zuiveringsstraten nog enige maanden gevolgd, om eventuele naijleffecten met betrekking tot de slibbezink-eigenschappen te kunnen vaststellen.

De resultaten

In tabel I zijn enkele kentallen voor de stikstofparameters en het energieverbruik over periode 1 weergegeven. Een typisch

TABEL I – Resultaten van periode 1.

Periode 1	QUTE (straat A)	Referentie (straat B)
Afloop Carroussel		
NH_4 -N [mg/l]	0,8	0,7
NO_3 -N [mg/l]	0,6	0,6
Energieverbruik [kWh/d]	3.594	3.925

verloop van de beluchtingcapaciteit en de corresponderende stikstofconcentraties is voor beide zuiveringsstraten te zien in afbeelding 2. Mede op basis hiervan kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

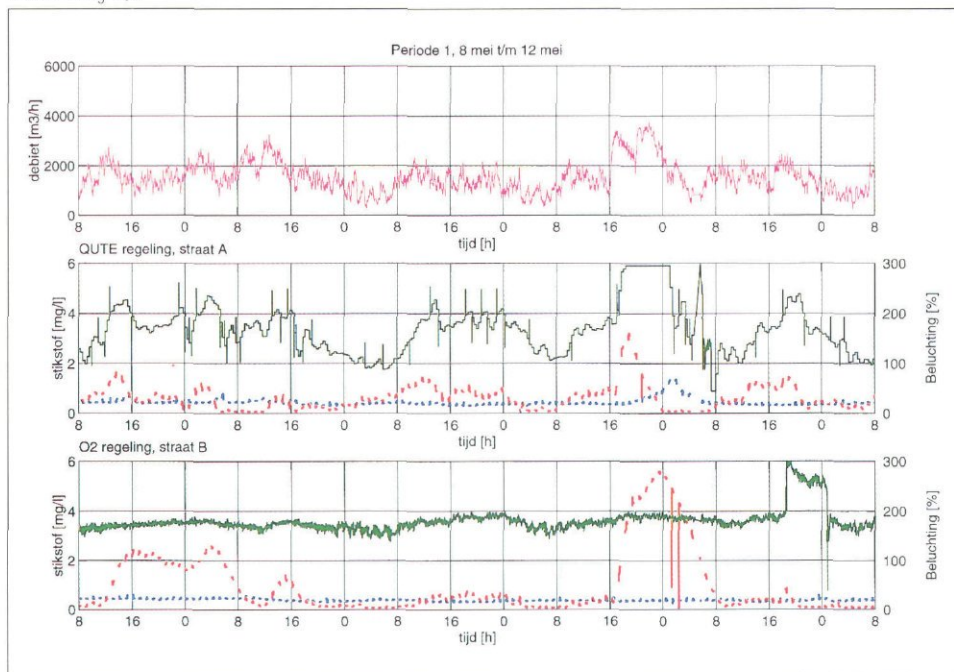
- de gemeten stikstofconcentraties van beide straten zijn vergelijkbaar en van een zeer laag niveau;
- de QUTE-regeling vlak in vergelijking tot de zuurstofregeling NH_4 -N concentratie pieken beter af;
- de QUTE-regeling verbruikt hiervoor gemiddeld ruim 8% minder energie. Tijdens de tweede periode is uitgegaan van een maximalisatie van de energiebesparing en is met het oog op de geldende effluenteisen een hogere NH_4 -concentratie toegestaan. Het setpoint van de QUTE-regelaar is daartoe verhoogd van 0,8 naar 3,0 mg/l. In tabel II zijn de belangrijkste kentallen over periode 2 opgenomen.

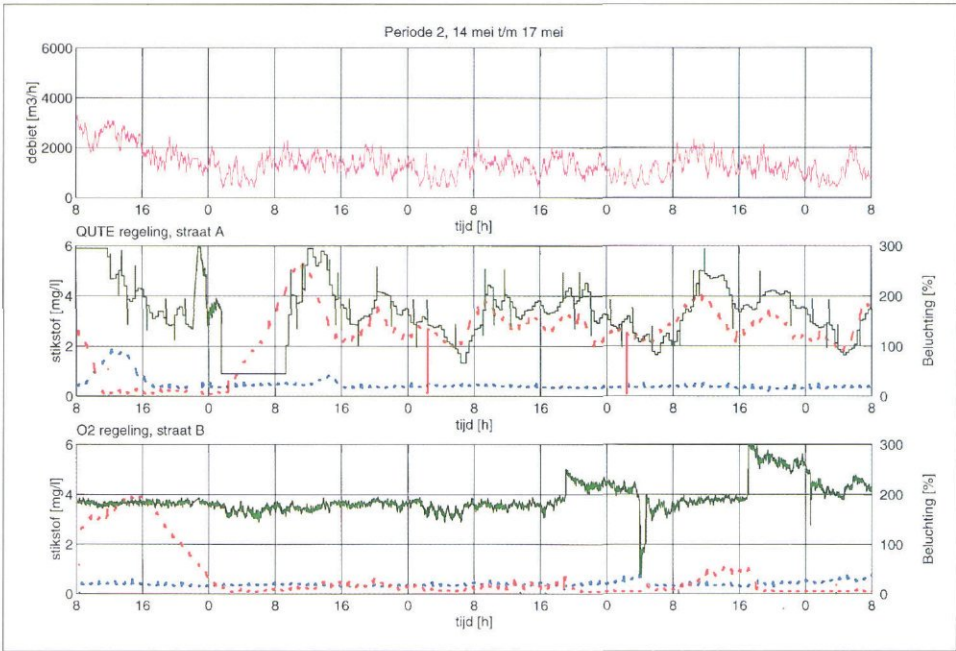
TABEL II – Resultaten van periode 2.

Periode 2	QUTE (straat A)	Referentie (straat B)
Afloop Carroussel		
NH_4 -N [mg/l]	3,1	0,4
NO_3 -N [mg/l]	0,4	0,7
Energieverbruik [kWh/d]	3.600	4.541

Een typisch verloop van de beluchtingcapaciteit en de corresponderende stikstofconcentraties is voor beide zuiveringsstraten te zien in afbeelding 3. Hierin is het effect van het omschakelen van het NH_4 -setpoint tijdens de eerste dag goed waar te nemen. Op basis van de resultaten

Afb. 2 – Resultaten van periode 1 (paars: het influentdebiet; groen: beluchtingsintensiteit in %; rood: NH_4 -N; blauw: NO_3 -N).





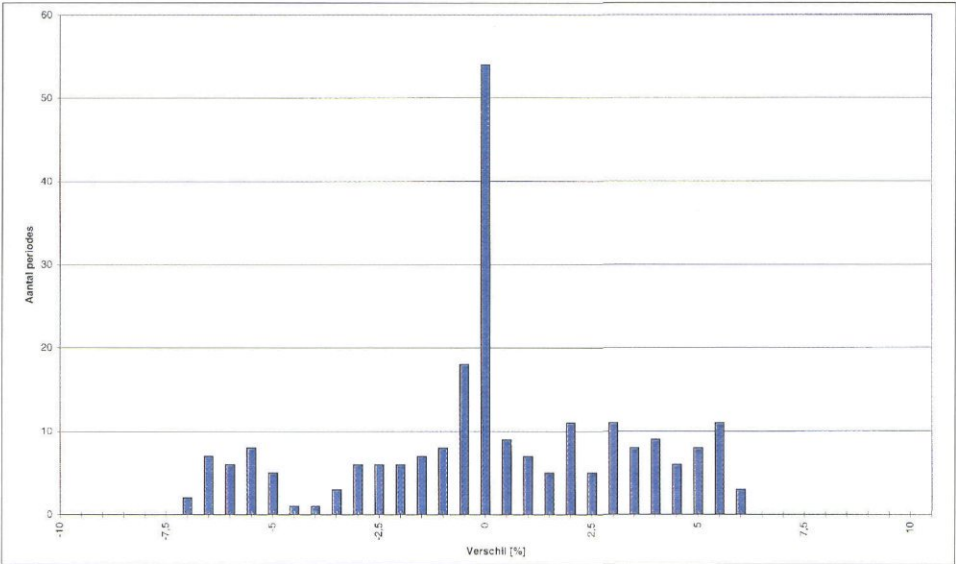
◀ Afb. 3 - Resultaten van periode 2. (paars: het influent-debiet; groen: beluchtingsintensiteit in %; rood: NH₄-N; blauw: NO₃-N).

aan het verschil in energieverbruik tussen beide zuiveringsstraten. Uit het gemeten verschil van ruim 8% en de frequentieverdeling in afbeelding 4 blijkt dat dit verschil significant is. Dit geldt ook voor de gemeten energiebesparing van 20% in periode 2. Tijdens de derde periode zijn de resultaten van de rwzi vooral gevolgd om eventuele najieffekten te kunnen waarnemen. Hierbij is vooral gelet op de slibbezink-eigenschappen, waarvan bekend is dat deze bij een lager beluchtingniveau kunnen verslechteren. In afbeelding 5 is het verloop van de slibvolumeindex in de tijd weergegeven. Hieruit blijkt over een periode van anderhalf jaar een marginaal hogere SVI voor straat 1 (QUTE), wat tijdens de testperiode en de periode daarna niet wezenlijk is veranderd. Ofschoon een testperiode van ruim 3 maanden te kort is om 'harde' uitspraken te doen over slibeigenschappen, is er op basis van het bovenstaande geen aanleiding om te veronderstellen dat de inzet van de QUTE regelaar deze negatief heeft beïnvloed.

Afsluiting

Het eerste praktijkonderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van een multi-variabele QUTE-regelaar op de rwzi Zwijndrecht is succesvol afgesloten. Vooral op het vlak van procesbeheersing c.q. sturing van effluentkwaliteit en op het

• *Vervolg op pagina 675.*

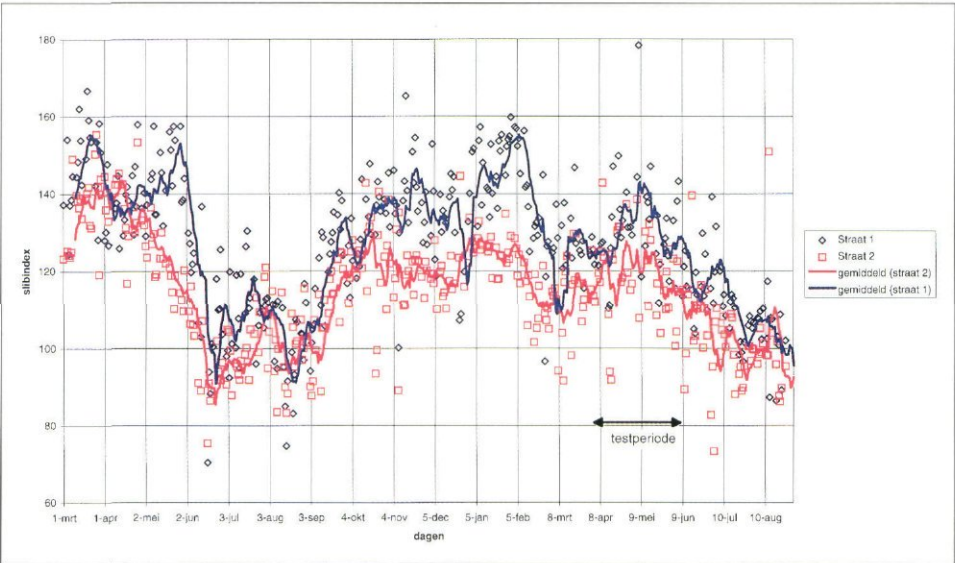


◀ Afb. 4 - Histogram van het verschil in energie-inbreng tussen straat A en B gemiddeld over periodes van 42 dagen.

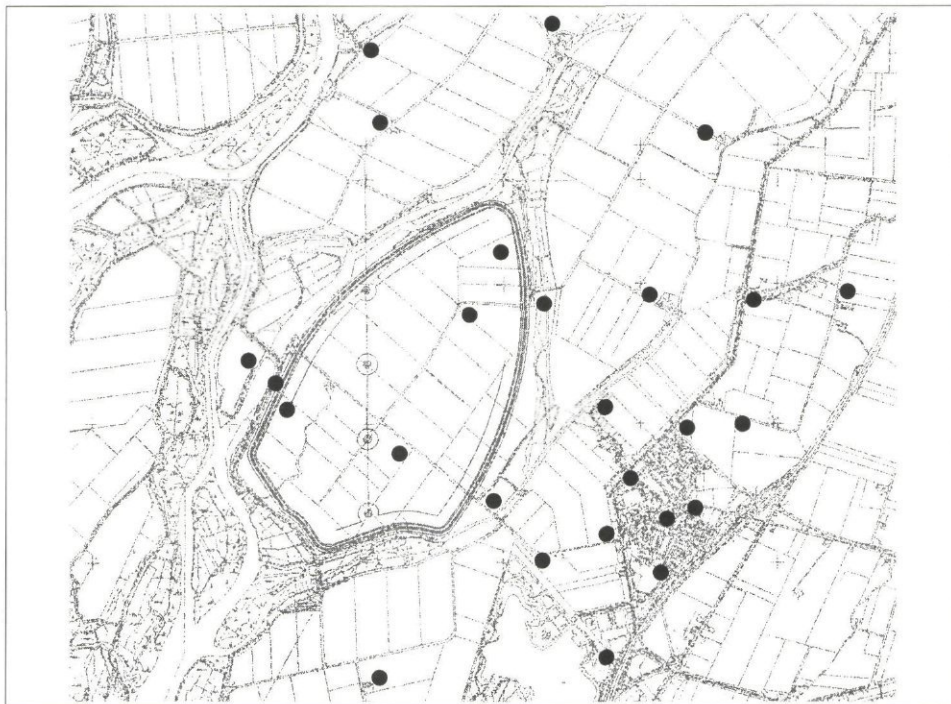
kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

- de gemeten NH₄-N concentratie in straat A is overeenkomstig de doelstelling;
- de QUTE-regeling bereikt een energiebesparing van 20%.

Om de bereikte energiebesparing verder te onderbouwen is het van belang nader in te gaan op de vergelijkbaarheid van beide zuiveringsstraten. Daartoe is op basis van de gegevens over 1996 een statistische analyse uitgevoerd, waarvan de resultaten schematisch zijn weergegeven in afbeelding 4. Hierin is de verdeling van het verschil in energieverbruik tussen de beide zuiveringsstraten in een histogram gepresenteerd. Daarin is het aantal periodes van 42 dagen (lengte onderzoeksperiode 1) gerelateerd



Afb. 5 - Slibvolumeindex voor de twee straten A en B. ▶



Afb. 7: - Het nulmeetnet.

onderzoek heeft in elke fase van het ontwerpproces een belangrijke rol gespeeld. Per fase is een stapsgewijze verfijning doorgevoerd. Tijdens het definitief ontwerp zijn door gedetailleerd geotechnisch en geohydrologisch onderzoek de relevante gegevens met voldoende nauwkeurigheid verzameld en ingevoerd in het grondwater-model.

Op basis van de eerste modelberekeningen is het ontwerp enigszins aangepast. Vooral de effecten van een spaarbekken Janneezand voor de grondwaterstand in de kern Hank zijn tot vrijwel nul gereduceerd door het afvangen van de kwel via een verdiepte watergang, de 'kanoroute'. De overige effecten worden vooral bepaald door het lekverlies uit het spaarbekken. De effecten zijn echter (zeer) gering. Bij een normaal bekkenpeil stijgt de grondwaterstand in het omringende landbouwgebied met enkele centimeters tot decimeters. Bij een incidentele peildaling in het bekken (door een innamestop) kan er een toestroming naar het bekken optreden, maar vanwege het kortstondige karakter zijn de effecten voor de omgeving vrijwel nihil.

Hoewel het 10 à 15 jaar duurt voordat het spaarbekken Janneezand gerealiseerd is, is inmiddels een uitgebreid meetnet van peilbuizen in en rondom het Janneezand geïnstalleerd (zie afb. 7). Vanaf mei 1996 worden de waterstanden en stijghoogten gemeten, zodat de daadwerkelijke verschillen tussen de huidige situatie (zonder spaarbekken) en de toekomstige situatie (mét spaarbekken) bepaald kunnen worden. Op deze wijze kan achteraf

gecontroleerd worden of de berekende geohydrologische effecten overeenkomen met de werkelijkheid en kan zonodig worden bijgestuurd.

Literatuur

- Oskam, G. en Waals, J. M. J. (1995). *Het vierde Biesbosch-bekken* Voordracht uit de 47e Vakantiecursus Drinkwatervoorziening 'Bouwen voor de 21e eeuw' gehouden op 6 januari 1995 aan de TU-Delft.
- Provincie Noord-Brabant (1994). *MER Uitwerkingsplan Vierde Spaarbekken*.
- Salverda, A. P., Waals, J. M. J. en Biesheuvel, A. (1996). *Geohydrologisch onderzoek voor het vierde Biesbosch-bekken*, H₂O (29) 1996, nr. 3, pagina 67-70.
- Wee, T. H. van, Waals, J. M. J. en Salverda, A. P. (1997). *Ontwerp spaarbekken Janneezand: Optimalisatie van geohydrologische proeven bij grote projecten*, Stromingen (in druk).
- Witteveen+Bos (1994). *MER Uitwerkingsplan Vierde Spaarbekken: Basisdocument Geohydrologie*.

• • •

Dynamische simulatie

- Slot van pagina 671.

vlak van energieverbruik zijn veelbelovende resultaten bereikt. De toepassing brengt echter ook kosten en andere consequenties met zich mee. Tegenover de potentieel grote (financiële) voordelen staan kosten voor het ontwerp van de regelaar, de benodigde hard- en software en de noodzakelijke analyzers. Ook moet worden stilgestaan bij de mogelijke veranderingen in de procesvoering. In plaats van het aanpassen van (zuurstof)setpoints komen doelfuncties en evaluatie van performance

meer naar de voorgrond. In het kader van de hedendaagse aandacht voor milieurendement en kostenefficiëntie zijn het vooral deze laatste aspecten die de toepassing van geavanceerde regelaars interessant maakt.

In het eerste artikel van dit drieluik is de waarde van dynamische simulatie in de praktijk geïllustreerd aan de hand van een aantal voorbeelden van uiteenlopende aard. Dit tweede artikel heeft zich gericht op de mogelijke inzet van simulatie bij de regeling van het zuiveringsproces.

In het derde en laatste artikel zal worden ingegaan op het afvalwatersysteem, waarbij de waarde van simulatiemodellen in een bredere scope wordt geplaatst.

Literatuur

1. Meinema, K., Roest, H. F. van der, Schagen, K. M. van en Veersma, A. M. J. (1997). *'Dynamische simulatie: van theorie naar praktijk'*, H₂O (30) 1997, nr. 22.
2. Schagen, K. M. van, Veersma, A. M. J., Meinema, K. en Roest, H. F. van der (1995). *'Multivariabel: de nieuwe generatie?'*, H₂O (28) 1995, nr. 16.

• • •

Colloquium Recent Advances in Subsurface Hydrology

The Section for Hydrology and Ecology of the Department of Water Management, Environmental and Sanitary Engineering (Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology), has recently started a colloquium series under the title *Recent Advances in Subsurface Hydrology*.

The colloquium is meant to serve as a forum for presenting results of up-to-date research in subsurface hydrology.

The following two talks are scheduled for the third colloquium in this series *Mathematical modeling of biodegradation of organic pollutants in soils*, Claudio Gallo (Centre for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia (CRS4), Cagliari, Sardinia, Italy) and *Napl in the subsurface: processes and remediation methods an overview*, Majid Hassanizadeh (Department of Water Management, Environmental and Sanitary Engineering Delft University of Technology, Delft, The Netherlands).

Location, date and time

Thursday, November 6, 1997. 14u30;
Room 5.99, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences, Stevinweg 1,
NL-2628 CN Delft.

Information

Ed Veling 015-278 50 74,
e-mail: Ed.Veling@ct.tudelft.nl &
Majid Hassanizadeh 015-278 73 46,
e-mail: Majid.Hassanizadeh@ct.tudelft.nl.