



Luuk Rietveld, Technische Universiteit Delft  
 Alex van der Helm, Waternet  
 Kim van Schagen, DHV  
 Joost Kappelhof, Waternet

# Geavanceerde sturing van drinkwaterzuiveringen met een integraal model

**PROMICIT is een project waarmee Waternet, DHV, ABB en TU Delft een doorbraak gerealiseerd hebben op het gebied van integrale modellering voor processturing van drinkwaterzuiveringsprocessen. Het richtte zich op het zuiveringsproces te Weesperkarspel van Waternet (met een productie van 30 miljoen kubieke meter per jaar). Hierbij werd gebruik gemaakt van de geautomatiseerde proefinstallatie die de zuivering van Weesperkarspel nabootst. Voor het realiseren van de doelstellingen werden twee promovendi, Alex van der Hem en Kim van Schagen, aangesteld die belangrijke delen van het onderzoek uitvoerden. De laatste promoveerde op 19 mei jl. (zie de vorige uitgave van H<sub>2</sub>O). Het project werd gesubsidieerd door SenterNovem in het kader van de TS-regeling (Technologische Samenwerking). Tijdens een afsluitend symposium op 4 maart bij Waternet werd teruggekeken op vijf jaar onderzoek.**

In de jaren tachtig is veel geïnvesteerd in de zuiveringen van Weesperkarspel en Leiduin. Zo zijn ontharding en ozon-kool gerealiseerd. Tijdens die periode is veel kennis ontwikkeld en ervaringsdeskundigheid opgedaan. Ook zijn de processen geautomatiseerd, waarbij wel altijd een handmatige bijstelling mogelijk was. Dit leidde tot een zeer goede kwaliteit van het drinkwater voor Amsterdam en omstreken. Uitbreiding van de zuivering werd inmiddels niet meer verwacht, omdat de watervraag geleidelijk afneemt. Daarom is Waternet zich meer gaan richten op het optimaliseren van de bestaande installaties, zoals de biologische actieve koolfiltratie. Hierbij werden steeds vaker modellen gebruikt en werd ook meegewerkt aan de ontwikkeling van modelleromgevingen zoals Stimela (gebaseerd op Matlab, waarmee drinkwaterzuiveringsprocessen kunnen worden doorgerekend). Deze modellen werden vervolgens gezien als een mogelijkheid kennis te borgen als compensatie voor het verdwijnen van ervaringsdeskundigheid en om ze in te zetten voor geavanceerde sturing. Dit zou dan kunnen leiden tot een optimale en duurzame bedrijfsvoering met minder gebruik van grondstoffen, waarbij de zuivering integraal wordt gezien<sup>1)</sup>. Deze visie leidde tot PROMICIT. In het project werd gewerkt aan het opstellen van een integraal

model, het modelgebaseerd sturen van de zuivering, het aansluiten bij vragen uit de praktijk en het vertalen van de modelresultaten naar de praktijk én het gebruiken van de kennis voor opleiding.

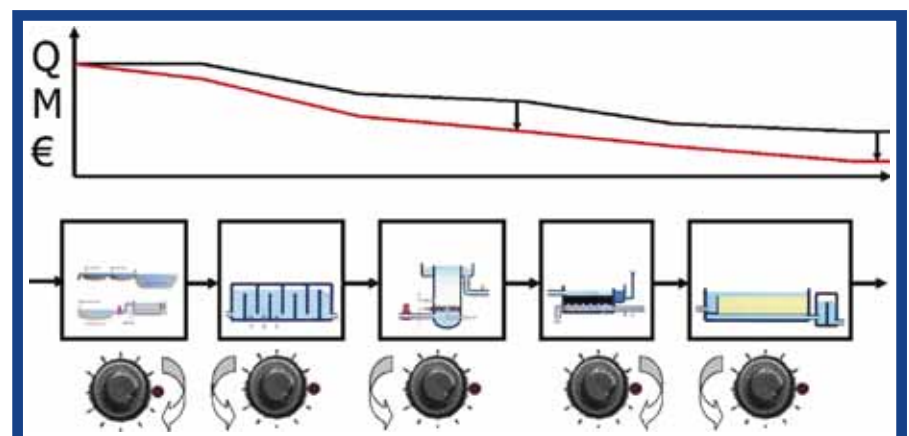
## Integraal modelleren van drinkwaterzuivering

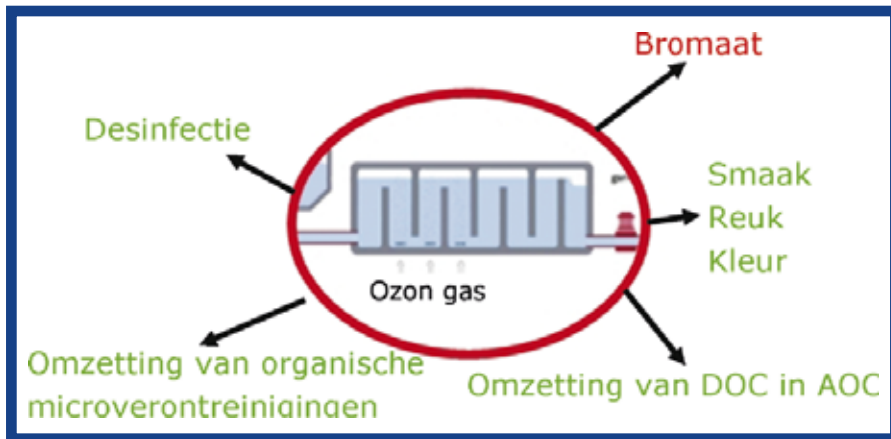
De verschillende zuiveringsprocessen in een installatie beïnvloeden elkaar, ook op de zuivering Weesperkarspel met ozonisatie, ontharding, actieve koolfiltratie en langzame zandfiltratie. Voorbeelden van de

onderlinge invloed tussen de processtappen zijn:

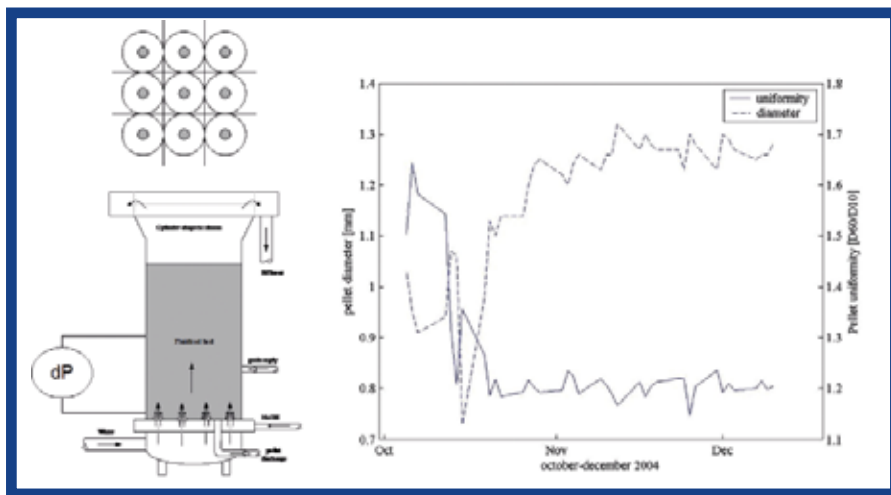
- de concentratie natuurlijk organisch materiaal in het water en de gewenste desinfectie die de hoogte van de ozon-dosering bepalen;
- de invloed van deze dosering op de hoeveelheid geproduceerde assimileerbaar organische koolstof;
- als gevolg hiervan de biologische activiteit in de actieve koolfilters en uiteindelijk ook de biologische stabiliteit van het drinkwater;

**Afb. 1: Integraal modelleren van zuivering leidt tot efficiëntere bedrijfsvoering.**





Afb. 2: Relatie van ozonisatie tot waterkwaliteit.



Afb. 3: Verschilddrukmeting voor het schatten van de pelletgrootte.

- de adsorptieve capaciteit van de kool voor het verwijderen van organische microverontreinigingen door de hoeveelheid biologische omzetting van het natuurlijk organisch metaal;
- de beïnvloeding van de bromaatvorming door de pH en de bromideconcentratie tijdens de ozonisatie;
- en tenslotte de beïnvloeding van de pH door de ontharding en de biologische omzettingen.

Door op een integrale manier naar de zuivering te kijken zou een optimale bedrijfsvoering mogelijk moeten zijn<sup>2)</sup>. Maar wat is nu optimaal? Gekeken is bijvoorbeeld naar de kwaliteit van het geproduceerde water, de milieubelasting en de kosten van de bedrijfsvoering<sup>3)</sup>. De conclusie luidde dat de kostenbesparingen op bedrijfsvoering misschien wel tien procent kunnen zijn, maar dit betekent voor de prijs van drinkwater slechts een verlaging van één procent. Een verlaging van de milieubelasting van de bedrijfsvoering van tien procent is te vergelijken met een vermindering van het aantal autokilometers van drie kilometer per inwoner per jaar.

De grootste winst is te halen uit het verbeteren van de drinkwaterkwaliteit. Dit zal indirect leiden tot een vermindering van het gebruik van flessenwater. Flessenwater is 150 tot 200 keer zo duur als drinkwater en 90 tot 1000 keer zo slecht voor het milieu. In één van de onderzoeken is vooral

aandacht besteed aan de optimalisatie van de ozonisatie. Dit proces speelt een sleutelrol in de zuivering van Weesperkarspel: het wordt beïnvloed door voorgaande processen en beïnvloedt de volgende processen (zie afbeelding 2). Ozonisatie is belangrijk voor desinfectie van pathogene micro-organismen, oxidatie van organische microverontreinigingen, verbetering van smaak, geur, reuk en kleur en omzetting van natuurlijk organisch in biologisch afbreekbaar materiaal. Tevens leidt het tot de vorming van bromaat. Voor de modellering van ozonisatie zijn vergelijkingen opgezet voor het voorspellen van de concentratie van ozon in water (dosering en afname), afname van UV-absorptie, berekening van CT-waarde, afdoding van *E. coli*, vorming van AOC en bromaat. Dit model is getest op laboratorium- en proefinstallatieschaal<sup>4),5),6),7)</sup>. Hiervoor was een speciaal ontwerp gemaakt dat een volledige propstroom kon simuleren en waarmee men na hele korte contacttijden (vanaf één seconde) al de afbraak van ozon kon meten. Het model kon vervolgens toegepast worden op de automatische sturing van de proefinstallatie en uiteindelijk ook op de sturing van de ozonisatie in het bedrijf. De afbraak van ozon en dus de CT-waarde bleek goed voorspeld te kunnen worden. Dit gold ook voor de bromaatvorming. Op grond hiervan kon een alternatieve besturing berekend worden die afgestemd was op de variatie van de waterkwaliteit over het jaar (temperatuurs-

wisselingen) en de benodigde desinfectiecapaciteit van de drinkwaterzuivering.

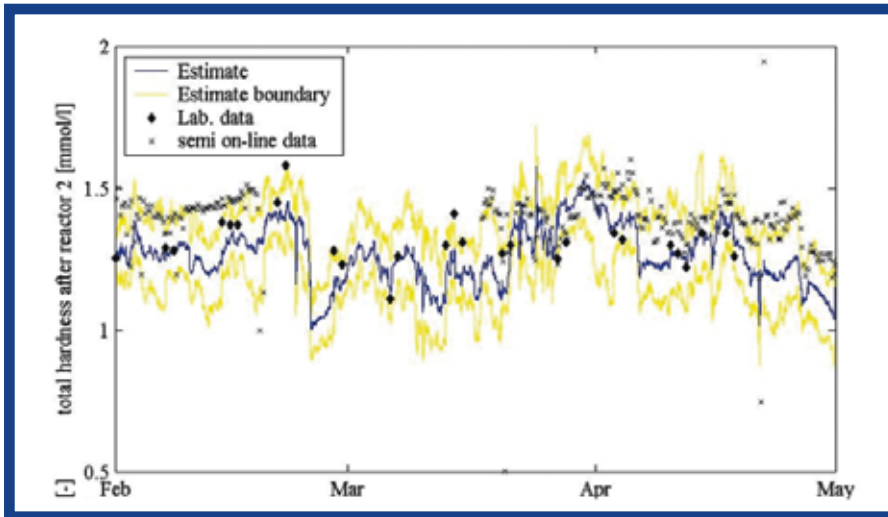
### Modelgebaseerd sturen van drinkwaterzuiveringsinstallaties

Een geavanceerde sturing zal leiden tot een (kleine) kostenbesparing in grondstoffen, maar vooral tot minder onderhoud. Voor drinkwaterzuivering geldt dat een kleine aanpassing van het proces op korte termijn kan leiden tot een groot effect op lange termijn. Daarom moet voorkomen worden dat te snel gereageerd wordt op kleine verstoringen. Voor het sturen van een zuivering is het van belang om het doel te bepalen van de zuivering en de bedrijfsvoering, de operationele beperkingen te kennen, de belangrijkste verstoringen te identificeren, te bepalen wat geregeld moet worden én hoe het geregeld moet worden. De modelgebaseerde aanpak bestaat uit verschillende niveaus<sup>8),9),10),11)</sup>.

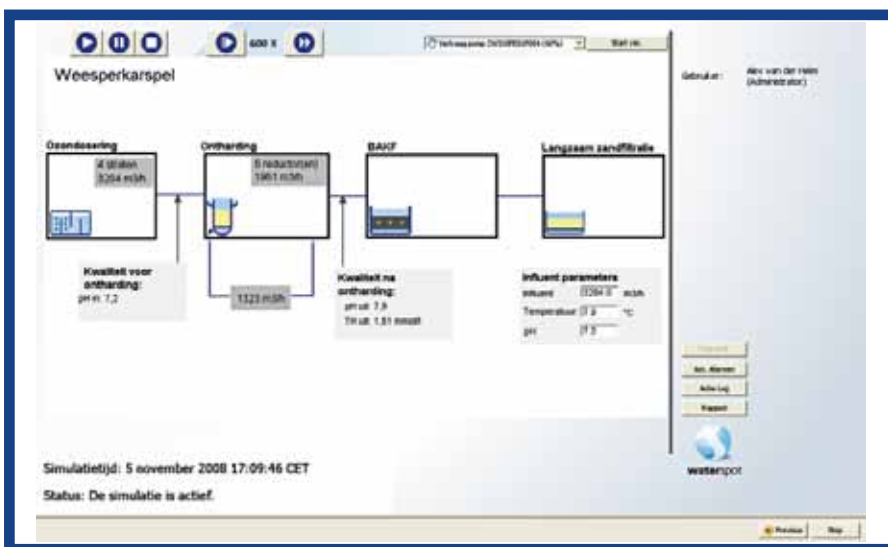
Het doel van de ontharding is het verwijderen van calcium (en het verhogen van de pH) door het doseren van een base, in dit geval natronloog. Doordat een oververzadiging van calciumcarbonaat optreedt, zal het kristalliseren op pellets die bij tijd en wijle worden afgetapt. Regelmatig zal ook zandsuppletie moeten plaatsvinden. Het model van de ontharding bestaat uit een stromings-, een fluidisatie-, een evenwichts- en een kinetische component. Vooral voor de fluidisatiecomponent is uitgebreid modelonderzoek verricht. Het model is gevalideerd aan de hand van laboratorium-, proefinstallatie- en bedrijfsproeven. Het vormt de basis van de sturing, geeft aan wat de sturingsrandvoorwaarden zijn, kan worden ingezet voor optimalisatie en vormt ook de basis voor modelgebaseerde monitoring. Voor de sturing van de ontharding is het vooral van belang fluidisatie te garanderen en te voorkomen dat granaatzand wordt afgetapt. Hiervoor is het schatten van de pelletgrootte onderin de reactor noodzakelijk. Hiertoe is een systeem ontwikkeld met verschilddrukmeting om de pelletgrootte te kunnen schatten en er dus op te kunnen sturen (zie afbeelding 3).

De bedhoogte moet te allen tijde gemaximaliseerd en de 'by-pass-flow' geoptimaliseerd zijn om oververzadiging in het effluent te minimaliseren. Hierdoor kan het gebruik van granaatzand en chemicaliën significant dalen. Het model kan verder ingezet worden om de eindhardheid en de pH (na ontharding) te schatten (zie afbeelding 4). In combinatie met laboratoriummetingen blijkt dit zelfs een beter systeem dan het meten van de waterkwaliteit met on-line meetapparatuur.

Gezien het feit dat een onthardingspellet een gemiddelde verblijftijd in de reactor heeft van ongeveer 100 dagen, is het voor een optimale bedrijfsvoering van belang voorspellingen te doen die rekening houden met deze tijdschik. Met ervaringsdeskundigheid is dit, door seizoensvariatiën in onder andere de temperatuur, praktisch onmogelijk, maar met geavanceerde sturing met kennismodellen behoort dit wel tot de



Afb. 4: Schatting van waterkwaliteit met modelgebaseerd monitoren.



Afb. 5: Scherm van Waterspot met modellen ontwikkeld in PROMICIT.

mogelijkheden. In het afgelopen jaar is op Weesperkarspel geëxperimenteerd met een verbeterde sturing van de ontharding. Het gebruik van granaatzand bleek meer dan gehalveerd te zijn.

### Procesautomatisering

De vraag is nu hoe de kennis die ontwikkeld is met PROMICIT geïmplementeerd kan worden in de procesautomatisering. Momenteel wordt kwantiteitssturing toegepast, waarbij vraagvoorspelling een belangrijke factor vormt. De kwaliteitssturing, zoals ontwikkeld in PROMICIT, kan nu doorgevoerd gaan worden. Een volgende stap waaraan Waternet werkt, is het standaardiseren van de besturingssystemen, waarbij modelgebaseerd regelen standaard is opgenomen. Niet alleen binnen drinkwater maar voor de hele watercyclus. Hiervoor is WARP (Waternet Automatisering en Regeling Primaire proces) in het leven geroepen. Het belangrijkste aspect voor het slagen van modelgebaseerd regelen is een *user interface* die begrepen wordt door de bedrijfsvoerders om het proces te controleren en bij te sturen. De uitdaging is dus om de kennis die PROMICIT opleverde, te verankeren in het sturingssysteem en die over te dragen aan de bedrijfsvoerders en de procesautomatiseerders.

### Productie

Omdat de modellen voor de technologen nog moeilijk toegankelijk zijn, is het beeld van de werkelijke waarde van de ontwikkelingen nog slecht te beoordelen. Het ter beschikking komen van een simulator (Waterspot) van de modellen aan de technologen van de productieafdeling zal inzicht geven in de betrouwbaarheid en robuustheid van de modellen. Dan zal blijken in welke mate ze ingezet kunnen worden voor beslissingsondersteuning in de bedrijfsvoering. Verankering van de kennis die is opgedaan binnen het onderzoek is derhalve een punt van aandacht. Dit geldt tevens voor het onderhoud en beheer van de opgeleverde producten.

### Breder perspectief

Toen PROMICIT in 2003 begon, was men sceptisch over het gebruik van modellen in de processturing. Door de jarenlange ervaring in de bedrijfsvoering leek het erop dat de computer niets zou kunnen toevoegen. Inmiddels is automatisering gemeengoed geworden en het gebruik van ICT niet meer weg te denken uit onze samenleving. Traditioneel is een zuivering robuust en overgedimensioneerd, wordt het bedreven op ervaring en gaat het er vorna-

melijk om voldoende water te leveren. De kwaliteitsborging gebeurt dan achteraf. Met behulp van modelgebaseerd werken wordt het echter mogelijk om de zuivering robuust te bedrijven door het inzetten van kennisgedreven voorspellingsmodellen, waarbij waterkwaliteit geoptimaliseerd kan worden. PROMICIT heeft een belangrijke rol gespeeld in de ontwikkeling hiervan. In het project is de basis gelegd voor de ontwikkeling van de fundamentele kennis van de processen, het ontwikkelen van procesmodellen voor ozon en ontharding, het ontwikkelen van sensoren voor het schatten van de toestand van het proces, het ontwikkelen van algoritmes voor modelgebaseerde sturing en uiteindelijk de ontwikkeling van modelleeromgevingen die ingezet kunnen worden voor het simuleren van de processen.

Om de modellen te verbeteren wordt op fundamenteel niveau het gedrag van organische microverontreinigingen, zoals hormoonverstorende stoffen, onderzocht met als doel op grond van de karakteristiek van de stof het gedrag in de zuivering te voorspellen. Ook wordt de stroming in zuiveringsprocessen bestudeerd om beter te kunnen ontwerpen zonder last te hebben van kortsluitstroming<sup>12)</sup>. Op het gebied van de processen wordt onderzoek verricht naar ionenwisseling voor het verwijderen van organische stof ter verbetering van de biologische stabiliteit en de optimalisatie van de biologische actieve koolfiltratie<sup>13)</sup>. Er zal zelfs onderzocht worden of deze processen ook efficiënt ingezet kunnen worden in de afvalwaterzuivering ter voorkoming van afgeven van organische microverontreinigingen aan het oppervlaktewater.

Een belangrijke uitkomst van het project is dat meer aandacht besteed moet worden aan de schatting van de toestand van de processen en dat niet alleen gekeken moet worden naar de geproduceerde eindkwaliteit. Dit leidde tot initiatieven om metingen te gaan doen in de processen. Een voorbeeld daarvan is het meten met akoestische signalen in zandfilters. De ervaringen van PROMICIT zijn ook meegenomen in het Europese project TECHNEAU. In dit project wordt onder andere verder gewerkt aan het ontwikkelen van een vrij toegankelijk modelleerplatform<sup>14)</sup>, nieuwe sensoren<sup>15)</sup> en nieuwe zuiveringstechnieken. Optimalisatie van bedrijfsvoering is daarbij zeer belangrijk.

Als grootste struikelblok voor het gebruik van modellen wordt de toegankelijkheid voor processtechnologen en bedrijfsvoerders genoemd. Deze zijn vaak niet bekend met modelleeromgevingen. Daarom is begonnen met het ontwikkelen van een simulatiepakket om de toegankelijkheid te verbeteren. Het sluit aan bij de dagelijkse bedrijfsvoering. De modellen kunnen aangestuurd worden via een omgeving die lijkt op de gangbare SCADA-systemen. Dit simulatiepakket kan dan niet alleen gebruikt worden voor verbetering van de procesvoering maar ook voor het trainen van bedrijfsvoerders.

Nieuwe uitdagingen zijn de koppeling met datasystemen, de verbetering en uitbreiding

van de modellen, het schatten van de procestoestand en de koppeling met andere gerelateerde vakgebieden, zoals drinkwaterdistributie en afvalwaterbehandeling, inbedding in de bedrijfsvoering van (drink) waterzuiveringen en vervolgens implementatie in beslissingsondersteuning en bij processturing.

#### LITERATUUR

- 1) Bosklopper Th., L. Rietveld, R. Babuska, B. Smaal en J. Timmer (2004). Integrated operation of drinking water treatment plant at Amsterdam water supply. *Water Science and Technology: Water Supply* 4 nr. 5-6, pag. 263-270.
- 2) Rietveld L., A. van der Helm, K. van Schagen, L. van der Aa en H. van Dijk (2008). Integrated simulation of drinking water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 57, nr. 3, pag. 133-141.
- 3) Van der Helm A., L. Rietveld, Th. Bosklopper, J. Kappelhof en H. van Dijk (2008). Objectives for optimization and consequences for operation, design and concept of drinking water treatment plants. *Water Science & Technology: Water Supply* 8, nr. 3, pag. 297-304.
- 4) Van der Helm A., P. Smeets, E. Baars, L. Rietveld en H. van Dijk (2005). Dosing ratios for reduced bromate formation by dissolved ozone dosing. *Water Science and Technology: Water Supply* 5, nr. 5, pag. 35-40.
- 5) Van der Helm A., P. Smeets, E. Baars, L. Rietveld en H. van Dijk (2007). Modelling of ozonation for dissolved ozone dosing. *Ozone Science & Engineering* 29, nr. 5, pag. 379-389.
- 6) Van der Helm A., L. Rietveld, E. Baars, P. Smeets en H. van Dijk (2008). Modeling disinfection and by-product formation during the initial and the second phase of natural water ozonation in a pilot-scale plug flow reactor. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 57, nr. 6, pag. 435-449.
- 7) Smeets P., A. van der Helm, Y. Dullemond, L. Rietveld, H. van Dijk en G.-J. Medema (2006). Inactivation of *Escherichia coli* by ozone under bench-scale plug flow and full-scale hydraulic conditions. *Water Research* 40, pag. 3239-3248.
- 8) Van Schagen K., R. Babuska, L. Rietveld en E. Baars (2006). Optimal flow distribution over multiple parallel pellet reactors: a model-based approach. *Water Science and Technology* 53, nr. 4-5, pag. 493-501.
- 9) Van Schagen K., L. Rietveld, R. Babuska en E. Baars (2008). Control of the fluidised bed in the pellet softening process. *Chemical Engineering Science* 63, nr. 5, pag. 1390-1400.
- 10) Van Schagen K., L. Rietveld en R. Babuska (2008). Dynamic modelling for optimisation of softening. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 57, nr. 1, pag. 45-56.
- 11) Van Schagen K., L. Rietveld, R. Babuska en O. Kramer (2008). Model-based operational constraints for fluidised bed crystallisation. *Water Research* 42, nr. 1-2, pag. 327-337.
- 12) Wols B., W. Uijttewaal, L. Rietveld, G. Stelling, H. van Dijk en J. Hofman (2008). Residence time distributions in ozone contactors. *Ozone Science & Engineering* 30, nr. 1, pag. 49-57.
- 13) Cornelissen E., N. Moreau, W. Siegers, A. Abrahamse, L. Rietveld, A. Grefte, M. Dignum, G. Amy en L. Wessels (2008). Selection of anionic exchange resins for removal of natural organic matter (NOM) fractions. *Water Research* 42, nr. 1-2, pag. 413-423.
- 14) Dudley J., G. Dillon en L. Rietveld (2008). Water treatment simulators. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 57, nr. 1, pag. 13-21.
- 15) Van den Broeke J., P. Ross, A. van der Helm, E. Baars en L. Rietveld (2008). Use of on-line UV/Vis-spectrometry in the measurement of dissolved ozone and AOC concentrations in drinking water treatment. *Water Science & Technology* 57, nr. 8, pag. 1169-1175.