



Harrie Timmer, Oasen

Lucyna Magda, TU Delft

Bas Wols, KWR Watercycle Research Institute / TU Delft

Luuk Rietveld, TU Delft

CFD-modellering: spreiding verblijftijd in reservoir ongevoelig voor ontwerp

Om eventuele microbiologische nagroei in drinkwaterdistributiesystemen te voorkomen, moet de verblijftijd van het drinkwater zo kort mogelijk zijn. In een reservoir van Oasen bleek de verblijftijd maximaal zeven dagen te zijn. Onderzocht is hoe we dit kunnen verkorten. Computational Fluid Dynamics (CFD)-modellering wijst uit dat de verblijftijdspreiding in een reservoir nauwelijks wordt beïnvloed door aanpassing in het ontwerp. Verkorting van de verblijftijd moet worden bereikt door aanpassing van de bedrijfsvoering.

Tijdens transport, distributie en opslag van drinkwater kan de waterkwaliteit verslechteren. Een aantal pathogene micro-organismen, waaronder *Aeromonas*, *Legionella*, *Mycobacterium* en *Pseudomonas*^{1),2)} kan gaan groeien. Cellen kunnen zich op de wanden gaan hechten en biofilms vormen. Deze biofilms beschermen de micro-organismen tegen desinfectiemiddelen en hogere organismen^{3),4)}. Uiteindelijk kunnen de pathogene micro-organismen weer worden afgegeven aan het water, waardoor ze een risico voor de consument vormen.

In Nederland is de bacteriologische kwaliteit van het drinkwater uitstekend⁵⁾. We beheersen deze risico's dus goed. In 2006 werden in het distributienet slechts zes overschrijdingen gemeld met bacteriën van de coligroep (0,08 procent van de metingen). Het betrof in alle gevallen een incident. Dit gaat niet vanzelf: door drinkwaterbedrijven wordt doorlopend gewerkt aan het minimaliseren van infectierisico's. Om deze kwaliteit ook voor de toekomst te borgen (klimaatverandering), is kennis van de groei van micro-organismen in het drinkwatersysteem noodzakelijk. Met dit inzicht kan de infrastructuur en bedrijfsvoering verder geoptimaliseerd worden. De groei van deze organismen is, naast voedselaanbod, afhankelijk van temperatuur en verblijftijd in het transport- en distributiesysteem. *Aeromonas* wordt beschouwd als indicator voor de groei van micro-organismen in het

systeem. Uit onderzoek in de jaren '90 blijkt al dat de hoogste waarden van aeromonas in drinkwater worden gevonden in de warmere periode: juli-september⁶⁾. Daarnaast worden de hogere concentraties *Aeromonas* vooral in de uitlopers van het voorzieningsgebied gevonden⁷⁾. Dit zijn de plekken waar de verblijftijden het grootst zijn en de temperatuur in de zomer het hoogst is. In het voorzieningsgebied van drinkwaterbedrijf Oasen zien we dit algemene beeld terug. Hogere waarden van *Aeromonas* worden

in de zomer aangetroffen. Verkennende metingen in de warme zomer van 2006 wezen uit dat bij zomerse temperaturen tien procent van de *Aeromonas*-analyses in het distributiegebied boven de grens van 1.000 kVE/100 ml lag, met name in de periferie van het gebied.

De temperatuurontwikkeling van het drinkwater is met het gegeven distributienet en bijbehorende opwarming via de bodem praktisch alleen te beïnvloeden door

Reservoirs te Gorinchem (foto: Bob Somers).



verkorting van de verblijftijd. Voor drinkwaterbedrijf Oasen geldt dat de temperatuur van het drinkwater afhankelijk is van de verblijftijd. Het gebruikt grondwater, dat van origine altijd 12°C is, neemt na zuivering tijdens het transport langzaam de temperatuur van de bodem aan. Zomers warmt dit water dus op. Om nagroei te vermijden is het daarom van belang de verblijftijd van het drinkwater zo kort mogelijk te houden en stagnante zones in het leidingnet te vermijden. Reden voor Oasen om, naast het reduceren van het voedselaanbod en het spuien van leidingen, onderzoek te doen naar de verblijftijdspreiding in het transport- en distributiesysteem. Om deze verblijftijd vast te stellen, zijn in 2007 enkele verblijftijdproeven uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van het verschil in elektrisch geleidingsvermogen (EGV) van onthard en niet-onthard water. Continue metingen van deze EGV op verschillende plekken in het distributienet gaven zo een inzicht in de verblijftijd van het water in het net. Geconcludeerd werd dat de verblijftijd circa 20 procent langer was dan berekend met het leidingnetprogramma Aleid. De gemiddelde verblijftijd in het distributienet bleek twee dagen. Opvallende uitschieter in deze studie was de grootte van de verblijftijdspreiding in de reservoirs in Gorinchem en Slidrecht. Uit de metingen en modellering van de verblijftijd in deze reservoirs bleek dat gedeeltes van het water tot wel zeven dagen in het reservoir verblijven.

Deze resultaten waren aanleiding om te onderzoeken of de verblijftijdspreiding in deze reservoirs kan worden verminderd. In eerste instantie werd gezocht naar een mogelijkheid om het ontwerp van de reservoirs aan te passen, zodat de stroming meer een propstrooming benadert. Daardoor zou de verblijftijdspreiding verminderen. In het kader van samenwerking van Oasen met de TU Delft is besloten te kijken of computational fluid dynamics (CFD)-modellering gebruikt kan worden om het bestaande reservoir in Gorinchem te optimaliseren. Verschillende aanpassingen aan het ontwerp zijn daartoe doorgerekend met CFD.

Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics is een onderdeel van de vloeistofmechanica dat geavanceerde numerieke technieken gebruikt om de stroming in vloeistoffen te modelleren. Het is dan dus mogelijk te simuleren hoe het water stroomt in een reactor (snelheid en richting). Bovendien kan de verspreiding van opgeloste stoffen, zoals

chloor of ozon, voorspeld worden met de CFD modellen. In de gezondheidstechniek wordt CFD voornamelijk toegepast op ozonen UV-installaties^{8),9),10)}. Bij deze installaties gaat het erom dat voldoende desinfectie wordt gerealiseerd. Kortsluitstroming in de reactoren heeft een zeer nadelige invloed op deze desinfectie en moet dan ook zoveel mogelijk worden voorkomen. Met behulp van CFD kunnen de kortsluitstromen worden opgespoord en maatregelen worden berekend om deze tegen te gaan. Voor ozonkelders bleek het installeren van tussenschotten een zeer effectieve manier te zijn om de kortsluitstromen te verminderen en de desinfectiecapaciteit te verhogen (zonder de ozondosering te verhogen). Bij het doorrekenen van de verblijftijdspreiding in reinwaterreservoirs is het tegengestelde aan de hand. Hier is niet zo zeer de kortsluitstroming relevant; het optreden van stagnante zones moet worden vermeden. Eén en ander heeft natuurlijk wel met elkaar te maken. Wanneer kortsluitstroming optreedt, zullen er ook gebieden zijn waar het water langer zal verblijven. Voor reinwaterreservoirs kan dus dezelfde aanpak gebruikt worden als bij de ozon en UV installaties.

Kortsluitstroming kan gemeten worden door passieve tracers toe te voegen aan de ingaande stroom en deze weer te meten in de uitgaande stroom. De verspreiding van de tracer in het reservoir laat dan zien waar de kortsluitstromen en de stagnante zones zich bevinden. De concentratie tracer zal heel langzaam oplopen in de stagnante zones, terwijl deze heel snel zal oplopen in de kortsluitgebieden.

Reservoir Gorinchem

Het reservoir te Gorinchem bestaat uit twee gekoppelde cilinders van 23 meter doorsnede. Deze zijn tot 8,7 meter gevuld met water. Dit water wordt bovenin het reservoir aangevuld en op ongeveer dezelfde plek onderin weggepompt (zie afbeelding 1a). De totale inhoud van elke cilinder is 3.600 kubieke meter. Dagelijks gaat er 3.100 tot 3.400 kubieke meter water uit. De gemiddelde verblijftijd in het reservoir is dus ongeveer een dag. Het reservoir wordt bedreven als suppletiepompstation. Dit betekent dat gedurende een groot deel van de dag er geen water geleverd wordt uit het reservoir. Alleen als er meer vraag is dan de aanvoer vanuit de zuivering kan leveren (ochtend- en avondpiek), zal het reservoir water bijleveren. De benutting van het reservoir wordt dus vooral gestuurd door de piekvraag in het achterliggende gebied.

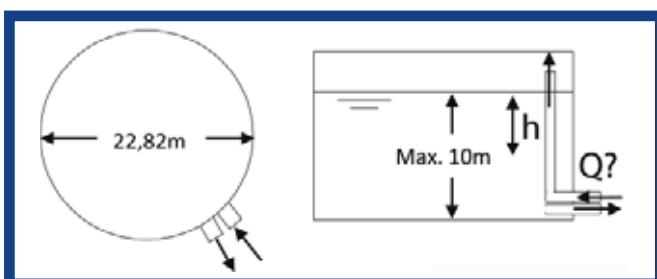
Bij CFD-modellering wordt een eindig elementen stromingsmodel gebruikt om het stromingspatroon in het reservoir te bepalen¹¹⁾. De vergelijkingen voor een onsamenproefbare vloeistof worden opgelost op een driehoekig rooster. De wanden worden gezien als een *no slip*-rand, wat betekent dat het water op de wand stilstaat en het vrije oppervlak als een *free slip*-rand, wat betekent dat het water in horizontale richting kan bewegen aan het vrije oppervlak. Bij het punt van instroming wordt een watersnelheid opgelegd, terwijl bij het punt van uitstroming een waterhoogte (druk) wordt gegeven. Het stromingsmodel wordt gebruikt om de turbulentie te modelleren. De verblijftijdspreiding wordt tenslotte bepaald door een passieve tracer aan het binnenkomende water toe te voegen. Door de concentratieverandering in de tijd bij te houden bij de uitstroom kan de verblijftijdspreiding van het systeem verkregen worden. De verspreiding van de tracer wordt gemodelleerd met een advection-diffusie-vergelijking. De advection wordt bepaald door de gemiddelde stromingsnelheid en de diffusie wordt afgeleid van de turbulente kinetische energie (k) en de turbulente dissipatie (ϵ) van het turbulentiemodel (ook wel k - ϵ model genoemd).

Uitgevoerd onderzoek

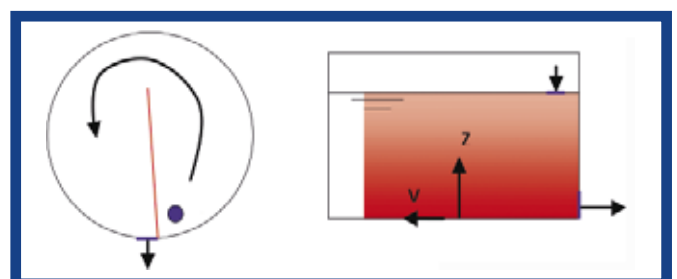
Met het CFD-model is een enkel reservoir doorgerekend. Hierbij is aangenomen dat het reservoir continu doorstroomd wordt en dat het oppervlak constant blijft. Voor deze situatie is het stromingspatroon bepaald en is de verblijftijdspreiding berekend. Met het model zijn verschillende aanpassingen doorgerekend. Hierbij is vooral gekeken naar veranderingen in de configuratie van de instroom en uitstroom en het plaatsen van schotten. Eén en ander heeft geleid tot de volgende alternatieven:

0. referentiesituatie met in- en uitgang vlak bij elkaar aan de rand,
1. verplaatsing instroom naar het midden van het reservoir,
2. verplaatsing instroom naar de andere kant van het reservoir,
3. plaatsing van een schot tussen in- en uitstroompunt,
4. plaatsing van een schot tussen in- en uitstroompunt op kortere afstand van de wand.

Afb. 1a: Dimensies en ontwerp huidige reservoir.



Afb. 1b: Voorbeeld alternatief 3, schot tussen in- en uitstroompunt.



De afbeeldingen 2a en 2b tonen het stromingsveld in het reservoir. Ze geven respectievelijk de stroming in de x, y en z-richting weer door middel van een kleurenschaal. Hieruit kan worden geconcludeerd dat in de referentiesituatie de stroming vooral verticaal verloopt. Het water stroomt vanuit het inlaatpunt bovenin in de richting van de uitstroming onderin het reservoir, wat zichtbaar is in het donkerblauwe gebied van de w-snelheid. Aan de andere kant van de reservoir stroomt het water weer omhoog (gele gebied van de w-snelheid). Daarnaast stroomt het water in radiale richting weg van het inlaatpunt, wat zichtbaar is in de donkerblauwe en donkerrode gebieden van de u- en v-snelheden. Het omgekeerde gebeurt bij de uitstroming. Hierdoor ontstaat een grote circulatie in het reservoir. Verplaatsing van de instroom naar het midden van het reservoir laat een ander stroombeeld zien (afbeelding 2b). Het water stroomt in radiale richting weg van de instroom (snelheidsvector u en v). Bovendien is er een sterke neerwaartse stroming in het midden van het reservoir, terwijl het water aan de randen weer omhoog stroomt. Wederom is hier sprake van grote circulaties in het reservoir. Voor de overige alternatieven geldt dat dit het stroombeeld verandert. Vooral in het geval van het plaatsen van een schot ontstaat een hogere graad van menging. Ondanks de verschillen in lokale snelheden vertonen alle opties sterk recirculerende stromingen in het reservoir.

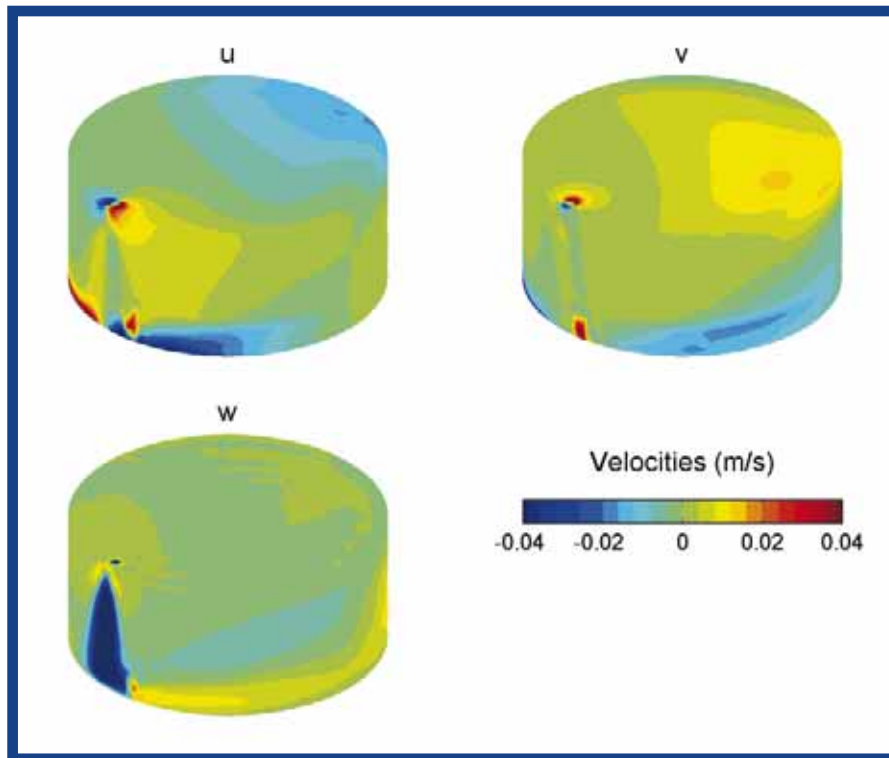
Uit afbeelding 3 kan echter per saldo geconcludeerd worden dat de verblijftijdspreading van alle opties bijna identiek is. Het reservoir gedraagt zich in alle gevallen als een compleet gemengd vat. Dit gedrag wordt verklaard door de relatief lage snelheden en de grote circulaties in het reservoir. Hieruit wordt geconcludeerd dat het plaatsen van schotten of het verplaatsen van de in- en uitstroomopening slechts een kleine positieve invloed hebben op de verblijftijdspreading. In alle gevallen is de gemiddelde verblijftijd ongeveer een dag en de maximumverblijftijd zes tot zeven dagen.

Conclusies

Het model geeft een goed beeld van het stromingspatroon en de verblijftijdspreading in de reservoirs van Gorinchem. Ondanks dat het model niet gevalideerd is met metingen, zijn de resultaten wel in lijn met eerdere resultaten van de verblijftijdsproeven. De resultaten van de berekeningen, en dan met name de invloed van gewijzigde configuraties, worden dan ook voldoende betrouwbaar geacht.

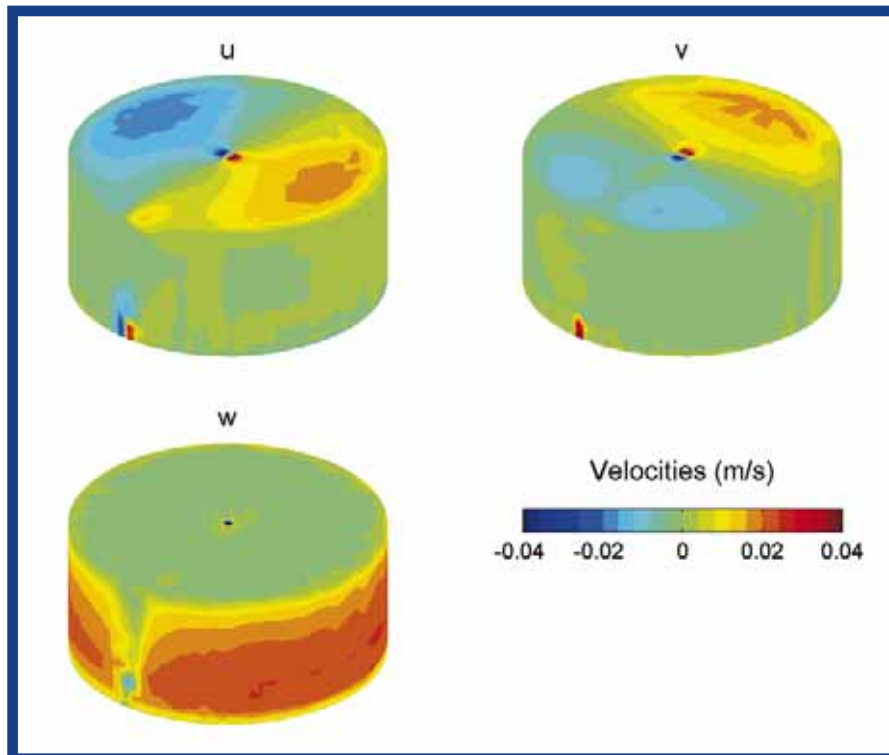
Uit de CFD-modellering volgt dat er verschillen in stromingspatroon zijn voor de verschillende ontwerpalternatieven. De verblijftijdspreading in de uitstroomopening van het reservoir is echter gelijk voor alle opties. Deze lijkt op de verblijftijdspreading van een volledig gemengd vat. De maximale verblijftijd in de reservoirs is ongeveer zes tot zeven maal de gemiddelde, hydraulische, verblijftijd.

Conclusie voor Oasen is dan ook dat de verkorting van de verblijftijd niet gezocht



Afb. 2a: Driedimensionele snelheidsverdeling voor de referentiesituatie. Achtereenvolgens zijn weergegeven: snelheidsvector u (x-richting in m/s), snelheidsvector v (y-richting in m/s) en snelheidsvector w (z-richting in m/s). De instroom van het water bevindt zich links onder aan het oppervlakte van het reservoir.

Afb. 2b: Driedimensionele snelheidsverdeling voor de situatie met instroom in het midden.



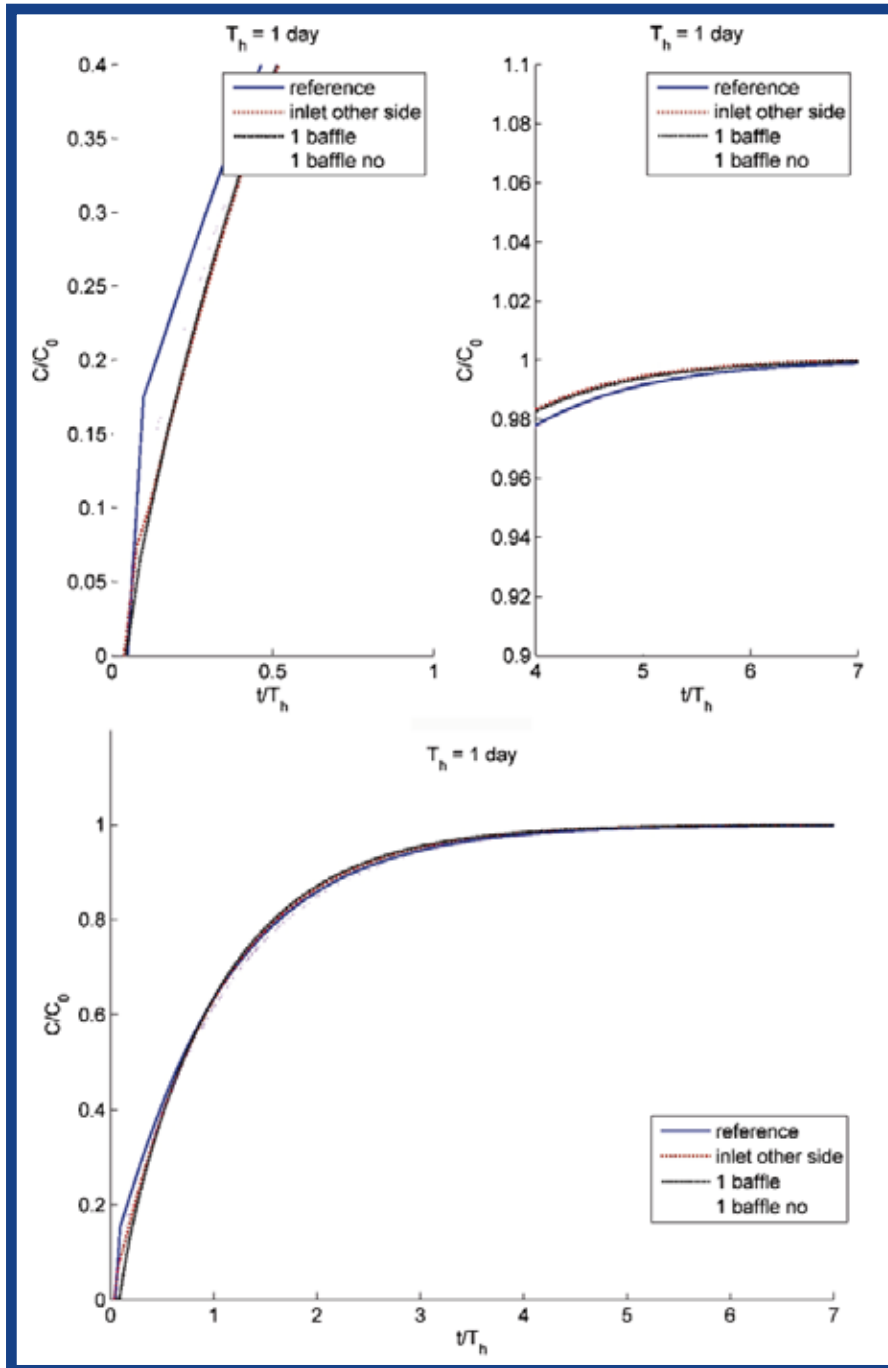
moet worden in aanpassingen van het reservoir, maar worden bereikt door aanpassing van de bedrijfsvoering.

Vervolg

In het geval van Gorinchem met zijn twee reservoirs is er door Oasen voor gekozen om als eerste optie na te gaan of beide reservoir-tanks ontkoppeld kunnen worden, waarvan één dagelijks geforceerd maximaal leeg gedraaid wordt. Deze inzet leidt wel tot enig

energieverlies, maar verkort de verblijftijd significant (maximaal twee dagen). Door één van de reservoirs relatief vol te houden, wordt hiermee ook de ijzeren voorraad op peil gehouden.

Voor de aanpassing van de bedrijfsvoering zijn ook nog andere mogelijkheden. Een interessante is de optimalisatie van de algoritmes van de vraagvoorspellingsmodellen. De afgelopen tien jaar is de bedrijfsvoering van de reservoirs geoptimaliseerd



Afb. 3: Berekende verblijftijd bij uitstroomopening reservoir.

door gebruik te maken van vraagvoorspellingsmodellen¹²⁾. Het doel hiervan was te komen tot een meer stabiele bedrijfsvoering met minimale debietsveranderingen. De implementatie van deze algoritmes op verschillende zuiveringsinstallaties heeft geleid tot significante optimalisatie van het zuiveringsproces. Een meer stabiele bedrijfsvoering leidt tot een betere reinwaterkwaliteit en tot minder energiegebruik. Doordat de zuivering minder debietsschommelingen te verwerken heeft, zal minder filterdoorslag plaatsvinden en de bedsamenstelling van onthardingsreactoren minder vaak veranderen. Dit leidt niet alleen tot een betere waterkwaliteit, maar kan ook de onderhouds- en bedrijfskosten reduceren. Tevens zal meer water gezuiverd kunnen worden gedurende de avonduren, wanneer de energiekosten lager zijn. Het inzicht in de verblijftijdspreiding van

het water in het reservoir geeft een extra randvoorwaarde voor het sturen van de reservoirs en dus het verbeteren van de doorstroming. De reservoirs moeten niet alleen de pieken van de watervraag opvangen, maar moeten ook regelmatig geleegd (of gedeeltelijk geleegd) worden, zodat stagnerende zones niet te lang kunnen blijven bestaan. Dit kan alleen als dit voor de bedrijfsvoering mogelijk is en deze randvoorwaarde moet dus zorgvuldig ingebouwd worden in het productiealgoritme. Nadeel van regelmatig legen is het extra energieverlies en het inboeten op reservecapaciteit bij calamiteiten (ijzeren voorraad). Het is zoeken naar een optimum. Modellen kunnen bij deze keuze ondersteunen. Inmiddels zijn er ook initiatieven ontstaan om de vraagvoorspelling te koppelen aan waterkwaliteitsvoorspelling¹³⁾. Hierdoor kan beter gestuurd worden op water-

kwaliteit afhankelijk van de kwaliteit van het inkomende water, in combinatie met het reduceren van kosten en het verminderen van de belasting voor het milieu. Dit is het ambitieuze doel aan de horizon voor de besturing van drinkwaterproductiestations in 2020.

LITERATUUR

- 1) Szewzyk U., R. Szewzyk, W. Manz en K-H. Schleifer (2000). Microbiological safety of drinking water. *Ann. Rev. Microbiol.* 54, pag. 81-127.
- 2) September S., V. Brözel en S. Venter (2004). Diversity of non-tuberculoïd Mycobacterium in biofilms of urban and semiurban drinking water distribution systems. *Appl. Environ. Microbiol.* 70, pag. 7571-7573.
- 3) Costerton J., Z. Lewandowski, D. Caldwell, D. Korber en H. Lappin-Scott (1995). Microbial biofilms. *Ann. Rev. Microbiol.* 49, pag. 711-745.
- 4) Buswell C., Y. Herlihy, L. Lawrence, J. McGuigan, P. Marsh, C. Keevil en S. Leach (1998). Extended survival and persistence of *Campylobacter spp.* in water and aquatic biofilms and their detection by immunofluorescent-antibody and -rRNA staining. *Appl. Environ. Microbiol.* 64, pag. 733-741.
- 5) VROM-Inspectie (2007). De kwaliteit van het drinkwater in Nederland in 2006.
- 6) Van der Kooij D. e.a. (1992). *Aeromonas* in drinkwater: voorkomen, bestrijding en betekenis. Kiwa Water Research, pag. 95-104.
- 7) Havelaar A., A. Versteegh en M. During (1990). The presence of *Aeromonas* in drinking-water supplies in the Netherlands. *Zentralblatt für Hygiene*, 190, pag. 236-256.
- 8) Blatchley III E., Z. Do-Quang, M. Janex en J. Laine (1998). Process modeling of ultraviolet disinfection. *Water Science Technology* nr. 6, pag. 63-69.
- 9) Sozzi D. en F. Taghipour (2007). The importance of hydrodynamics in UV advanced oxidation reactors. *Water Science Technology* 55, pag. 53-58.
- 10) Wols B., W. Uijtewaal, L. Rietveld, G. Stelling, H. van Dijk en J. Hofman (2008). Residence time distributions in ozone contactors. *Ozone Science and Engineering* nr. 1, pag. 49-57.
- 11) Labeur R. en G. Wells (2007). A Galerkin interface stabilisation method for the advection-diffusion and incompressible Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* nr. 196, pag. 4985-5000.
- 12) Bakker M., K. van Schagen en J. Timmer (2003). *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* nr. 6, pag. 417-424.
- 13) Rietveld L., A. van der Helm, K. van Schagen en J. Kappelhof (2009). Geavanceerde sturing van drinkwaterzuiveringen met een integraalmodel. *H₂O* nr. 12, pag. 37-40.