



Alex van der Helm, DHV / TU Delft

Integrale modellering van ozonisatie voor optimalisatie drinkwaterbereiding

In Nederland zijn drinkwaterzuiveringen robuust en vaak overgedimensioneerd, waardoor ze minder gevoelig zijn voor wisselingen in debiet en de kwaliteit van het influent. De prestatie van de gehele zuivering is gebaseerd op de prestaties van de deelprocessen met voorafgestelde grenzen aan de procescondities. Verbeteringen in de bedrijfsvoering zijn gewoonlijk gericht op optimalisatie van deze deelprocessen, gebaseerd op vuistregels, kennis van bedrijfsvoerders en ervaring. Een integrale aanpak van de gehele zuivering leidt tot een meer efficiënte bedrijfsvoering. Een integraal model van een drinkwaterzuivering kan gebruikt worden ter ondersteuning van de bedrijfsvoering én voor procesbesturing. Dit leidt tot verbetering van de bedrijfsvoering van een drinkwaterzuivering en tot maximaal gebruik van de bestaande installaties, waardoor nieuwe investeringen kunnen worden uitgesteld.

Om een integrale optimalisatie van de bedrijfsvoering van een drinkwaterzuivering uit te voeren, dienen expliciete doelen voor de bedrijfsvoering geïdentificeerd en gedefinieerd te worden. Drie mogelijke doelen zijn beoordeeld: waterkwaliteit, milieubelasting en kosten. De voorzuivering Loenderveen en drinkwaterzuivering Weesperkarspel van Waternet, het waterbedrijf voor Amsterdam en 25 omliggende gemeenten, zijn gebruikt als voorbeeld.

De realiseerbare verlaging van de milieubelasting in vergelijking met andere activiteiten, zoals autorijden, en de kosten van de productie van drinkwater in Loenderveen en Weesperkarspel bleken klein te zijn. Een verlaging van de milieubelasting met tien procent door veranderingen in de bedrijfsvoering staat gelijk aan drie kilometer minder autorijden per consument per jaar. De operationele kosten van drinkwaterproductie vormen minder dan tien procent van de totale kosten van drinkwater inclusief distributie, afschrijving, belastingen, salarissen van kantoorpersoneel, etc. Als op deze operationele kosten tien procent bespaard kan worden door veranderingen in de bedrijfsvoering, resulteert dat in minder dan één procent verlaging van de kosten voor de consument.

Deze effecten zijn relatief klein in vergelijking met de stijging van de milieubelasting en de

kosten voor de maatschappij, wanneer meer flessenwater gedronken zou gaan worden, als gevolg van onvoldoende (vertrouwen in de) kwaliteit van het kraanwater. Overheden en waterleidingbedrijven moeten zich richten op een onberispelijke kwaliteit van kraanwater. Een betrouwbaar, gezond en milieuvriendelijk imago van kraanwater is en blijft noodzakelijk om op zijn minst de stijging van het gebruik van flessenwater te stoppen. De verbetering van de waterkwaliteit moet dus het doel vormen voor integrale optimalisatie van de bedrijfsvoering en niet a-priori de verlaging van de milieubelasting of de kosten.

Modellering van ozonisatie

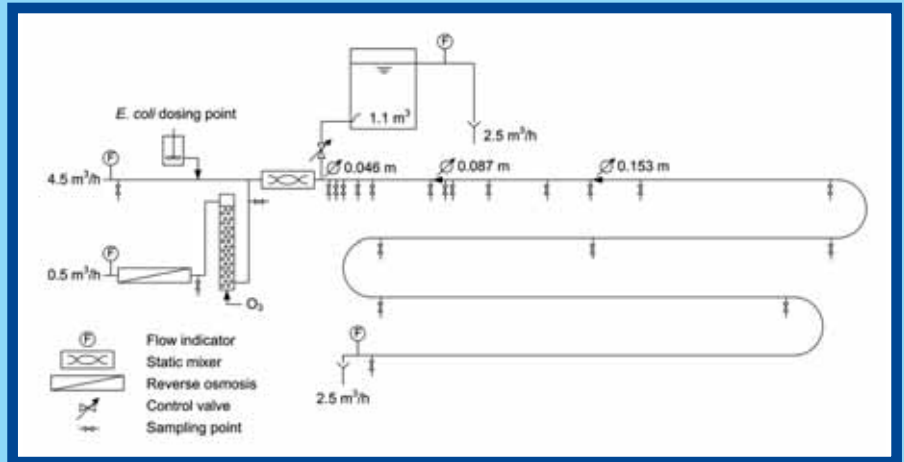
Uit het onderzoek naar de doelen voor optimalisatie van de bedrijfsvoering van Weesperkarspel, bleek de ozonisatie een sleutelrol te vervullen in de zuivering. Om deze reden is de integrale modellering in dit onderzoek gericht op ozonisatie, waarbij assimileerbaar organisch koolstof (AOC), bromaat en de CT-waarde (maat voor blootstelling aan ozon) de belangrijkste parameters zijn. Voor de ontwikkeling en kalibratie van een model dat deze parameters beschrijft, zijn experimenten uitgevoerd in verschillende proefinstallaties, zowel op testbankschaal als op proefinstallatieschaal, met water van verschillende locaties.

Het model is gekalibreerd en gevalideerd voor een breed toepassingsgebied door

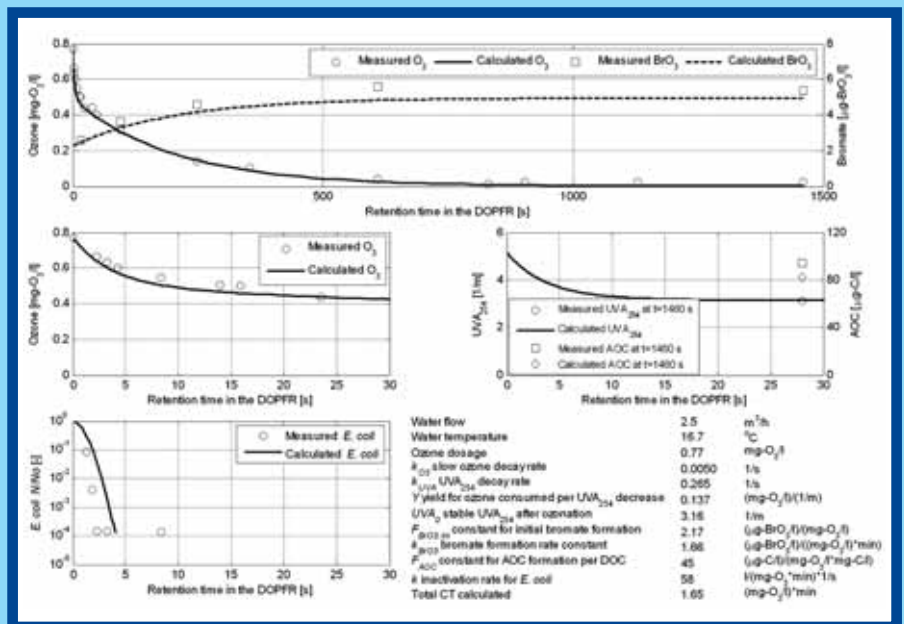
Alex van der Helm verdedigt zijn proefschrift op 3 december aan de TU Delft. Het proefschrift is getiteld 'Integrated modeling of ozonation for optimization of drinking water treatment'. In dit artikel wordt een overzicht gegeven van het onderzoek, dat onderdeel uitmaakt van het project Promicit: een samenwerkingsverband van Waternet, TU Delft, DHV en ABB. Het project wordt gefinancierd door SenterNovem.

gebruik te maken van verschillende opstellingen. Hierin is ozon gedoseerd in opgeloste vorm en met conventionele bellenkolommen. Daarnaast is contacttijd tussen ozon in water gecreëerd in een leiding met een propstroomkarakteristiek en in een reactor met de karakteristiek van een volledig gemengd vat (zie afbeelding 1). Dit resulteerde in een integraal model voor ozon dat in staat is om voor verschillende hydraulische condities de ozonafbraak, de CT-waarde, *E. coli*-inactivatie, de afname van UV-absorptie bij 254 nm, de toename van de AOC-concentratie en bromaatvorming te voorspellen. Afbeelding 2 geeft een voorbeeld van de door het model berekende waarden en de gemeten waarden van een experiment dat is uitgevoerd in

Afb. 1: Experimentele opstelling met opgelost ozondosering waarbij contacttijd tussen ozon en water wordt gerealiseerd in een leiding en in een vat.



Afb. 2: Gemeten en berekende waarden voor ozon in water, bromaat, UVA₂₅₄, AOC, E. coli en CT-waarde.



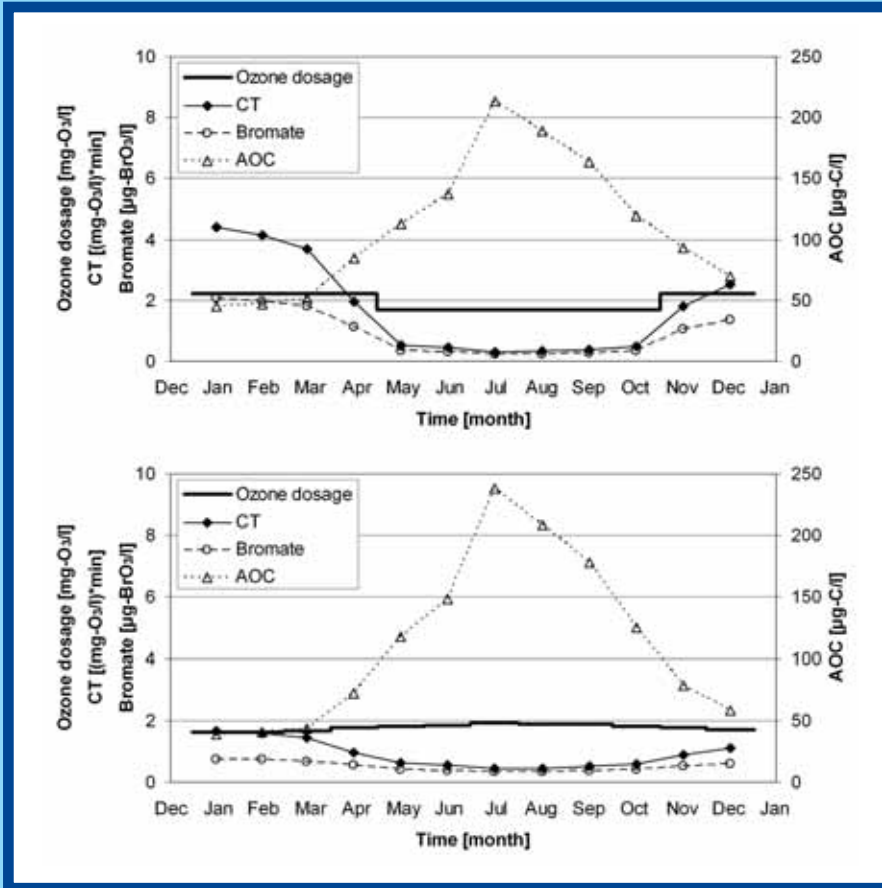
de proefinstallatie uit afbeelding 1. Te zien zijn de verschillen in de tijdschalen van de verschillende processen die optreden tijdens ozonisatie. De *E. coli*-inactivatie is in deze installatie na vijf seconden al vier logeenheden. Het overgrote deel van de snelle ozonconsumptie is geëindigd na ongeveer 20 seconden en de bromaatvorming stopt na ongeveer 700 seconden. Het stoppen van de snelle ozonconsumptie volgt uit de ozonconcentratie in water en aan de afname van UVA₂₅₄. Deze stopt na ongeveer 20 seconden. De snelle ozonconsumptie wordt voornamelijk veroorzaakt door de directe reactie van ozon met de dubbele bindingen in aromatische verbindingen die voorkomen in natuurlijk organisch materiaal in het water. Dit gaat gepaard met een afname in de UVA₂₅₄. Dit is een maat voor het aantal dubbele bindingen in het water. Om deze reden is in het model de snelle ozonconsumptie gerelateerd aan de daling van de

UVA₂₅₄. Op basis van de modelberekening kan de CT-waarde nauwkeurig worden berekend. In het experiment in afbeelding 2 is de CT-waarde gelijk aan 1,65 (mg O₃/l)*min.

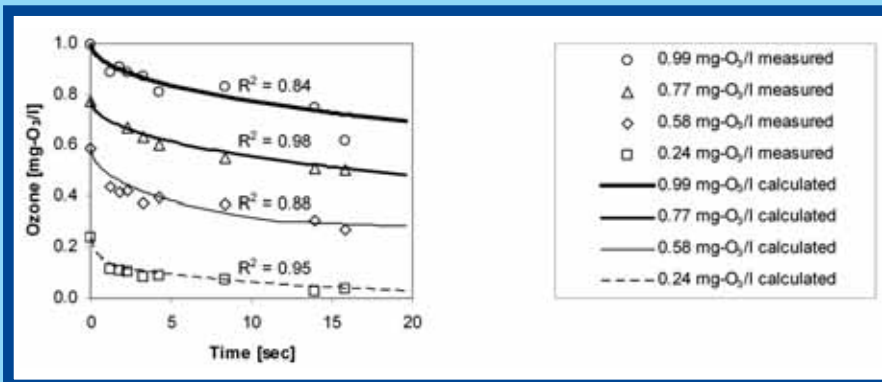
Bedrijfsvoeringstrategieën

Het model is gebruikt voor het evalueren van de huidige bedrijfsvoeringstrategie van de ozonpraktijkinstallatie van Weesperkarspel en voor het testen en beoordelen van een alternatieve bedrijfsvoering voor ondersteuning en procesbesturing van de ozoninstallatie. Afbeelding 3 (boven) geeft de bedrijfsvoering weer die tot voor kort op Weesperkarspel werd gehanteerd, waarbij de ozondosering 1,7 mg/l is bij een watertemperatuur boven de 12°C en anders 2,2 mg/l. Voor iedere maand is op basis van de gemiddelde watertemperatuur de bromaatconcentratie, de AOC-concentratie en de CT-waarde berekend. Hetzelfde is gedaan voor de bedrijfsvoeringstrategie, waarbij de

ozondosering is bepaald aan de hand van een setpoint voor de inactivatie van *Giardia*. Als voorbeeld is in afbeelding 3 (onder) een 2 loginactivatie van *Giardia* gekozen. Met behulp van een tabel van USEPA, die de relatie tussen CT-waarde en inactivatie weergeeft voor verschillende temperaturen, is de benodigde CT-waarde bepaald voor de verschillende maanden. In afbeelding 3 (onder) is te zien dat voor deze bedrijfsvoeringstrategie de ozondosering in de warme maanden omhoog moet in plaats van omlaag. Dit zal wel leiden tot hogere AOC-concentraties in de warme maanden. De bromaatconcentratie komt niet boven de 1 µg/l. Indien de hogere AOC-concentraties niet acceptabel zijn, kunnen met het model scenarioberekeningen worden uitgevoerd, waarin bijvoorbeeld het effect van DOC-verwijdering vóór ozonisatie wordt geëvalueerd. Het model is een hulpmiddel dat de consequenties zichtbaar maakt van veran-



Afb. 3: Bedrijfsvoeringstrategieën: vaste ozon dosering, twee setpoints afhankelijk van watertemperatuur (boven), 2 loginactivatie voor Giardia (onder).



Afb. 4: Snelle ozonconsumptie in de eerste 20 seconden contacttijd tussen ozon en water, gemeten waarden en berekende waarden op basis van een diffusielimitatiemodel.

deringen in de bedrijfsvoering. Het geeft waterleidingbedrijven de mogelijkheid om meer objectieve keuzes te maken voor de stuurparameters en is daarom een waardevol gereedschap voor het beheersen van de balans tussen desinfectie, AOC-vorming en bromaatvorming.

Opgelost ozon-propstroomreactor

Met het experimentele onderzoek en de modelstudies is het belang van goede hydraulische condities aangetoond. De desinfectiecapaciteit voor het ozongevoelige organisme *E. coli* blijkt drie tot vijf keer groter te zijn in een propstroomreactor dan in een volledig gemengd vat.

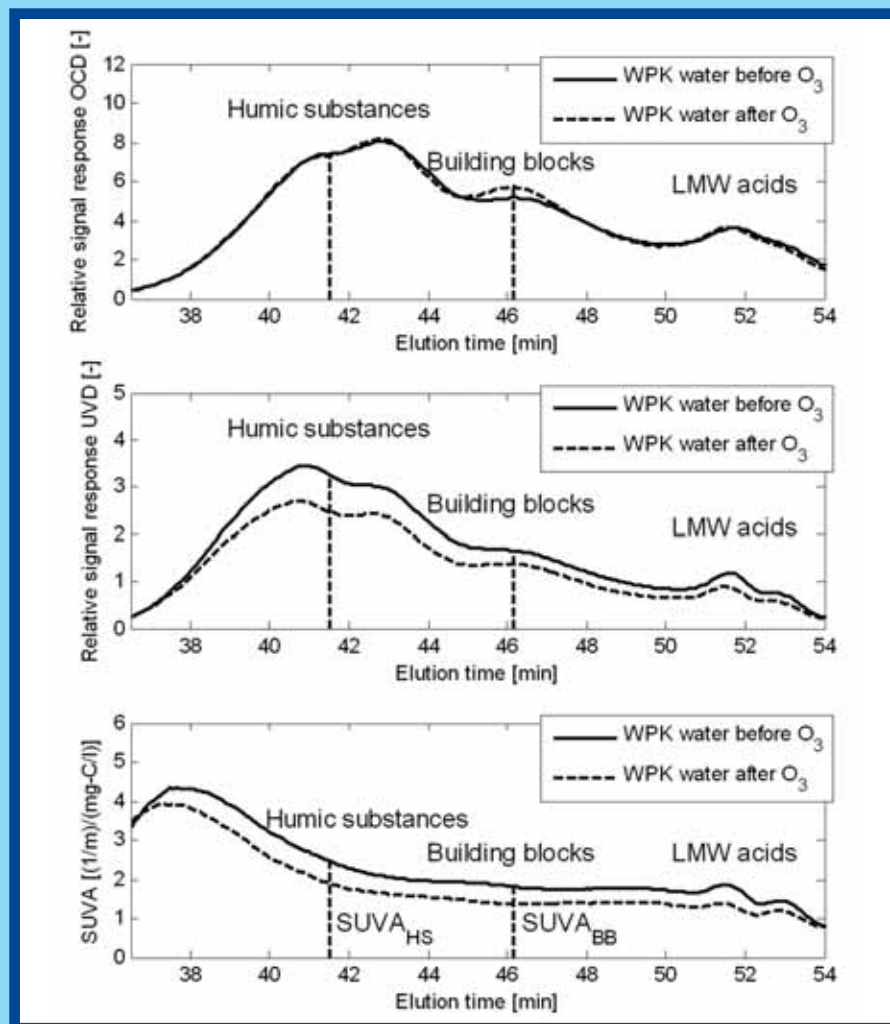
Voor een efficiënte desinfectie is het van belang dat het gedoseerde ozon zo snel mogelijk volledig gemengd wordt over de te behandelen waterstroom, om te voorkomen dat delen van de waterstroom een ozon-

concentratie hebben die lager is dan de gemiddelde concentratie. Dit geldt voornamelijk wanneer relatief lage ozonconcentraties worden toegepast, zoals bij Waternet. Het concept van de opgelost ozon-propstroomreactor (dissolved ozone plug flow reactor of DOPFR), ontwikkeld tijdens dit onderzoek, richt zich op deze twee punten. In de DOPFR wordt ozon opgelost in een voorbehandelde deelstroom die vlak voor een statische menger aan de hoofdstroom wordt toegevoegd. Twee waterstromen mengen veel beter en sneller dan een gas- en een waterstroom. Op deze wijze kan het gedoseerde ozon door middel van de statische menger vrijwel instantaan gemengd worden met de totale waterstroom. Vervolgens wordt contacttijd gerealiseerd in een leiding met een propstroomkarakteristiek. Uit proefonderzoek in bellenkolommen op proefinstallatieschaal met relatief goede hydraulische eigenschappen

bleek dat grote kortsluitstromen op kunnen treden in de bellenkolommen. Gezien het belang van de hydraulische condities dient de toepassing en het ontwerp van conventionele bellenkolominstallaties in heroverweging genomen te worden.

Effect samenstelling en verwijdering van NOM

Natuurlijk organisch materiaal heeft een grote invloed op de processen die optreden tijdens ozonisatie en is daarom een belangrijke parameter voor de efficiëntie van ozonisatie en voor de integrale modellering van ozonisatie. In de DOPFR was het mogelijk om ozonconcentraties te meten vanaf één à twee seconden verblijftijd. Dit gaf de mogelijkheid om de snelle ozonconsumptie te bepalen die optreedt door de reactie tussen ozon en NOM vanaf het moment dat ozon in het water aanwezig is. Uit de modellering bleek dat de snelheid van snelle ozonconsumptie in de



Afb. 5: Effect van ozonisatie op de samenstelling van NOM.

eerste 20 seconden contacttijd de kinetiek van diffusielimitatie volgt:

$$\frac{dc_{O_3}}{dt} = -k_{03DL} c_{O_3} \frac{1}{2\sqrt{t}} \quad 0 \leq t \leq t_{DL}$$

waarin c_{O_3} de concentratie van ozon in water ($\text{mg-O}_3/\text{l}$) is, t de tijd (s), k_{03DL} de diffusie gelimiteerde snelheidsconstante voor snelle ozonconsumptie ($1/\sqrt{s}$) en t_{DL} de duur van de diffusielimitatie (s).

Dit is geïllustreerd in afbeelding 4, waarin de snelle ozonconsumptie is weergegeven in de eerste 20 seconden contacttijd tussen ozon en water met een concentratie opgelost organisch koolstof (DOC) van ongeveer 2 mg/l.

NOM bestaat uit een grote verscheidenheid aan organisch materiaal en kan worden gekarakteriseerd door onder andere de molecuulgrootte. De effecten van de samenstelling van NOM en de verwijdering van NOM op de vorming van AOC, de vorming van bromaat en de CT-waarde zijn onderzocht. Met deze resultaten kan de hoeveelheid en het specifieke deel van NOM worden bepaald dat moet worden verwijderd om de efficiëntie van ozonisatie te verbeteren. Hiervoor is water van de productielocaties Leiduin en Weesperkarspel van Waternet, met verschillende

gehalten aan DOC, onderzocht. Tevens zijn experimenten uitgevoerd waarbij de DOC-concentratie van water uit Weesperkarspel is verlaagd met behulp van ionenwisseling of met actieve koolfiltratie. De resulterende vier watertypen zijn onderzocht in een bellenkolomproefinstallatie en in een testbank DOPFR. In afbeelding 5 is het effect van ozonisatie op de samenstelling van NOM weergegeven. Met behulp van een chromatografische techniek die moleculen op grootte scheidt in combinatie met online DOC-detectie en UVA_{254} -detectie zijn de verschillende NOM-fracties bepaald. Hiermee is de SUVA (het quotiënt van de UVA_{254} en de DOC-concentratie) van de verschillende fracties berekend om de reactiviteit van de fracties met ozon te onderzoeken. De NOM-fracties in afbeelding 5 zijn de humuszuren met een molecuulair gewicht van ongeveer 1000 g/mol, de bouwstenen met een molecuulair gewicht van 300-500 g/mol en de kleine zuren. Door ozonisatie worden dubbele bindingen in grotere moleculen in de humuszuren en de bouwstenen aangevallen waarbij onder andere kleine zuren worden gevormd. Met deze methode kan het effect van ozonisatie op NOM-fracties worden onderzocht.

Uit de experimenten kan de conclusie getrokken worden dat voor dezelfde

ozondoseringen de CT-waarde hoger is bij NOM-verwijdering door ionenwisseling of actieve koolfiltratie dan voor de situatie waarbij geen NOM wordt verwijderd. Een andere conclusie luidt dat de efficiëntie van ozonisatie sterker verbeterd door de verwijdering van humuszuren uit NOM dan door verwijdering van de bouwstenen, omdat dit leidde tot minder AOC-vorming en minder bromaatvorming. Ionenwisseling wordt dus verkozen boven actieve koolfiltratie voor NOM-verwijdering voorafgaand aan ozonisatie, omdat de geteste ionenwisselaar meer humuszuren verwijderde.

Conclusie

Tijdens dit onderzoek blijkt integrale modellering de drijvende kracht voor optimalisatie van de bedrijfsvoering gebaseerd op expliciete doelen (bedrijfsvoeringstrategieën), voor nieuwe ontwikkelingen in ontwerp (DOPFR) en voor het onderzoeken van veranderingen in het concept van een drinkwaterzuiveringsinstallatie (NOM-verwijdering). In het algemeen kan gesteld worden dat voor het modelleren van een proces, dat proces begrepen moet worden. Modellering leidt dan tot het vergroten, het toepassen en het vastleggen van kennis.