



Jan Hofman, KWR Water Research Institute / TU Delft

Lanzhu Shao, TU Delft

Bas Wols, TU Delft

Guus Ijpelaar, KWR Water Research Institute, thans Royal Haskoning

Prestaties van UV-reactoren te voorspellen met modellen

Binnen het bedrijfstakonderzoek voor de waterbedrijven (BTO) is een model ontwikkeld voor de voorspelling van de prestaties van UV-reactoren, dat rekening houdt met onder meer de stroming in de reactor en de UV-lichtverdeling. Dit tweedimensionale model voorspelt de hoofdstroom van het water door de reactor redelijk goed. In een vervolproject binnen het TTIW Wetsus (programmatafel Geavanceerde schoonwatertechnologie) wordt dit model nu onder meer uitgebreid naar de derde dimensie.

UV-technologie als nadesinfectie voor grondwaterbehandeling is al enkele decennia in gebruik⁶⁾. Sinds in 1998 door Bolton *et al.*¹⁾ is ontdekt dat UV erg effectief is voor de inactivatie van *Cryptosporidium Parvum* en dat in later onderzoek is bevestigd^{2),3)}, is UV ook sterk in opkomst als hoofddesinfectiebarrière. Daarnaast bestaat veel belangstelling voor toepassing van UV in combinatie met waterstofperoxide als geavanceerd oxidatieproces voor de omzetting van een breed spectrum aan ongewenste verbindingen. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot realisatie van UV-desinfectie op de Berenplaat en UV-oxidatie in Andijk, maar ook internationaal lopen meerdere projecten, zoals de realisatie van een UV-desinfectie in New York.

De prestaties van een UV-installatie hangen af van een groot aantal factoren. In de eerste

plaats natuurlijk de watersamenstelling van het te behandelen water. Een belangrijke parameter daarin is de UV-transmissie. Bij lagere UV-transmissies zal het UV-licht minder diep doordringen in het water en is meer energie nodig om het gewenste effect te bereiken, zoals voldoende inactivatie van micro-organismen.

In de tweede plaats is het hydraulische ontwerp van groot belang. Bepalend zijn de vorm van de reactor en de vorm en plaatsing van de UV-lampen. Ook de wijze waarop het water in de reactor wordt ingevoerd, is van belang voor het stromingsveld.

UV-installaties kunnen worden uitgerust met lagedruk of middendruk kwiklampen. In het UV-C-bereik emitteren lagedruk lampen slechts één karakteristieke golflengte van 253,7 nm. Middendruk lampen daarentegen stralen licht uit in een breed spectrum, tot zelfs in het zichtbare deel van het spectrum. Aangezien de UV-extinctie ook

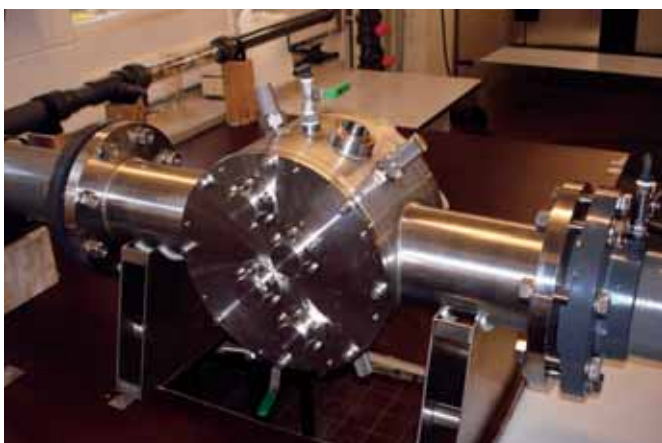
afhankelijk is van de golflengte, is dimensionering van een middendruksysteem extra gecompliceerd.

Reactorvalidatie

Omdat de prestaties van een UV-installatie door zoveel complexe factoren worden beïnvloed, wordt reactorvalidatie in de praktijk vaak met bioassays uitgevoerd⁷⁾. Bioassays zijn duur en moeilijk op praktisch schaal uit te voeren. Bovendien vormen ze een controle achteraf: aanpassen van een reactor die onvoldoende prestaties levert is meestal onmogelijk.

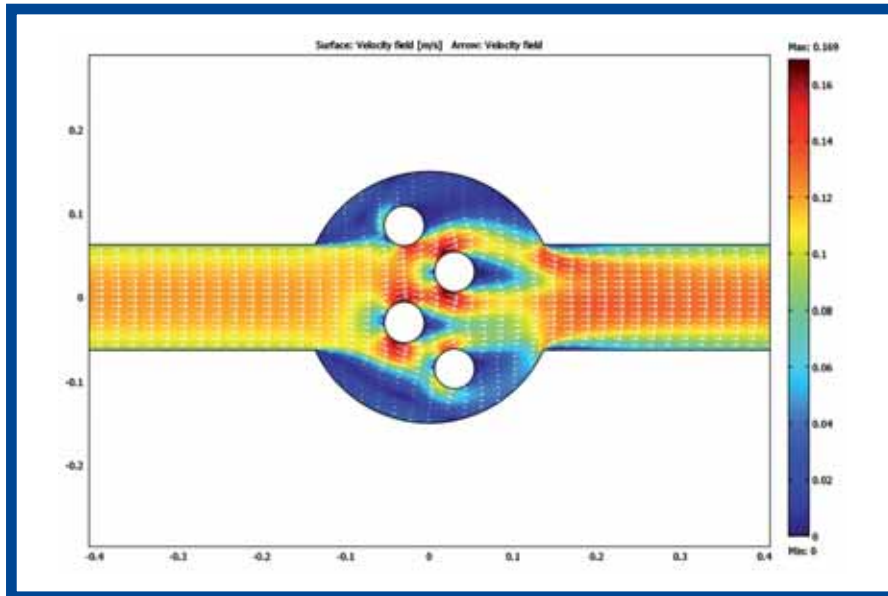
De ontwikkeling van een gereedschap voor de voorspelling van de prestaties van UV-reactoren is daarom onontbeerlijk. In het kader van het bedrijfstakonderzoek van de Nederlandse waterleidingbedrijven is in samenwerking met de TU Delft een basismodel voor een UV-reactor ontwikkeld en experimenteel gevalideerd.

De UV-testreactor.



Visualisatie verblijftijd en menging met behulp van een kleurstof.





Afb. 1: Snelheidsveld berekend met computational fluid dynamics (debiet = $5 \text{ m}^3/\text{h}$).

Moderne computers en ontwikkelingen op softwaregebied bieden tegenwoordig goede mogelijkheden om dergelijke modellen achter het bureau te ontwikkelen. Slechts enkele jaren geleden waren daarvoor nog grote universitaire rekencentra nodig. Dit artikel beschrijft de opbouw van dit model en geeft de resultaten van enkele experimenten voor validatie weer.

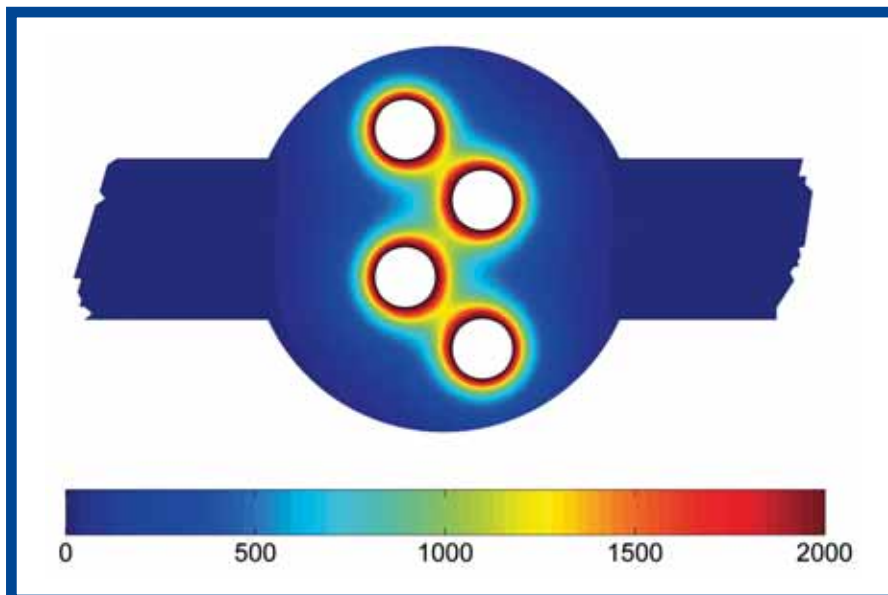
Opbouw model

Het model voor een UV-reactor bestaat uit drie submodellen, die alle aan elkaar gekoppeld zijn. In de eerste plaats is een beschrijving van het stromingsveld in de reactor nodig. Omdat in de reactor een turbulente stroming gewenst is, zal het model ook turbulentie goed moeten voorspellen. Het in dit artikel beschreven model gebruikt een standaard $k-\epsilon$ turbulentiemodel⁽⁸⁾. Hiermee is het mogelijk om de gemiddelde grootte en richting van de snelheid op elke willekeurige plek in de reactor te voorspellen. Ook de drukverdeling wordt voorspeld. De berekende turbulentie-

parameters zijn later van belang om de lokale menging te kunnen berekenen.

Het tweede submodel omvat de beschrijving van de UV-lichtverdeling in de reactor⁽⁴⁾. Die wordt bepaald door het aantal lampen, het UV-C-vermogen van de lampen, de positionering in de reactor en de UV-absorptie van het water. De combinatie van stroming en UV-lichtverdeling is bepalend voor de UV-dosis of beter de dosisverdeling die het water ontvangt. De UV-dosis wordt berekend door in het derde model het pad dat individuele deeltjes doorlopen in de reactor, te voorspellen. Deze paden hebben een willekeurige component ten gevolge van de heersende turbulentie. Dit betekent dat twee deeltjes die op exact dezelfde plek de reactor binnenkomen maar op een ander tijdstip, een ander pad door de reactor hebben. Tijdens zijn 'reis' door de reactor ontvangt ieder deeltje een hoeveelheid licht. De totaal opgevangen hoeveelheid is de dosis en is dus afhankelijk van de tijd dat een deeltje in de reactor is. Het huidige model is ontwikkeld als een

Afb. 2: UV-lichtverdeling in de UV-reactor (vermogen lampen: 150 W/m UVC , UV-transmissie 78,5%).



tweedimensionaal model. Hiervoor is gekozen omdat de ontwikkeling dan eenvoudiger en sneller is. Het model beschrijft daarmee in principe de situatie op het centrumvlak in de reactor. De verwachting is dat het model een redelijke beschrijving geeft van de stroming, maar door een aantal concessies en aannames in het model is te verwachten dat de resultaten van het model zullen afwijken van de werkelijkheid.

Validatie

Voor validatie van het model is een UV-reactor op testbankschaal gebruikt, die Kiwa Water Research heeft ontworpen voor het uitvoeren van onderzoek naar lage-druk UV-oxidatie. De reactor is daarvoor voorzien van transparante flenzen, zodat de stroming in de reactor zichtbaar kon worden gemaakt. Gebruikmakend van Laser-Dopplermetingen zijn de watersnelheden in de reactor gemeten. Bij deze metingen wordt de snelheid van deeltjes in het water gemeten op het kruispunt van twee laserstralen. Het voordeel van deze methode is dat de watersnelheden op elke willekeurige plek in de reactor kunnen worden gemeten, zonder dat het stromingsveld wordt verstoord. Voor de metingen was in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft een speciale testopstelling gebouwd. Ook zijn experimenten met een kleurstof uitgevoerd om de effecten van menging en verblijftijd-spreiding zichtbaar te maken.

Resultaten

Het model is opgezet met dezelfde dimensies als de testbankreactor. Het reactorvolume bedraagt circa tien liter. De reactor bevat vier lampen, elk voorzien van een kwartsbuis die ze afschermt van het water. De kwartsbuizen zijn a-symmetrisch rondom het hart van de reactor geplaatst. Om te zorgen voor een volledig ingelopen turbulente stroming, is in het model een lange (zes meter) aanvoerbuisc voor de reactor geplaatst. Deze lengte is ook in de testopstelling aan de TU Delft gebruikt. De berekeningen zijn uitgevoerd met lagedruk kwiklampen, die elk een UV-vermogen van 150 Watt per meter lampenlengte uitstralen. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een relatief lage UV-transmissie van 78,5 procent. Gerekend is met een debiet van vijf kubieke meter per uur.

Het berekende stromingsveld in de reactor is te zien in afbeelding 1. Wat direct opvalt, is dat de reactor twee grote dode zones kent aan de boven- en onderzijde. Het water in deze zones circuleert langzaam en zal weinig bijdragen aan de desinfectie. Daarnaast is achter de lampen ook een gebied te zien waar het water vrijwel stil staat. Dit gebied draagt daardoor niet bij aan de desinfectie. Toch wordt in dit gebied nog een aanzienlijke hoeveelheid UV-licht geabsorbeerd. Verkleining van dit gebied door optimalisering van de stroming kan daardoor tot een aanzienlijke verbetering van het energieverbruik leiden.

De berekende UV-intensiteit in de reactor is te zien in afbeelding 2. Het valt op dat de UV-intensiteit vrij snel uitdooft naarmate de

afstand tot de lampen toeneemt. Enerzijds komt dit door divergentie van het licht, maar vanuit de belangrijkste bijdrage is de absorptie van het UV-licht door de watermatrix. De resultaten onderschrijven het belang van een hoge watertransmissie. De UV-dosis kan vervolgens worden berekend door de stroombanen van deeltjes door de reactor te simuleren en de opgenomen hoeveelheid UV-licht bij de passage van de reactor te integreren. Omdat elk deeltje een ander pad door de reactor volgt, zullen alle deeltjes een verschillende tijd in de reactor verblijven en ook een andere hoeveelheid UV-licht opnemen. Hierdoor ontstaat een UV-dosisverdeling. De werkelijke verdeling kan worden benaderd door een grote hoeveelheid deeltjes te simuleren.

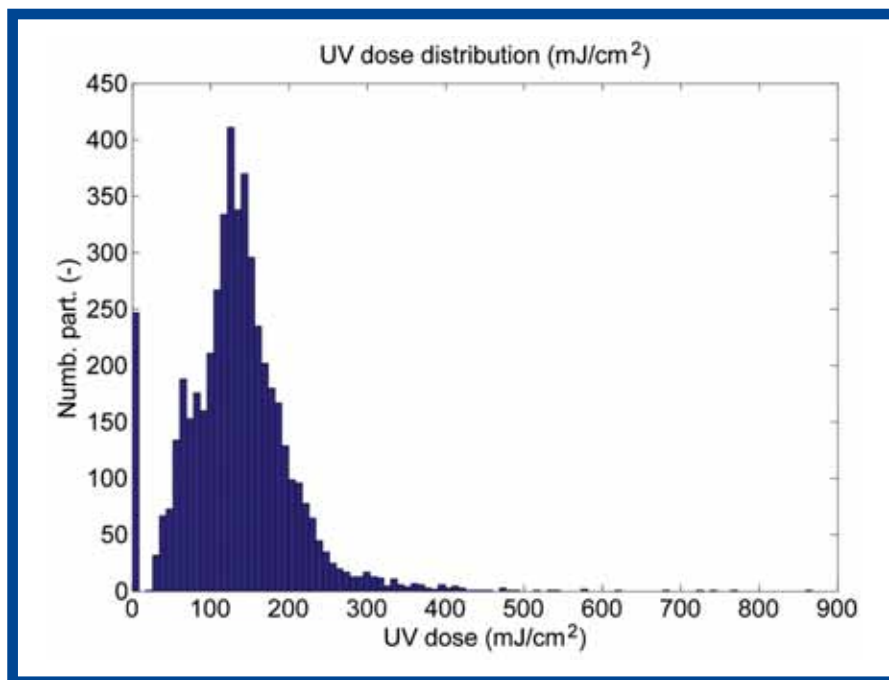
Afbeelding 3 toont het resultaat voor deze reactor bij vijf kubieke meter per uur. De relatief grote piek bij 0 mJ/cm² bestaat uit deeltjes die in het model de reactor nog niet verlaten hebben, omdat ze nog ergens in een circulatiestroming 'gevangen' zitten. Ook zijn er deeltjes die tijdens het berekenen van de stroombanen 'uit de reactor' schieten.

Om vast te stellen of de berekende dosis en snelheidsverdeling juist is, zijn validatie-experimenten uitgevoerd. Op verschillende doorsnedes in de reactor zijn watersnelheden gemeten. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in afbeelding 4. Hierin zijn de gemeten en berekende snelheden in de reactor weergegeven als pijlen, die de richting en de grootte van de snelheid in het meetpunt weergeven.

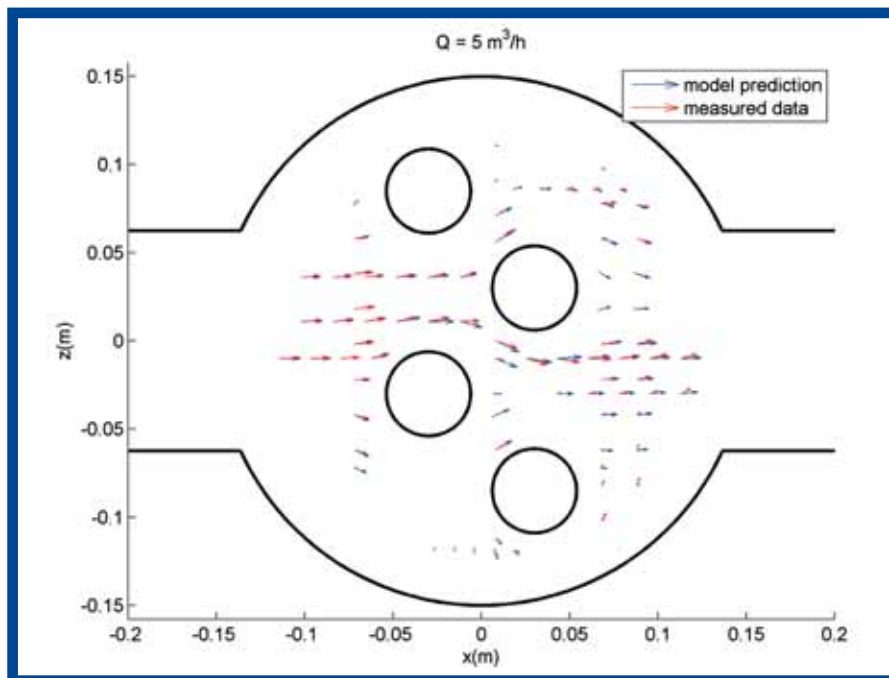
Het blijkt dat de hoofdstroom van het water door de reactor redelijk goed wordt voorspeld. Met name in de zogebieden achter de lamp en gebieden waar de turbulentie hoog is, worden grotere afwijkingen waargenomen. De oorzaak hiervoor kan tweeledig zijn. De metingen worden uitgevoerd in een doorsnede vlak in de reactor. De gemeten snelheden liggen dus ook in dit vlak, terwijl de werkelijke snelheid ook nog een component loodrecht op het meetvlak kan hebben. De modelberekeningen hebben uitsluitend componenten in het doorsnedevlak, omdat een tweedimensionaal model is gebruikt. Hierdoor kunnen afwijkingen ontstaan tussen de metingen en de berekeningen. Een tweede reden is dat de berekeningen zijn gebaseerd op een standaardmodel voor de beschrijving van turbulente stromingen (het k-ε model), waarvan bekend is dat het afwijkingen kan vertonen in de omgeving van zogebieden - bijvoorbeeld zoals in dit model achter de UV-lampen. De kleurstofexperimenten bevestigden kwalitatief de gevonden resultaten (zie foto).

Toekomst

Het model kan een redelijke voorspelling geven van de prestaties van een UV-reactor, maar voor een echt goede kwantitatieve beschrijving van een UV-reactor is een verdere ontwikkeling nodig van dat model nodig. Een eerste stap is de omzetting naar een driedimensionaal model. Daarnaast wordt de berekening van de deeltjesbanen verder geoptimaliseerd. De verdere



Afb. 3: UV-dosisverdeling voor 5000 deeltjes.



Afb. 4: Gemeten (Laser Doppler) en berekend snelheidsveld (debiet = 5 m³/h).

ontwikkeling vindt plaats in het kader van het TTIW-project 'New UV-reactor concepts for chemical degradation of trace organic compounds and disinfection'.

LITERATUUR

- 1) Bolton J., B. Dussert, Z. Bukhari, T. Hargy en J. Clancy (1998). Inactivation of *Cryptosporidium Parvum* by medium-pressure ultraviolet light in finished drinking water. Proceedings AWWA Annual Conference Dallas TX volume A, pag. 389-403.
- 2) Craik S., G. Finch, J. Bolton en M. Belosevic (2000). Inactivation of *Giardia Muris* cysts using medium-pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water. Water Research nr. 18, pag. 4325-4332.
- 3) Craik S., D. Weldon, G. Finch, J. Bolton en M. Belosevic (2001). Inactivation of *Cryptosporidium Parvum* oocysts using medium- and low-pressure

ultraviolet radiation. Water Research nr. 6, pag. 1387-1398.

- 4) Ducoste J. en K. Linden (2006). Hydrodynamic characterization of UV reactors. Technical report 2682. Awwa Research Foundation.
- 5) Kruithof J., B. van der Veer, S. Nugteren en R. Dekker (2006). Berenplaat: onderzoek naar toepassing UV voor hoofddesinfectie. H₂O nr. 9, pag. 35-37.
- 6) Ijpelaar G., D. Harmsen, S. Krijnen en T. Knol (2007). UV/H₂O₂-oxidatie mogelijk met middendruk- en lagedruk lampen. H₂O nr. 4, pag. 44-46.
- 7) Schmelling D., C. Cotton, D. Owen, E. Mackey, H. Wright, K. Linden en J. Malley jr. (2006). Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Technical report. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.
- 8) Wilcox D. (1998). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries.