

Toepassen stromings- berekeningen voor het optimaliseren van waterbehandeling

JAN HOFMAN, WATERLEIDINGBEDRIJF AMSTERDAM / KIWA WATER RESEARCH
DOLF WIND, WATERLEIDINGBEDRIJF AMSTERDAM
RODOLPHE JANSSENS, ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE CHIMIE DE RENNES

Over de prestaties van waterbehandelingsystemen is veel kennis en praktijkervaring beschikbaar. Dat geldt ook voor de achterliggende fysische, chemische en microbiologische mechanismen. Door- gaans wordt deze kennis en ervaring gebruikt voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van de installa- ties. Toch blijkt in de praktijk dat verdere verbetering van de zuiveringsprocessen mogelijk is. Hierbij speelt de hydrodynamica van het systeem een grote rol. Vaak zijn voorkeursstromen of dode hoeken aanwezig die de prestaties negatief kunnen beïnvloeden. Voor sommige processen, zoals bij desinfectie, wordt de aanwezigheid van verblijftijdspreiding onderkend, maar wordt het effect verdisconteerd in een empirische correctiefactor. Vanwege de onzekerheid hierbij wordt daarboven een veiligheids- marge gehanteerd, met als gevolg dat vaak de gebruikte dosis desinfectiemiddel te hoog uitvalt.

Door de ontwikkeling van snellere compu- ters is het mogelijk om de verdeling van het water in een waterbehandelingsreactor te voorspellen en te visualiseren. De daarbij gebruikte methodes worden onder de noemer Computational Fluid Dynamics (CFD) gebracht. Toepassing van CFD-software bij het ontwerp van zuiveringssystemen en bij de optimalisering daarvan is sterk in opkomst. Voor het ontwerp van reactoren voor UV-des- infectie of oxidatie met UV en waterstof- peroxide lijkt deze technologie zelfs onont- beerlijk³⁾. Ook voor het verkrijgen van inzicht in het effect van stroming, nodig voor verdere procesoptimalisering, is CFD-modellering geschikt. In dit artikel wordt getracht de potenties die toepassing van CFD heeft aan de hand van enkele voorbeelden te verduide- lijken.

Achtergrond

De beschrijving van de stroming in of om een object, bijvoorbeeld bij een reactor of buis, begint met het schematiseren van de geome- trie. Hiermee worden de grenzen of het domein van het model vastgelegd. Op het domein geldt een aantal vergelijkingen, die de

toestand van de stroming beschrijven. Dit zijn in het algemeen complexe (partiële differenti- aal) vergelijkingen die niet analytisch kunnen worden opgelost. CFD-modellering zoekt op numerieke wijze naar de best passende bena-

deringsoplossing van deze vergelijkingen. Hiervoor kunnen verschillende werkwijzen worden toegepast. In de meeste van onder- staande voorbeelden is gebruik gemaakt van de zogeheten 'Finite Element'-methode. Bij deze methode wordt het domein verdeeld in aantal aan elkaar grenzende elementen. Op ieder ele- ment wordt een benadering voor de oplossing van de vergelijking berekend en tenslotte wordt de oplossing gevisualiseerd.

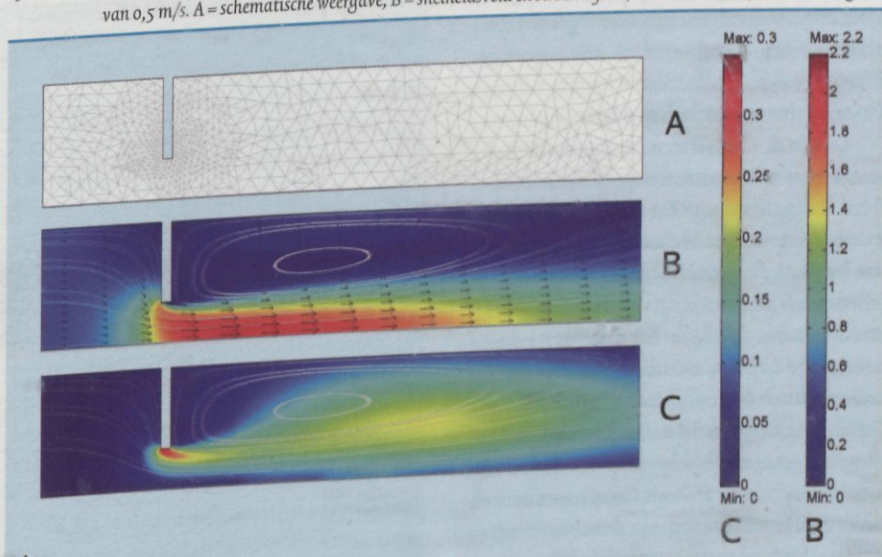
Bij toepassing van CFD bij waterbehande- lingsprocessen komen twee belangrijke pro- blemen voor: de stroming is in het algemeen turbulent én vaak is naast een continue water- fase ook een disperse fase in de vorm van gas- bellen of vaste deeltjes aanwezig. Daarnaast is het vaak nodig om het systeem in drie dimen- sies te modelleren, waardoor een aanzienlijk beslag wordt gelegd op reken- en geheugenca- paciteit van de gebruikte computer.

Het opzetten van een CFD-model kent een drietal stappen. In stap 1 wordt het te modelle- ren proces geschematiseerd. Daarmee wordt dan het domein waarop de oplossing wordt berekend, vastgelegd. Vaak komt het domein overeen met de werkelijke situatie, maar soms wordt handig gebruik gemaakt van aanwezige symmetrieën. In de eerste stap worden ook alle randvoorwaarden vastgelegd. Stap 2 is het berekenen van de oplossing. Tenslotte wordt in stap 3 de berekende oplossing gevisuali- seerd. De stappen van het modelleringsproces zijn weergegeven in afbeelding 1 (A: schemati- satie, B en C: visualisatie van de oplossing), waar de stroming door een half geopende schuifafsluiter is gesimuleerd.

Waterverdeling in een spuitstuk

Het eerste voorbeeld voor toepassing van CFD gaat om de waterverdeling over de ver-

Afb. 1: Turbulente stroming door een half afgesloten schuifafsluiter met een diameter van 0,8 m en een snelheid van 0,5 m/s. A = schematische weergave, B = snelheidsveld en stroomlijnen, C = turbulente kinetische energie.



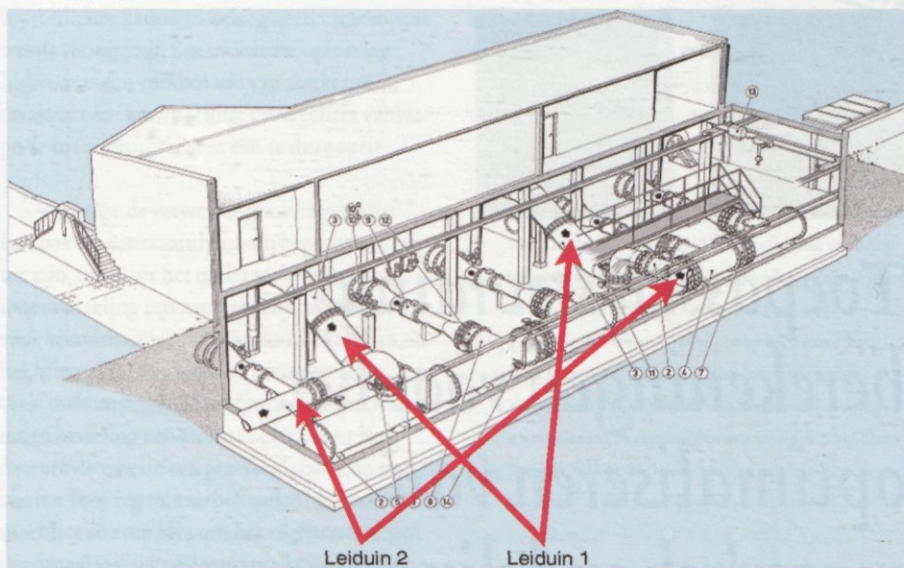
schillende ozonstraten op het productiebedrijf Leiduin¹. Deze verdeling komt tot stand in een verdeelspruitstuk dat via vier plaatsen wordt gevoed. Vanuit het spruitstuk wordt het water verdeeld over vijf ozonstraten (afbeelding 2). Elke straat wordt als gelijkwaardig beschouwd met gelijke desinfectieniveau's. De waterverdeling in dit verdeelwerk wordt geregeld via magnetische debietsmeters en vlinderkleppen in de vijf toevoeren naar de straten. De regeling is zodanig ontworpen dat de vijf straten gelijke hoeveelheden water ontvangen (gemiddeld rond 1500 kubieke meter per uur). De praktijk gaf echter aanwijzingen dat de debieten door de straten niet gelijk waren, een ongewenste situatie in verband met desinfectie. Metingen met externe akoestische debietsmeters bevestigden dat vermoeden, hoewel geen hard bewijs kon worden geleverd vanwege de beperkte nauwkeurigheid van de meting.

Het waterverdelingsspruitstuk is vervolgens in een tweedimensionaal model geschematiseerd. Daarbij zijn de watertoevoeren vanaf de bovenzijde (nr. 1 en 2 in afbeelding 2) 90° gedraaid naar het horizontale vlak. Daarnaast is aangenomen dat de toevoerstromen, twee aan twee gelijk zijn. Afbeelding 3 toont de resultaten van het model. In het model valt in de eerste plaats op dat sterke voorkeurstromen bestaan in het verdeelwerk. Het effect hiervan kan zijn, dat de vijf ozonstraten worden belast met verschillende waterkwaliteiten en dus ook verschillende desinfectieniveau's nodig zijn. Een tweede constatering is dat inderdaad verschillen in de debieten naar de vijf ozonstraten worden voorspeld. De voorspellingen liggen bovendien in lijn met de akoestische metingen.

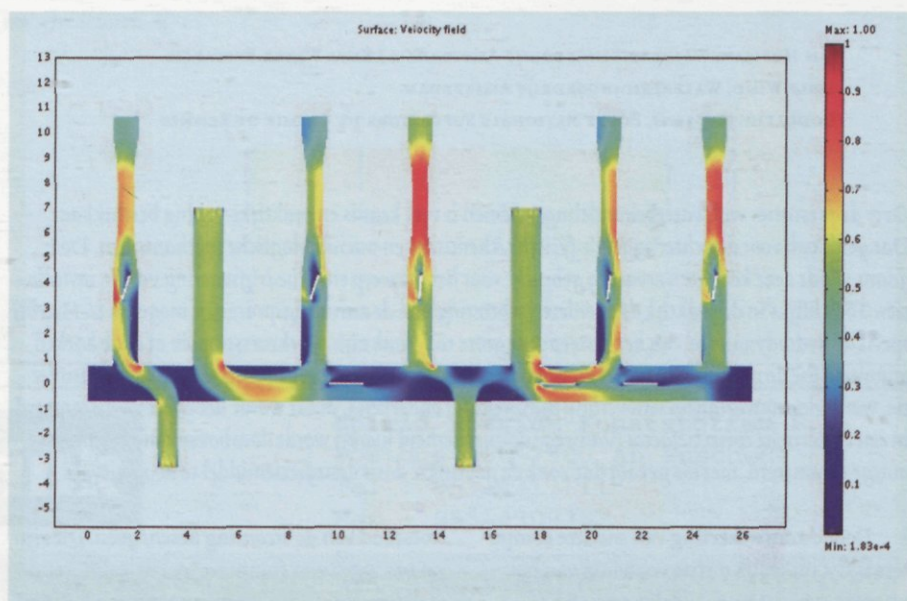
Samengevat kan gezegd worden dat CFD heeft aangetoond, dat sterke voorkeurstromen aanwezig kunnen zijn en dat de aanwijzingen voor verschillen in debieten over de vijf straten zijn versterkt. Op basis hiervan is het aan te bevelen om sturing van het ozonproces op het niveau van individuele straten mogelijk te maken.

Voorkeurstromen bij ozon

Ook in de ozonstraten komen voorkeurstromen voor. Vanuit het oogpunt van desinfectie is dit ongewenst. De mate van desinfectie wordt immers bepaald door de concentratie van het desinfectiemiddel en de contacttijd ($C \cdot t$ -waarde). Bij het optreden van voorkeurstromen zal een deel van het water een kortere contacttijd hebben, waardoor in deze pakketten onvoldoende desinfectie zal optreden. Onlangs is aangetoond dat verblijftijdspreiding een grote invloed heeft op de effectiviteit van het desinfectieproces². Om propstroom in de straten te stimuleren zijn de ozoncontactkelders door een aantal verticale schotten ver-

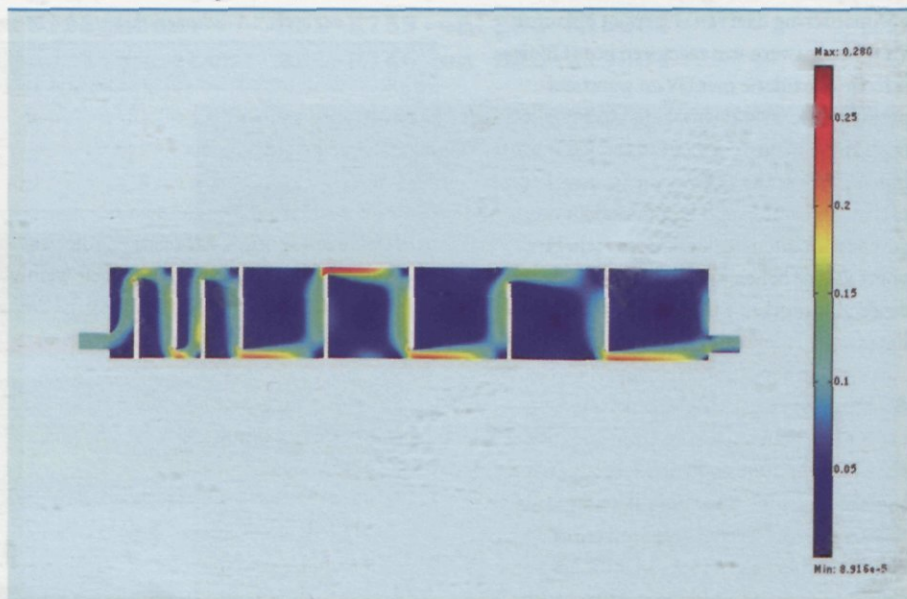


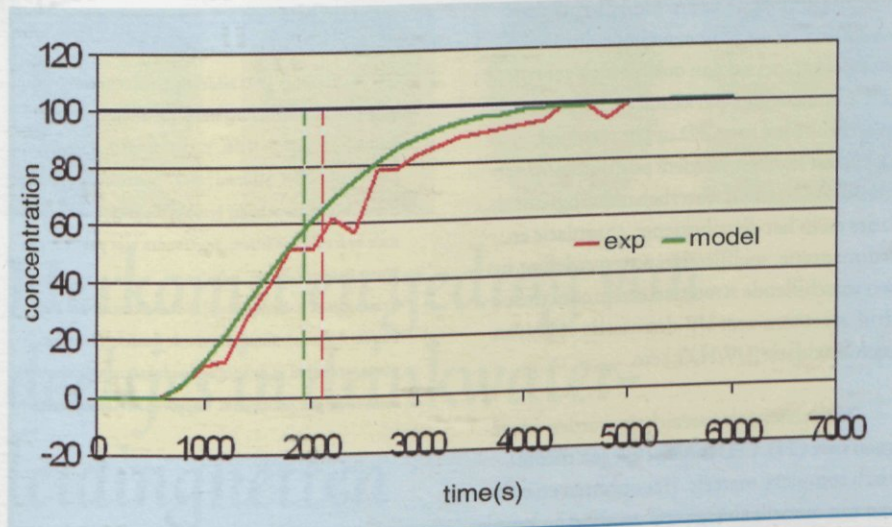
Afb. 2: Verdeelwerk voor de ozondoseerkelders in Leiduin.



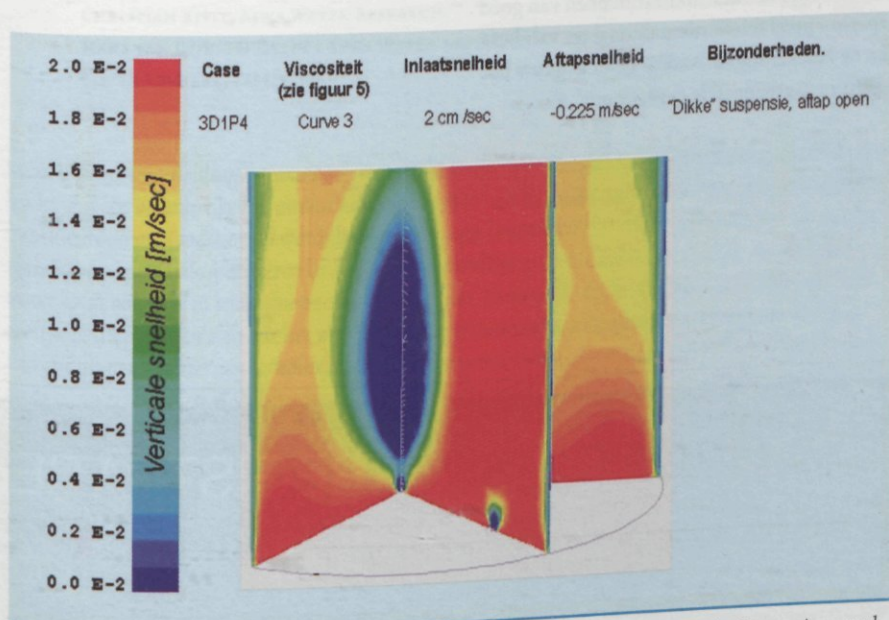
Afb. 3: Snelheidsverdeling van het water in doseerspruitstuk ozonkelders Leiduin.

Afb. 4: Tweedimensionaal model van de ozonstraat Leiduin. Weergegeven is de snelheidsverdeling bij een belasting van de kelder bij 1.200 m³/h.





Afb. 5: Experimenteel vastgestelde en berekende (relatieve) tracerconcentratie aan het einde van de contactkelder.



Afb. 6: Model voor een korrelreactor. De kleuren geven de verticale snelheid weer. Het centrale aftappunt is geopend.

deeld in compartimenten. Een tweede aspect dat bij toepassing van ozon een rol speelt, is de vorming van nevenproducten. De belangrijkste daarbij is bromaat. Het Waterleidingbesluit schrijft een maximaal toelaatbare concentratie van 5 µg/l voor (bij toepassing van ozon voor desinfectie). Vorming van bromaat lijkt voornamelijk op te treden in gebieden met hoge ozonconcentraties. Dit komt voor in de doseercompartimenten van de ozonstraten. Het effect van de bellen op de stroming speelt daarbij een belangrijke rol. Door koppeling van een chemisch model voor ozonvorming aan het stromingsmodel, is het mogelijk een goed beeld te krijgen van de plekken waar ozon gevormd wordt.

Voor de stroming in de ozonstraten van Leiduin is een model in ontwikkeling. Tot nu toe zijn de ozonstraten geschematiseerd in een tweedimensionaal model¹⁾. In dit model is nog geen rekening gehouden met aanwezigheid

van ozonbellen. Afbeelding 4 toont het resultaat van de stroming door de kelders bij een gemiddeld debiet van 1.200 kubieke meter per uur.

Wat opvalt in deze simulatie is het optreden van grote snelheidsverschillen en recirculatiestromingen in de ozoncontactkelders. Daarnaast blijkt de hoofdstroom voornamelijk langs de wanden van de kelder plaats te vinden. De consequentie is dat relatief grote verblijftijdspreiding optreedt. Het behoeft weinig discussie om in te zien dat het effect op de desinfectiecapaciteit van de kelder groot is. Ook is het van groot belang om in deze stromingscondities monsterpunten goed te positioneren, zodat een adequate monitoring van het proces mogelijk is.

In het verleden is de verblijftijdspreiding in de contactkelders ook experimenteel vastgesteld met behulp van een studie met een fluo-

ridetracer. Deze zijn gebruikt om het ontwikkelde model te valideren.

Bij de studie is hexafluorkiezelzuur in een stapfunctie gedoseerd in de toevoer naar een ozonkelder en is het concentratieverloop in de kelder gemeten. Ook in het model is een tracer gedoseerd en de verdeling in de stroming gesimuleerd. Het resultaat is weergegeven in afbeelding 5.

Geconcludeerd wordt dat CFD een krachtig middel is om de stroming in waterbehandelingssystemen inzichtelijk te maken. Met name voor het realiseren van een effectieve desinfectie en het minimaliseren van schadelijke nevenproducten is dit van groot belang. CFD maakt het mogelijk om maatregelen ter verbetering van de stromingscondities in beeld te brengen.

Pelletaftap bij korrelreactoren

Een derde en laatste voorbeeld van toepassing van CFD-modellering is de aftap van kalkkorrels in pelletreactoren. De korrels worden ingezet bij de productie van staal. Afzet is echter alleen mogelijk als het kalkgehalte van de pellets hoger is dan 90 procent, bij voorkeur zelfs 95 procent.

De aftap van de korrels vindt periodiek plaats en wordt geïnitieerd door de drukval over het fluïde pelletbed. De aftap dient zo uitgevoerd te worden dat het gestratificeerde fluïde bed niet verstoord raakt. De pelletreactoren zijn daarom uitgevoerd met vier aftappunten in de bodem: één centraal, en drie eromheen (zie afbeelding 6). De aftap vindt plaats door de aftappunten één voor één kort te openen in het aangegeven patroon, net zolang tot de minimale drukval over het bed is bereikt. In de praktijk bleek dat het moeilijk was om het gewenste kalkgehalte te handhaven. Bovendien werd waargenomen dat de afgetapte pellets waren vermengd met een fractie kaal entmateriaal (granaatzand). Vanwege stratificatie van het bed bevindt dit granaatzand zich echter bovenin en zou dus niet in de aftap aanwezig mogen zijn. De hypothese ontstond dat tijdens het aftappen een trechter in het bed werd getrokken, waardoor deze fractie ook in de aftap terecht kwam.

Om deze hypothese te toetsen is in samenwerking met het in CFD gespecialiseerde adviesbureau rND te Delft een model opgesteld waarmee de aftap kon worden gesimuleerd⁴⁾. De resultaten gaven aan dat voornamelijk de aftap van het centrale spruitstuk een grote mate van trechtersvorming kon worden gesimuleerd. Afbeelding 6 toont de snelheidsverdelingen in het fluïde bed tijdens de aftap van de pellets. In het model zijn extreme condities aangenomen met betrekking tot de viscositeit van het water-pelletmengsel, waardoor de gegevens niet representatief zijn voor de

werkelijke situatie. Dit is gedaan om het effect van de aftap in het model te benadrukken. Momenteel worden experimenten uitgevoerd om dit te bevestigen, door de aftap via het centrale spuitstuk te sluiten.

Ook in deze situatie kon CFD de oorzaak van het probleem - te laag kalkgehalte van de afgetapte pellets - inzichtelijk maken. Ook hier was de oorzaak terug te voeren op stromingscondities in de reactor.

Mogelijkheden

Bovenstaande voorbeelden tonen aan dat Computational Fluid Dynamics een hulpmiddel is dat een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan de optimalisering van waterbehandelingsprocessen. Inzicht in de stroming door de reactoren en het effect daarvan op de kwaliteit van het geproduceerde water zijn van wezenlijk belang. De ontwikkeling van steeds snellere computers met veel geheugencapaciteit zorgt ervoor dat toepassing van CFD steeds meer

binnen handbereik komt. Modelleren voor veroptimalisering van ozon in Leiduin en Weesperkarspel zal dan ook worden voortgezet. Daarnaast ligt een aantal nieuwe mogelijkheden van CFD in het verschiet. Genoemd kunnen worden: positionering van monsterpunten bij waterbehandelingsinstallaties en in het distributienet, coagulatie en sedimentatie, snelfiltratie, waterverdeling tussen verschillende straten in een productiebedrijf, reactoren voor UV-desinfectie of geavanceerde oxidatie (UV/H_2O_2) etc.

Toch moet ook voorzichtig worden omgegaan met CFD. CFD is namelijk een theoretisch complexe materie. Het opzetten en oplossen van modellen vergt veel ervaring en kennis van de achterliggende theorieën over vloeistofstromingen. Daarnaast staat of valt de kracht van CFD met het beschikbaar hebben van goed experimenteel referentiemateriaal ter validatie van de berekeningen. Anders geldt al gauw het adagium 'Garbage in is garbage out'. 

LITERATUUR

- 1) Janssens R. (2004). CFD modeling Leiduin ozone system. Stageverslag Waterleidingbedrijf Amsterdam.
- 2) Smeets P., A. van der Helm, Y. Dullemond, L. Rietveld, J. van Dijk en G-J. Medema (2004). Inactivation of *Escherichia Coli* by ozone under bench-scale plug flow and full-scale hydraulic conditions. Ingezonden voor publicatie in Water Research.
- 3) Kruithof J. en P. Kamp (2005). Vakantiecursus TU Delft.
- 4) Pajjens A. (2000). Simulatie van de fluidisatie van het granaatzandbed in de hardheidsreductor van Gemeentewaterleidingen Amsterdam. Rapport pRND00036.1002.