



Betere bedrijfsvoering van de drinkwaterzuivering door modellering

LUUK RIETVELD, TU DELFT

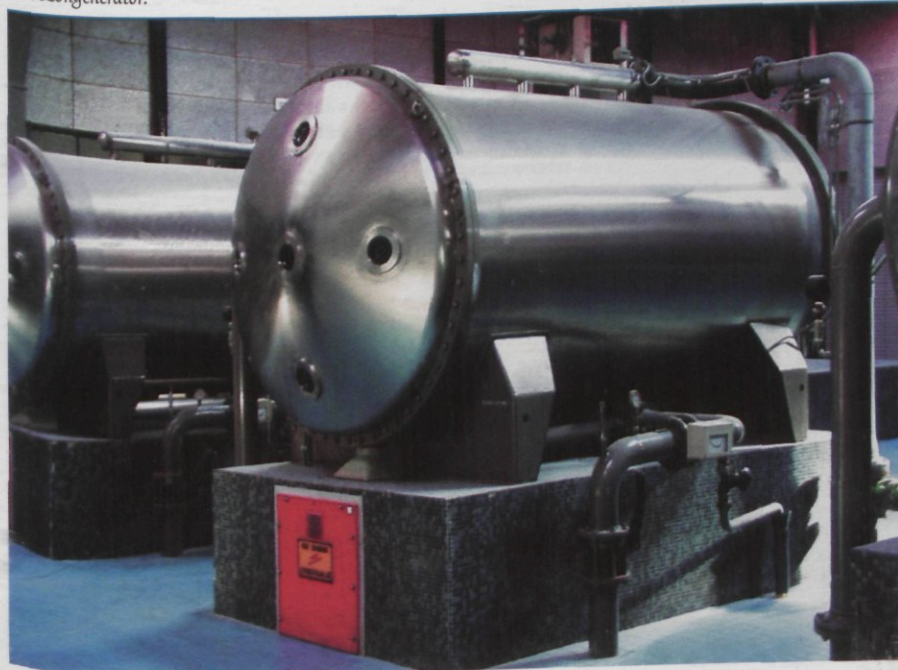
De bedrijfsvoering van drinkwaterzuiveringsinstallaties is gebaseerd op ervaring. De waterkwaliteit wordt bemonsterd om te bewijzen dat de kwaliteitsnormen en -richtlijnen worden gehaald en soms worden laboratoriumtesten uitgevoerd om bijvoorbeeld de dosering van chemicaliën te bepalen. Al deze gegevens worden echter zelden gebruikt om de dagelijkse besturing te verbeteren en verdwijnen in de kelders van het waterleidingbedrijf. Door het gebruik van modellen, in combinatie met on-line monitoren en real-time besturing, kan de bedrijfsvoering worden verbeterd. Dit zal leiden tot een betere en stabielere waterkwaliteit, beter gebruik van de geïnstalleerde infrastructuur, lagere zuiveringskosten en een verlaging van de uitstoot in het milieu.

Simulaties van verschillende bedrijfsvoeringsscenario's zullen leiden tot een verbeterde bedrijfsvoering die varieert in de tijd. In het promotieonderzoek worden daarvoor fenomenologische modellen gebruikt die zijn gebaseerd op het numeriek integreren van partiële differentiaalvergelijkingen, die het proces en het dynamische gedrag van het proces beschrijven. De modellen zijn uitgewerkt in de

modelleeromgeving Stimela, die geprogrammeerd is in Matlab/Simulink.

De drie uitgewerkte praktijkvoorbeelden beschrijven de 'post-conventionele' processen ozonisatie, actieve koolfiltratie en ontharding met een korrelreactor. Deze processen worden in Nederland gebruikt om het drinkwater, na de conventionele zuivering, verder te verbeteren.

Een ozongenerator.



Luuk Rietveld promoveerde op 22 februari aan de TU Delft op het proefschrift 'Improving operation of drinking water treatment through modelling'. Hij werkte drie praktijkvoorbeelden uit om de waarde van het modelleren te illustreren.

Modellering van zuiveringsprocessen

De verschillende stappen in de drinkwaterzuivering hebben vergelijkbare mechanismen en kunnen worden beschreven met vergelijkbare partiële differentiaalvergelijkingen, die gebaseerd zijn op het advectie-dispersie-model. Vergelijkingen zijn gegeven voor het transport van stoffen door een reactor, overdracht naar een gas- of een vaste fase, afbraak van de stof en de massabalans tussen het water en de gas- of vaste fase.

De algemene differentiaalvergelijking voor het transport van een stof in water kan als volgt beschreven worden:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + u \frac{\partial c}{\partial x} + f_1(c) + f_2(c, c_{g,s}) = 0$$

waarin: u = watersnelheid door een reactor (m/s)

c = stofconcentratie in water (g/m³)

$c_{g,s}$ = stofconcentratie in gas- of vaste fase (g/m³)

D_x = dispersiecoëfficiënt in water (m²/s)

f_1 = functie voor afbraak in water

f_2 = stofoverdrachtsfunctie uit het water

De eerste term aan de linker zijde is de verandering van de concentratie in de tijd. Wanneer $dc/dt = 0$, betreft het een stationaire situatie en is de concentratie op een bepaalde plaats tijds-onafhankelijk. De tweede term is de turbulente dispersie (volgens de wet van Fick). De derde term geeft het advectieve transport van de concentratie door de reactor weer. De vierde term beschrijft de stofafbraak. De laatste term behelst de stofoverdracht uit het water naar een gas- of vaste fase.

Voor elk zuiveringsproces zijn met name de stofoverdracht en -afbraak verschillend. Als die snel is, kunnen de contacttijden in een reactor klein zijn. Dit heeft als gevolg dat de snelheden in de reactor groot kunnen zijn en het oppervlak van de zuiveringsstap dus klein. Deze installaties zullen dan lage investeringskosten hebben. Als voorbeeld kan de korrelreactor genoemd worden.

Om de verschillende zuiveringsstappen te modelleren is het modelleerplatform 'Stimela' ontwikkeld. Hierin is het mogelijk modellen te maken voor de verbetering van de bedrijfsvoering maar ook voor onderzoek, ontwerp en onderwijs. Het platform is te bereiken via internet (www.stimela.com).

Om de modellen te kunnen gebruiken voor de verbetering van de bedrijfsvoering

moet calibratie en validatie op een gestructureerde manier uitgevoerd worden. Literatuurstudie zal de mogelijke verbeteringen identificeren en de differentiaalvergelijkingen definiëren. Met beschikbare gegevens zal het model worden geëvalueerd en een eerste schatting van de calibratieparameters worden gedaan. Normaliter zal dit uitmonden in een testprogramma voor additionele experimenten. Na calibratie en validatie zullen verschillende alternatieve bedrijfsvoeringsscenario's worden doorgerekend en zal het beste alternatief worden geïmplementeerd. Tijdens de toepassing van het model zullen voortdurend gegevens worden verzameld en gebruikt voor on-line parameteridentificatie om zodoende de kwaliteit van het model te verbeteren.

Ozonisatie

Decimale eliminatie van pathogene micro-organismen tijdens de ozonisatie is gekoppeld aan de CT-waarde (gebaseerd op ozonconcentratie en verblijftijd). De CT-waarde wordt normaliter alleen berekend voor de contactkelders en het effect van de bellenkolommen wordt verwaarloosd. In het eerste praktijkvoorbeeld zijn ozonprofielen bepaald met gegevens van de meestroom- en tegenstroom-kolommen van de proefinstallatie Weesperkarspel van Waterleidingbedrijf Amsterdam en op deze gegevens is een model voor de bellenkolommen geïkt. Het model is gebaseerd op partiële differentiaalvergelijkingen die de waterstroom en de gasstroom, de overdracht van ozon van het gas naar het water en de langzame en snelle afbraak van ozon in water beschrijven. De langzame afbraak van ozon is separaat gemeten in de proefinstallatie, maar ook de snelle afbraak speelt een belangrijke rol in het ozonisatieproces.

Zoals al te zien is in afbeelding 1 zou de ozonconcentratie in de bellenkolom ver worden overschat als de snelle afbraak niet zou worden meegenomen. Toch is de bijdrage van de bellenkolommen aanzienlijk. In de proefinstallatie werd bij 20°C het volgende gemeten: in de bellenkolom bleek bij tegenstroom 30 procent van de totale CT-waarde en 80 procent bij meestroom te worden bereikt. In de praktijk is dus een hogere totale CT-waarde aanwezig dan verondersteld en derhalve een grotere desinfectie-capaciteit dan verwacht. Voor de bedrijfsvoering van de ozonreactor is de voorspelling van het ozonprofiel in de bellenkolom dus van belang. Verdere calibratie zal leiden tot een model dat het profiel kan bepalen onder verschillende omstandigheden (temperatuur, UV-adsorptie).

In de drinkwaterzuivering Weesperkarspel wordt in de winter (2,25 mg/l) en de zomer (1,75 mg/l) een vaste bruto ozondosering gehanteerd. Met het model kan echter een voorspelling van de werkelijke CT-waarde

worden gedaan, variërend met de temperatuur en de UV-adsorptie. Deze procedure zal leiden tot een minimalisatie van de ozondosering zonder verslechtering van de hygiënische waterkwaliteit.

Actieve koolfiltratie

In het tweede praktijkvoorbeeld is de verwijdering van bentazon door actieve koolfilters op twee locaties gemodelleerd: de drinkwaterzuiveringen Rodenhuis en Reijerwaard van Hydron Zuid-Holland. De actieve koolfilters zijn geïnstalleerd in series van twee filters in een 'pseudo moving bed'-configuratie. Met gegevens van de proefinstallatie en het bedrijf zijn de looptijden van de actieve koolfilters berekend en deze zijn vergeleken met de huidige bedrijfsvoering. Het model van de actieve koolfilters is gebaseerd op partiële differentiaalvergelijkingen die het transport van micro-verontreinigingen door het filterbed, de overdracht van micro-verontreinigingen van het water naar de vaste fase en de accumulatie van micro-verontreinigingen in de poriën van de actieve koolkorrels beschrijven. Het model is geïkt op gegevens van de proefinstallatie en de drinkwaterzuivering Rodenhuis en gevalideerd aan de hand van gegevens van Reijerwaard, waar de voorbelading met organisch materiaal hoger is.

Verschillende scenario's zijn geëvalueerd, waarbij uitgegaan is van een betere planning van de regeneratie van de filters en waarbij 'pseudo moving bed' is vergeleken met parallelle bedrijfsvoering. Voor drinkwaterzuivering Reijerwaard kan worden geconcludeerd dat parallelle bedrijfsvoering zal leiden tot kortere looptijden (twee jaar in plaats van 2,5 jaar), maar heeft als voordeel dat de besturing minder gecompliceerd wordt en dat het systeem

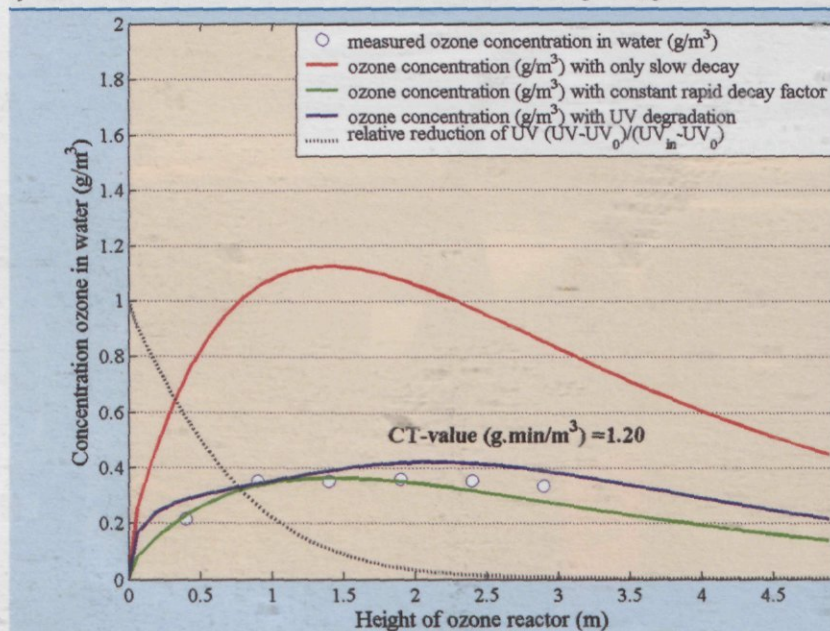
een groter debiet kan behandelen. Voor Rodenhuis kan worden geconcludeerd dat de huidige regeneratiepraktijk, economisch gezien, suboptimaal is (zie afbeelding 2).

De gemiddelde waarde van de betreffende waterkwaliteitsparameter, hier bentazon, ligt ver onder de toelaatbare waarde. Het aantal regeneraties van actieve kool zou kunnen worden verminderd met 20 procent (één regeneratie minder per jaar). Regeneraties vormen de belangrijkste operationele kosten van het proces en daarom kunnen aanmerkelijke economische maar ook milieuvoordelen gehaald worden als de filterlooptijd wordt verlengd. Uit kwaliteitsoverwegingen zal frequent regenereren echter leiden tot een beter product.

Ontharding

In het derde praktijkvoorbeeld is het onthardingsproces met korrelreactoren gemodelleerd en geëvalueerd voor drinkwaterzuivering Weesperkarspel van Waterleidingbedrijf Amsterdam, waar het water wordt onthard door natronloog te doseren. Het doel van de studie was om een optimalisatie in bedrijfsvoering te vinden door de oververzadiging van calciumionen in het gemengde product van de reactoren en de by-pass stroom te verminderen. Van één van de korrelreactoren van de Weesperkarspel zijn gegevens verzameld. Een model is ontwikkeld dat gebaseerd is op partiële differentiaalvergelijkingen die het transport van water door de reactor, de kristallisatie van calciumcarbonaat op de korrels, de groei van de korrels, het transport van de korrels door de reactor, filterbedexpansie als functie van debiet en korrelgrootte en drukval over de reactor beschrijven. Met de modelevaluaties is een verandering van de bedrijfsvoering voorgesteld

Afb. 1: Model calibratie van een meestroom bellenkolom met een dosering van 3,5 g/m³.



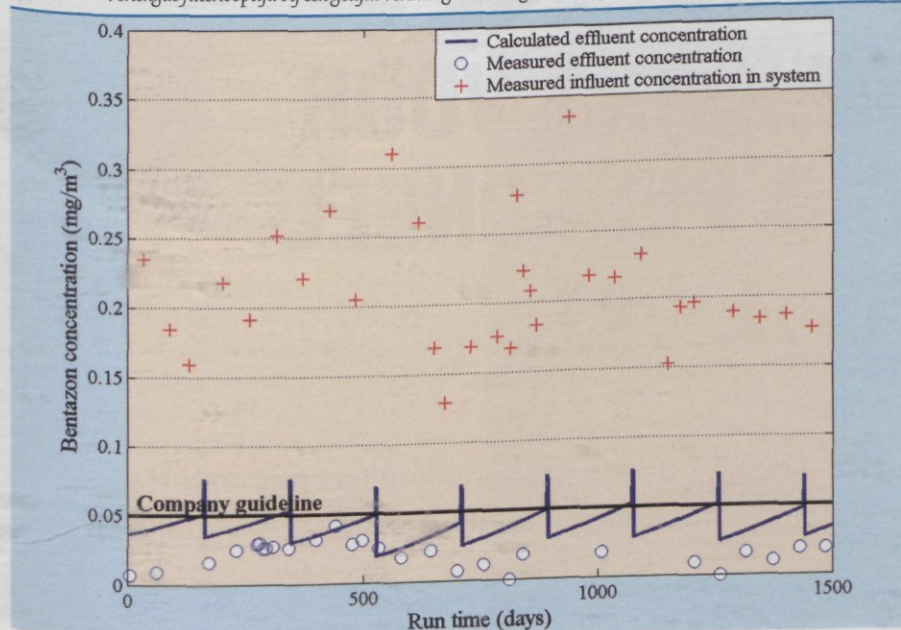


Korrelreactoren.

om een betere waterkwaliteit (minder oververzadiging) te verkrijgen. Hiertoe zouden de deelstroomverhouding en de hoogte van het gefluidiseerde bed moeten worden gemaximaliseerd en het debiet door de individuele reac-

toren geminimaliseerd. Het verloop van de oververzadiging in het gemengde effluent als functie van het aantal reactoren dat in bedrijf is én de deelstroomverhouding is te zien in afbeelding 3.

Afb. 2: Verlengde filterlooptijd bij een gelijke verdeling van de regeneraties (drinkwaterzuivering Rodenhuis).



Met deze aanpak worden bij een gemiddeld debiet niet alle geïnstalleerde reactoren gebruikt. In het onthardingsproces betekent een verbetering van de productkwaliteit tevens een besparing op chemicaliën, hetgeen leidt tot een verlaging van de operationele kosten en uitstoot in het milieu. Met een verbeterde bedrijfsvoering kan de dosering van natronloog met vijf tot tien procent worden verlaagd, waardoor op bijna de totale hoeveelheid zoutzuur ten behoeve van de pH-verlaging kan worden bespaard.

Conclusie

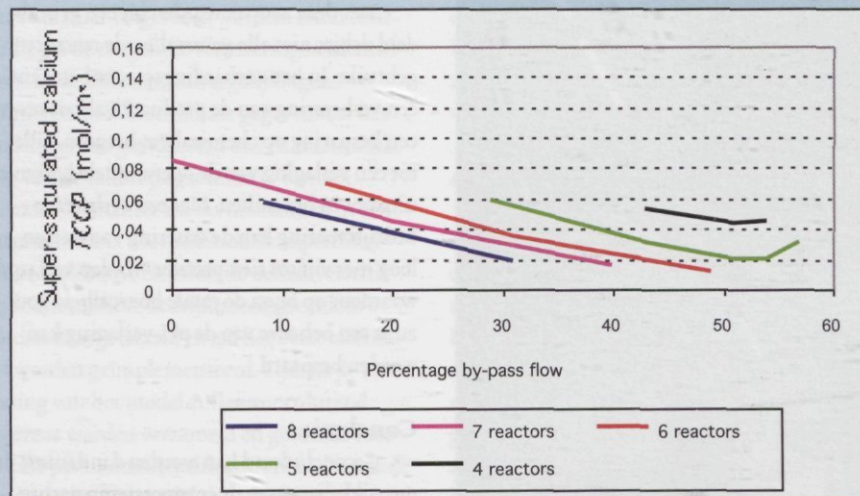
Geconcludeerd kan worden dat dankzij de ontwikkelingen in de computerwetenschap, PC technologie en modelleringstechnieken nieuwe mogelijkheden ontstaan die de overvloedige beschikbaarheid van gegevens gebruiken om de bedrijfsvoering van drinkwaterzuivering te verbeteren. Dit zal leiden tot een betere drinkwaterkwaliteit en/of een verlaging van de operationele kosten en/of een verlaging van de uitstoot in het milieu.

Tevens wordt het inzicht in het proces verhoogd, waardoor meer vertrouwen in de efficiëntie van de zuiveringsinstallatie wordt verkregen. Ingrepen kunnen worden gepland en er kan geanticipeerd worden op verstoringen. Modellering ten behoeve van de bedrijfsvoering geeft meer informatie over de status van het proces. In de praktijk kunnen niet alle parameters on-line of met regelmatige tussenpozen worden gemonitord. Goed gekikte modellen kunnen gebruikt worden voor virtuele monitoring van de productkwaliteit, resulterend in een verlaging van de analysekosten. Het gebruik van modellen om de bedrijfsvoering te evalueren kan ook leiden tot meer kennis over het proces zonder dat duur proefinstallatieonderzoek noodzakelijk is.

Gebeurtenissen die nu niet worden begrepen, kunnen worden geanalyseerd door gebruik te maken van gegevens uit het bedrijf. Bedrijfsvoerders worden op die manier meer betrokken bij het onderzoek, dat voortgezet kan worden in een proefinstallatie en dat kan leiden tot een alternatief zuiveringsschema. Het gebruik van modellen tijdens de bedrijfsvoering van een drinkwaterzuivering zorgt voor een stabiel proces, waarbij snelle veranderingen in debiet, waterverdeling en dosering van chemicaliën vermeden worden. De stabiele bedrijfsvoering zal tevens leiden tot minder onregelmatigheden.

Toekomst

In de nabije toekomst zullen de modellen toegepast gaan worden in de praktijk. Zij zullen worden gebruikt voor modelgebaseerde beslissingsondersteuning en geïntegreerd worden in modelvoorspellende 'controllers'



Afb. 3: Operationele scenario's voor ontharding op waterzuivering Weesperkarspel.

ten behoeve van on-line, geoptimaliseerde, geautomatiseerde sturing.

Het gebruik van het ozonisatiemodel voor beslissingsondersteuning in de bedrijfsvoering van waterzuivering Weesperkarspel staat gepland voor dit en volgend jaar nadat eerst

een uitgebreide calibratie en validatiefase zal worden doorlopen.

Op basis van de modelstudies voor ontharding wordt nu onderzoek uitgevoerd in de proefinstallatie van Weesperkarspel om het model verder te valideren en de voorgestelde

operationele scenario's te testen. Hiertoe is de proefinstallatie geautomatiseerd en apparatuur geïnstalleerd om on-line metingen van bedhoogte, drukverlies en de waterkwaliteit van het influent en het effluent te kunnen meten. Het model zal dan worden gebruikt om een modelgestuurde 'controller' te ontwikkelen.

Tevens zullen de individuele modellen aan elkaar worden gekoppeld, hetgeen resulteert in een integrale aanpak van de gehele zuiveringsinstallatie ten behoeve van een nog efficiëntere bedrijfsvoering.

Waterleidingbedrijf Amsterdam, TU Delft, DHV Water en het bedrijf ABB zijn daarom het project PROMICIT begonnen, gesubsidieerd door Senter (Ministerie van Economische Zaken). Het doel van dit project is om een doorbraak te bereiken in de controle van de drinkwaterkwaliteit door integrale, dynamische modellen van de gehele drinkwaterzuivering te ontwikkelen en dit model te gebruiken als een basis voor integrale, on-line besturing. Drinkwaterzuivering Weesperkarspel is het onderwerp van dit project.