

Is de praktijk gebaat bij modellen van intensieve gasuitwisselingssystemen?

IR. A. VAN DER HELM, TU DELFT, THANS WERKZAAM BIJ DHV WATER BV

IR. L. RIETVELD, TU DELFT

PROF. IR. J. VAN DIJK, TU DELFT

Gasuitwisselingssystemen worden gebruikt voor de beluchting en ontgassing van grondwater. In dit artikel worden de verschillende toepassingen uitgediept. De modellen blijken vooral van belang voor educatieve doeleinden en voor het ondersteunen van onderzoek (optimalisatieonderzoek aan bestaande installaties). Door het robuuste karakter en de beperkte instelmogelijkheden geeft 'real time control' geen grote verbeteringen.

Tijdens een workshop op 11 september '98 op de TU Delft naar aanleiding van de afstudeervoorzitting van A. van der Helm met als titel 'Modellering van intensieve gasuitwisselingssystemen' is met een aantal deskundigen van waterleidingbedrijven, het Kiwa, waterlaboratoria en ingenieursbureaus gediscussieerd over het gebruik van modellen van gasuitwisselingssystemen.

Deze systemen worden gebruikt voor de beluchting en ontgassing van grondwater. Bij de beluchting gaat het om het inbrengen van zuurstof en bij de

ontgassing gaat het om de verwijdering van methaan, kooldioxide, stikstof, zwavelwaterstof en gehalogeneerde koolwaterstoffen. Met intensieve gasuitwisselingssystemen worden systemen bedoeld waarmee beluchtings- en ontgassingsrendementen van meer dan 90 procent kunnen worden gerealiseerd. Voorbeelden van intensieve gasuitwisselingssystemen zijn: cascade, plaatbeluchter, beluchtings- en ontgassingstoren en de vacuüm-ontgasser (zie afbeelding 1).

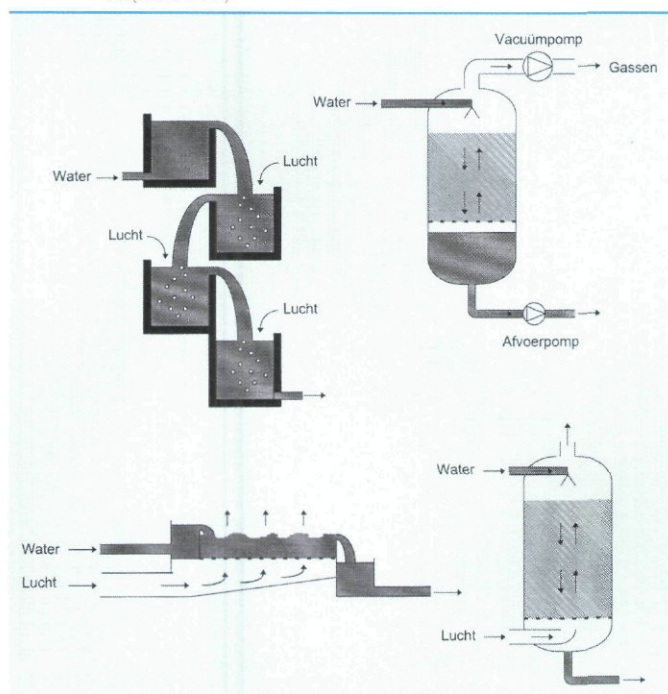
Er zijn diverse toepassingsmogelijkheden voor deze modellen te bedenken. De vier belangrijkste komen in dit artikel aan bod: educatie, onderzoek, ontwerp en 'real time control'.

Modellering

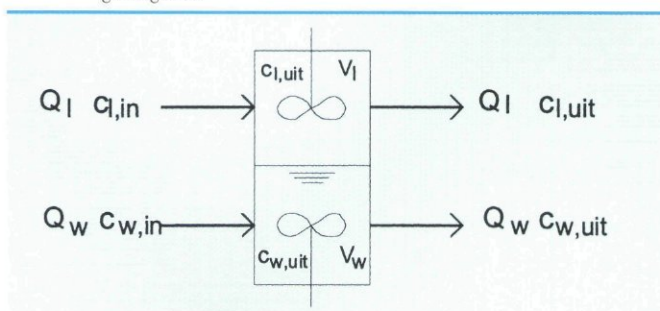
De gasuitwisseling treedt op door diffusie op het grensvlak van water en lucht. De richting en de grootte van het gastransport is afhankelijk van het gasconcentratieverschil tussen lucht en water, de drijvende kracht en van de grootte van de gasoverdrachtscoëfficiënt. De grootte van deze coëfficiënt hangt af van de grootte van het contactoppervlak, de vernieuwing van het contactoppervlak en het soort gas dat wordt beschouwd²⁾.

Als een stukje van de water- en de luchtstroom in een gasuitwisselingssysteem beschouwd wordt, kan dit worden weergegeven als een volledig gemengd vat (zie afbeelding 2).

Afb. 1 Intensieve gasuitwisselingssystemen: cascade (links boven), vacuüm-ontgasser (rechts boven), plaatbeluchter (links onder) en beluchtings- en ontgassingstoren (rechts onder).



Afb. 2 Een stukje van de water- en luchtstroom weergegeven als een volledig gemengd vat.



Afb. 3 Gasconcentratieverandering in water en lucht.

Water: $\frac{dc_w}{dt} = \frac{dc_w}{T} + k_2 * (k_D * c_l - c_w) - r_w$

Verandering = Transport ± Gasuitwisseling ± Verbruik/Productie

Lucht: $\frac{dc_l}{dt} = \frac{dc_l}{T} - \frac{k_2}{RQ} * (k_D * c_l - c_w)$

met:	
c_w	= gasconcentratie in water [g/m ³]
c_l	= gasconcentratie in lucht [g/m ³]
k_2	= totale gasoverdrachtscoëfficiënt [s ⁻¹]
k_D	= distributie coëfficiënt [-]
RQ	= de lucht-watervoorhouding [-]
t	= tijd [s]
T	= de verblijftijd van het water in één volledig gemengd vat [s]
r_w	= verbruik of productie van gassen in water [g/(m ³ ·s)]

ding 2). Voor dit stukje kunnen lineaire differentiaalvergelijkingen worden opgesteld voor de verandering van de gasconcentratie in het water en in de lucht (zie afbeelding 3). Hierbij wordt rekening gehouden met concentratieveranderingen van gassen in het water en de lucht door het transport, de gasuitwisseling en het optreden van verbruik en/of productie van gassen in het water. Dit laatste kan bijvoorbeeld gebeuren in het geval ijzeroxidatie en/of ontharding optreedt in een gasuitwisselingsstelsel. De reactievergelijkingen voor ijzeroxidatie en ontharding zijn weergegeven in afbeelding 4.

Door de water- en luchtstroom weer te geven als meerdere achter elkaar geplaatste volledig gemengde vaten, ontstaat een stelsel vergelijkingen dat met behulp van numerieke integratie kan worden opgelost. Op deze wijze kan het gasconcentratieverloop in het water en in de lucht worden berekend. Dit kan voor ieder in het water en in de lucht voorkomend gas worden gedaan. Bij het oplossen van dit soort uitgebreide stelsels van vergelijkingen biedt de computer uitkomst. Voor deze studie is gebruik gemaakt van het simulatiepakket Matlab/Simulink, waarin verschillende integratiemethoden beschikbaar zijn.

Educatie

De modellen kunnen worden gebruikt als hulpmiddel bij het uitleggen van bijvoorbeeld de effecten van het stroomprincipe, luchtrecirculatie en de verblijftijdspreiding op de gasuitwisseling. Op deze wijze kunnen ze bijdragen tot een verhoging van het inzicht in de gasuitwisseling bij de student en ontwerper.

Afb. 4 Omzettingsvergelijkingen.

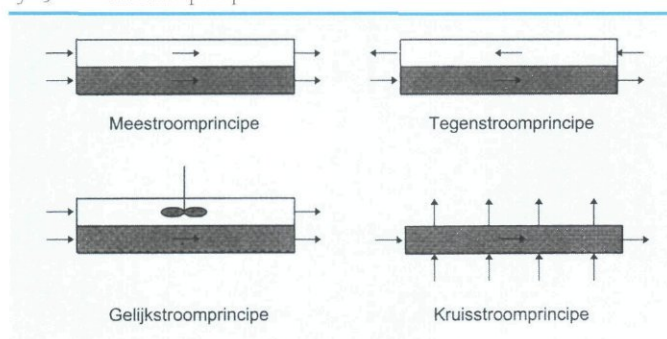
Ijzeroxidatie:



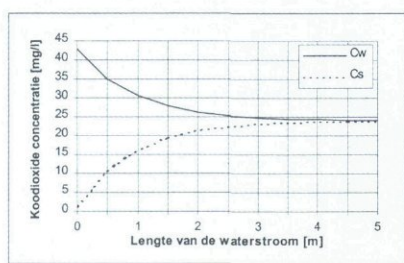
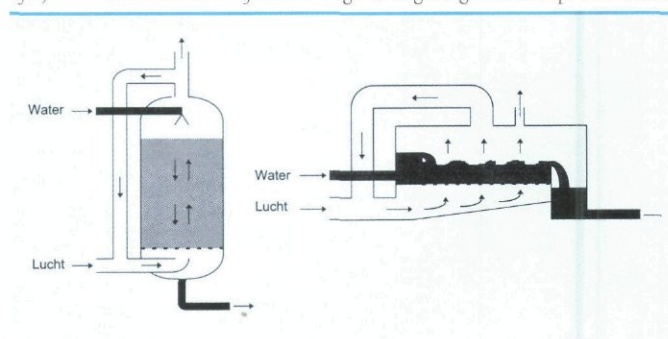
Ontharding:



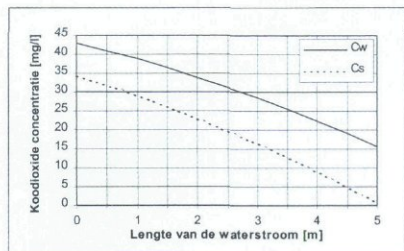
Afb. 5 Vier stroomprincipes.



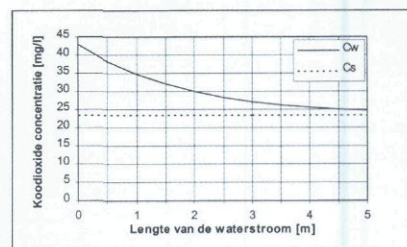
Afb. 7 Luchtrecirculatie bij de beluchtings- en ontgassingstoren en de plaatbeluchter.



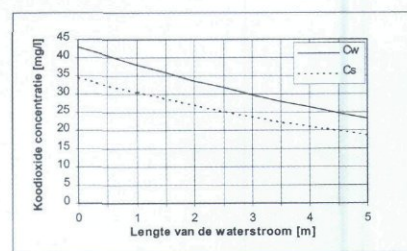
Meestroomprincipe



Tegenstroomprincipe



Gelijktroomprincipe



Kruisstroomprincipe

Afb. 6 Concentratieverloop van kooldioxide in water en lucht voor de vier stroomprincipes bij een lucht-water-verhouding van 1.

Stroomprincipe

Met het stroomprincipe wordt de wijze waarop het water en de lucht langs elkaar stromen bedoeld. Met de modellen kunnen de volgende vier stroomprincipes worden nagebootst: (zie afbeelding 5)

- het meestroomprincipe: de lucht stroomt dan in dezelfde richting als het water, bijvoorbeeld bij een beluchtings- en ontgassingstoren met meestroombeluchting;
- het tegenstroomprincipe: de lucht stroomt dan in de tegengestelde richting van het water, bijvoorbeeld bij een beluchtings- en ontgassingstoren met tegenstroombeluchting;
- het gelijkstroomprincipe: de gasconcentraties in de lucht worden verondersteld langs de hele lengte van de waterstroom hetzelfde te zijn, met andere woorden de gehele hoeveelheid lucht in een gasuitwisselingsstelsel wordt als één volledig gemengd vat

beschouwd, bijvoorbeeld bij een cascade die in een open ruimte is opgesteld;

- het kruisstroomprincipe: de lucht stroomt dwars op de richting van het water, bijvoorbeeld bij een plaatbeluchter.

In afbeelding 6 is het gasconcentratieverloop van kooldioxide in water en lucht weergegeven voor de vier verschillende stroomprincipes. Hieruit volgt (zoals bekend) dat uit het oogpunt van het stroomprincipe het tegenstroomprincipe het hoogste rendement geeft.

Luchtrecirculatie

Zowel bij plaatbeluchters als bij beluchtings- en ontgassingstorens wordt luchtrecirculatie toegepast (zie afbeelding 7). Redenen voor het toepassen van luchtrecirculatie zijn: het beperken van de kooldioxideverwijdering en kostenbesparingen. Met de modellen is het mogelijk om bij de verschillende stroomprincipes het effect van luchtrecirculatie op de gasuitwisseling te berekenen.

Uit modelsimulaties is gebleken dat het gasconcentratieverloop in water en lucht bij een toenemende luchtrecirculatie voor alle

stroomprincipes uiteindelijk gelijk wordt aan het gasconcentratieverloop bij gelijkstroom zonder luchtrecirculatie (zie afbeelding 6). Dit komt doordat het gasconcentratieverloop in de lucht door de recirculatielucht wordt afgevlakt. De gasconcentraties in de lucht nemen dus overal langs de waterstroom een gemiddelde waarde aan die gelijk is aan de waarde die optreedt indien wordt verondersteld dat de lucht beschouwd kan worden als één volledig gemengd vat.

Verblijftijdspreiding

Door in het model te variëren met de grootte en het aantal volledig gemengde vaten waaruit de waterstroom kan worden opgebouwd, kan iedere verblijftijdspreiding nagebootst worden. In afbeelding 8 is een verblijftijdspreidingscurve weergegeven die in een cascade is gemeten, en zijn de met het model berekende curven weergegeven voor 2, 9 en 25 volledig gemengde vaten. Te zien is dat de verblijftijdspreidingscurve die de stroming weergeeft als 9 volledig gemengde vaten, de curve van de cascade het beste benadert. De verblijftijdspreiding is op deze manier een instrument om de stroming door een gasuitwisselingssysteem zo goed mogelijk te modelleren.

Doordat de verblijftijdspreidingscurve kan worden geplot, kan het effect van de verblijftijdspreiding op de gasuitwisseling zichtbaar worden gemaakt. Hoe kleiner de spreiding van de verblijftijd is, des te meer de stroming een propstroom benadert en des te beter de gasuitwisseling verloopt. Bovendien is het model hierdoor een instrument om begrippen als propstroom, volledige menging, stap- en pulsfuncties uit te leggen.

Onderzoek

Uit verschillende modelonderzoeken blijkt dat berekeningen van kooldioxideverwijderingen overschattingen oplevert van de waarden die in de praktijk gemeten worden. Mogelijke verklaringen kunnen het optreden van ijzeroxidatie en ontharding in het gasuitwisselingssysteem en in de monsterfles zijn in het geval de kooldioxide bepalingen niet ter plaatse zijn uitgevoerd (zie afbeelding 4).

Als voorbeeld worden de plaatbeluchters op Spannenburg van Waterleiding Friesland gebruikt waaraan veel onderzoek is verricht³⁾. In afbeelding 9 zijn de gemeten verwijderingsrendementen voor methaan en kooldioxide weergegeven bij verschillende waterdebieten. Ook zijn de berekende kooldioxide-rendementen weergegeven voor het geval geen rekening gehouden wordt met ijzeroxidatie en ontharding en voor het geval 100 procent van het aanwezige ijzer oxideert en 10 procent onthar-

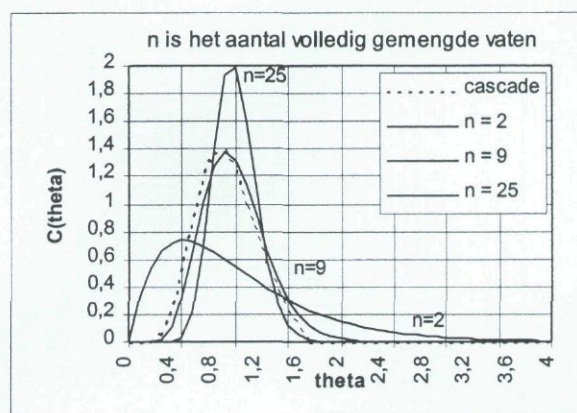
ding optreedt in de plaatbeluchter. Te zien is dat de berekende kooldioxideverwijdering groter is dan de gemeten kooldioxideverwijdering, zelfs met inachtneming van het optreden van ijzeroxidatie en ontharding. Slechts een deel van het verschil is hiermee te verklaren. Dit is niet alleen geconstateerd bij modelberekeningen aan plaatbeluchters maar ook bij modelberekeningen aan cascades, vacuümontgassers en beluchtings- en ontgassingstorens.

Overigens zijn de berekende methaanrendementen gelijk aan de gemeten methaanrendementen, omdat de modelberekeningen op de methaanrendementen zijn gekalibreerd.

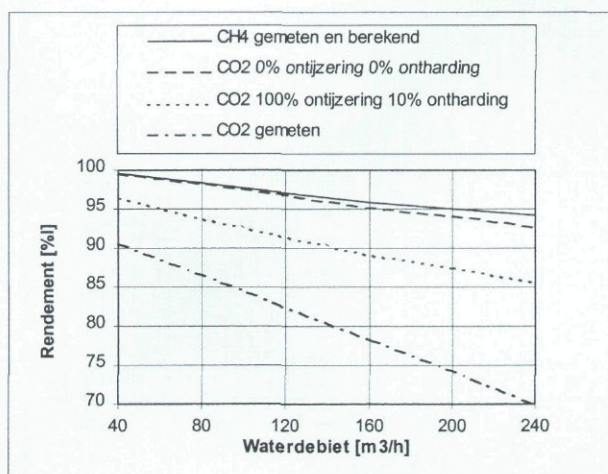
Ontwerp

Het ontwerpen van gasuitwisselingssystemen is voornamelijk gebaseerd op empirische formules. Voor nieuwe systemen kan het model gebruikt worden om de invloed van ontwerpparameters te testen. De vacuümontgasser is hiervan een voorbeeld. Het principe van de vacuümontgasser berust op een verlaging van de druk in de ketel waar water en lucht met elkaar in contact komen middels een vacuümpomp. Door de lagere druk zijn de gasconcentraties in de ketel lager dan onder atmosferische omstandigheden, waardoor gassen verder verwijderd kunnen worden. Enkele vragen die gesteld kunnen worden bij het ontwerpen van een vacuümontgasser zijn: Dient een continue of een discontinue vacuümpomp gebruikt te worden? Bij welke druk moet de vacuümontgasser worden bedreven? En dient wel of geen sleeplucht toegepast te worden?

Bij een continue vacuümpomp wordt de onderdruk op een constante waarde gehouden. Bij een discontinue vacuümpomp wordt een boven- en ondergrens bepaald voor de druk in de ketel. De pomp slaat aan tot de ondergrens is bereikt; dan slaat hij af. Vervolgens zal de druk in de ketel oplopen door de gasuitwisseling.



Afb. 8 Spreiding van de verblijftijd.

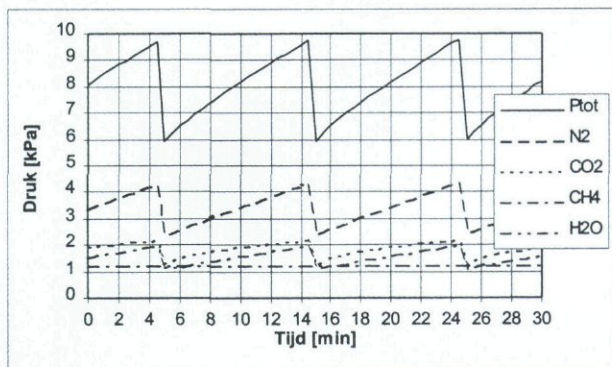


Afb. 9 Effect van de ontijzering en de ontharding op het kooldioxide-rendement.

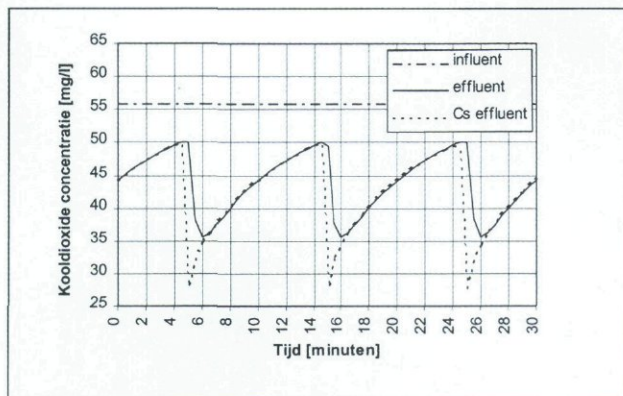
ling. Zodra de bovengrens is bereikt slaat de pomp weer aan tot de druk in de ketel is verlaagd tot de ondergrens. In afbeelding 10 is het drukverloop van de totale druk en de partiële drukken van de verschillende gassen en waterdamp weergegeven. De ondergrens waarop de vacuümpomp afslaat is in dit geval gesteld op 6 kPa en de bovengrens waarop de vacuümpomp aanslaat is gesteld op 10 kPa. In afbeelding 10 is dit te zien in het verloop van de totale druk.

Als de gasconcentraties in de lucht variëren, variëren ook de evenwichtsconcentraties van deze gassen in het water. Dit heeft tot gevolg dat de gasconcentraties in het uitgaande water ook zullen verlopen. Voor kooldioxide verloopt, bij een constante influentconcentratie, de effluentconcentratie zoals weergegeven in afbeelding 11.

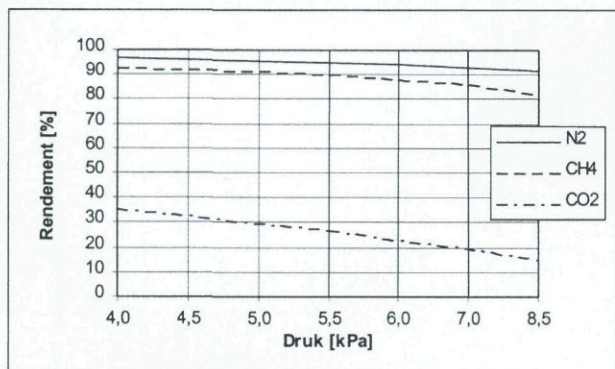
Er kan dus een grote variatie in de verwijdering van gassen optreden en aangezien een in de tijd constante belasting beter wordt geacht voor de achter liggende filters is het beter een continue vacuümpomp te gebruiken. De vraag is dan bij welke druk deze bedre-



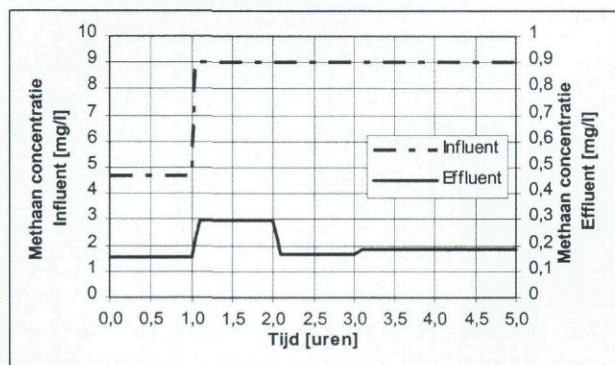
Afb. 10 Verloop van de totale en partiële drukken in de vacuümontgasser.



Afb. 11 Verloop van de kooldioxide concentratie in het water.



Afb. 12 Invloed van de druk op de gasverwijderingsrendementen.



Afb. 13 Het verloop van de methaanconcentratie bij gebruik van Real time control.

ven moet worden.

Om hierop een antwoord te kunnen geven zijn rendementsberekeningen gemaakt bij verschillende drukken. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 12. Te zien is dat hoe lager de druk is hoe hoger het gasverwijderingsrendement is. De druk zou dus zo laag mogelijk moeten worden gekozen. Hoe lager echter de druk, hoe harder de vacuümpomp moet zuigen en hoe meer energie er wordt verbruikt. Door het energieverbruik te kwantificeren en te koppelen aan het ontgassingsrendement is het mogelijk om met de resultaten van de modelberekeningen een kosten/rendement optimalisatie te maken.

Het gebruik van sleep lucht is het inlaten van een kleine hoeveelheid lucht door een ventiel in de ketel. Het voordeel hiervan zou zijn dat de verwijderde gassen beter afgevoerd zouden worden.

Het gebruik van sleep lucht is echter onnodig want met modelberekeningen is aangetoond dat sleep lucht geen verbetering geeft van de rendementen. In het geval van zuurstof- en stikstofverwijdering treedt zelfs een verslechtering op. Bovendien is één van de hoofdredenen voor het toepassen van vacuümontgassing voor de ontgassing van grondwater dat geen zuurstof wordt ingebracht zodat er

geen ijzeroxidatie optreedt. Door het toepassen van sleep lucht wordt zuurstof ingebracht zodat alsnog ijzeroxidatie op kan treden;

Real time control

'Real time control' houdt in dat het verloop van processen in de tijd wordt voorspeld en gestuurd. Bij gasuitwisselingssystemen zijn er een aantal instrumenten die kunnen worden gebruikt voor het sturen van het proces:

- kiezen van een bepaalde putschakeling met een bepaalde kwaliteit;
- het aanpassen van het debiet over een gasuitwisselingssysteem door putten bij of af te schakelen of door het aan- of uitzetten van een unit;
- het aanpassen van de lucht/water-verhouding door het luchtdebiet dat door een gasuitwisselingssysteem wordt geblazen te variëren;
- het aanpassen van het recirculatie-luchtdebiet.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de methaanverwijdering met een beluchtungs- en ontgassingstoren die is uitgerust met de mogelijkheid tot luchtrecirculatie (zie afbeelding 7). Voor het beperken van de kooldioxideverwijdering wordt 75 procent van het luchtdebiet door de beluchtungs- en ontgassingstoren gerecirculeerd. De methaanconcentratie van het effluent bedraagt 0,15 mg/l bij een influentconcentratie van 4,7 mg/l (zie afbeelding 13) op het tijdstip $t = 0$ uur. Op het tijdstip $t = 1$ uur vindt een putschakeling plaats waardoor de methaanconcentratie van het influent naar 9 mg/l stijgt. Het gevolg is dat de effluentconcentratie naar 0,29 mg/l stijgt. Als de hogere methaanconcentratie van het influent ernstiger wordt geacht dan beperking van de kooldioxideverwijdering, wordt op het tijdstip $t = 2$ uur de luchtrecirculatie afgezet, terwijl het totale luchtdebiet door de beluchtungs- en ontgassingstoren gelijk wordt gehouden. Dit heeft tot gevolg dat de methaanverwijdering toeneemt en de effluentconcentratie naar 0,17 mg/l daalt. Niet alleen de kooldioxideverwijdering werd dus beperkt door de luchtrecirculatie, maar ook de methaanverwijdering. Vervolgens wordt op het tijdstip $t = 3$ uur één van de beluchtungs- en ontgassingstorens uitgeschakeld vanwege onderhoudswerkzaamheden. Het waterdebiet over de beschouwde beluchtungs- en ontgassingstoren wordt hierdoor verhoogd. Het gevolg is dat de methaanverwijdering afneemt waardoor de effluentconcentratie naar 0,19 mg/l gaat.

Discussie

Zowel de TU Delft als Stichting Wateropleidingen zien mogelijkheden voor het gebruik van de modellen voor onderwijsdoel-

einden, met name als hulpmiddel bij ontwerp oefeningen en voor het verkrijgen van inzicht in de werking van de verschillende systemen. Hierbij zouden de modellen zodanig gebruikersvriendelijk moeten zijn dat er op verschillende niveaus mee kan worden gewerkt. De modellen worden geschikt geacht voor onderzoek naar de keuze van een proefinstallatie en het opzetten van proeven. Ook worden mogelijkheden gezien voor toepassing op het zuiveringsstation als instrument voor medewerkers om onderzoek te doen naar problemen en knelpunten bij het niet optimaal functioneren van de gasuitwisselingssystemen. De huidige ontwerpmethoden voor

praktijkinstallaties voldoen goed. Er bestaat daarom geen grote behoefte aan nieuwe ontwerpmethoden. De modellen zijn wellicht wel nuttig voor het verhogen van het inzicht in de ontwerpparameters van nieuwe systemen, zoals vacuümontgassing en hogedrukversproeiing. Het gebruik van de modellen voor Real time control voor het regelen van individuele gasuitwisselingssystemen zal geen spectaculaire verbeteringen opleveren, maar kan in bepaalde gevallen wel nuttig zijn.

Geconcludeerd wordt dat de modellen voor diverse toepassingen handig kunnen zijn. De TU Delft streeft er dan ook naar om een gebruikersvriendelijke PC-versie van de

modellen uit te brengen. ■

Bij de ontwikkeling van modellen is de terugkoppeling naar de praktijk van groot belang. In dit kader is aan het afstudeerwerk medewerking verleend door ir. P. Hesse (WZHO), ir. G. Regnea (Kiwa) en ir. R. Schotsman (IWACO).

LITERATUUR

- 1) Helm, A. van der (1998). Modellerings van intensieve gasuitwisselingssystemen, afstudeerverslag TU Delft.
- 2) Smit, J., Stammers, E. en Janssen, L. (1991). Fysische transportverschijnselen I, Delftse Uitgeversmaatschappij b.v.
- 3) Oostelbos, ir. P. en Meulen, J. van der (1990). Het toepassen van plaatbeluchters op pompstation Spannenburg, NV Waterleiding Friesland.