

Inleiding

Computersimulatie is een geaccepteerde techniek voor de beschrijving van relatief eenvoudige processen. Vooral chemische reacties, fysische verschijnselen, maar ook biologische omzettingen – waarbij een goed gedefinieerd substraat wordt afgebroken door een beperkt aantal soorten micro-organismen – komen in aanmerking voor simulatie.



I.R. R. J. VAN DER KUIJ
DHV Water BV



I.R. A. G. N. VAN BENTEM
DHV Water BV



I.R. F. TH. VAN BREUKELLEN
Hoogheemraadschap
van Schieland

Actief-slibsystemen vormen hierop echter een uitzondering. Zowel de samenstelling van het substraat (=influent) als de samenstelling van het actief slib zijn bijzonder divers en verschillen per lokatie en in de tijd. De complexiteit van het systeem bemoeilijkt een mathematische benadering.

Computersimulatie van actief-slibsystemen wordt daarom met scepsis bezien. Het ontbreken van een succesvolle toepassing draagt hier ook aan bij. Al in 1973 is de 'University of Cape Town' (UCT) gestart met de ontwikkeling van een mathematisch model voor de beschrijving van het actief-slibproces in een compleet gemengde reactor. De 'International Association of Water Pollution Research and Control' (IAWPRC) erkende in 1983 het belang van het UCT-model en vormde de 'Task Group on Modelling of Waste Water Treatment' [1]. De Task Group heeft enkele wijzigingen aangebracht in het UCT-model. Daarnaast is aandacht besteed aan een universele weergave van mathematische modellen. Zij ontwikkelde onder andere een matrix-tabel waarin relaties tussen de verschillende processen, substraten en omzettingen producten zijn weergegeven [2]. Toepassing van simulatiemodellen kan bijvoorbeeld worden overwogen bij training van bedienend personeel of bij procesanalyse voor extreme omstandig-

Samenvatting

In Nederland wordt de toepassing van computersimulatie voor onderzoek naar afvalwaterzuiveringsprocessen door velen met scepsis bezien. Enerzijds wordt dit veroorzaakt door de complexiteit van de processen, anderzijds zijn er onvoldoende goede voorbeelden voorhanden waaruit blijkt, dat computersimulatie een goed hulpmiddel kan zijn bij de optimalisatie c.q. uitbreiding van afvalwaterzuiveringsinrichtingen (awzi's).

Voor de awzi Kralingseveer (Hoogheemraadschap van Schieland) is simulatie toegepast voor de optimalisatie van de beluchterregeling én voor de beoordeling van verschillende procestechnologische aanpassingen. Er wordt getracht met de beschikbare middelen en eventueel aanvullende maatregelen, stikstof vergaand te verwijderen.

Op basis van de simulatieresultaten kan worden geconcludeerd dat door een geïntegreerde beluchterregeling, waarbij het influentdebiet en de concentraties nitraat en ammonium in het actief slib 'on-line' worden gemeten, het zuiveringsproces verder kan worden verbeterd. Wanneer bovendien het slibgehalte wordt verhoogd en stikstof wordt verwijderd uit de interne stromen, lijkt bij de huidige belasting van de awzi een jaargemiddelde effluentkwaliteit van 10 mg N_{totaal}/l haalbaar.

Eén en ander zal op korte termijn worden geverifieerd door metingen in de praktijk.

Het project Kralingseveer toont aan, dat computersimulatie meer dan alleen 'spel' is. Het is een reëel hulpmiddel geworden om uitgebreid en kostbaar (praktijk)-onderzoek te sturen c.q. te beperken.

heden. Ook bij de opbouw van regel-algoritmen en bij Beslissings-Ondersteunende Systemen (BOS) voor de bedrijfsvoering kunnen simulatiemodellen worden toegepast [3].

Het ontwerp van zuiveringsinrichtingen kan (nog) niet worden gebaseerd op simulatieberekeningen. De resultaten kunnen voorts nog niet als absoluut worden beschouwd. Voor de beoordeling van maatregelen moet gekeken worden naar de tendens ten opzichte van een referentiesituatie.

In principe wordt eenmalig voor een bepaald simulatieprogramma gekozen. Als dit programma voldoende flexibel is, kan het worden toegepast in ieder willekeurig project.

Door DHV wordt het programma Simplex toegepast. Simplex is een algemeen programma waarmee verschillende soorten processen kunnen worden gesimuleerd. Het voordeel van Simplex ten opzichte van meer conventionele simulatiemodellen is, dat al geprogrammeerde deelprocessen op iedere willekeurige wijze aan elkaar kunnen worden gekoppeld. Simplex is daardoor uitermate geschikt voor processimulatie.

In Simplex is door DHV de modellenbank STREAM[®] ontwikkeld. STREAM[®] bevat onder andere modellen voor voorbezinkprocessen, actief-slibsystemen, nabezinkprocessen, verbindingen- en verdeelstukken en diverse regelalgoritmen. Deze modellen kunnen in Simplex worden aangepast en uitgebreid.

Bovendien kunnen nieuwe modellen worden toegevoegd. Voorbeelden hiervan zijn: dosering van chemicaliën en slib-indikking en -ontwatering.

Op bovenstaande wijze kan in principe iedere praktijksituatie worden gesimuleerd.

In 1992 heeft DHV Water BV een aantal projecten uitgevoerd met ondersteuning van STREAM[®]. Voor en met het Hoogheemraadschap van Schieland bijvoorbeeld is een studie uitgevoerd, waarbij simulatie is toegepast voor de beoordeling van het effect van verschillende maatregelen op de stikstofverwijdering op de awzi Kralingseveer. Dit betreft zowel optimalisatie van de beluchterregeling als aanvullende maatregelen, zoals vóórprecipitatie en de behandeling van interne stromen.

Op basis van de aanpak van het project Kralingseveer is in dit artikel een mogelijke werkwijze aangegeven voor de toepassing van simulatiemodellen.

Projectaanpak

In het project Kralingseveer zijn de in tabel I aangegeven projectfasen onderscheiden:

In het eerste blok wordt de praktijksituatie geïmplementeerd in het model. In het tweede blok vinden de simulatieberekeningen plaats, op basis waarvan voorstellen kunnen worden gedaan voor eventuele aanpassingen in de praktijk. In het laatste blok worden de voorstellen eventueel uitgevoerd en kan een check

TABEL I – Gevolgde projectaanpak.

Fase	Omschrijving
A	keuze van het simulatiemodel
B	modelleren van de bestaande situatie
C	kalibratie van de constanten en een check daarop
D	optimalisatie van de regelstrategie
E	beoordeling aanvullende maatregelen
F	implementatie in het model
G	beoordeling van de resultaten
H	implementatie in de bestaande situatie
I	check praktijk met model voorstellen voor de praktijk

plaatsvinden voor de werking van het model.

Keuze van het simulatiemodel

De keuze van het model wordt bepaald door de doelstelling van het project. Als het programma dit toelaat, kan voor een bepaald model worden gekozen. Naast het IAWPRC-model en het UCT-model is het afgelopen decennium een groot aantal andere modellen ontwikkeld. Zo zijn er bijvoorbeeld modellen die de samenstelling van het slib beschrijven voor onder andere draadvormende organismen. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen in de bezinkeigenschappen van het slib onder bepaalde procescondities. Bij het project Kralingseveer is het IAWPRC-model toegepast, onder andere omdat dit model de omzetting van CZV en stikstofcomponenten beschrijft. Het UCT-model is uitgebreider en beschrijft, naast de omzetting van stikstof, ook de opname van fosfor (opbouw van celmateriaal en 'luxury-uptake'). Een nadeel van het UCT-model is echter dat in totaal 90 procesconstanten moeten worden afgestemd op de praktijksituatie (kalibratie), terwijl dit in het IAWPRC-model 45 constanten betreft. De uiteindelijke keuze moet daarom beperkt worden tot het eenvoudigst mogelijke model. Te uitgebreide modellen maken de kalibratie onnodig ingewikkeld.

Modelleren van de bestaande situatie

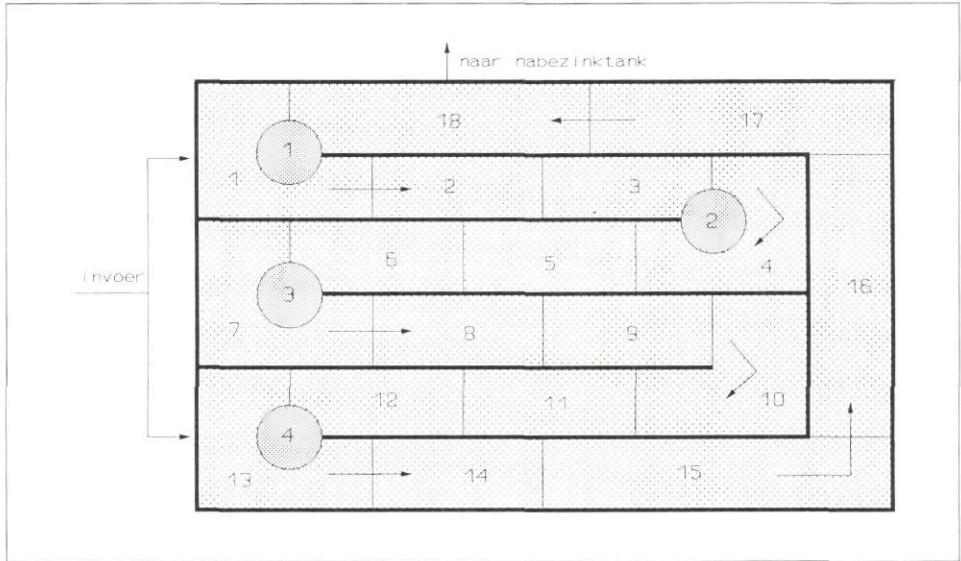
De awzi Kralingseveer zuivert een belangrijk deel van het afvalwater van Rotterdam. De installatie is ontworpen door DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV (nu DHV Water BV) en is op 2 september 1985 in bedrijf genomen. De ontwerpcapaciteit bedraagt 301.500 inwonerequivalenten à 54 g BZV. Het is een laag-belast actief-slibstelsysteem van het type Carrousel. De ontwerp-slibbelasting bedraagt 150 g BZV/(kg d.s. · dag) en 35 kg N_{ki}/(kg d.s. · dag). Dit is exclusief de interne stromen vanaf de slibverwerkingseenheden. Inclusief de interne

stromen bedraagt de specifieke stikstofbelasting ruim 38 g N_{ki}/(kg d.s. · dag). De CZV-belasting van het beluchtingscircuit bedraagt nu circa 70% van de ontwerpbelasting. De N_{ki}-belasting komt overeen met de ontwerpbelasting. De twee parallelle beluchtingsstraten bestaan elk uit twee voorbezinktanks, een contacttank, een Carrousel en drie nabezinktanks. In elke Carrousel wordt het actief slib belucht door vier asymmetrisch opgestelde puntbeluchters. Het voorbezinken afvalwater wordt met een deel van het retourslib (circa 25%) naar de contacttank gevoerd. Van hieruit wordt het afvalwater samen met de rest van het retourslib verdeeld over twee toevoerpunten bij de eerste en de vierde beluchter. In afbeelding 1 is één en ander schematisch weergegeven.

Omdat beide beluchtingsstraten identiek zijn, is slechts één straat gemodelleerd. Het omloopsysteem van de Carrousel is daarbij hydraulisch benaderd als achttien in serie geschakelde, compleet gemengde, actief-slibtanks (afb. 1). In afbeelding 2 is de opbouw van het model in STREAM® weergegeven.

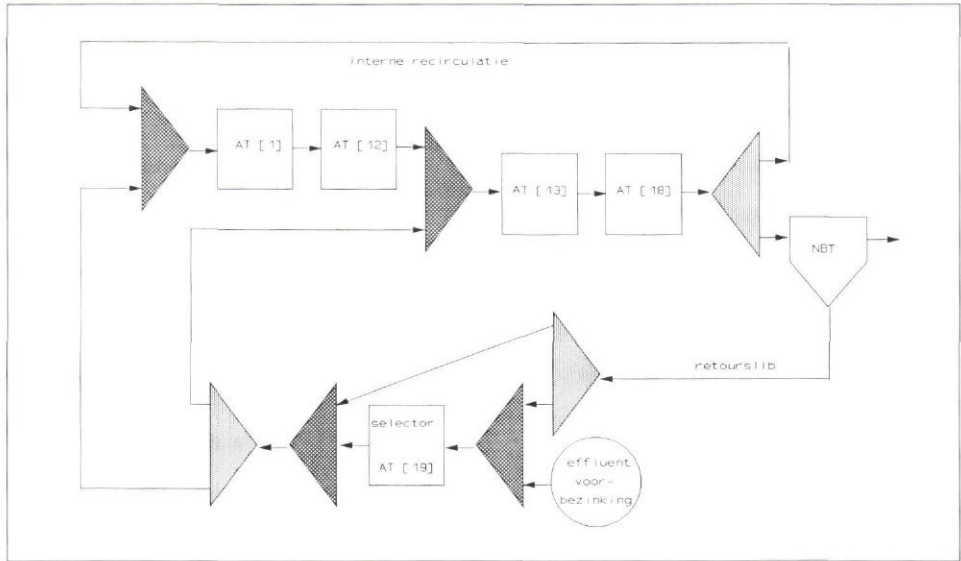
Kalibratie en check

In de kalibratiefase worden de procesconstanten in het model afgestemd op de praktijksituatie. Vooral de influentsamenstelling, de samenstelling van het actief slib, de procesconfiguratie en de procesvoering vertonen per lokatie veelal duidelijke verschillen. De oorspronkelijke constantenset is gebaseerd op de bedrijfsresultaten van een awzi in Zwitserland. Deze set is vrijwel volledig aangepast en voor de



Afb. 1 - Schematische weergave van de Carrousel.

Afb. 2 - Modelopbouw voor de awzi Kralingseveer in STREAM®.



Nederlandse situatie geschikt gemaakt. Daarbij is gebruik gemaakt van de bedrijfsresultaten van een groot aantal awzi's. Door onderzoek is namelijk vastgesteld dat uit de bedrijfsresultaten van één awzi geen algemene constantenset kan worden ontwikkeld, omdat daarmee onnavolgbare fouten kunnen worden geïntroduceerd door bijvoorbeeld limiterende procescondities. Per lokatie hoeven nu slechts enkele constanten te worden aangepast. Hiervan hebben er vier betrekking op de influentsamenstelling. Wijzigen van constanten vindt overigens in beperkte mate plaats en slechts binnen een in de literatuur opgegeven bereik. Op de awzi Kralingseveer zijn gedurende twee weken in de maand augustus 1992 bij een procestemperatuur van 22 °C alle relevante stromen bemonsterd en geanalyseerd. Op basis van deze gegevens is het model gekalibreerd. In tabel II is het resultaat van de kalibratie weergegeven.

TABEL II – Simulatieberekeningen ten behoeve van kalibratie bij 22 °C (voortschrijdend daggemiddelde).

N-componenten	Praktijkmeting [mg/l]	Resultaat simulatie [mg/l]
NH ₄ -N	1	2
NO ₃ -N	9	9
N _{totaal}	11	11

De gevolgde kalibratieprocedure is getoetst op basis van de bedrijfsgegevens van de maand januari 1992. De procestemperatuur in die periode bedroeg circa 12 °C. In tabel III is hiervan het resultaat weergegeven. Daarbij bleken geen verdere wijzigingen in de constantenset noodzakelijk.

TABEL III – Simulatieberekeningen ten behoeve van een check van de kalibratie bij 12 °C (voortschrijdend daggemiddelde).

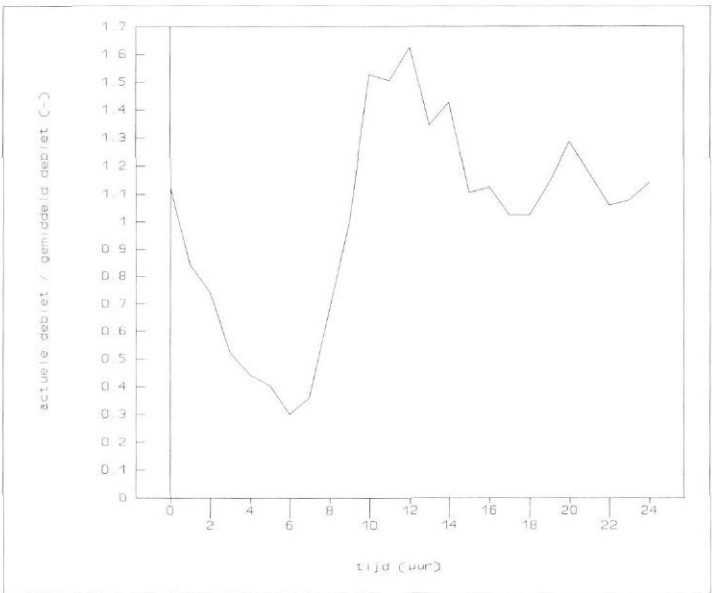
N-componenten	Praktijkmeting [mg/l]	Resultaat simulatie [mg/l]
NH ₄ -N	10	10
NO ₃ -N	10	11
N _{totaal}		22

Op basis van deze resultaten is geconcludeerd dat het model in het project Kralingseveer binnen de aangegeven grenzen kan worden toegepast.

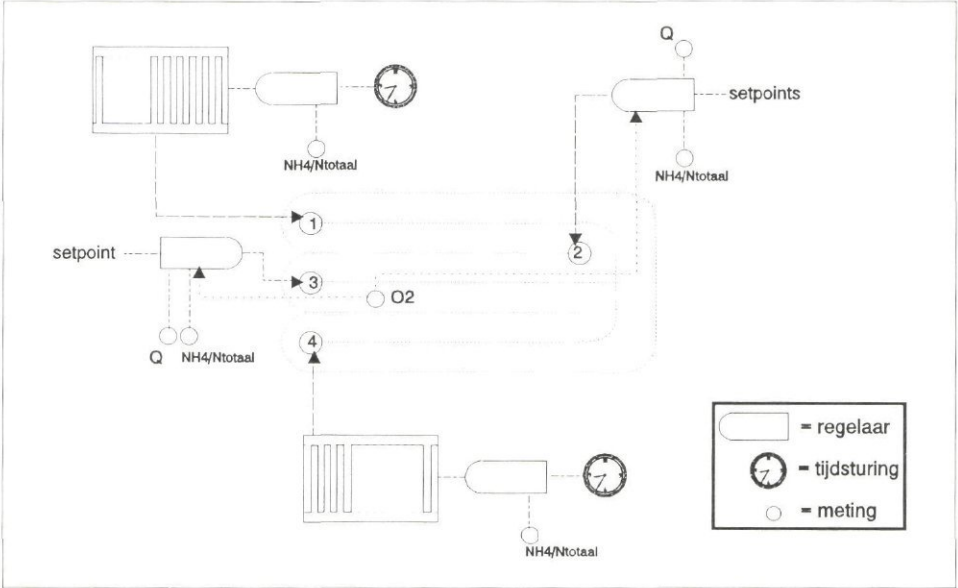
Optimalisatie van de regelstrategie:
In eerste instantie is getracht door een wijziging van de regelstrategie de stikstofverwijdering verdergaand te optimaliseren. Het Hoogheemraadschap van Schieland

had al besloten voor de awzi Kralingseveer analyse-apparatuur aan te schaffen voor het 'on-line' meten van ammonium, nitraat en fosfaat. De aanwezige PLC zou eventueel worden vervangen. De keuze van een nieuwe regelstrategie werd daardoor niet beperkt door de aanwezige 'hardware'. Het influent komt niet gelijkmatig over de dag aan. Er is een duidelijk aanvoerpatroon waarneembaar (afb. 3). Regelen op basis van 'on-line' stikstofmetingen is derhalve zinvol. In overleg met de afdeling Afvalwaterzuiveringstechnologie van het hoogheemraadschap en de bedrijfsleiding van de awzi Kralingseveer, is op basis van de uitkomsten van de simulatieberekeningen een groot aantal regelstrategieën geëvalueerd. Deze strategieën zijn beoordeeld ten opzichte van de bemonsteringsperiode

Afb. 3 – Het verloop van het debiet over de dag.



Afb. 4 – Geoptimaliseerde regelstrategie.



bij een procestemperatuur van 22 °C. Op basis van de resultaten is hieruit de meest optimale regelstrategie samengesteld. Deze is schematisch weergegeven in afbeelding 4. De weergegeven regelstrategie heeft primair tot doel het denitrificatieproces te bevorderen, zonder daarbij het nitrificatieproces nadelig te beïnvloeden. De geselecteerde regelstrategie heeft de volgende kenmerken:

- volgens het model is de motor van beluchter 2 continu op hoogtoeren ingeschakeld;
- beluchter 3 heeft een traploos gestuurde motor. Deze wordt geregeld op basis van het zuurstofgehalte stroomafwaarts. Het zuurstofsetpoint van deze regeling is door een voorwaartse regeling afhankelijk gemaakt van het influentdebiet;

- bij onvoldoende zuurstofinbreng (beluchter 3 staat hoogtoeren) worden achtereenvolgens beluchter 4 en 1 (ook toevoerpunten influent) ingeschakeld. De bedrijfsvoering van beide beluchters is intermitterend, waarbij het tijdsinterval wordt aangepast op basis van het ammoniumgehalte in de beluchtingsruimte;
- de NH_4 -setpoints van de regelingen voor de beluchters 1 en 4 worden bepaald door de NO_3/NH_4 -verhouding.

Zolang door de beluchters 2 en 3 voldoende zuurstof kan worden ingebracht, blijven de beluchters 1 en 4 afgeschakeld. Op deze wijze komt de toegevoerde CZV optimaal ter beschikking aan het denitrificatieproces. Door de voorwaartse regeling op basis van het debiet, kan de zuurstofinbrengcapaciteit vooraf worden afgestemd op de verwachte zuurstofbehoefte. Omdat de stikstofverwijderingscapaciteit voor een groot deel afhankelijk is van de procestemperatuur, is een regeling op een vast nitraat- en/of ammoniumgehalte niet mogelijk. Een regeling op basis van de NO_3/NH_4 - verhouding is daarentegen onafhankelijk van de seizoenen. Deze verhouding kan in principe (rekening houdend met een maximale ammoniumconcentratie) het gehele jaar constant worden gehouden.

Beoordeling aanvullende maatregelen:

- Omdat door alleen optimalisatie van de regelstrategie naar verwachting niet kan worden voldaan aan de gewenste effluentkwaliteit, zijn vervolgens voor een verdergaande stikstofverwijdering vijf aanvullende maatregelen geëvalueerd:
- optimalisatie van de influenttoevoer:
- De influenttoevoer kan tot een maximum van 33% naar de vierde beluchter worden

gevoerd. Hierdoor kan wellicht het denitrificatieproces in het 'lange been' worden bevorderd;

- voordennitrificatie:
- Daarbij is uitgegaan van een separate voordennitrificatieruimte;
- vóórprecipitatie:
- Begin 1993 worden de mogelijkheden van vóórprecipitatie voor een verdergaande fosforverwijdering op praktijkschaal onderzocht. Op basis van ervaringen op de rioolwaterzuiveringsinrichtingen Nieuwegein en Walcheren blijkt op deze wijze ook stikstof verdergaand te kunnen worden verwijderd. Het effect van vóórprecipitatie op de verwijdering in de voorbezinktanks is afgeleid op basis van vlokproeven;
- verhoging van het slibgehalte:
- Op basis van de ervaringen op de rwzi's Nieuwegein en Walcheren wordt verwacht dat de slibbezinkeigenschappen door vóórprecipitatie zullen verbeteren. Momenteel is het slibgehalte 3,2-3,6 g d.s./l. Bij de simulatieberekeningen is uitgegaan van een verhoging tot 5 g d.s./l, zonder dat de nabezinkcapaciteit moet worden uitgebreid;
- behandeling van interne stromen:
- Interne stromen afkomstig van bijvoorbeeld de slibdijkers en de zeefbandpersen bevatten over het algemeen hoge concentraties ammoniumstikstof (500-1.000 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$). Op de awzi Kralingseveer is circa 9,5% van de totale stikstofvracht hiervan afkomstig en slechts 1,3% van het totale influentdebiet;
- een combinatie van de meest interessante maatregelen.

De resultaten van de simulatieberekeningen zijn vergeleken met de bedrijfsresultaten van de maand januari 1992, uitgaande van een optimale regelstrategie (zie tabel IV). Bij een procestemperatuur

TABEL IV – Simulatieberekeningen bij een optimale regeling bij 12 °C en 22 °C (voortschrijdend daggemiddelde).

Gemiddelde concentratie [mg/l]	N _{totaal}	NH ₄ -N	NO ₃ -N
augustus 1992 (22 °C)			
huidige regeling	11	2	9
optimale regeling	7	2	5
januari 1992 (12 °C)			
huidige regeling	22	10	11
optimale regeling	18	10	7

van 12 °C is de stikstofverwijderingscapaciteit geringer zodat het effect van de maatregelen beter kan worden beoordeeld.

Resultaten en evaluatie

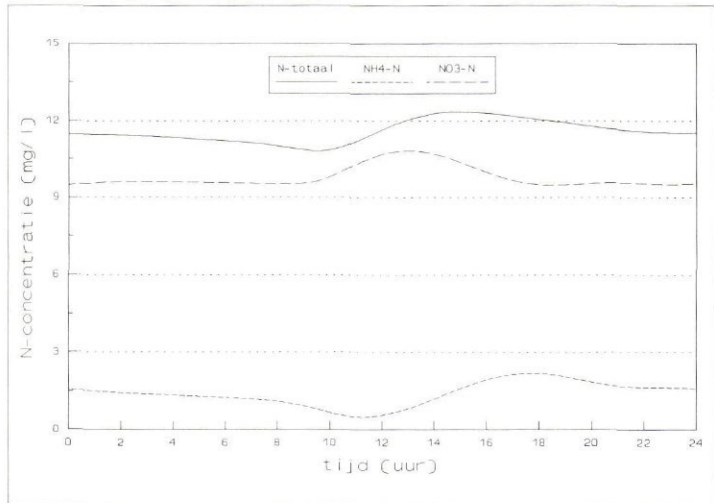
In tabel IV is de berekende effluentkwaliteit weergegeven bij de huidige en de geoptimaliseerde regelstrategie. Op basis van de resultaten wordt verwacht dat door optimalisatie een significante verbetering van de stikstofverwijdering kan worden bewerkstelligd.

In de afbeeldingen 5 t/m 8 is het dynamisch verloop van de stikstofgehalten in het effluent over de dag weergegeven. Uit deze afbeeldingen blijkt duidelijk het effect van de voorwaartse regeling op basis van het influentdebiet. Door optimaal gebruik van de CZV-toevoer, kan naar verwachting een lager nitraatgehalte gedurende de daguren worden bereikt.

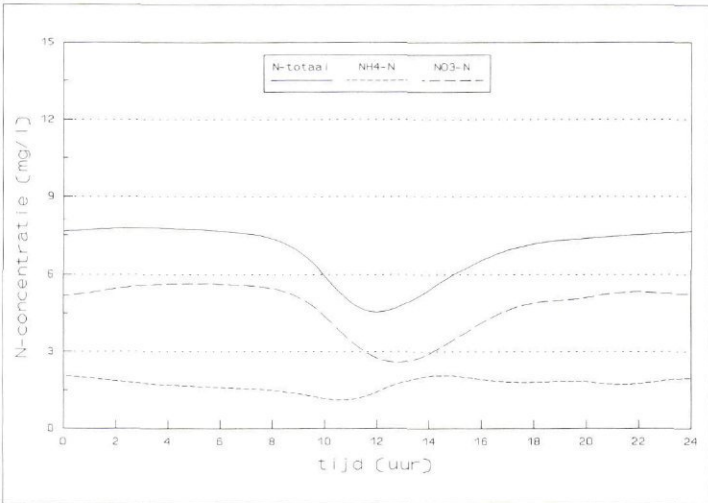
De resultaten van de simulatieberekeningen met de verschillende aanvullende maatregelen, inclusief de geoptimaliseerde regelstrategie en de meest interessante combinaties staan weergegeven in tabel V.

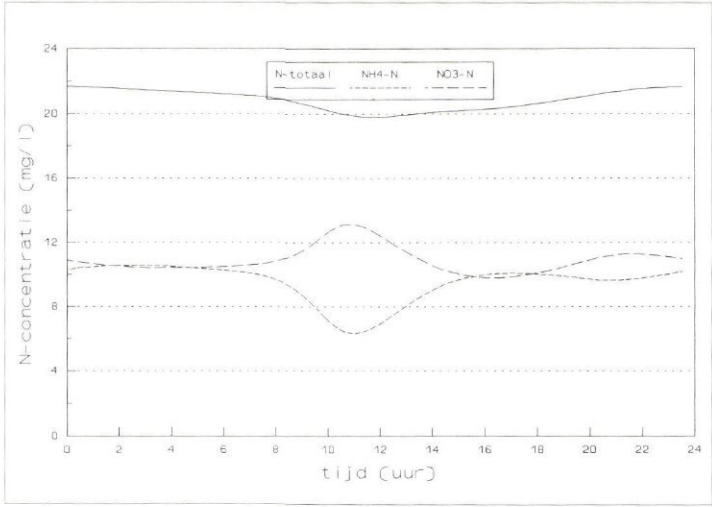
Met de geselecteerde regelstrategie is het denitrificatieproces al vèrgaand geoptimaliseerd. Toepassing van een voordennitrifi-

Afb. 5 - Huidige regelstrategie bij een procestemperatuur van 22 °C.

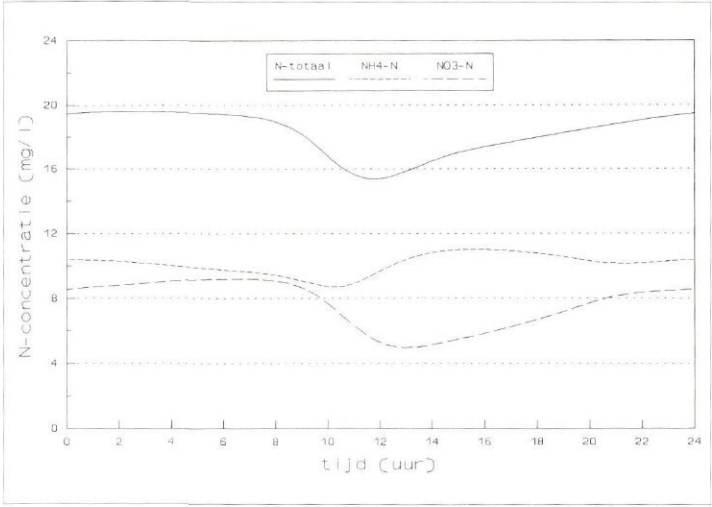


Afb. 6 - Geselecteerde optimale regelstrategie bij een procestemperatuur van 22 °C.





Afb. 7 - Huidige regelstrategie bij een procestemperatuur van 12 °C.



Afb. 8 - Geselecteerde optimale regelstrategie bij een procestemperatuur van 12 °C.

catieruimte heeft daardoor weinig effect. Ook het effect van de optimalisatie van de influenttoevoer is daardoor gering. Uit vlokproeven is gebleken dat door vóórprecipitatie – in vergelijking met de rwzi’s Nieuwegein en Walcheren – relatief veel CZV in de voorbezinktanks zal worden verwijderd. Het denitrificatie-proces kan daardoor worden geremd. Op basis van deze resultaten is aanbevolen toepassing van vóórprecipitatie te beperken tot de verwijdering van P. In het kader van een verdergaande N-verwijdering mag alleen een positief effect worden verwacht doordat door verbetering van de slibbezink eigenschappen een hoger slibgehalte kan worden toegepast. Verhoging van het slibgehalte (eventueel door vóórprecipitatie), behandeling van het retourwater of een combinatie van

beide heeft een relatief groot effect op de stikstofverwijdering.

Conclusies

Op basis van de resultaten van de simulatieberekeningen voor de awzi Kralingseveer kan worden geconcludeerd dat:

- de regelstrategie verder kan worden geoptimaliseerd voor een verdergaande stikstofverwijdering, door in de regeling analyse-apparatuur op te nemen voor het ‘on-line’ meten van nitraat en ammonium;
- toepassen van een voordennitrificatieruimte, optimalisatie van de influenttoevoer en volledige vóórprecipitatie in het kader van een verdergaande stikstofverwijdering niet zinvol lijken;
- verhoging van het slibgehalte (eventueel door vóórprecipitatie), behandeling van het retourwater of een combinatie van beide naar verwachting een gunstig effect hebben op de stikstofverwijdering.

Voortgang

Projecten zoals Kralingseveer tonen aan dat computersimulatie een reëel hulpmiddel is om uitgebreid en/of kostbaar (praktijk)onderzoek te sturen c.q. te beperken. Toepassing van modellen voor de beoordeling van verschillende maatregelen is als bijzonder zinvol en verhelderend ervaren.

Op de awzi Kralingseveer is in januari 1993 gestart met een onderzoek op praktijkschaal naar de toepassing van vóórprecipitatie voor een verdergaande fosforverwijdering. Parallel hieraan wordt in een proefinstallatie (schaal 1:60.000) onderzoek verricht naar de mogelijkheden om de slibbezink eigenschappen te verbeteren. Daarbij wordt uitgegaan van de geselecteerde (optimale) beluchterregeling.

Op basis van de resultaten van het praktijkonderzoek en het onderzoek met de proefinstallatie wordt het model getoetst, zodat inzicht in de mogelijkheden van computersimulatie verder zal toenemen.

Literatuur

1. Wentzel, M. C. et al. (1991). ‘Processes and modelling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems – a review’. Department of Civil Engineering, University of Cape Town, Rondebosch, 7700, South Africa.
2. IAWPRC (1986). ‘Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment’. Activated Sludge Model No. 1’, july 1986.
3. Lobbrecht, A. H. et al. (1993). ‘De rol van procesautomatisering bij afvalwaterzuivering’ H₂O (in voorbereiding).

• • •

Waterleidingbedrijf Schiedam eigendom van WZHZ

De NV Openbaar Nutsbedrijf Schiedam (ONS) heeft per 1 juli 1993 haar waterleidingbedrijf overgedragen aan Waterleidingbedrijf Zuid-Holland-Zuid (WZHZ). Het gehele waterleidingnet en het pompstation in de gemeente Schiedam zijn eigendom geworden van WZHZ. Tegelijk met de overdracht heeft WZHZ met ONS een dienstverleningscontract afgesloten. ONS blijft in de gemeente Schiedam voor WZHZ de distributie-activiteiten verzorgen en andere waterleidingtaken uitvoeren zoals het bijhouden en verzorgen van de verbruikersadministratie.

TABEL V – Resultaten van de verschillende maatregelen.

Januari 1992 (12 °C)		N _{totaal} (mg/l)
Uitgangssituatie		
optimale regeling		18
Aanvullende maatregelen		
optimalisatie	100% beluchter 1	18
influenttoevoer	100% beluchter 4	17
voordennitrificatie (10% van het totale volume)		17
vóórprecipitatie	volledig	19
	1 voorbezinktank (1/4)	18
verhoging slibgehalte (5 g/l)		13
behandeling retourwater		15
Combinaties		
vóórprecipitatie + verhoging slibgehalte	volledig	16
	1 voorbezinktank (1/4)	14
vóórprecipitatie + verhoging slibgeh. + beh. retourwater	volledig	13
	1 voorbezinktank (1/4)	11
verhoging slibgeh. + behandeling retourwater		10