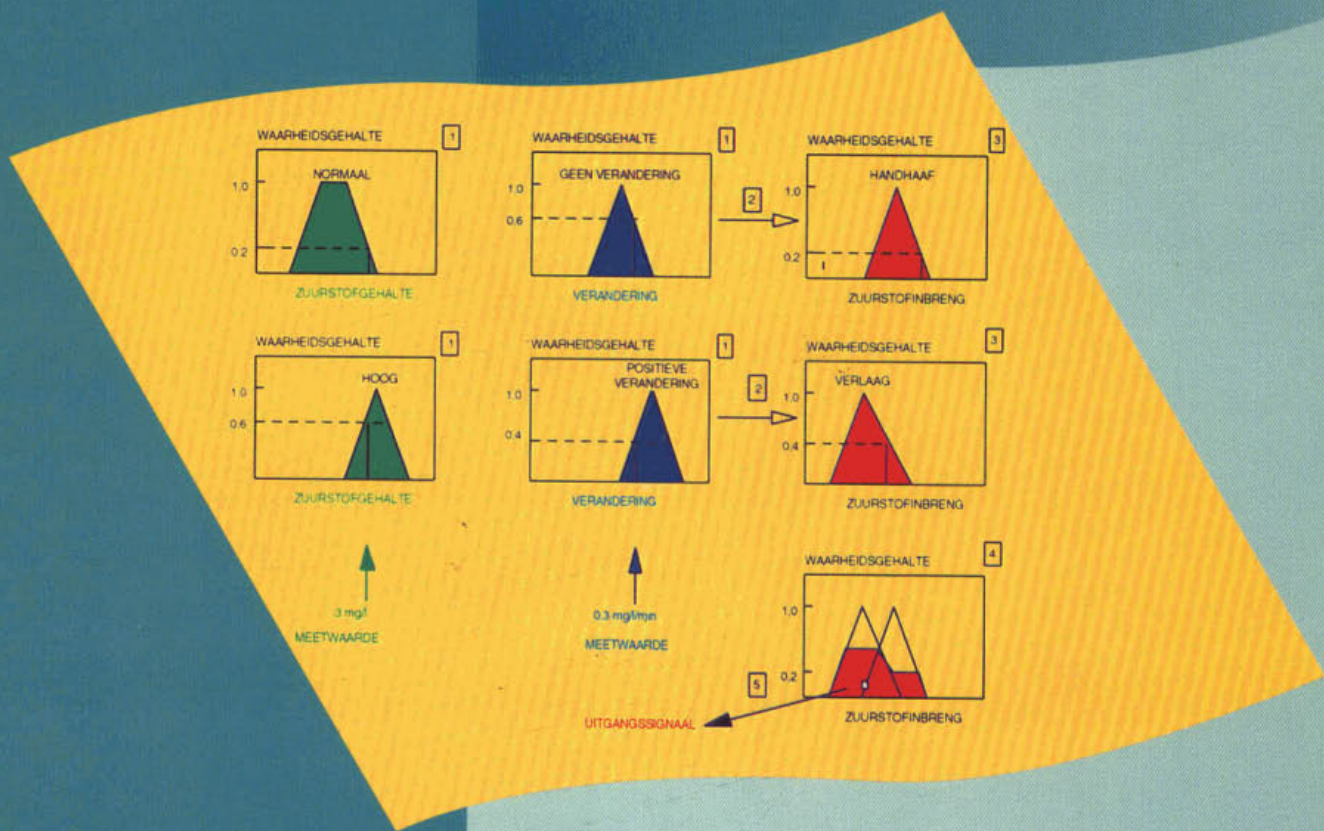


De toepasbaarheid van fuzzy control bij het zuiveren van stedelijk afvalwater



**De toepasbaarheid van fuzzy control
bij het
zuiveren van stedelijk afvalwater**

97 32

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66

Publicaties en het publicatie-
overzicht van de STOWA kunt u
uitsluitend bestellen bij:

Hageman Verpakkers BV

Postbus 281

2700 AC Zoetermeer

tel. 079 - 361 11 88

fax 079 - 361 39 27

o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

ISBN 90.5773.012.84

INHOUDSOPGAVE

	blz
TEN GELEIDE	1
SAMENVATTING	2
1 INLEIDING	4
1.1 Doelstelling	4
1.2 Aanpak	4
1.3 Leeswijzer	5
2 FUZZY CONTROL EN ANDERE REGELTECHNIEKEN	6
2.1 Wat is fuzzy control?	6
2.2 Overzicht van regeltechnieken	8
2.3 Eigenschappen van PID-regelingen	11
2.4 Typen van fuzzy regelingen	14
2.5 Vergelijking van regeltechnieken	16
3 INVENTARISATIE VAN REGELINGEN IN DE PRAKTIJK	19
3.1 Werkwijze bij de inventarisatie	19
3.2 Besturing van de aanvoer	20
3.3 Besturing van de recirculatie voor de denitrificatie	21
3.4 Besturing van de beluchting	21
3.4.1 Regelingen	21
3.4.2 Knelpunten	25
3.5 Besturing van de chemicaliëndosering	27
3.5.1 Knelpunten	28
3.6 Besturing van het retourslibdebiet	28
3.7 Besturing van het spuislibdebiet	28
4 RESULTATEN VAN HET LITERATUURONDERZOEK	29
4.1 Inleiding	29
4.2 Regeling van de beluchting en de interne recirculatie	30
4.3 Dosering van chemicaliën	31
4.4 Modelling en regeling van slibstromen	32
4.5 Regeling van meer deelprocessen	32
4.6 Vroegtijdige detectie van problemen en beslissingsondersteunende systemen	33
4.7 Samenvatting en conclusies van het literatuuronderzoek	34
5 AANDACHTSPUNTEN VOOR VERBETERING VAN REGELINGEN	39
6 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN VAN DE SIMULATIESTUDIE	42
6.1 Opzet	42
6.2 Geteste regelaars	43
6.3 Resultaten van de directe fuzzy basiszuurstofregeling	45
6.4 Resultaten van de ratio-regeling	48
6.5 Ontwerpaspecten en instelbaarheid	54
6.6 Mogelijke verbeteringen	55
6.7 Conclusies en aanbevelingen	55

7	TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN FUZZY CONTROL	57
7.1	Inleiding	57
7.2	Optimalisatie van de beluchtingsregeling	57
7.2.1	Optimalisatie van de basiszuurstofregeling	57
7.2.2	Het toepassen van multivariabele fuzzy regelingen	58
7.3	Optimalisatie van slibregelingen	60
7.4	Slibindexbeheersing	60
7.5	Koppeling van regelkringen	60
7.6	Foutdetectie, monitoring en diagnose	61
7.6.1	Foutdetectie	61
7.6.2	Verbetering van de "mens-machine-interface"	62
7.6.3	Diagnose	62
7.7	Reconstructie en voorspelling van niet-gemeten variabelen	62
7.7.1	Vervanging van extra sensoren	62
7.7.2	Technieken voor reconstructie en voorspelling	63
8	EVALUATIE EN CONCLUSIES	66
8.1	Behoeften vanuit de praktijk	66
8.2	Eigenschappen van fuzzy control	67
8.3	Nader uit te werken toepassingsmogelijkheden	68

LITERATUUR

BEGRIPPENLIJST

TEN GELEIDE

De ontwikkelingen op het gebied van regeltechniek hebben geleid tot een aantal geavanceerde methoden om regelingen te ontwerpen. Fuzzy control is een dergelijke methode die, in tegenstelling tot wat de naam doet vermoeden, tot zeer nauwkeurige regelingen kan leiden.

Fuzzy control regelt processen op basis van regels zonder scherpe grenzen, zoals die vaak in het menselijk denken en handelen voorkomen. Deze aanpak is bij uitstek geschikt voor processen die niet met exacte formules te beschrijven zijn, die onvoorspelbare tijdvertragingen vertonen en sterke koppelingen tussen deelprocessen hebben.

Waterzuiveringsprocessen hebben deze kenmerken: vloeiende overgangen, onvoorspelbare situaties bij piekaanvoer en slibkwaliteit en conflicterende processen bij de nutriëntenverwijdering. Bij conventionele regelaars kan dit problemen opleveren, fuzzy control kan daar bij uitstek goed mee omgaan.

De thans voorliggende inventariserende studie gaat de toepassingsmogelijkheden na van fuzzy control voor de besturing van actiefslibsystemen. Verbeteringen van fuzzy control boven de bestaande 'klassieke' regelingen worden vooral verwacht voor adequate reacties op veranderingen in de aanvoer, bij de beluchtingsregeling en de regeling van slibstromen.

Het onderzoek werd door het bestuur van de STOWA opgedragen aan HASKONING Koninklijk Ingenieurs- en Architectenbureau te Nijmegen (projectteam bestaande uit mw. drs. T.J.J. Kalker, ir. M.F. Ruland, ir. P.J. Roeleveld en dr.ir. W.M. Wiegant). In het project had de vakgroep Regeltechniek, faculteit der Electrotechniek van de TU Delft (team bestaande uit dr. R. Babuska M Sc en C. van Goor) belangrijk aandeel. Het project werd namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. P.J.M. Knaapen (voorzitter), ing. J. van Dijk, ir. Chr. Hellinga, ing. H.W. Jansen, ir. A.J. Krielen en ir. P.C. Stamperius.

Utrecht, december 1997

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

SAMENVATTING

De ontwikkelingen op het gebied van de regeltechniek hebben geleid tot een aantal geavanceerde methoden om regelingen te ontwerpen. Fuzzy control is een relatief nieuwe techniek, die gebruik maakt van linguïstische kennisregels in combinatie met verzamelingen, waarvan de grenzen niet scherp gedefinieerd zijn. In dit rapport worden de mogelijke toepassingsmogelijkheden van fuzzy control voor de besturing van het actiefslibstelsysteem beschreven. Deze zijn geïdentificeerd door middel van een inventarisatie van bestaande regelingen in de praktijk, een literatuuronderzoek en een simulatiestudie waarin een fuzzy regeling ontworpen en getest is. Daarnaast is een overzicht van regeltechnieken gepresenteerd en zijn de geïdentificeerde toepassingsmogelijkheden zo geselecteerd dat goed gebruik kan worden gemaakt van de specifieke eigenschappen van fuzzy control.

Een fuzzy regeling maakt gebruik van linguïstische kennisregels, zoals bijvoorbeeld

ALS het ammoniumgehalte *hoog* is EN het debiet stijgt *behoorlijk*,
DAN *verhoog* het zuurstofsetpoint *in hoge mate*.

Door middel van vage verzamelingen worden de begrippen "hoog", "behoorlijk" en "in hoge mate" gekwantificeerd. Hierbij worden vloeiende overgangen gehanteerd. Zo kan bijvoorbeeld een bepaalde waarde voor de ammoniumconcentratie ten dele als "hoog" en ten dele als "matig hoog" beschouwd worden. In de vage verzamelingen wordt vastgelegd in welke mate de verschillende ammoniumconcentraties tot de betreffende verzamelingen "matig hoog" en "hoog" behoren.

De specifieke eigenschappen die fuzzy control aantrekkelijk maken zijn:

- De mogelijkheid ervaringskennis op te nemen in regelingen. Deze kennis kan afkomstig zijn van bedrijfsvoerders of technologen en kan eveneens betrokken worden uit bestaande meetgegevens.
- De mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag.
- De inzichtelijkheid voor niet-regeltechnici.
- De mogelijkheid aan te sluiten bij bestaande regelingen. Fuzzy control dient te worden beschouwd als aanvulling op andere regeltechnieken.

Een nadeel van fuzzy control is dat de optimale regeltechnische instellingen niet theoretisch te berekenen zijn. Bij lineaire regeltechnieken is dat wel zo; daar dient echter wel een lineair model voor beschikbaar te zijn. In de praktijk wordt hier weinig gebruik van gemaakt.

Uit de interviews blijkt dat waterbeheerders over het algemeen aannemen dat de menselijke factor van invloed is op het zuiveringsproces en dat door verbeterde regelingen het zuiveringsproces is te optimaliseren. De verscherping van de effluenteisen en de noodzaak om kostenefficiënt te werken zullen om verbeterde regelingen vragen. Daarbij wordt een groot belang gehecht aan de inzichtelijkheid en de instelbaarheid van regelingen. Regelingen mogen daarom niet onnodig complex zijn. Verbeteringen worden vooral verwacht van een adequate reactie op veranderingen in de aanvoer en op veranderende procesomstandigheden. De meeste aandacht gaat momenteel uit naar de verbetering van beluchtingsregelingen, waarbij de slibindexbeheersing als knelpunt wordt ervaren. De literatuur over toepassingen van fuzzy control in afvalwaterzuivering geeft een aantal voorbeelden van beluchtingsregelingen.

Daarnaast is het ook mogelijk gebleken door toepassing van fuzzy control slibregelingen te verbeteren en verschillende regelkringen te koppelen.

Uit de uitgevoerde studie blijkt dat op de volgende punten verbeteringen door middel van fuzzy control denkbaar zijn:

1. Optimalisatie van bestaande zuurstofregelingen door middel van een directe fuzzy regelaar of een supervisierегeling die de PID-constanten afstemt op de procescondities. Hiermee is vooral energie te besparen. Er zijn behalve fuzzy control ook andere methoden denkbaar om dit te realiseren; deze zijn echter niet onderzocht.
2. Ontwerpen van een multivariabele beluchtingsregeling ten behoeve van de stikstofverwijdering.
Een multivariabele regeling voor de beluchting is in principe te realiseren door middel van verschillende regeltechnieken waarbij fuzzy control een aantrekkelijk alternatief is vanwege de mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag zonder schakelende overgangen. Voor een feed forward signaal in de beluchtingsregeling worden van fuzzy control specifieke voordelen verwacht omdat de kennis over de verwachte aanvoer "vaag" omschreven kan worden. In de literatuur is een aantal succesvolle toepassingen van multivariabele fuzzy beluchtingsregelingen gerapporteerd. Ook uit de uitgevoerde simulatiestudie blijkt dat door middel van een beperkt aantal kennisregels verbeteringen zijn te realiseren van de effluentkwaliteit en het energieverbruik.
3. Ontwerp van alternatieve regelstrategieën voor slibregelingen.
Door verbeterde regelstrategieën zouden zowel verhoogde concentraties zwevende stof als totaal stikstof bij regenweer voorkomen kunnen worden. De kennisregels zouden door middel van fuzzy ontwerpmethoden vastgesteld kunnen worden; de daaruit voortvloeiende regelstrategieën hoeven niet noodzakelijkerwijs door middel van fuzzy control gerealiseerd te worden.
4. Signalering en voorspelling van afwijkende slibbezinking.
Fuzzy logic kan naar verwachting een belangrijke bijdrage leveren aan de ontwikkeling van vroegtijdige waarschuwingssystemen voor veranderende slibbezinkingseigenschappen. Hierbij speelt namelijk ervaringskennis een belangrijke rol en zijn "scherpe" grenzen moeilijk definieerbaar.

Andere toepassingsmogelijkheden, die minder specifiek zijn voor fuzzy control of minder directe prioriteit hebben zijn: de koppeling van regelkringen, foutdetectie, automatische diagnose van afwijkende omstandigheden en reconstructie en voorspelling van niet-gemeten variabelen.

Bij het ontwerpen van nieuwe regelingen kan de inzichtelijkheid naar verwachting gewaarborgd blijven door doelstellingen en randvoorwaarden duidelijk als invoervariabele in de regeling op te nemen. Daarnaast is het van belang dat de regeling goed gevolgd kan worden door bedrijfsvoerders en technologen zodat het duidelijk is waarom een bepaalde actie ondernomen wordt. Dit geldt voor alle regelstrategieën en regeltechnieken. Fuzzy control biedt hier mogelijkheden voor doordat regelingen in de taal van procesexperts worden geschreven.

1 INLEIDING

1.1 Doelstelling

De ontwikkelingen op het gebied van regeltechniek hebben geleid tot een aantal geavanceerde methoden om regelingen te ontwerpen. Fuzzy control is een relatief nieuwe techniek, die gebruik maakt van zogenaamde "fuzzy sets". Dit zijn verzamelingen, waarvan de grenzen niet scherp gedefinieerd zijn. Fuzzy control kan, in tegenstelling tot wat de naam doet vermoeden, tot zeer nauwkeurige regelingen leiden. Met name in Aziatische landen wordt deze technische methode op grote schaal toegepast voor tal van processen. Ook in de Verenigde Staten en West-Europa geniet fuzzy control tegenwoordig een grote belangstelling. Door het gebruik van fuzzy technieken is het mogelijk verschillende vormen van kennis met elkaar te combineren om zo het hiaat tussen praktijk en model op te vullen en tot betere regelontwerpen te komen. Daardoor wordt een aantal knelpunten van conventionele regeltechnieken opgelost. Hierbij kan gedacht worden aan het combineren van kennis van procesexperts en bedrijfsvoerders met meetgegevens, in aanvulling op de reeds bekende mathematische verbanden.

Door de verscherpte effluenteisen en de toegenomen mogelijkheden van de huidige automatiseringstechnologie geniet de automatische besturing van waterzuiveringsprocessen een groeiende belangstelling. Voor deze processen lijkt fuzzy control een aantrekkelijke optie, omdat hier sprake is van complexe, niet-lineaire processen. Gezien een aantal nadelen van conventionele regelstructuren zou toepassing van fuzzy control een verbetering kunnen betekenen van bestaande regelingen. In bepaalde gevallen zou fuzzy control zelfs de enige mogelijkheid kunnen zijn om processen behoorlijk te automatiseren.

De doelstelling van het onderhavige onderzoek is na te gaan wat de potentiële rol is van fuzzy control voor de besturing van het actiefslibstelsysteem door middel van een inventarisatie van bestaande regelingen, een literatuuronderzoek en een verkennende simulatiestudie.

1.2 Aanpak

Om toepassingsmogelijkheden van fuzzy control te identificeren is de bestaande situatie wat betreft de besturing van het actiefslibstelsysteem in kaart gebracht. Daartoe zijn de praktijkervaringen van negen waterkwaliteitsbeheerders geïnventariseerd door middel van interviews, die met name gericht waren op de technologische en regeltechnische aspecten van procesautomatisering. Informatietechnologische aspecten zoals bijvoorbeeld beeldschermbesturing en afstandsbediening zijn buiten beschouwing gelaten, evenals onderhoudsmatige aspecten. De interviews waren erop gericht de behoefte aan verbeteringen op het gebied van regelingen in de praktijk vast te stellen met specifieke aandacht voor verbeteringen die door toepassing van fuzzy control te realiseren zouden zijn.

Tevens is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar toepassingen van fuzzy control als besturingsmethode van het actiefslibstelsysteem. Op grond van de resultaten van de interviews en de uitkomsten van het literatuuronderzoek is een aantal toepassingsmogelijkheden nader uitgewerkt, en is een advies geformuleerd voor een geschikte toepassingsmogelijkheid voor een demonstratieproject. Er is een simulatiestudie uitgevoerd, waarin de beluchting door middel van fuzzy control

geregeld wordt. Het belangrijkste doel hiervan was op een gedetailleerd niveau ervaring op te doen met de mogelijkheden van fuzzy control.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt uitleg gegeven over het begrip fuzzy control en wordt deze regeltechniek binnen een kader van conventionele en meer geavanceerde regeltechnieken geplaatst. Tevens wordt aandacht besteed aan de werkwijze waarop een fuzzy regelaar ontworpen wordt. Hoofdstuk 3 beschrijft de inventarisatie van procesregelingen in de praktijk en de ondervonden knelpunten. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van het literatuuronderzoek. Hoofdstuk 5 geeft de aandachtspunten bij de verdere ontwikkeling van regelingen. In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de verkennende simulatiestudie samengevat. Op grond van de voorgaande hoofdstukken wordt in hoofdstuk 7 een aantal perspectiefvolle toepassingen van fuzzy control geïdentificeerd. In hoofdstuk 8 worden de conclusies weergegeven en worden aan de geïdentificeerde toepassingsmogelijkheden prioriteiten toegekend. Achterin is een begrippenlijst van regeltechnische vaktermen opgenomen. In een aantal gevallen zijn nog geen Nederlandse equivalenten beschikbaar van de Engelse terminologie.

2 FUZZY CONTROL EN ANDERE REGELTECHNIEKEN

2.1 Wat is fuzzy control?

Fuzzy control is het regelen op basis van vage verzamelingen (fuzzy sets) en linguïstische kennisregels (linguistic rules). Linguïstische kennisregels worden in spreektaal opgesteld. Dat wil zeggen dat vage begrippen zoals "veel" en "enigszins" kunnen worden gehanteerd. In feite is dat de manier waarop bedrijfsvoerders over bediening en besturing spreken. In de praktijk echter leveren metingen precieze waarden aan, die moeten leiden tot een exacte bepaling van "hoe aan de knoppen te draaien". Ook een fuzzy regelaar gaat uit van precieze metingen en geeft precies aan hoe bestuurd moet worden. De term "fuzzy" heeft betrekking op de manier waarop de kennis in de regelaar wordt ingevoerd of waarop de regelstrategie wordt ontwikkeld. Hieronder wordt deze manier uitgelegd door de ontwikkeling en de werking van een fuzzy regelaar te beschrijven.

Tijdens het ontwikkelen van een fuzzy regelaar worden, voorafgaand aan het opstellen van linguïstische kennisregels, vage verzamelingen gedefinieerd. Daarbij wordt vastgesteld welke meet- en stuurwaarden bij "veel" en "enigszins" horen. Bij "gewone" verzamelingen maken meetwaarden zeker wel of niet deel uit van de verzameling. Bij "vage" verzamelingen kunnen bepaalde waarden voor een gedeelte aan de verzameling toebehoren. Bij "gewone" beweringen is iets "waar" of "onwaar": 1 of 0. Bij vage beweringen kan iets ook "een beetje waar", of "bijna waar" of "helemaal waar" zijn: het "waarheidsgehalte" is dan bijvoorbeeld 0,2 of 0,8 of 1. Om dit duidelijk te maken wordt hieronder een voorbeeld gegeven van een fuzzy regelaar voor de zuurstofinbreng. Hierbij wordt geregeld op basis van het zuurstofgehalte en de verandering daarin. Het voorbeeld dient als illustratie van het regelprincipe en is daarom met opzet eenvoudig gehouden. In tabel 1 zijn de linguïstische kennisregels van de regelaar weergegeven. Deze hebben toepassing op één invoervariabele: de zuurstofconcentratie. In een meer complexe regelaar kunnen uiteraard kennisregels over andere variabelen, zoals de ammoniumconcentratie of het debiet, worden ingevoerd. Ook kan het aantal vage verzamelingen worden uitgebreid met bijvoorbeeld "zuurstofgehalte zeer laag" of "zuurstofgehalte enigszins laag".

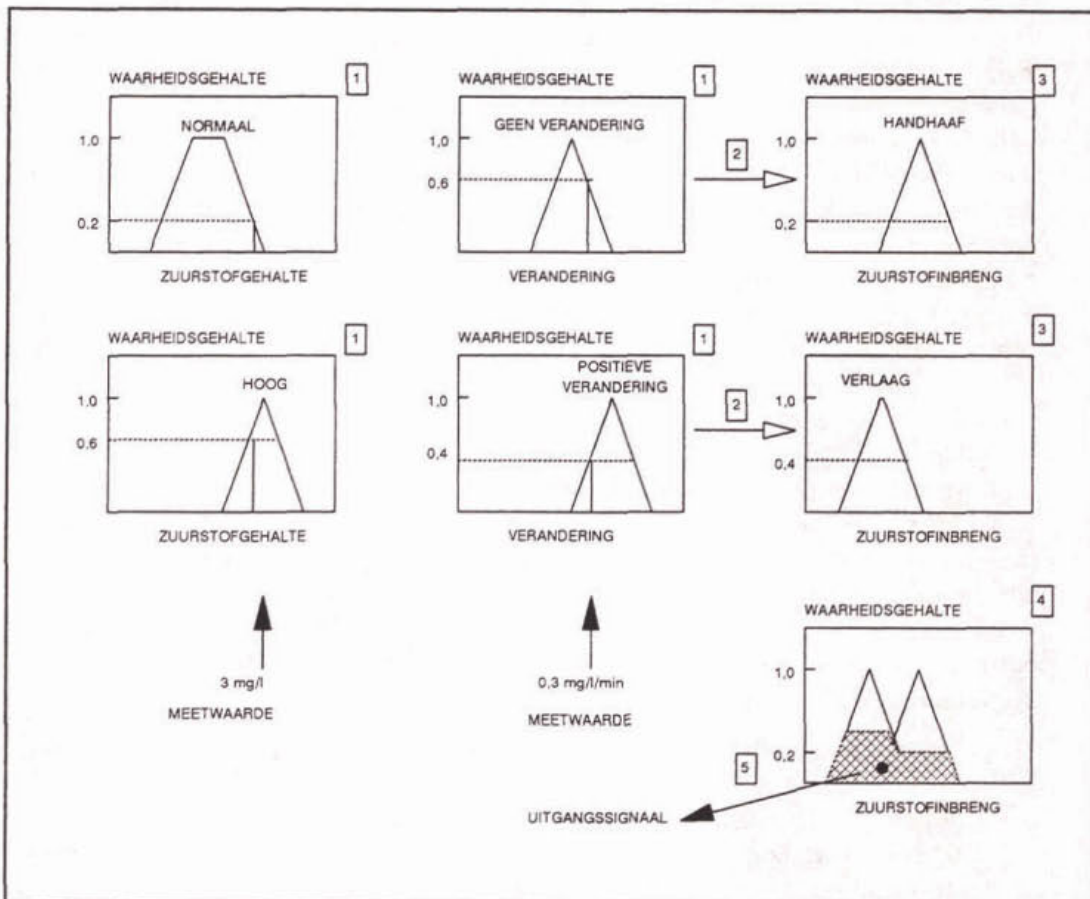
Tabel 1: Een voorbeeld van linguïstische kennisregels voor een zuurstofregeling

LINGUIÏSTISCHE KENNISREGELS VAN DE FUZZY ZUURSTOFREGELING

1. ALS het zuurstofgehalte laag is, EN de verandering is negatief, DAN verhoog de zuurstofinbreng veel.
2. ALS het zuurstofgehalte laag is, EN er is geen verandering, DAN verhoog de zuurstofinbreng weinig.
3. ALS het zuurstofgehalte laag is, EN de verandering is positief, DAN handhaaf de zuurstofinbreng.
4. ALS het zuurstofgehalte normaal is, EN de verandering is negatief, DAN verhoog de zuurstofinbreng weinig.
5. ALS het zuurstofgehalte normaal is, EN er is geen verandering, DAN handhaaf de zuurstofinbreng.
6. ALS het zuurstofgehalte normaal is, EN de verandering is positief, DAN verlaag de zuurstofinbreng weinig.
7. ALS het zuurstofgehalte hoog is, EN de verandering is negatief, DAN handhaaf de zuurstofinbreng.
8. ALS het zuurstofgehalte hoog is, EN er is geen verandering, DAN verlaag de zuurstofinbreng weinig.
9. ALS het zuurstofgehalte hoog is, EN de verandering is positief, DAN verlaag de zuurstofinbreng veel.

Het definiëren van vage verzamelingen bestaat in dit geval uit de volgende activiteiten. Eerst wordt vastgesteld welke meetwaarden verstaan worden onder een laag, een normaal, en een hoog zuurstofgehalte. Aan elke mogelijke waarde

van het zuurstofgehalte wordt daarbij een "waarheidsgehalte" van 0 tot 1 toegekend, dat aangeeft in welke mate deze waarde tot de genoemde verzamelingen "laag", "normaal" en "hoog" behoort. Hetzelfde wordt gedaan voor de verandering in het zuurstofgehalte: "negatief", "geen" of "positief". Ook voor de stuuracties voor de zuurstofinbreng moet door middel van vage verzamelingen beschreven worden welke stuursignalen bedoeld worden met "veel verhogen", "weinig verhogen", "handhaven", "weinig verlagen" of "veel verlagen" is. In figuur 1 worden de vastgestelde vage verzamelingen gevisualiseerd.



Figuur 1. Bouwstenen van een fuzzy regelaar. In deze figuur zijn de kennisregels 5 en 9 uit tabel 1 weergegeven. Op grond van de meetwaarde zouden de kennisregels 5, 6, 8 en 9 geldig zijn: ten behoeve van de duidelijkheid zijn deze niet alle in de figuur opgenomen.

De bovenste rij figuurtjes geeft de acties aan die behoren bij kennisregel 5: "Als het zuurstofgehalte normaal is en er is geen verandering in het zuurstofgehalte, handhaaf dan de zuurstofinbreng". De tweede rij figuurtjes geeft kennisregel 9 weer: "Als het zuurstofgehalte hoog is en de verandering is positief, verlaag dan de zuurstofinbreng. Het figuurtje rechtsonder geeft aan wat het resultaat is van de gecombineerde regels. De getallen in de figuur hebben betrekking op de volgende acties:

- 1: fuzzificatie van de ingangswaarden. De gemeten waarden maken onderdeel uit van de vage verzamelingen "zuurstofgehalte normaal", "zuurstofgehalte hoog", "geen verandering" en "positieve verandering".
- 2: bepalen van het waarheidsgehalte. De gemeten waarde behoort met een bepaald waarheidsgehalte toe aan de vage verzameling.
- 3: fuzzy inferentie. "EN" resulteert in de minimale waarde van de twee gecombineerde waarden. De kennisregel wordt gekoppeld aan een vage verzameling voor de bijbehorende stuuractie.
- 4: aggregatie. De vage verzamelingen die betrekking hebben op de stuuracties voor de beluchting worden samengevoegd in één figuur.
- 5: defuzzificatie. Het zwaartepunt van de combinatie van de twee instellingen van de zuurstoftoevoer resulteert in het uitgangssignaal.

Als de regelaar in werking is, worden het zuurstofgehalte en de snelheid waarmee dit verandert, gemeten. Dit betreft discrete waarden, waarvan de regelaar vast stelt in welke mate deze tot de gedefinieerde vage verzamelingen behoren. Deze vaststelling wordt "fuzzificatie" genoemd. Daarna wordt bepaald welke kennisregels van toepassing zijn en in welke mate: het vaststellen van het waarheidsgehalte. Vervolgens wordt vastgesteld welke stuuractie behoort bij de betreffende kennisregel en in welke mate deze stuuractie moet worden uitgevoerd. Dit wordt "fuzzy inferentie" genoemd. Het waarheidsgehalte dat voor deze stuuractie geldt, is gelijk aan het waarheidsgehalte van de betreffende kennisregel. Bij elke kennisregel die van toepassing is, behoort een stuuractie die met een bepaald waarheidsgehalte moet worden uitgevoerd. Zo ontstaat er een combinatie van vage verzamelingen voor de stuuractie. Tijdens de "aggregatie" worden deze vage verzameling als het ware "over elkaar heen gelegd" in een figuur. Het vaststellen van de precieze stuurwaarde wordt met behulp van deze figuur uitgevoerd. Dit wordt "defuzzificatie" genoemd. In een fuzzy regelaar kan de defuzzificatie volgens verschillende methoden plaatsvinden. Eén van de meest toegepaste methoden is de zwaartepuntsmethode. Bij deze methode wordt het zwaartepunt bepaald van de figuur die ontstaan is door de aggregatie van vage verzamelingen. In figuur 1 worden de beschreven stappen van het regelproces puntsgewijs toegelicht.

2.2 Overzicht van regeltechnieken

In dit rapport gelden de volgende definities. Onder "conventionele regeltechniek" wordt verstaan: alle lineaire en niet-lineaire regeltechniek en alle regeltechniek die niet van fuzzy logic gebruik maakt. Onder "lineaire regeltechniek" wordt verstaan: alle regeltechniek die impliciet of expliciet gebruik maakt van lineaire verbanden tussen de invoervariabelen en de stuursignalen. PI(D)-regelaars en LQ-regelaars behoren tot deze categorie, net zoals modelgebaseerde regelaars die van lineaire modellen gebruik maken.

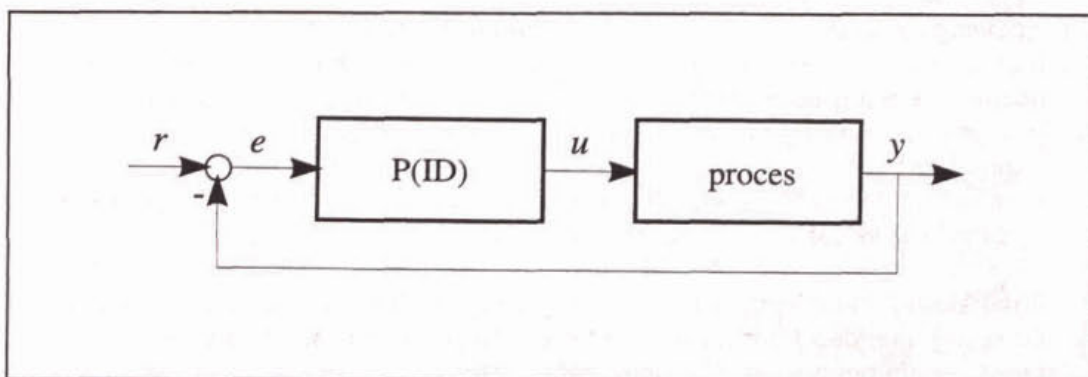
De conventionele regeltechniek kent grofweg twee klassen van regelingen:

1. Regelingen op basis van een ingangssignaal (signal-based control);
Dit type regelingen wordt in de besturing van het actiefslibstelsysteem vaak gecombineerd met tijdproportionele -, schakelende - of logische regelingen.
2. Regelingen op basis van een model (model-based control)

Hieronder worden de hierboven genoemde typen regelingen toegelicht. Paragraaf 2.3 gaat vervolgens in op de specifieke eigenschappen van PID-regelaars.

Regeling op basis van een ingangssignaal (signal-based control)

In de praktijk behoren de meeste regelaars tot deze klasse, zoals de P (proportionele) regelaar, de PI (proportioneel-integrale) regelaar en de PID (proportioneel-integraal-differentiële) regelaar. Een algemeen schema van een P(ID)-regelaar is in figuur 2 te zien.



Figuur 2. P(ID)-regelaar.

De belangrijkste eigenschap van dit type regeling is dat er geen expliciet model van het proces gebruikt wordt, maar slechts het foutsignaal e , d.w.z. het verschil tussen de gewenste en werkelijke proces-uitgang ($e = r - y$). Het ontwerp van een P(ID)-regelaar kan gebaseerd zijn op een eenvoudig lineair model van het proces, bijvoorbeeld eerste-orde dynamica met dode tijd, of op door middel van experimenten verkregen data (trial-and-error methode) in combinatie met het toepassen van vuistregels zoals de Ziegler-Nichols criteria of de relai-smethode. Industriële PID-regelaars zijn vaak voorzien van "auto-tuning" (zelf-instellende) functies.

Regelingen op basis van hetingangssignaal worden meestal toegepast op monovariabele processen, maar zijn in principe ook geschikt voor eenvoudige multivariabele processen. Een typisch praktijkvoorbeeld van een monovariabele regeling is de zuurstofregeling die is weergegeven in figuur 9 in hoofdstuk 3. Bij multivariabele regelingen is sprake van meer dan één invoervariabele op grond waarvan één of meer stuursignalen worden gegeven. Een voorbeeld van een multivariabele zuurstofregeling is de cascaderregeling die weergegeven is in figuur 12 in hoofdstuk 3. Hierbij zijn meer regelkringen in een cascade aan elkaar gekoppeld.

Tijdproportionele -, schakelende - en logische regelingen

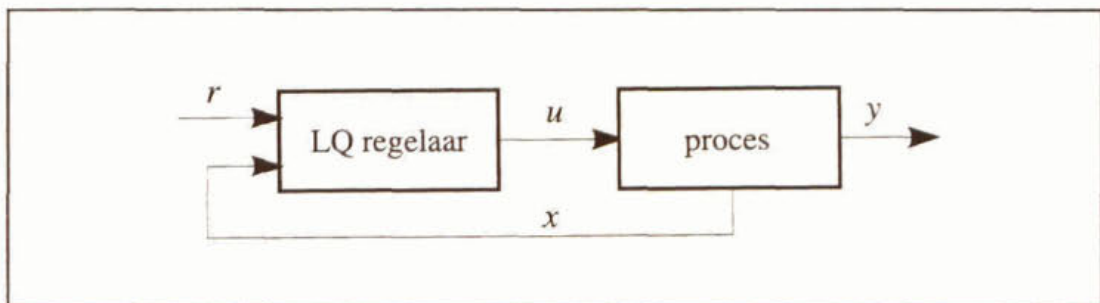
Voor de besturing van het actiefslijbsysteem worden in de praktijk vaak tijdproportionele -, schakelende - of logische regelingen gebruikt, al dan niet in combinatie met PI(D)-regelingen. Bij een tijdproportionele regeling wordt gedurende een instelbare tijd een bepaalde actie ondernomen. In aanvulling op bijvoorbeeld PI(D) regelingen kunnen door middel van dergelijke regelingen ook minimale loop- en wachttijden van elektromechanische apparatuur worden gerealiseerd. Dit is weergegeven in figuur 10 in hoofdstuk 3. Een schakelende regelaar kent meestal maar twee stuuracties zoals aan/uit of hoog/laag. Op basis van een on-line meting wordt dan gekozen voor een bepaalde stuuractie. Een meer complexe vorm van een schakelende regeling is een logische regeling. Op grond van meer invoervariabelen worden logische beslissingen (ja/nee beslissingen) genomen over de uit te voeren stuuractie. Een voorbeeld daarvan is gegeven in hoofdstuk 3 in figuur 14.

Regelingen op basis van een model (model-based control)

Moderne regelingen zijn vaak gebaseerd op een wiskundig dynamisch model van het te regelen proces. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen

- regelaars waarbij het model alleen gebruikt wordt tijdens het ontwerp van de regelaar;
- regelaars die een model van het proces bevatten om voorspellingen te doen over de procesvariabelen en op grond daarvan optimaal aan te sturen.

Een bekend voorbeeld van de eerste groep is de LQ (lineair kwadratisch) regelaar. Deze regelaar berekent de stuuractie als een lineaire functie van de toestandsvariabelen, zoals bijvoorbeeld concentraties. Het basisschema van een LQ-regelaar is in figuur 3 te zien.

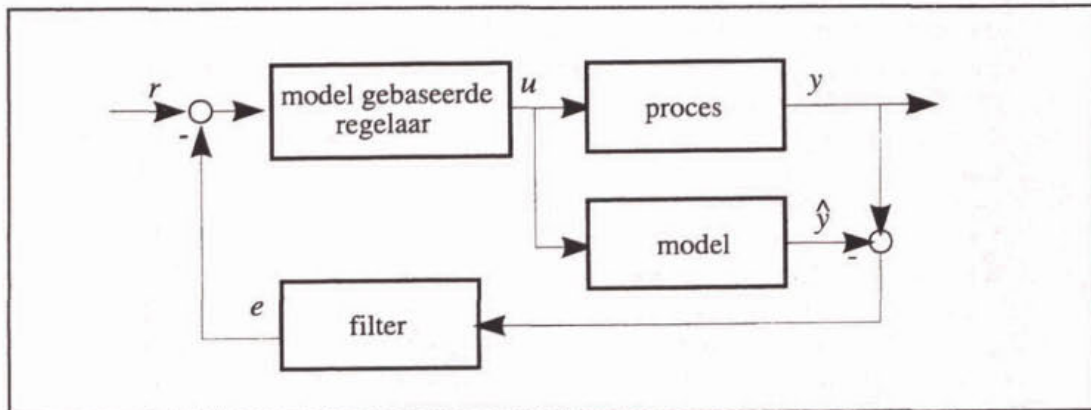


Figuur 3. LQ-regelaar.

Om een LQ-regelaar te kunnen gebruiken moet de toestand x van het proces gemeten worden, bijvoorbeeld de substraatconcentratie of het aandeel nitrificerende bacteriën. In de praktijk is het vaak niet mogelijk of wenselijk een dergelijke toestandsvariabele te meten omdat daarvoor geen sensor beschikbaar is of omdat een dergelijke sensor te kostbaar is. Daarom wordt de LQ-regelaar veelal uitgebreid met een Kalman-filter tot een LQG (linear quadratic Gaussian) regelaar. Het Kalman-filter gebruikt een lineair model om de toestand x te reconstrueren uit input- en outputmetingen.

Tijdens het ontwerp van de LQ(G)-regelaar wordt hetzelfde lineaire model gebruikt in combinatie met een doelfunctie. De doelfunctie is een wiskundige benadering voor de mate waarin het regeldoel wordt bereikt, bijvoorbeeld een bepaald stikstofgehalte in het effluent of een minimaal energieverbruik. Voor de doelfunctie wordt meestal een kwadratische functie gebruikt. Voor een gegeven model en een gegeven doelfunctie leidt het LQ(G)-ontwerp tot een "optimale" regeling: het theoretisch optimum. Dit theoretisch optimum is echter geen garantie voor een werkelijk optimaal gedrag omdat het model en de doelfunctie slechts benaderingen van de werkelijkheid zijn. Een belangrijk theoretisch voordeel van de LQ-regeling is dat deze direct toepasbaar is op multivariabele processen.

Een voorbeeld van een regeling waarin een model is opgenomen, is de IMC (internal model control) structuur, gegeven in figuur 4.



Figuur 4. Regeling op basis van een model (internal model control).

Deze structuur wordt vaak toegepast bij voorspellende regelaars (model-based predictive control, MBPC). Een voorspellende regelaar gebruikt dit model om het procesgedrag over een eindige horizon te voorspellen. Op basis daarvan wordt een optimale stuuractie berekend. Dit gebeurt in het blok "model-gebaseerde regelaar" in figuur 4. Hetzelfde model wordt in een ander blok gebruikt om het effect van verstoringen te compenseren via terugkoppeling. Een belangrijk voordeel van voorspellende regelingen is de mogelijkheid om vooraf rekening te houden met bepaalde begrenzingen, zodat deze niet overschreden worden. Een nadeel is dat een vrij nauwkeurig model beschikbaar moet zijn.

2.3 Eigenschappen van PID-regelingen

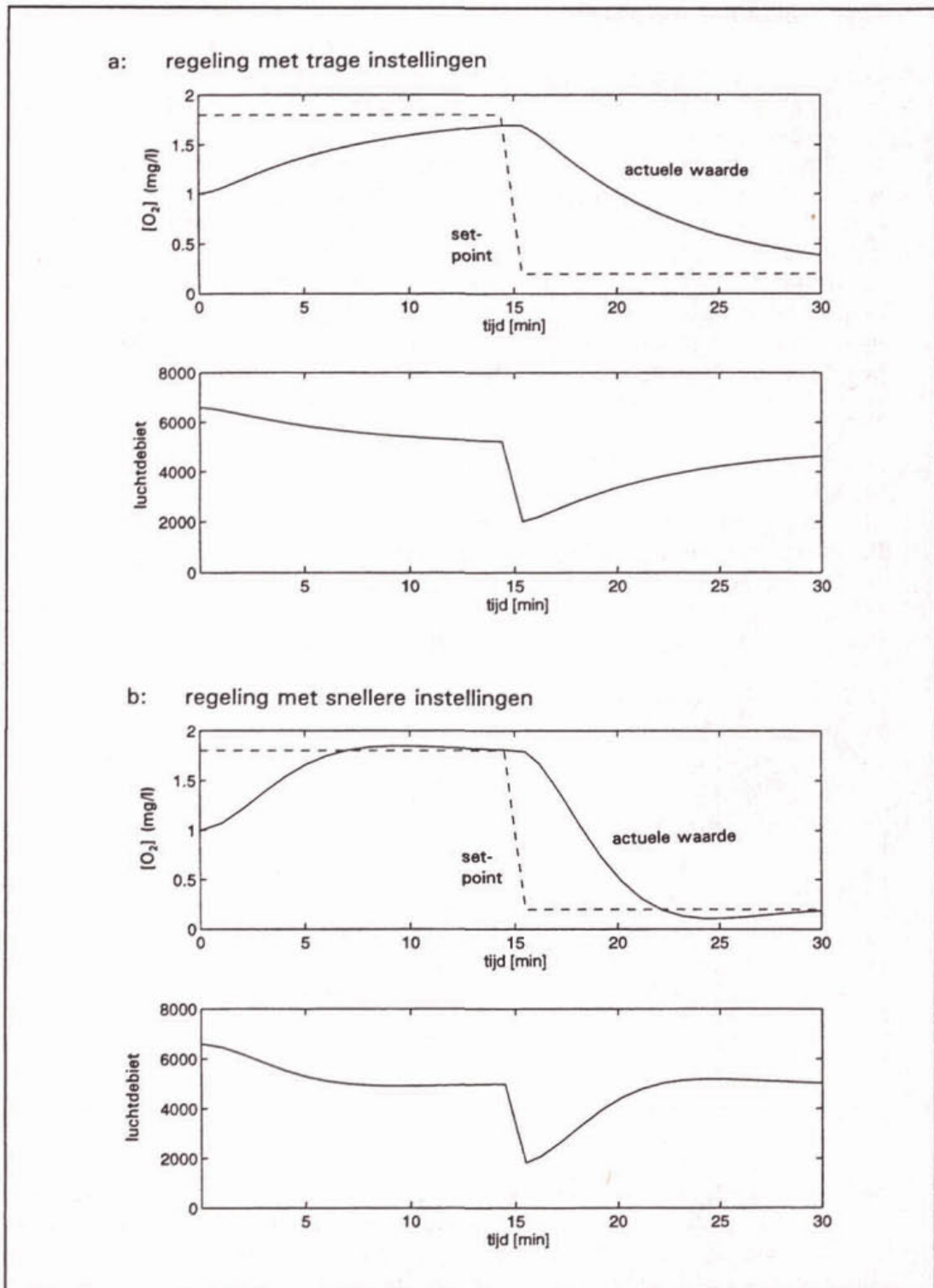
Aangezien in de waterzuivering veelvuldig gebruik wordt gemaakt van PID-regelingen worden de eigenschappen daarvan in deze paragraaf toegelicht aan de hand van een specifiek voorbeeld van een zuurstofregeling. De gewenste beluchtingsintensiteit wordt daarbij bepaald op basis van de afwijking tussen de gemeten zuurstofconcentratie en het zuurstofsetpoint. Hetingangssignaal van de PID-regeling kan in principe bestaan uit de afwijking van het zuurstofsetpoint, de integraal van deze afwijking over een bepaalde tijdsperiode en de snelheid waarmee deze afwijking verandert. Met de P-constante bepaalt de PID-regelaar de stuuractie op basis van de afwijking van het setpoint, met de I-actie de stuuractie op basis van de integraal van de afwijking en met de D-actie de stuuractie op basis van de snelheid waarmee de afwijking verandert. In alle drie de gevallen bestaat er een lineaire relatie tussen hetingangssignaal en de stuuractie. Het stuuringsignaal van de "totale" PID-regeling is gelijk aan de sommatie van de drie bovenbeschreven stuuracties.

De P-, de I- en de D-constanten worden ingesteld voor het totale werkgebied van de regeling. Gezamenlijk bepalen deze constanten het "regelgedrag" wat als volgt kan worden gekwantificeerd:

- de snelheid waarmee de regelaar een gewenst setpoint bereikt of reageert op externe verstoringen.
Te kleine waarden voor de P- of I-constanten leiden tot trage regelingen;
- de mate waarin undershoot of overshoot optreedt (doorschieten van de regeling).
Te hoge waarden van de P- of I-constanten leiden tot under- of overshoot;

- de mate waarin oscillatie optreedt.
Een te snelle regeling met te hoge waarden voor de P- of I-versterkingsconstanten leidt tot oscillatie;
- de mate waarin een "steady state fout" (continue afwijking van het setpoint) optreedt.
De I-constante moet een dergelijke fout voorkomen.

Een juiste instelling van de beschreven constanten is van belang om slijtage aan de apparatuur te voorkomen, het energieverbruik te minimaliseren en de effluentkwaliteit te optimaliseren. Bij een te snelle regeling resulteert oscillatie in het gunstige geval in het veelvuldig aan- en afschakelen van beluchters en afwisselend onder- en overbeluchting. In het ongunstige geval leidt dit tot instabiliteit. Bij de trage regeling wordt in eerste instantie het setpoint niet bereikt. Het is voorstelbaar dat daardoor de nitrificatie niet optimaal verloopt. In tweede instantie kost het na een setpointverlaging meer tijd voordat de beluchting voldoende is verlaagd. Het is voorstelbaar dat als gevolg hiervan onnodig energie wordt verbruikt en dat de denitrificatie niet optimaal verloopt. Waarschijnlijk heeft de snelheid van de regeling meer invloed op het energieverbruik dan op de effluentkwaliteit, omdat het proces van de zuurstofinbreng een snellere dynamica heeft dan de bacteriële omzettingsprocessen. In figuur 5 is het verschil tussen een snelle en trage regeling weergegeven.



Figuur 5. Voorbeeld van een trage regeling (a) en een snellere regeling (b). De procesingang is bijvoorbeeld de afwijking van het zuurstofsetpoint; bij de "knik" treedt een setpointverlaging op. De procesuitgang is het stuursignaal voor de beluchting.

2.4 Typen van fuzzy regelingen

Een gemeenschappelijk nadeel van de conventionele regelstructuren is dat er geen mogelijkheid is om kennis en ervaring van specialisten (proces operators, ontwerpers) te gebruiken in het ontwerp van de regelaar. Deze informatie is vaak kwalitatief en kan niet vertaald worden in wiskundige criteria en modellen. De wens om verschillende soorten kennis en informatie te gebruiken heeft geleid tot aandacht voor methodieken uit het vakgebied van de kunstmatige intelligentie. Indien deze methodieken in regeltechniek worden toegepast spreekt men van "intelligente regeltechnieken". Te denken is aan het gebruik van expertsystemen, neurale netwerken en fuzzy logic. Indien fuzzy logic wordt toegepast spreekt men van fuzzy control. De "logische regelingen", zoals deze in het voorgaande zijn beschreven, zijn in wezen te beschouwen als regelingen onder supervisie van een zeer eenvoudig expertstelsel.

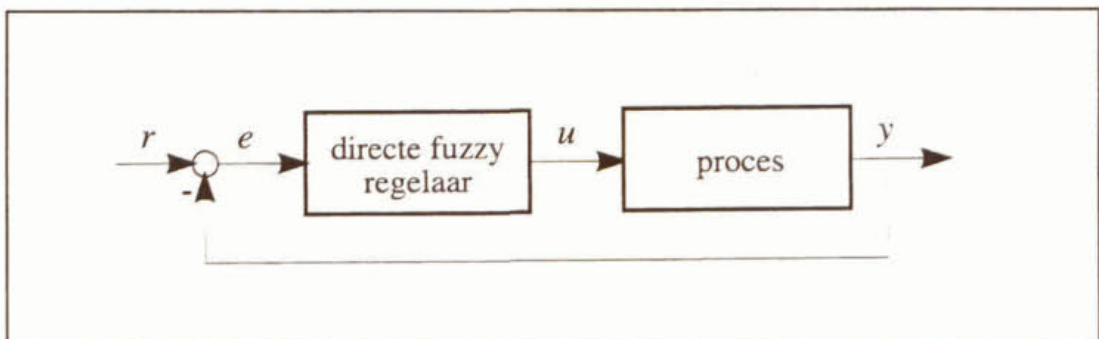
Het concept van fuzzy control wordt in principe toegepast op drie verschillende manieren:

1. directe fuzzy regeling (laag niveau);
2. fuzzy supervisieregeling (hoog niveau);
3. regelingen op basis van een fuzzy model.

Deze typen regelingen worden als volgt beschreven.

Directe fuzzy regeling (laag-niveau)

In een directe fuzzy regeling wordt een klassieke regelaar vervangen door een fuzzy regelaar; dit is weergegeven in figuur 6.



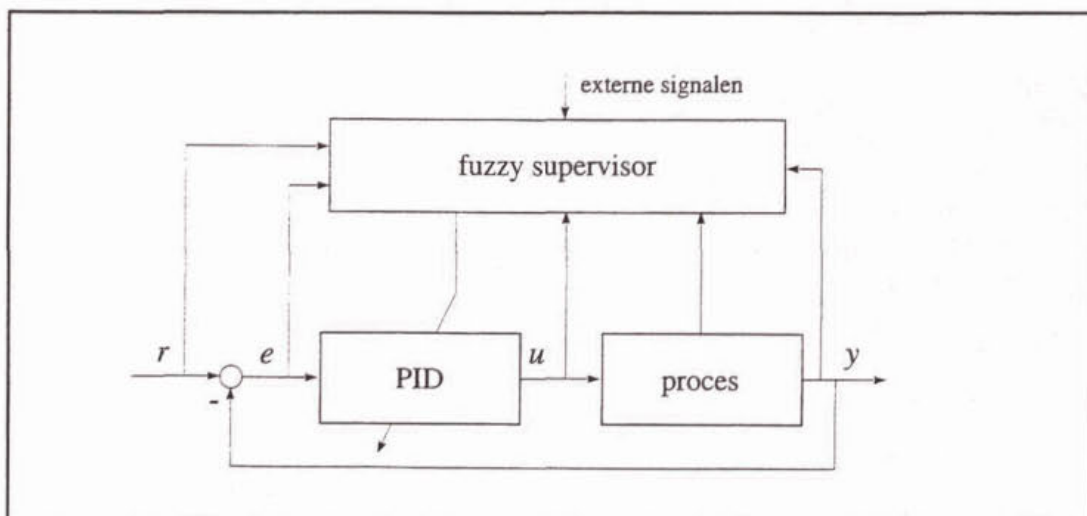
Figuur 6. Directe fuzzy regelaar.

Hierbij komen alle bovengenoemde structuren in aanmerking. Een fuzzy regelaar is op betrekkelijk eenvoudige wijze exact te kopiëren van een bestaande PID-regelaar. De verbanden tussen de afwijking van het setpoint, de integraal en de differentiaal van deze afwijking enerzijds en het stuursignaal anderzijds zijn daarbij in eerste instantie lineair. Als optimalisatie kan vervolgens in specifieke werkgebieden niet-lineair regelgedrag worden geïntroduceerd. Zo kan bijvoorbeeld bij een heel kleine afwijking van het setpoint minder actie worden ondernomen dan op grond van de P-constante berekend zou worden, of juist bij een heel grote afwijking meer actie dan op grond van de P-actie zou worden berekend. Bij grotere afwijkingen reageert de fuzzy regelaar dan sneller en bij kleinere afwijkingen langzamer dan de PID-regelaar.

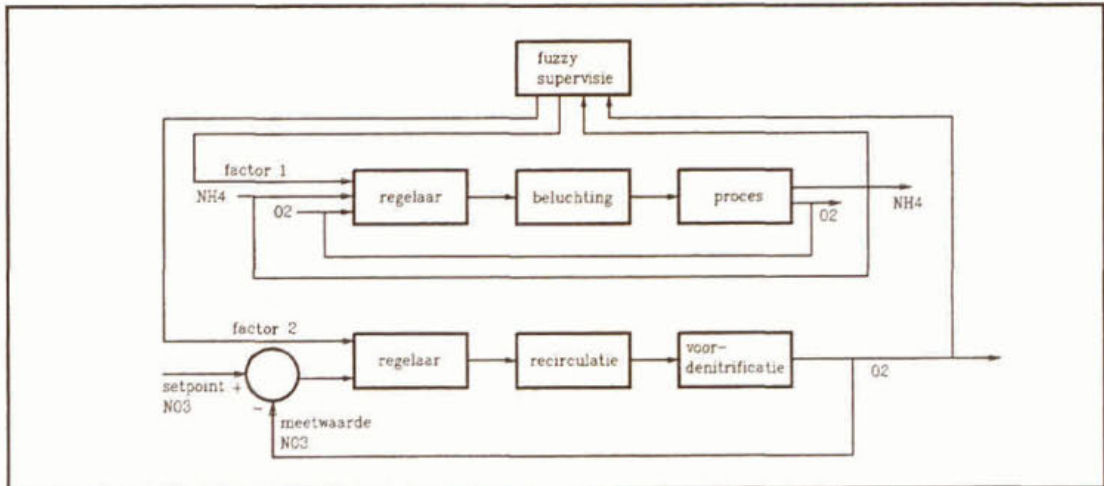
Ook kan bijvoorbeeld de gewenste I-actie worden verwaarloosd bij een verlaging van het zuurstofsetpoint. Het effect van de I-actie, die gebaseerd is op de afwijking van het vroegere setpoint, wordt daardoor teniet gedaan, wat eveneens kan leiden tot een snellere regeling.

Fuzzy supervisieregeling (supervisory fuzzy control)

Een supervisieregeling is een overkoepelende regeling die andere regelingen aanstuurt. Figuur 7 geeft een voorbeeld van een fuzzy supervisieregeling die de parameters van een klassieke PID-regelaar aanpast onder verschillende condities. Bij deze regeling wordt het proces door een klassieke (bijv. PID) regelaar geregeld en de parameterinstellingen van deze regelaar worden door middel van fuzzy logic ingesteld. Ten opzichte van een klassieke PID-regelaar kan het responsgedrag verbeterd worden. Een supervisieregeling kan ook schakelen tussen regelstrategieën of bepaalde invoervariabelen van regelaars aanpassen. Als deze regeling is gebaseerd op linguïstische kennisregels en vage verzamelingen, is sprake van een fuzzy supervisieregeling. Een voorbeeld is gegeven in figuur 8.



Figuur 7. Fuzzy supervisieregeling voor de instelling van PID-constanten onder verschillende condities.



Figuur 8. Fuzzy supervisieregeling voor de aansturing van verschillende regelaars.

Regelingen op basis van een fuzzy model

Sinds kort worden ook regelingen ontwikkeld op basis van een fuzzy model van het te regelen proces. Dit is een model op basis van vage verzamelingen en kennisregels. Een fuzzy model kan gebruikt worden in combinatie met bijvoorbeeld wiskundige modellen. Zo kunnen regelingen op basis van een lineair model bijvoorbeeld worden uitgebreid met fuzzy parameterschatters.

2.5 Vergelijking van regeltechnieken

De belangrijkste eigenschappen van fuzzy regelingen in vergelijking met andere regelingen zijn:

- *Mogelijkheid tot niet-lineair input-output gedrag;*

Dit is een uitbreiding ten opzichte van de meeste conventionele regeltechnieken zoals bijvoorbeeld PID en LQ. Het toepassen van een niet-lineaire regelaar kan tot goede verbeteringen leiden, vooral bij sterk niet-lineaire processen of bij lineaire processen in de combinatie met begrenzingen of tegenstrijdige regeldoelen.

- *Ontwerp op basis van kennis en ervaring, uitgedrukt in de vorm van "Als-Dan" regels.*

In de klassieke regeltechniek is het regelaarontwerp gebaseerd op een dynamisch model van het te regelen proces en vaak een doelfunctie. De noodzakelijke mate van detail van het model verschilt per regeling. In het ontwerp van fuzzy regelingen is geen wiskundig model nodig. In plaats daarvan maakt men gebruik van kennis- en vuistregels. Dit soort kennis kan beschouwd worden als een kwalitatief model. Tijdproportionele -, schakelende - en logische regelingen worden vaak gebruikt als toevoegingen aan lineaire regelaars en introduceren daarmee eveneens een vorm van een "Als-Dan"-regel. Bij dergelijke regelaars is echter sprake van zeer scherpe overgangen. Bij fuzzy regelaars kan gebruik worden gemaakt van vloeiende overgangen, die meer overeenkomen

met het menselijk denken of op een meer realistische wijze aansluiten op het te regelen proces.

Het ontwerp van een fuzzy regelaar kan plaatsvinden op basis van ervaringskennis van bijvoorbeeld bedrijfsvoerders of technologen. Ook bestaande wiskundige modellen kunnen worden gebruikt. Anderzijds is het mogelijk kennisregels te "extraheren" uit bestaande meetgegevens. In feite is dan sprake van het opstellen van een fuzzy model of het ontwerpen van een fuzzy regelstrategie. Naarmate er meer kennisregels worden opgesteld, is de regelstrategie of het model complexer.

- *De mogelijkheid om met begrenzings rekening te houden*

Indien het noodzakelijk is een begrenzing op te nemen in de regeling, bijvoorbeeld een maximale beluchtingscapaciteit, kan dit niet in een PID-regelaar worden opgenomen. Er is daarvoor een afzonderlijk regelonderdeel nodig in de vorm van een logische regelaar. In de aansturing van de beluchting wordt dan op zeker moment geen rekening gehouden met het feit dat de begrenzing bijna bereikt wordt.

- *Inzichtelijkheid voor niet-regeltechnici, instelbaarheid en theoretische analyse*

Een fuzzy regeling is meer inzichtelijk voor niet-regeltechnici dan veel andere regelingen omdat de regeling beschreven is door middel van linguïstische kennisregels. Het veranderen van de regeltechnische instellingen is daarom voor niet regeltechnici een minder abstracte aangelegenheid dan de verandering van P-, I- en D-constanten. Bovendien is in de praktijk de fuzzy regeling zodanig te implementeren dat men op een scherm kan zien welke kennisregels in welke mate van toepassing zijn.

Aan de andere kant kan het vinden van de juiste instellingen toch tijdrovend zijn, omdat er meer waarden moeten worden ingesteld. Er zijn hier wel richtlijnen voor maar geen standaard vuistregels.

Bij regelingen op basis van een lineair model (PID, LQG en eventueel MBPC) zijn de optimale instellingen te berekenen op basis van een doelfunctie. Hier geldt echter dat het lineaire model vaak een benadering is van de werkelijkheid. Daardoor is de berekende optimale instelling theoretisch en zal in de praktijk toch nog een fijne tuning nodig zijn.

In tabel 2 is een overzicht gegeven van de ontwerpaspecten van de besproken regeltechnieken.

Tabel 2: Ontwerpaspecten van PID-, LQG-, MBPC- en fuzzy regelingen

Ontwerpaspecten	PID	logische regelingen	LQG	MBPC	Fuzzy
Wiskundig model vereist	nee	nee	ja	ja	nee
Lineair proces verondersteld	ja	nee	ja	nee	nee
Ontwerp op basis van een wiskundige doelfunctie	nee	nee	ja	ja	nee
Houdt rekening met begrenzingen van het proces	nee	ja	nee	ja	ja
Kan niet-wiskundige kennis gebruiken	nee	ja	nee	nee	ja
Moelijkheidsgraad van instellen (aantal parameters)	laag	hoog	hoog	hoog	hoog
Theoretische analyse (stabieliteit, robuustheid)	eenvoudig	ingewikkeld	eenvoudig	ingewikkeld	ingewikkeld

3 INVENTARISATIE VAN REGELINGEN IN DE PRAKTIJK

3.1 Werkwijze bij de inventarisatie

In hoofdstuk 3 worden de ervaringen met bestaande procesregelingen samengevat. Dit is het resultaat van de interviews die met representanten van negen waterbeheerders zijn gehouden in het voorjaar van 1997. De interviews hebben plaatsgevonden met technologen, bedrijfsvoerders en elektrotechnici van de volgende waterkwaliteitsbeheerders:

- Waterschap Veluwe;
- Waterschap Vallei en Eem;
- Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden;
- Hoogheemraadschap van Rijnland;
- Dienst Waterbeheer en Riolering¹;
- Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier;
- Zuiveringschap Limburg;
- Hoogheemraadschap van West-Brabant;
- Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden.

De interviews bestonden uit twee gedeelten. Tijdens het algemene gedeelte ging de aandacht uit naar de beoordeling van de bestaande situatie en de visie van de beheerders op wenselijke en mogelijke verbeteringen. De uitkomst van het algemene gedeelte van de interviews is als volgt samen te vatten. De doelstelling bij het ontwerpen en toepassen van procesregelingen is in de eerste plaats het verbeteren van de effluentkwaliteit, waarbij het voorkomen van slijtage aan electromechanische onderdelen een randvoorwaarde is. Zodra aan de effluenteisen wordt voldaan krijgt reductie van het energieverbruik een hoge prioriteit. Het is een algemene tendens dat meer RWZI's frequenter onbemand bedreven zullen worden, hetgeen door procesregelingen mogelijk wordt gemaakt. Over het algemeen wordt aangenomen dat de menselijke factor van grote invloed is op het zuiveringsproces omdat het belangrijk is adequaat te reageren op veranderende procesomstandigheden. De benodigde tijd voor bewaking en bijsturing van het proces wordt geschat op ongeveer een halve dag per week per RWZI. Daarbij worden vooral technologische instellingen gewijzigd zoals setpoints of wachttijden. Regeltechnische instellingen zoals PID-constanten worden in de regel zelden aangepast. De meeste kwaliteitsbeheerders verwachten dat door verbeterde regelingen het zuiveringsproces kan worden geoptimaliseerd. Het is daarbij van groot belang dat regelingen inzichtelijk zijn en gemakkelijk instelbaar zijn.

Tijdens het tweede gedeelte van het interview ging de aandacht uit naar specifieke regelingen. De resultaten hiervan worden in dit hoofdstuk besproken. In hoofdstuk 5 worden op basis van de praktijkinventarisatie en het literatuuronderzoek de aandachtspunten geformuleerd voor de verbetering van regelingen.

¹ Aangezien de geïnterviewden vooral deel uitmaken van het voormalig Zuiveringschap Amstel en Gooiland, hebben de betreffende ervaringen vooral betrekking op de RWZI's van dit voormalige zuiveringschap.

Tijdens het tweede interview met de waterbeheerders zijn achtereenvolgens de volgende regelkringen aan de orde gekomen:

- besturing van de aanvoer;
- besturing van recirculatie ten behoeve van denitrificatie;
- besturing van de beluchters;
- besturing van doseerpompen;
- besturing van retourslibvijzels;
- besturing van spuislibpompen.

Er zijn daarbij voor zo ver mogelijk binnen het beheersgebied van de geïnterviewden verschillende typen RWZI's in beschouwing genomen: compleet gemengde systemen, propstroomsystemen, Schreiber-installaties en tweetraps-systemen. In de volgende paragrafen wordt per regeling een globaal overzicht gegeven van aangetroffen regelingen en knelpunten. In bijlage 2 worden alle regelingen in meer detail weergegeven. De hierbij gepresenteerde figuren dienen te worden beschouwd als een schematische weergave van de regelstructuur. Begrenzings-, uitzonderingsregels en wachttijden zijn omwille van de duidelijkheid niet altijd weergegeven. Per regeling worden tevens knelpunten besproken.

3.2 Besturing van de aanvoer

Bij enkele waterbeheerders worden inventariserende studies uitgevoerd naar de mogelijkheden van geïntegreerde sturing van riolering en RWZI. Deze ontwikkeling kan zich nu voortzetten door de toegenomen mogelijkheden van dynamische simulatie van de processen in het rioleringssysteem en de RWZI. De onbekendheid met betrekking tot het dynamische gedrag van het vuilaanbod in de riolering vormt volgens dr. ir. A.J.M. Nelen (persoonlijke mededeling) nog een knelpunt in de verdere ontwikkeling van dergelijke modellen. De mogelijkheden van geïntegreerde sturing kunnen daarom vooral duidelijk gemaakt worden voor systemen met persleidingen. Hierbij is het vuiltransport eenvoudiger vast te stellen.

Reeds uitgevoerde modelstudies op het gebied van geïntegreerde sturing hebben uitgewezen dat dit een perspectiefvolle werkwijze is. Het gebruik maken van het bufferend vermogen van het rioolstelsel kan volgens één van de beheerders in een specifiek geval resulteren in een reductie van 5 mg N_{tot}/l in het effluent van een grote volbelaste RWZI. Dit is in een simulatiestudie aangetoond. De perspectieven van geïntegreerde sturing zijn echter sterk afhankelijk van de beschikbare bergingscapaciteit in het rioolstelsel. De bergingscapaciteit is niet altijd toereikend indien behalve DWA- ook RWA-fluctuaties moeten worden gebufferd.

Volgens Nelen wordt fuzzy control in Nederland nog niet toegepast voor de regelingen van rioolgemalen. Hiervoor kunnen tot nu toe betrekkelijk eenvoudige regelmodellen worden toegepast. De doelstelling is éénduidig: het beperken van de hoeveelheid overstorten bij een vast maximaal debiet naar de RWZI. De gehanteerde regelmodellen hanteren daarom bergingscapaciteiten en pompcapaciteiten die eenvoudig opgeteld kunnen worden. Zodra meer complexe en minder eenduidige informatie moet worden verwerkt, bijvoorbeeld een variërend maximaal debiet naar de RWZI, of waterkwaliteitsvoorspellingen, wordt verwacht dat fuzzy control een belangrijker rol kan gaan spelen.

Over het algemeen wordt het aanvoerdebiet geregeld op basis van het niveau in de pompkelder door middel van een aan/uit-, een laagtoeren/hogtoeren- of een PID-regeling. In vrijwel alle gevallen vindt boven een bepaalde maximumcapaciteit overstort plaats. In een enkel geval kan onder dergelijke omstandigheden het rioolwater naar een andere RWZI worden gevoerd.

Er zijn geen knelpunten gemeld inzake de besturing van de influenttoevoer naar de RWZI's. Bij de multivariabele regeling van meer rioolgemalen tegelijkertijd bij Wervershoof, is als knelpunt gemeld dat de regeling zich "onrustig" gedraagt. De instellingen van deze regeling dienen jaarlijks te worden aangepast om dit te voorkomen.

3.3 Besturing van de recirculatie voor de denitrificatie

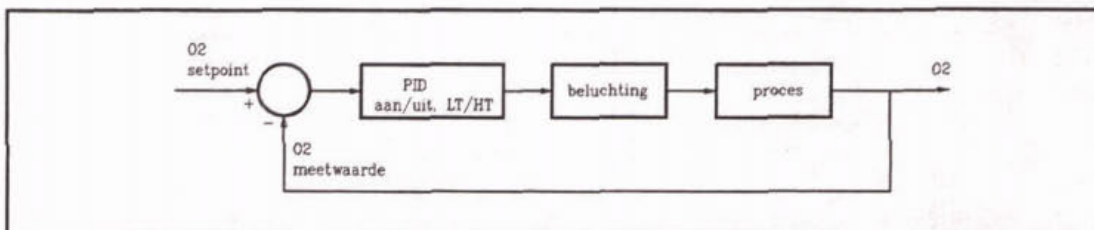
Er zijn geen regeltechnische knelpunten gemeld ten aanzien van de besturing van de recirculatie van nitraatrijke stromen. Wel is een aantal technologische voorwaarden genoemd, waaraan voldaan moet worden voor een positief effect van interne recirculatie. Er dient voldoende afbreekbaar CZV aanwezig te zijn in het denitrificatiecompartiment. De verdunning die optreedt als gevolg van de recirculatie mag niet zodanig zijn dat de concentratie van afbreekbaar CZV te laag wordt. Dan heeft recirculatie van nitraatrijk water geen zin meer.

3.4 Besturing van de beluchting

3.4.1 Regelingen

Zuurstofregeling

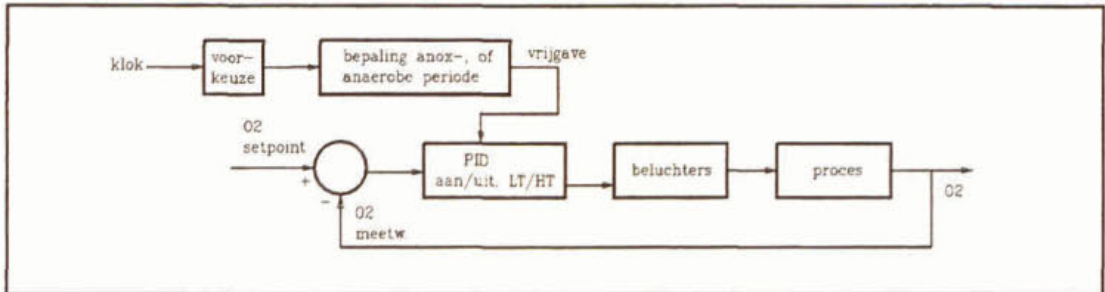
De basiscomponent voor de meeste regelingen is de zuurstofregeling. Op basis van de gemeten zuurstofconcentratie en de afwijking van het zuurstofsetpoint wordt het toerental of de dompeldiepte bij een puntbeluchter of het luchtdebiet bij een bellenbeluchter aangestuurd. In één beluchtingsbassin kunnen meer zuurstofmeters geplaatst zijn die verschillende beluchtingselementen aansturen. In geval van een traploos regelbereik wordt gebruik gemaakt van PI(D)-regelingen, waarbij de D-actie meestal niet van toepassing is. In andere gevallen wordt gebruik gemaakt van aan/uit regelingen van één of meer beluchters, met een bepaalde in- en uitschakelvolgorde en instelbare wachttijden. In figuur 9 is de zuurstofregeling geschematiseerd. Deze regeling wordt in het vervolg *basiszuurstofregeling* genoemd.



Figuur 9. Zuurstofregeling. LT = laag toeren; HT = hoog toeren.

Indien geen ammonium- en/of nitraatmeting beschikbaar is, is de zuurstofconcentratie de enige procesvariabele die de beluchting beïnvloedt. Op grond van ervaring en de off-line gemeten effluentkwaliteit worden het zuurstofsetpoint en/of de loop-

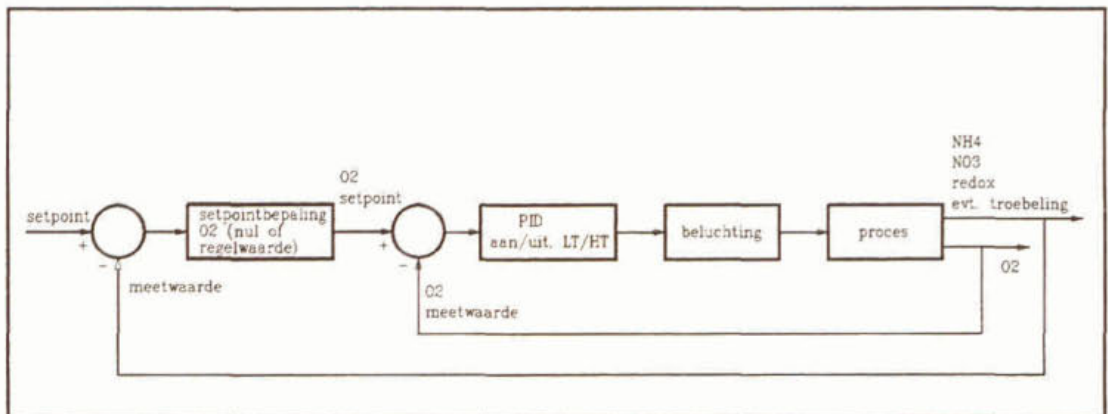
en wachttijden van beluchters handmatig bijgesteld teneinde een optimale effluentkwaliteit te verkrijgen. In figuur 10 is weergegeven hoe een basiszuurstofregeling wordt uitgebreid met vooraf bepaalde loop- en wachttijden.



Figuur 10. Zuurstofregeling in combinatie met loop- en wachttijdenregeling ten behoeve van de stikstofverwijdering. LT = laag toeren; HT = hoog toeren.

Intermitterende beluchting op basis van zuurstof en andere procesvariabelen

Er zijn diverse varianten van regelingen voor intermitterende beluchting. Indien de beluchting aan is, wordt meestal de basiszuurstofregeling toegepast. Op basis van een meting van ammonium, nitraat of de redoxpotentiaal wordt besloten of deze regeling actief wordt. De zuurstofminimator bij een Schreiberinstallatie bepaalt eveneens of al dan niet belucht moet worden, maar dan op basis van een troebelheidsmeting van de bovenstaande vloeistof van bezonken slib. In figuur 11 is dit type regeling in één schema weergegeven.

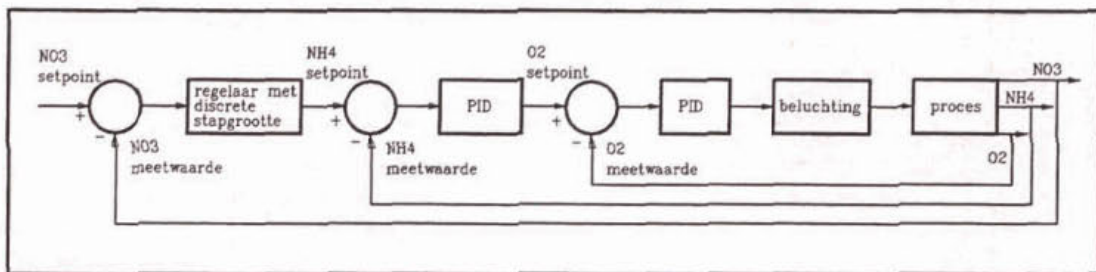


Figuur 11. Intermitterende beluchting op basis van NH_4 , NO_3 , verandering in redoxpotentiaal of troebeling.

Continue beluchting op basis van meer procesvariabelen

Er zijn verschillende varianten op het type regeling dat op basis van twee of meer metingen van zuurstof, ammonium, nitraat of de redoxpotentiaal de beluchting continu aanstuurt. Indien er twee of meer regelaars in cascade zijn geplaatst, is sprake van een "cascaderegeling".

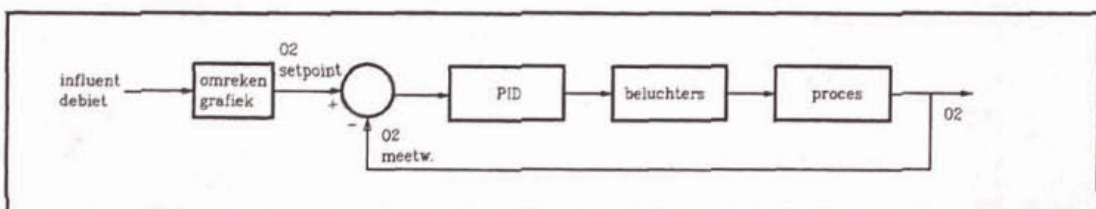
Een voorbeeld van een cascaderегeling is de beluchtingsregeling van RWZI Beemster. Hier worden de beluchters geregeld door middel van een $\text{NO}_3/\text{NH}_4/\text{O}_2$ -regeling. De regeling is geschematiseerd in figuur 12. De beluchters worden daarbij direct aangestuurd door een PI(D)-zuurstofregeling. Het setpoint voor zuurstof wordt bepaald door een PI(D)-ammoniumregeling: de afwijking van het ammoniumsetpoint bepaalt namelijk het zuurstofsetpoint. Het ammoniumsetpoint wordt bepaald door een nitraatmeting. Bij een hoog nitraatgehalte wordt het ammoniumsetpoint verhoogd. Bij een laag nitraatgehalte wordt het ammoniumsetpoint verlaagd.



Figuur 12. Beluchtingsregeling op de RWZI Beemster.

Regelingen met een toegevoegd feedforward-sig-naal

Van een feedforward-sig-naal is sprake als een gegeven over de influenttoevoer is opgenomen in de besturing van de RWZI. Dit kan op eenvoudige wijze door bijvoorbeeld over te schakelen op een ander beluchtingsregime bij RWA. Op meer complexe wijze kan ook het debiet het setpoint van de zuurstofregeling beïnvloeden. Dit is weergegeven in figuur 13.



Figuur 13. Feedforward-sig-naal van het debiet, in combinatie met een feedback sig-naal van de zuurstofconcentratie.

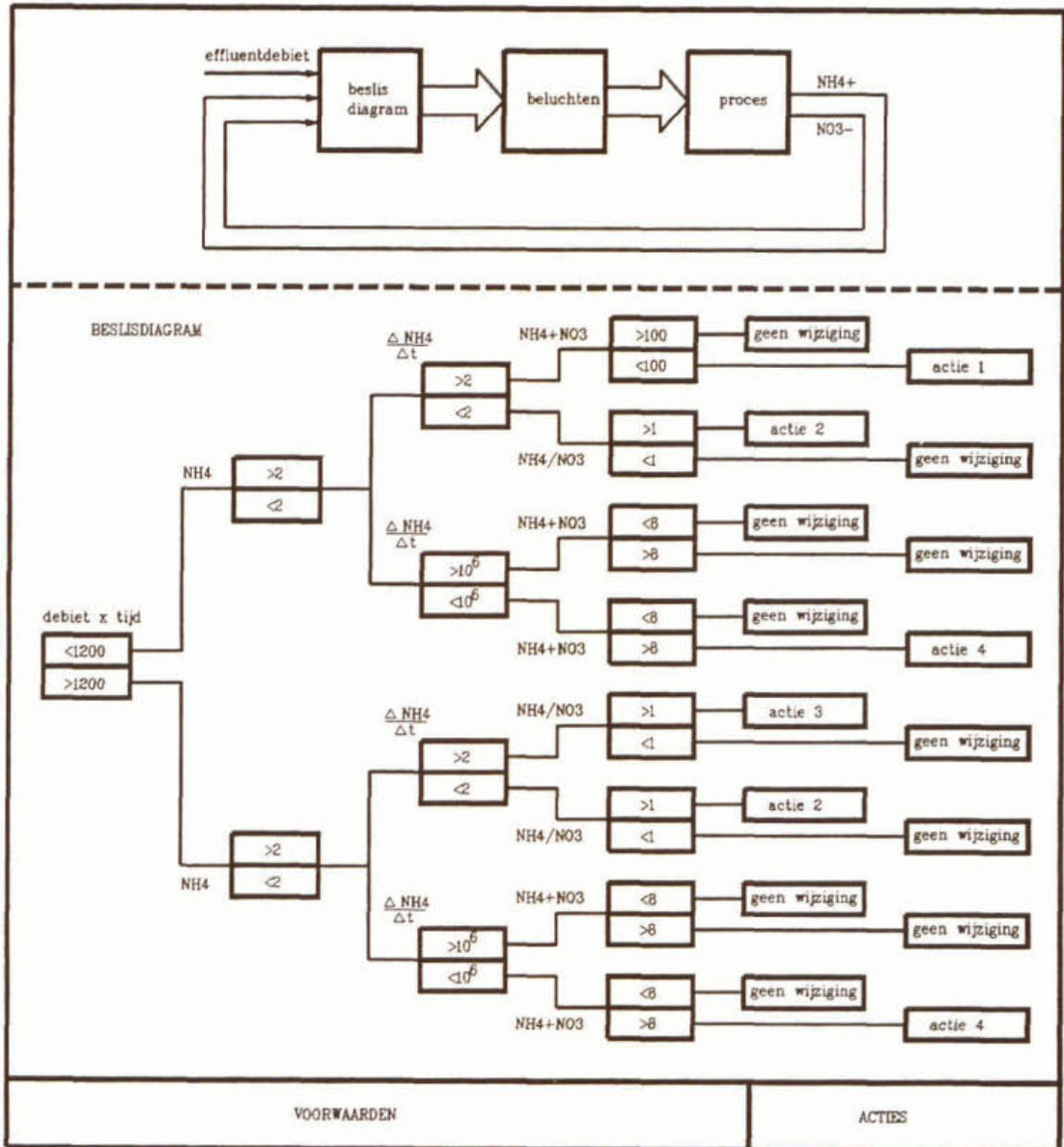
Meer complexe logische regelingen

In een aantal gevallen worden regelingen toegepast die van meer invoervariabelen gebruik maken door middel van een besturingsprogramma waarin logische ja/nee-beslissingen worden genomen. Een voorbeeld daarvan is de beluchtingsregeling van de RWZI Huizen.

RWZI Huizen:

De regelaars voor de beluchting worden aangestuurd door middel van een besturingsprogramma, dat bestaat uit een beslisschema, dat is weergegeven in figuur 14.

Er worden daarbij scherpe keuzes gemaakt ten aanzien van het debiet over de afgelopen tijd, de ammoniumconcentratie, de verandering in de ammoniumconcentratie, de som van de ammonium- en de nitraatconcentratie, en de verhouding tussen de ammonium- en de nitraatconcentratie. De exacte stuuracties die op grond van deze beslissingen worden gemaakt, zijn daarin niet weergegeven.



Figuur 14. Beluchttingsregeling van de RWZI Huizen.

3.4.2 Knelpunten

De regelingen die in de voorgaande paragraaf beschreven zijn, worden als volgt beoordeeld.

Zuurstofregeling

1. *Reacties of afwijkende omstandigheden, behaalde effluentkwaliteit*

De zuurstofregeling, zonder toevoeging van extra metingen en aanvullende regelingen, wordt doorgaans zeer goed beoordeeld qua inzichtelijkheid, stabiliteit en effluentkwaliteit. Als knelpunt wordt gemeld dat deze eenvoudige regeling niet altijd in voldoende mate reageert op afwijkende aanvoer of veranderende procescondities, waardoor eerder overschrijdingen op kunnen treden. Bij deze inventarisatie zijn geen kwantitatieve gegevens beschouwd. Daarom is in feite niet te beoordelen in welke mate de effluentkwaliteit, die behaald wordt door middel van een zuurstofregeling, verschilt van een regeling waarin ook meetwaarden van ammonium en/of nitraat of de redoxpotentiaal worden beschouwd. Uit simulaties uitgevoerd door Meinema et. al. [1995] blijkt dat, in tegenstelling tot de algemene gedachte, een ammonium- of cascaderregeling niet per definitie een betere effluentkwaliteit oplevert dan een conventionele zuurstofregeling. Door de beperking van een vast setpoint of een vaste verhouding kunnen dergelijke regelingen zelfs minder goed functioneren dan een conventionele zuurstofregeling. Meinema verwacht echter dat, indien meer beluchters moeten worden aangestuurd, de eenvoudige zuurstofregeling minder goed voldoet.

Voor de vergelijking van zuurstofregelingen met gecombineerde ammonium/nitraat(redox)/zuurstofregelingen wordt verwezen naar de betreffende STOWA-onderzoeksrapporten [97W01, 97W03 en 97W06].

2. *Frequentie van aanpassen van setpoints*

Het is denkbaar dat de instellingen van setpoints en loop- en wachttijden van beluchters bij een eenvoudige zuurstofregeling vaker worden bijgesteld op basis van off-line metingen dan de setpoints van regelingen waarbij gebruik wordt gemaakt van on-line signalen van ammonium of nitraat. Dit is echter niet als knelpunt gemeld, mogelijk omdat het bij de eenvoudige zuurstofregeling gemakkelijk te bepalen is op welke manier instellingen veranderd moeten worden.

3. *Optimale PI(D)-instellingen variëren*

Door enkele waterbeheerders is gemeld dat de gewenste PI(D)-instellingen afhankelijk zijn van de aanvoer. Bij lage aanvoer is een minder snelle reactie vereist dan bij hoge aanvoer. De PI(D)-regelingen worden met opzet traag ingesteld om instabiliteit te voorkómen. De variatie in feitelijk gewenste PI(D)-instellingen treedt op korte termijn op als functie van het dag/nacht ritme en het optreden van RWA, maar kan op langere termijn optreden als gevolg van structurele veranderingen in de aanvoer en de procescondities.

Door een enkele beheerder zijn "auto-tuning" (zelfinstellende) PI(D)-regelaars toegepast. Dit bleek in dat geval echter geen oplossing voor het omschreven knelpunt, aangezien de betreffende regelaars het instellende stadium nooit konden beëindigen. Hieruit blijkt inderdaad dat de optimale PI(D)-instelling gedurende de tijd varieert.

Intermitterende en continue beluchting op basis van zuurstof en andere procesvariabelen

4. Reacties op afwijkende omstandigheden

Indien als aanvulling op de zuurstofmeting alleen ammonium of nitraat wordt gemeten, komt als knelpunt naar voren dat het andere signaal niet wordt gemeten. In enkele gevallen worden daarom soms verkeerde keuzes gemaakt bij een voorkeur voor nitrificatie of denitrificatie.

5. Storingen van sensoren, verloop van meetsignalen

De frequentie waarmee storingen optreden, wordt nog altijd als knelpunt ervaren. Eveneens worden storingen niet altijd goed gesignaleerd en moet tijdig worden ingegrepen als meetsignalen verlopen.

6. Ongewenste stijging van de SVI

In een aantal gevallen is een optimale beluchting, in de zin van een optimale benutting van nitraat als elektronenacceptor, aanleiding voor een verhoogde frequentie van lichtslibproblemen.

7. Gebrek aan inzichtelijkheid

Indien er te veel instelmogelijkheden zijn en de onderlinge verbanden tussen instelmogelijkheid en effluentkwaliteit niet altijd voorspelbaar zijn, wordt de regeling regelmatig als "complex" en "ondoorzichtig" ervaren.

8. Instabiliteit

In het geval van een ammonium/nitraatregeling, waarbij geen basiszuurstofregeling wordt gehanteerd, wordt melding gemaakt van een "onrustige" beluchting. Dit is te verklaren door het feit dat het signaal van het meest snelle proces, de inbreng van zuurstof, wordt veronachtzaamd ten opzichte van de minder snelle omzettingsprocessen van nitraat en ammonium.

Regelingen met feedforward signaal

9. Tijdsduur van inregelen

Zodra regelingen complexer worden, zijn inregelperioden van één à twee jaar niet ongebruikelijk. Extra knelpunt bij de debietmeting als feed-forward signaal is waarschijnlijk dat het verband tussen het debiet en de exacte influentvracht moeilijk voorspelbaar is. Dit komt overeen met de bewering van Nelen (persoonlijke mededeling) dat er veel onzekerheden zijn inzake het vuiltransport in rioleringsystemen.

10. Inflexibiliteit

Indien geen nitraat en/of ammonium worden gemeten, blijkt een scherpe verandering in de bedrijfsvoering op grond van een debietmeting in onvoldoende mate de veranderende influentkwaliteit op te vangen. De betreffende regeling wordt als "star" ervaren. In feite is hier overeenkomst met knelpunt 1 en 4.

Gecombineerde regeling van de beluchting en de compressordruk

11. Tijdsduur van inregelen

Als eerder gemeld bij complexere regelingen wordt bij dit type regeling de benodigde tijdsduur voor het inregelen als knelpunt ervaren.

3.5 Besturing van de chemicaliëndosering

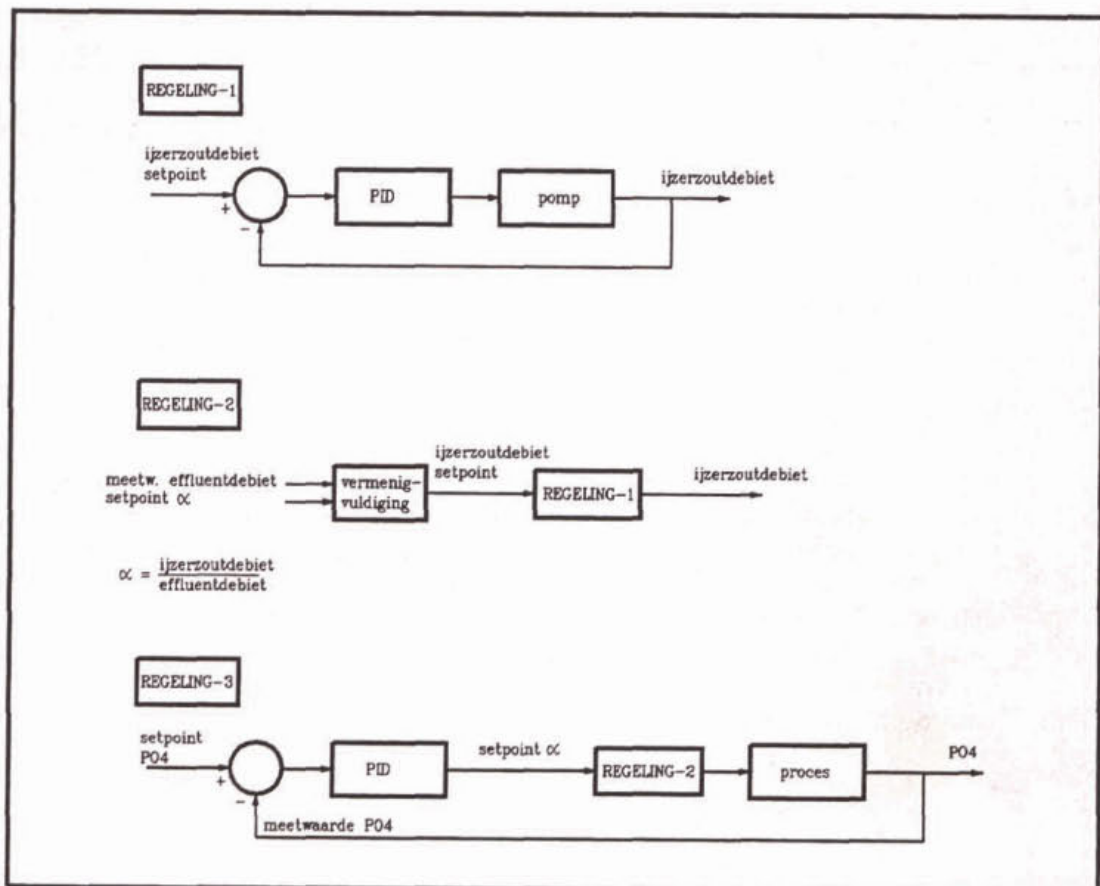
De dosering van chemicaliën ten behoeve van chemische fosfaatverwijdering kan op de volgende manieren gerealiseerd worden.

Regeling 1: Er wordt een vast doseerdebiet ingesteld.

Regeling 2: Het gewenste doseerdebiet wordt bepaald door het gemeten influentdebiet te vermenigvuldigen met een vermenigvuldigingsfactor. Regeling 2 wordt vaak uitgebreid met een uitzonderingsregel indien er sprake is van enige uren RWA. In dat geval wordt de dosering vermindert.

Regeling 3: De vermenigvuldigingsfactor uit regeling 2 wordt bepaald door de fosfaatconcentratie in het effluent.

Deze regelingen zijn in figuur 15 weergegeven.



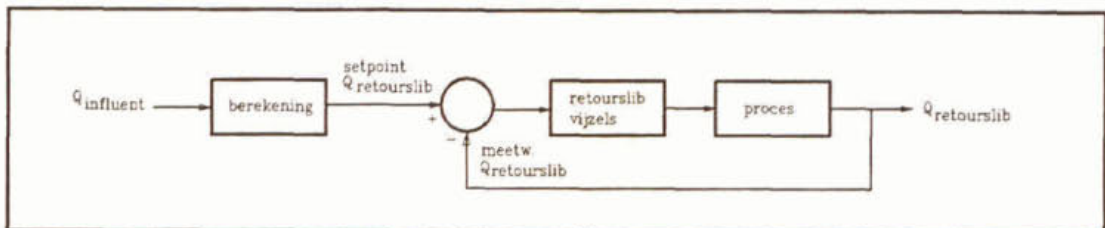
Figuur 15. Regelingen voor ijzerzoutdosering. Regeling 2 is vaak uitgebreid met een uitzonderingsregel: na enige tijd RWA wordt de dosering vermindert of gestopt.

3.5.1 Knelpunten

De regeling met een vast doseerdebiet wordt als te grof ervaren. Het blijkt dat regeling op basis van het debiet in de praktijk goede resultaten oplevert. Een regeling die daarnaast ook rekening houdt met de fosfaatconcentratie wordt door enkele beheerders als onnodig complex ervaren.

3.6 **Besturing van het retourslibdebiet**

Bij het overgrote deel van de RWZI's wordt het retourslibdebiet geregeld door middel van een feedforward-sigitaal van de influentdebietmeting. Het influentdebiet is evenredig met het retourslibdebiet. Er vindt in enkele gevallen terugkoppeling plaats met een meting van het retourslibdebiet. Dit is weergegeven in figuur 16. In een aantal gevallen heeft het retourslibdebiet een vaste waarde, die kan worden verlaagd indien de gemeten slibspiegel in de nabezinker te hoog is. Beide besturingsmethoden worden als goed beoordeeld.



Figuur 16. Regeling van het retourslibdebiet met terugkoppeling.

3.7 **Besturing van het spuislibdebiet**

De spuislibpompen worden veelal bedreven door middel van een tijd klokregeling. De instellingen van deze regeling worden frequent bijgesteld op grond van handmatig uitgevoerde metingen van het drogestofgehalte en ervaringskennis. In een enkel geval wordt het gewenste spuislibdebiet berekend op basis van een on-line drogestofmeting.

De handmatige methode wordt doorgaans goed beoordeeld. Een knelpunt is dat de drogestofmeting een momentopname is. Gedurende de dag varieert het drogestofgehalte in het beluchttingsbassin, doordat de slibhoeveelheid in de nabezinker varieert. Daarom wordt in de berekening van het gewenste spuislibdebiet ook ervaringskennis omtrent de slibproductie betrokken.

Hetzelfde knelpunt wordt gesignaleerd bij toepassing van on-line drogestofmeters. Dit knelpunt zou gedeeltelijk op te lossen zijn door in dat geval een gemiddelde waarde als regelsignaal te gebruiken.

4 RESULTATEN VAN HET LITERATUURONDERZOEK

4.1 Inleiding

Het toepassen van regelingen heeft diverse doelstellingen. Eén daarvan is het garanderen van een goede effluentkwaliteit onder variërende procesomstandigheden. Dat dit in de praktijk niet altijd eenvoudig is, blijkt uit het onderzoek van Berthouex *et al* (1989) door de gegevens van vijftien goed bedreven RWZI's te analyseren. Het bleek dat gedurende negen procent van de tijd sprake was van een verstoorde bedrijfsvoering. In 90% van deze tijd was hiervoor een oorzaak aan te wijzen. In 60% van deze gevallen zou deze storing in een vroeg stadium detecteerbaar zijn en had dus vroegtijdig kunnen worden ingegrepen. Hiermee wordt het belang van procesbewaking en beslissingsondersteunende systemen geschetst, die het mogelijk maken snel te reageren op afwijkende omstandigheden. Alle genoemde percentages in aanmerking genomen leidt dit tot een verbeterde effluentkwaliteit in 5 % van de tijd, met name gedurende procesverstoringen. In zijn algemeenheid stellen Olsson *et al* (1989) dat de zuiveringsresultaten van RWZI's verre van het maximaal haalbare zijn. Harremoës *et al* (1993) en Alex *et al* (1994) geven daarvoor de volgende redenen:

- a. Het ontwerp van zuiveringsinrichtingen is gebaseerd op de analyse van een stationaire toestand, terwijl het proces onderhevig is aan grote variaties. Bovendien worden regeltechniek en automatisering niet in voldoende mate beschouwd gedurende het ontwerpproces.
- b. De beschikbare simulatiemodellen zijn niet in staat alle ontwerpconfiguraties te simuleren.
- c. De betreffende biologische processen vertonen niet-lineariteiten, zijn tijdsafhankelijk en vertonen onderlinge koppelingen tussen de procesvariabelen. Dit bemoeilijkt het ontwerpen van effectieve regelingen.
- d. Variërende procesomstandigheden kunnen in de praktijk tot verstoringen leiden. Dit tracht men veelal te voorkomen door in het ontwerp extra volume te installeren. In de toekomst zou door het gebruik van relevante procesregelingen op deze volumes bespaard kunnen worden.

Om relevante procesregelingen te ontwikkelen moeten volgens Alex *et al* (1994) de volgende ontwikkelingen plaatsvinden:

- a. Geïntegreerde modellering van de RWZI en de besturingsmethode.
- b. Vergelijking van regelstrategieën door middel van simulatie om tot een optimale keuze te komen.
- c. Het gebruik maken van fuzzy control technieken.
- d. Een diepgaande vergelijking van nieuwe strategieën en regelprincipes, de ontwikkeling van regelingen op hoger niveau (supervisory control), en het gebruik maken van optimaliseringsmethoden.

Voor de Nederlandse situatie geldt dat de activiteiten genoemd onder punt a en punt b inmiddels steeds vaker plaatsvinden. De onderhavige studie vormt een eerste stap met betrekking tot punt c en kan een stimulans zijn om de andere punten genoemd onder punt d) verder te ontwikkelen.

In de volgende paragrafen wordt verslag gedaan van een literatuuronderzoek naar toepassingen van fuzzy control, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de volgende typen toepassingen:

- regeling van de beluchting en de interne recirculatie;
- regeling van de dosering van chemicaliën;
- modellering en regeling van slibstromen;
- regeling van meer deelprocessen;
- vroegtijdige detectie van problemen en expertsystemen.

In een aantal gevallen hebben de besproken referenties niet direct betrekking op het actiefslibstelsysteem, maar is de gevolgde methode toch vermeldenswaardig. In tabel 3 in paragraaf 4.7 wordt een vergelijkend overzicht gepresenteerd van de onderzochte toepassingen.

4.2 Regeling van de beluchting en de interne recirculatie

Er zijn verschillende fuzzy beluchttingsregelingen ontwikkeld en getest in simulatiemodellen en op laboratorium- en semitechnische schaal. Een eenvoudige fuzzy zuurstofregelaar, die op basis van de zuurstofconcentratie de beluchting regelt, is ontwikkeld en getest door middel van een simulatiemodel van RWZI Beemster. In vergelijking met een PI(D)-regeling werd het energieverbruik gereduceerd met 9%. Ook zou in de praktijk slijtage beter voorkomen kunnen worden doordat er minder geschakeld werd. De fuzzy regelaar had eveneens een betere effluentkwaliteit tot gevolg. In de praktijk is een toepassing in Tampere, Finland, gerapporteerd (Salo *et al*, 1997).

Naast de bovenbeschreven monovariabele regeling zijn ook fuzzy multivariabele regelingen en supervisierregelingen voor de beluchting ontwikkeld. Hiervan zijn twee toepassingen in Japan gerapporteerd. De eisen aan regelingen zijn daar niet geheel vergelijkbaar met die voor de Nederlandse situatie, aangezien in Japan het huishoudelijk afvalwater zeer geconcentreerd is. De beschreven multivariabele regelaar is een fuzzy regelaar, die de gewenste tijdsduur van de onbeluchte na de beluchte periode bepaalt alsmede de gewenste beluchttingsintensiteit van het betreffende intermitterende beluchtingssysteem. Invoervariabelen zijn de ammoniumconcentratie, de zuurstofconcentratie, de redoxpotentiaal en de pH (Aoi *et al*, 1992). De regelaar wordt vergeleken met een conventionele regeling waarbij op grond van de ammoniumconcentratie al dan niet de zuurstofregeling in werking treedt. Deze regeling is op semitechnische schaal getest. De auteurs rapporteren een verbeterde stikstofverwijdering. Er wordt echter alleen een duidelijke vergelijking gemaakt van ammoniumgehalten en niet van nitraatgehalten. De multivariabele fuzzy regeling, ontwikkeld door Hamamoto *et al* (1997), bepaalt eveneens de beluchte en onbeluchte periode bij intermitterende beluchting. Ingangsvariabelen zijn de redoxpotentiaal, de zuurstofconcentratie en het niveau in de reactor. De regeling is op laboratoriumschaal getest. In vergelijking met experimenten waarbij een vaste beluchtingstijd werd gehanteerd, wordt het verwijderingsrendement van stikstof verhoogd van 90% tot 96%. Hoewel dit een goed resultaat is, kan niet geconcludeerd worden dat juist de toegepaste regeltechniek tot de verbetering leidt. Bij het experiment met de fuzzy regelaar was namelijk sprake van een verhoogde temperatuur.

De fuzzy supervisieregeling die is ontwikkeld en getest door Alex *et al* (1994) bepaalt de gewenste beluchtingsintensiteit en het gewenste debiet van de interne recirculatie. Deze regeling is daarbij vergeleken met een conventionele regeling door middel van simulatie. De conventionele regeling bestaat uit een stapsgewijze verhoging van het recirculatie-debiet op grond van "scherpe" beslissingen inzake de ammonium - en nitraatconcentraties. Op dezelfde manier wordt het aan- en afschakelen van de beluchting bepaald door "scherpe" over- en onderschrijdingen van setpoints van ammonium en nitraat. De nieuw ontwikkelde regeling bestaat uit twee fuzzy regelaars. De eerste regelaar bepaalt de zuurstofsetpoints voor twee compartimenten op basis van de verhouding ammonium/nitraat. De tweede regelaar berekent op niet-lineaire wijze de interne recirculatiefactor als functie van de nitraatconcentratie. Een belangrijk verschil tussen de vergeleken regelingen is de regelstrategie: de conventionele regeling neemt niet de verhouding ammonium/nitraat in beschouwing, de invoervariabelen zijn echter wel gelijk. Beide regelingen zijn getest door middel van verschillende simulaties van een laagbelaste RWZI, die gemakkelijk de gestelde effluenteisen behaalt. In vergelijking met de conventionele regeling bereikt de fuzzy regeling een reductie van totaal anorganisch stikstof met 7% en een reductie in het energieverbruik met 9%.

Het is voorstelbaar dat bij beluchting door middel van zuivere zuurstof de stabiliteit van de regeling een extra belangrijke factor is. Yin en Stenstrom (1996) ontwikkelden een fuzzy regeling voor een dergelijk beluchtingssysteem. Er zijn vier regelstrategieën getest in een simulatiemodel. In alle gevallen vertoonden de zuurstoftoevoer en de zuurstofconcentratie minder variatie in vergelijking met een conventionele PI(D)-regeling. Bovendien werd het energieverbruik gereduceerd. Het positieve effect van een feedforward-sigitaal van het influentdebiet wordt eveneens in deze studie aangetoond, doordat de regeling waarin dit werd toegepast het laagste energieverbruik had en het meest stabiel was.

4.3 Dosering van chemicaliën

Chemische fosfaatverwijdering

Het flocculatieproces lijkt bij uitstek geschikt voor het toepassen van een fuzzy regeling, omdat hierop veel factoren van invloed zijn waarvan geen modelmatige beschrijving voorhanden is. In de praktijk worden de meeste factoren niet beschouwd in de regeling en worden voor chemische fosfaatverwijdering eenvoudige regelstrategieën toegepast op basis van het debiet en/of de fosfaatconcentratie. Gebhardt en Maschlanka (1996) hebben een dergelijke strategie gerealiseerd door middel van een fuzzy regelaar. Er is een uitzonderingsregel opgesteld voor hoge debieten, waarbij een zekere vertragingstijd is opgenomen. De regeling blijkt in een simulatiemodel goed te functioneren. Er is geen vergelijking gemaakt met andere regelstrategieën of andere regeltechnieken.

Slibontwatering

Fuzzy control is in potentie goed geschikt voor de besturing van de slibontwatering, omdat hiervan geen mathematisch model beschikbaar is. Dit is aangetoond door Froese *et al* (1994), die een fuzzy regelaar realiseerden voor de dosering van polymeer. Het ontwerp van de regelaar kostte twee manweken, inclusief de integratie van de regelaar in het bestaande besturingssysteem. Met name door de reductie van energiekosten voor de slibdroging, werd deze investering binnen drie maanden terugverdiend. Met dit artikel wordt vooral aangetoond dat het eenvoudig is een kostenreductie te realiseren door middel van regelingen.

4.4 Modellingering en regeling van slibstromen

De optimale regelstrategie voor het retourslibbedrijf is bepaald door Tsai *et al*, (1996) met behulp van fuzzy modelleringstechnieken op basis van een groot aantal gegevens. In tegenstelling tot de regelstrategie die meestal gehanteerd wordt, bleek de concentratie zwevende stof in het effluent het laagst te zijn indien in bepaalde situaties het retourslibdebiet *omgekeerd evenredig* was met het influentdebiet. Deze strategie is eerst door middel van simulatie en later op semitechnische schaal getest. Hieruit blijkt dat de modelvoorspellingen vergelijkbaar zijn met de experimentele uitkomsten. De gevolgde regelstrategie is vergeleken met een regeling waarbij het gewenste retourslibdebiet wordt bepaald op basis van de slibbelasting: aangenomen wordt dat hierbij gestreefd wordt naar een gelijkmatige slibbelasting. Het blijkt dat de regelstrategie gebaseerd op de geëxtraheerde fuzzy kennisregels beter reageert op piekaanvoer dan de regelstrategie op basis van de slibbelasting. De uitgevoerde studie geeft derhalve aan dat het mogelijk is doeltreffende kennisregels te extraheren op basis van beschikbare data. Voor de Nederlandse situatie zou de gevolgde regelstrategie uiteraard gevalideerd moeten worden door middel van simulatie en praktijkonderzoek.

4.5 Regeling van meer deelprocessen

De specifieke voordelen van fuzzy control komen over het algemeen goed tot uitdrukking bij toepassingen op hoger niveau, als fuzzy supervisieregelingen. Hiervan wordt in de literatuur een aantal voorbeelden gegeven. Een gedeelte van deze voorbeelden is al aan de orde geweest in de voorgaande paragrafen voor de regeling van de afzonderlijke deelprocessen. In deze paragraaf worden de voorbeelden besproken waarbij meer deelprocessen tegelijkertijd geregeld worden.

Een supervisieregeling voor het actiefslibstelsysteem op basis van twintig kennisregels is beschreven door Tong *et al* (1980). Door middel van fuzzy inferentie worden setpoints gewijzigd van de zuurstofconcentratie, de slibrecirculatiefactor en het spuislibdebiet. Het besturingssysteem is door middel van simulatie getest. Het feit dat geen nitraatconcentratie wordt gehanteerd, geeft aan dat het denitrificatieproces nog niet in dit systeem is opgenomen. Aangetoond wordt dat met slechts twintig kennisregels al een overkoepelende regeling gerealiseerd kan worden voor het gehele actiefslibstelsysteem. Op vergelijkbare wijze ontwikkelden Couillard en Zhu (1992) een regeling die op basis van acht ingangsvARIABLEN het zuurstofsetpoint, de slibrecirculatiefactor en het gewenste spuislibdebiet bepaalt.

In een aantal fuzzy supervisieregelingen wordt door middel van een niet-fuzzy modelberekening een schatting gemaakt van microbiologische toestandsvariabelen. Deze berekening dient als ingangsvARIABLE voor de fuzzy regelaar. De fuzzy regelaar stelt vervolgens de setpoints voor regelaars op lager niveau vast. Dit principe is toegepast voor de stikstofverwijdering van geconcentreerde afvalwaterstromen door Shaffranietz en Rock (1994). De ingangsvARIABLEN van de regeling zijn het influentdebiet, de respiratiesnelheid, het CO₂-gehalte in de doorgeblazen lucht en het doseerdebiet ten behoeve van de pH-correctie. Op basis van deze metingen en modelmatig berekende microbiologische parameters bepaalt een fuzzy regelaar het gewenste influentdebiet en de gewenste pH-waarde. Het systeem is op laboratoriumschaal getest en blijkt goed te reageren op grote variaties in de belasting.

Voor de regeling van het aanvoerregime van een gecombineerd anaëroob/aëroob systeem wordt gebruik gemaakt van een fuzzy supervisieregeling (Marsili-Libelli *et al*, 1994). De ingangsvariabelen zijn partiële waterstof- en koolmonoxidedruk en de concentratie propionaat in het anaërobe systeem, alsmede een schatting van de biologische activiteit. Door middel van fuzzy inferentie wordt het gewenste influentdebiet naar de anaërobe reactor, het aërobe systeem en een buffertank berekend.

Op praktijkschaal zijn enkele regelingen die gebruik maken van fuzzy supervisieregeling gerealiseerd (Oswald, 1995; Cohen, 1996). Voor de regeling van de aanvoer naar een aërobe lagune voor industrieel afvalwater worden een modelberekening, een neurale netwerk en een fuzzy regeling in één regelsysteem gecombineerd (Cohen, 1996). Door het toepassen van deze geavanceerde regelstructuur wordt het aantal benodigde sensoren gereduceerd.

Ook zeer simpele zuiveringssystemen, waarbij de aanschaf van on-line apparatuur niet kosteneffectief is, worden door middel van fuzzy control technieken geoptimaliseerd. Een voorbeeld hiervan geven Bongards *et al* (1996), die een regeling ontwikkelden voor de beluchting van een zeer kleine zuiveringsinrichting van 300 i.e. met een volume van 75 m³. De beluchting van het beschouwde systeem vindt intermitterend plaats. Tijdens de beluchte fase wordt de zuurstofinbreng geregeld op basis van een zuurstofmeting. De ontwikkelde regelaar is een PI-regelaar, die uitgebreid is met een fuzzy supervisie regelaar, die de P- en de I-constanten aanpast. De reden hiervoor is dat de optimale tijdconstante van de PI-regelaar varieert van 5 tot 25 minuten, afhankelijk van de aanvoer, de concentratie, de toestand van de biomassa en de temperatuur. Door middel van simulatie is aangetoond dat met deze fuzzy adaptieve PI-regelaar de gewenste waarde voor zuurstof sneller bereikt wordt. In de praktijk reageert de fuzzy adaptieve regelaar goed op variaties in belastingen; er heeft echter geen vergelijking met een conventionele PI-regelaar plaatsgevonden.

4.6 Vroegtijdige detectie van problemen en beslissingsondersteunende systemen

Fuzzy control technieken kunnen behalve bij regelsystemen ook gebruikt worden bij de ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen. Een dergelijk beslissingsondersteunend systeem, ontwikkeld door Berthouex *et al* (1989), kan het zuiveringsproces beoordelen: goed, normaal of verstoord. Daarnaast geeft het systeem aanwijzingen voor de bedrijfsvoering. De gepresenteerde aanwijzingen betreffen met name de beheersing van het slibgehalte en het slibontwateringssysteem. Het systeem maakt gebruik van kennisregels en vage verzamelingen, die zijn vastgesteld met behulp van statistische technieken.

Het detecteren en voorkomen van verslechterde bezinkingseigenschappen leent zich bij uitstek voor een fuzzy benaderingswijze, omdat hier nog weinig modelmatige kennis over beschikbaar is. Verscheidene pogingen zijn gedaan om dit probleem door middel van procesbewaking en beslissingsondersteunende systemen voortijdig te onderkennen. Een nieuwe methode om een verslechterde slibkwaliteit vroegtijdig te ontdekken is ontwikkeld door Bergh en Olsson (1996). Zij stellen dat de vlokstructuur van het slib slechts langzaam verandert en daarbij niet direct leidt tot verhoogde concentraties zwevende stof in het effluent. In de beschreven methode wordt gebruik gemaakt van het feit dat bij de verhoging van het retourslibdebiet een kortdurende piek van zwevende stof in het effluent optreedt,

indien de bezinkingseigenschappen van het slib verslechterd zijn. Daarom wordt met opzet regelmatig het retourlibdebit iets verhoogd. Tegelijkertijd worden on-line het debit en het zwevendestofgehalte van het effluent gemeten en geïnterpreteerd. Deze interpretatie leidt al dan niet tot een waarschuwingssignaal. De methode is getest met gegevens van een bestaande RWZI. Het bleek dat bij iedere waargenomen troebeling van het effluent een paar uur later een werkelijke procesverstoring optrad. In vergelijking met handmatige interpretatie vond door middel van de on-line interpretatie vaker een vroegtijdige signalering plaats. Bergh (1996) noemt als aanbeveling dat verbeteringen mogelijk zijn als bij de interpretatie van de signalen gebruik wordt gemaakt van fuzzy control. Een knelpunt is mogelijk dat bij deze methode weliswaar een procesverstoring op korte termijn kan worden voorspeld, maar dat men daarmee nog niet het probleem van een verslechterde slibbezinking heeft opgelost. Desalniettemin biedt de methode voldoende aanknopingspunten om verder uit te werken.

In vergelijking met de bovenbeschreven methoden zouden on-line metingen van het microscopisch slibbeeld het lichtslibprobleem mogelijk eerder detecteren. Het signaal afkomstig van een onderwatermicroscoop wordt gebruikt in een fuzzy regeling, ontwikkeld door Watanabe *et al* (1993). De regeling voorspelt het risico dat licht slib optreedt en geeft daarbij suggesties voor mogelijke maatregelen. Er wordt nog geen melding gedaan van praktijktesten.

Het voorkómen van lichtslib is minstens zo belangrijk als het vroegtijdig signaleren van een lichtslibprobleem. Ook op dit gebied wordt gebruik gemaakt van fuzzy technieken (Geselbracht *et al*, 1988). Een fuzzy expertsysteem is ontwikkeld om het ontwerp van actiefslibsystemen en de influentkarakteristieken te beoordelen met betrekking tot de kans op licht slib. Het expertsysteem is uitgebreid getest door de uitkomsten te vergelijken met voorspellingen van procesexperts, die niet op de hoogte waren van de toegepaste kennisregels. Beide voorspellingen bleken goed overeen te komen. De volgende stap is het toetsen van de voorspellingen in de praktijk.

4.7 Samenvatting en conclusies van het literatuuronderzoek

Het literatuuronderzoek geeft aan dat er een aantal interessante oplossingsrichtingen is voor regelingen van het actiefslibstelsel, waarbij fuzzy control op verschillende manieren wordt toegepast. Dit levert in veel gevallen zowel een verbeterde effluentkwaliteit op als een reductie van energie- of chemicaliënverbruik. Het effect van monovariabele directe fuzzy regelingen op de effluentkwaliteit en het energieverbruik mag niet worden onderschat. De specifieke kracht van fuzzy control ligt echter meer op het gebied van fuzzy supervisieregelingen en multivariabele regelingen.

In veel gevallen heeft in de onderzoeken geen grondige vergelijking plaatsgevonden met conventionele regelingen. De toepassing van fuzzy supervisieregelingen heeft echter veelal geen conventioneel equivalent, of het kost onevenredig veel inspanningen een vergelijkbare regeling te realiseren. Daarom is een vergelijking in dit geval niet altijd zinvol. Veel regelingen zijn door middel van simulaties getest. Het is van belang dat regelingen daarna ook in de praktijk worden getest. In een aantal gevallen heeft dit plaatsgevonden.

Fuzzy control wordt veelvuldig toegepast in combinatie met PI(D)-regelaars. Fuzzy regelaars bepalen bijvoorbeeld de setpoints voor de zuurstofconcentratie, het recirculatie-debiet of een doseringsfactor. In één geval is een fuzzy supervisieregeling gerapporteerd die de PI(D)-constanten van een zuurstofregelaar aanpast. In een aantal gevallen wordt fuzzy control gecombineerd met andere geavanceerde regeltechnieken, waarbij bijvoorbeeld de toestandsvariabelen geschat worden met behulp van modelberekeningen, of waarbij een neurale netwerk als vervanging dient voor een kostbare sensor. In één van deze gevallen wordt een dergelijk geavanceerd regelsysteem toegepast op praktijkschaal (Cohen *et al*, 1996).

De ontwikkelingen op het gebied van vroegtijdige detectie en de voorspelling van lichtslibproblematiek verdienen nauwlettende aandacht. Op dit gebied zouden fuzzy modelleringstechnieken en fuzzy control een belangrijke rol kunnen gaan spelen. Ook blijkt uit de literatuur dat fuzzy modelleringstechnieken en fuzzy control kunnen worden toegepast voor de optimalisatie van regelstrategieën voor de besturing van slibstromen en voor overkoepelende regelingen die de regelkringen van verschillende deelprocessen koppelen. De slibontwatering, die buiten het kader van de onderhavige studie valt, is een procesonderdeel waarvan uit de literatuur blijkt dat op relatief eenvoudige wijze door toepassing van fuzzy control veel energiekosten bespaard kunnen worden.

Op de volgende drie bladzijden wordt in tabel 3 een vergelijkend overzicht van de bestudeerde literatuur gepresenteerd.

Tabel 3: Overzicht uit de literatuurstudie

Type toepassing	Type regeling	Globale regelstrategie	Aard van het onderzoek, type afvalwater	Resultaten	Vergelijking ¹	Referentie
Regeling van de beluchting	Monovariabele directe fuzzy regelaar	Op basis van de zuurstofconcentratie wordt de beluchting aangepast.	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Verbeterde stikstofverwijdering, gereduceerd energieverbruik, stabielere zuurstofconcentratie, minder schakelingen van de beluchters	Met PI-regelaar (+)	US Beemster
	Fuzzy regelaar voor setpointbepaling	Ammonium, zuurstof, redoxpotential en pH bepalen de beluchting en het luchtdebiet; de beluchters worden op basis daarvan PI(D)-geregeld	Simulatiestudie gevolgd door onderzoek op semi-technische schaal, geconcentreerd huishoudelijk afvalwater (Japan)	Verbeterde stikstofverwijdering, echter geen duidelijke gegevens over nitraat gepresenteerd	Met geschakelde supervisie-regeling, die minder metingen in beschouwing neemt (+)	Aoi <i>et al.</i> , 1992
	Multivariabele directe fuzzy regelaar	Redoxpotential, pH, zuurstof en waterniveau bepalen de beluchting en onbeluchte periode en de beluchtingsintensiteit	Laboratorium-, semitechnisch en praktisch schaalonderzoek, geconcentreerd huishoudelijk afvalwater (Japan)	Verbeterde stikstofverwijdering	Met andere regelstrategieën die minder metingen in beschouwing nemen en bij een andere temperatuur getest zijn (±)	Hamamoto <i>et al.</i> , 1997
	Combinatie van verschillende fuzzy regelaars: een feedforward signaal is in de regeling opgenomen	Regeling voor beluchting met zuivere zuurstof, waarbij het influentdebiet, de zuiverheid van het zuurstofgas en de zuurstofconcentratie in het slibwatermengsel de beluchtingsintensiteit bepalen	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Stabiele zuurstofconcentratie, goede reactie op piekaanvoer, gereduceerd energieverbruik	Met PI(D)-regelingen die niet duidelijk beschreven worden (±)	Yin en Stenstrom, 1996
	Fuzzy supervisie-regeling voor PI(D)-instellingen	Op basis van de zuurstofmeting bepaalt de fuzzy regelaar de gewenste bijstellingen van de PI(D)-regelaar die de beluchters aanstuurt	Simulatiestudie en praktisch schaalonderzoek aan een RWZI van 300 i.e., huishoudelijk afvalwater	Snellere reactie op wijzigingen in de aanvoer	- Met conventionele PI(D)-regeling in de simulatiestudie (+) - Geen vergelijking op praktisch schaal	Bongards <i>et al.</i> , 1996
Regeling van de beluchting en de interne recirculatie	Multivariabele fuzzy regeling	Ammonium en nitraat bepalen de zuurstofsets en de interne recirculatiefactor	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Verbeterde stikstofverwijdering, gereduceerd energieverbruik	Met PI(D)-regelaar in combinatie met supervisie-regelaar op basis van klassieke logica (+)	Alex en Tschepeski, 1994

* 1 +: er is een representatieve vergelijking gemaakt
±: de vergelijking is weinig of niet representatief

* 2 Hier wordt geen fuzzy control toegepast, maar alleen gesuggereerd dat dit mogelijk verdere verbeteringen oplevert

Type toepassing	Type regeling	Globale regelstrategie	Aard van het onderzoek, type afvalwater	Resultaten	Vergelijking ¹	Referentie
Dosering van chemica- lijën	Monovariabele directe fuzzy regelaar	Besturing van chemische fosfaat- verwijdering. Influentdebiet be- paalt doseerdebiet	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Lage fosfaatconcentratie in effluent	Geen vergelijking	Gebhardt en Maschanka, 1996
	Multivariabele fuzzy regeling	Besturing van de slibontwatering. Geleidbaarheid, troebeling en de dosering in het verleden bepalen de actuele polymeedosering	Praktijktoepassing voor slib- ontwatering van een penicilli- nefabriek	Gereduceerd energieverbruik voor slibdwing door de verbe- terde ontwatering, met een terugverdiend van drie maan- den	Geen vergelijking	Froese et al
Besturing van de re- tourstroom	Fuzzy model en multi- variabele fuzzy regelaar (waarschijnlijk op laag niveau)	Op basis van het influentdebiet en de zwevendestofconcentratie in het effluent wordt het gewens- te retourstroomdebiet bepaald	Fuzzy model opstellen door kennisregels te extraheren, op basis daarvan een regeling ontwerpen en deze testen door middel van simulatie en semitechnisch onderzoek	Stabiele lage zwevendestof- concentratie in het effluent en retourstroomdebiet op basis van de Tsaï et al, 1996	Met een regelstrategie waarin het retourstroomdebiet wordt bepaald (±)	Tsaï et al, 1996
Besturing van meer deelprocessen	Fuzzy regeling voor set- pointbepaling	Negen invoervariabelen, waar- onder off-line waarnemingen, bepalen het zuurstofsetpoint, de ratio voor het retourstroomdebiet en het gewenste spuislibdebiet	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Het is mogelijk door middel van een redelijk eenvoudige super- visieregeling (tweintig kennisre- gels) de verschillende deelpro- cessen gekoppeld te besturen	Geen vergelijking; dit zou echter ook moeilijk te realiseren zijn (-)	Tong et al, 1980
	Fuzzy regeling voor set- pointbepaling	Zeven invoervariabelen bepalen het zuurstofsetpoint, de ratio voor het retourstroomdebiet en het gewenste spuislibdebiet	Simulatiestudie, huishoudelijk afvalwater	Stabiele zuurstofconcentratie en slibdekkenhoogte, goede reactie op piekbelasting	Vergelijking met andere regelstra- tegie, die van vaste setpoints ge- bruik maakt (±)	Couillard en Zhu, 1992
	Fuzzy regeling voor set- pointbepaling	Influentdebiet, respiratiesnelheid, CO ₂ -gehalte en doseerdebiet bepalen de setpoints voor de zuurstofconcentratie en de pH	Laboratoriumstudie, indus- trieel afvalwater	Goede reactie op variaties in de Influentvracht	Vergelijking met regelstrategie zonder beluchtingsregeling (±)	Shaffranietz en Rock, 1994
	Fuzzy regelaar bepaalt setpoints voor lager niveau regelaars; deze regeling maakt deel uit van een model-gebaseer- de systeemstructuur	Op basis van geschatte toe- standsvariabelen bepaalt een fuzzy regelaar verschillende set- points voor het influent-, het re- tourstroom- en het spuislibdebiet	Simulatiestudie (gerappor- teerd) gevolgd door praktijk- toepassing (niet gerappor- teerd), industrieel afvalwater	Verbeterde stikstof- en CZV- verwijdering, vroegtijdige waar- schuwning bij toxische stoffen in het influent	Vergelijking met situatie zonder regeling (±)	Oswald et al, 1995

* 1 + : er is een representatieve vergelijking gemaakt

± : de vergelijking is weinig of niet representatief

* 2 Hier wordt geen fuzzy control toegepast, maar alleen gesuggereerd dat dit mogelijk verdere verbeteringen oplevert

Type toepassing	Type regeling	Globale regelstrategie	Aard van het onderzoek, type afvalwater	Resultaten	Vergelijking ¹	Referentie
Besturing van meer deelprocessen	Fuzzy parameterschatters en fuzzy supervisie-regeloor voor setpointbepaling	Regelaars maken onderdeel uit van een complex regelsysteem voor de besturing van de influenttoevoer, de beluchting en de slibstromen. Gebruik wordt gemaakt van een neurale netwerk, fuzzy parameterschatters, massabalansberekeningen en een fuzzy regelaar die het gewenste influentdebiet bepaalt	Praktijktoepassing in een laag belast afvalwater	Beschrijving van de procesregeling en de methodek waar-mee deze tot stand is gekomen. Een neurale netwerk blijkt als vervanging te kunnen dienen van een BZV-meting	Geen (-)	Cohen <i>et al</i> , 1996
Voorstelling van het systeem (geen regeling)	Fuzzy supervisie-regeling	Een fuzzy supervisie-regeling bepaalt de belastingsituatie (onder of overbelasting) en het gewenste aantal gemeten invoer variabelen	Opstellen van een regelsysteem voor de besturing van een anaërobe/afvalwater	Beschrijving van de procesregeling	Geen (-)	Marsili-Libelli <i>et al</i> , 1994
Voorstellen van licht slib	Bestuursondersteunend systeem (geen regeling)	Bestuursondersteunend systeem, dat op grond van ontwerp-betreffende influentkarakteristieken aangeeft wat de kans is op licht slib	Opstellen en testen van het systeem	De voorstellingen van het systeem komen overeen met de voorstellingen van proces-experts	(+)	Geselbracht <i>et al</i> , 1988
Bestuursondersteunend systeem (geen regeling)	Bestuursondersteunend systeem dat gebruik maakt van fuzzy kennisregels en patroonherkenning van on-line microscopisch slibonderzoek	Bestuursondersteunend systeem dat gebruik maakt van fuzzy kennisregels en patroonherkenning van on-line microscopisch slibonderzoek	Opstellen en testen van het systeem	De simulatieresultaten worden goed beoordeeld. De manier waarop deze zijn verkregen wordt echter niet beschreven, net zo min als de exacte resultaten	Geen (-)	Watanabe <i>et al</i> , 1993
Signaleringsysteem (geen regeling)	Een vroegtijdige waarschuwing over een verslechterde slibwal-tijd wordt gegeven op grond van een automatische beoordeling van de effluentkwaliteit na een tijdelijke verhoging van het re-tourslibdebiet	Een vroegtijdige waarschuwing over een verslechterde slibwal-tijd wordt gegeven op grond van een automatische beoordeling van de effluentkwaliteit na een tijdelijke verhoging van het re-tourslibdebiet	Opstellen en testen van het systeem ²	Het systeem signaleert in ver-gelijking met handmatige gegevensinterpretatie in meer gevallen vroegtijdig een procesver-storing	Met interpretatie door bedrijfsvoers-ers (+)	Bergh, 1996; Olsson, 1996

1 +: er is een representatieve vergelijking gemaakt

±: de vergelijking is weinig of niet representatief

2: Hier wordt geen fuzzy control toegepast, maar alleen gesuggereerd dat dit mogelijk verdere verbeteringen oplevert

5 AANDACHTSPUNTEN VOOR VERBETERING VAN REGELINGEN

Op grond van de uitgevoerde inventarisatie van bestaande regelingen en ervaringen van waterkwaliteitsbeheerders en het uitgevoerde literatuuronderzoek kunnen de volgende aandachtspunten opgesteld worden, waarbij nog niet de oplossingen worden besproken.

Doelstellingen van regelingen

1. Bij de beoordeling van regelingen dient de effluentkwaliteit als eerste leidraad. De uitdaging is daarbij de bestaande capaciteit van RWZI's effectief te benutten.
2. De reductie van het energieverbruik, die door toepassing van regelingen behaald kan worden, mag niet onderschat worden. Dit geldt ook voor de mogelijke beperking van slijtage van elektromechanische apparatuur en voor het chemicaliënverbruik.
3. Het is op grond van de uitgevoerde inventarisatie niet te zeggen in welke mate door de implementatie van regelingen bespaard kan worden op personele kosten. Wel is duidelijk dat de aard van de werkzaamheden verandert.

Het testen van regelingen

4. Simulatie is een essentieel onderdeel voor het testen van regelingen en het optimaliseren van instellingen. Daarnaast zullen regelingen die succesvol zijn in het simulatiemodel ook moeten worden getest in de praktijk. Verschillende regelstrategieën en regeltechnieken zullen daarbij in voldoende mate met elkaar vergeleken moeten worden onder zoveel mogelijk gelijke procescondities. Voor het vergelijken van verschillende regeltechnieken is het van belang dat zoveel mogelijk dezelfde regelstrategie wordt gevolgd.
5. Regelingen dienen bij voorkeur te worden getest in volbelaste RWZI's, omdat daar het verwachte effect op de effluentkwaliteit het grootst is. Er moet daarbij voldoende beluchtingscapaciteit zijn, die eveneens in voldoende mate regelbaar is. Dit wil niet zeggen dat regelingen bij laagbelaste RWZI's minder zinvol zijn. Hier speelt reductie van het energieverbruik een belangrijker rol.

Supervisieregelingen als vervanging voor handmatige bediening

6. De juiste keuze van setpoints heeft een belangrijke invloed op de effluentkwaliteit. Hierbij kunnen supervisieregelingen en multivariabele regelingen een belangrijke rol spelen. Zodra regelingen complexer worden, blijkt het in de praktijk vaak moeilijk de juiste instellingen te vinden. Het is belangrijk hiervoor oplossingen te vinden. Regelingen mogen niet onnodig complex zijn en dienen uiteraard eenduidig en actueel gedocumenteerd te zijn.
7. Er zijn factoren waarop bedrijfsvoerders reageren en bestaande regelingen niet altijd in voldoende mate. Het betreft hier bijvoorbeeld veranderingen in de SVI en de temperatuur, en onvoorziene lozingen uit de landbouw of de industrie. Dergelijke factoren kunnen mogelijk worden opgenomen in een supervisieregeling.

8. PI(D)-instellingen worden over het algemeen zelden aangepast. Er zijn knelpunten gesignaleerd op dit gebied. Het blijkt namelijk dat de optimale PI(D)-instellingen afhankelijk zijn van de aanvoer en de procescondities. Verbeteringen op dit punt hebben naar verwachting een belangrijk effect op het energieverbruik. Mogelijkerwijs treedt ook een verbetering van de effluentkwaliteit op.

Foutdetectie en monitoring

9. De bedrijfszekerheid, het benodigde onderhoud en de hoge kosten van sensoren wordt nog steeds als een knelpunt ervaren bij de verdere ontwikkeling van regelingen. Vooral nog wordt voorgesteld dat voor grotere RWZI's verdere ontwikkelingen op dit gebied zich moeten richten op een adequate detectie van storingen en het signaleren van de noodzaak tot ijking. Anderzijds kunnen voor kleinere RWZI's mogelijk regelingen geoptimaliseerd worden, waarbij de extra aanschaf van sensoren niet nodig is.
10. De interpretatie van on-line meetsignalen zou mogelijk gedeeltelijk kunnen worden geautomatiseerd. Hierdoor zou in hogere mate het patroon van het verloop van meetsignalen als regelsignaal kunnen dienen in plaats van de absolute meetwaarde.
11. Inzichtelijkheid is uitermate belangrijk bij de verdere ontwikkeling van regelingen. Het is van belang dat tijdens het proces goed kan worden gevolgd "wat de regeling doet". Dit is extra van belang tijdens het inregelen, wat doorgaans veel tijd kost als regelingen complexer worden.

Gewenste regelstrategieën

12. Er wordt verwacht dat de besturing van rioleringsystemen en RWZI's in toenemende mate geïntegreerd zal plaatsvinden. Eén van de mogelijkheden tot integratie is het gebruik van het influentdebiet als feedforward signaal. Hierbij dient in voldoende mate het verband tussen het debiet en het effect daarvan op het proces bekend te zijn. In theorie heeft een feedforward regeling in combinatie met een feedback regeling altijd een positief effect. Op grond van de verrichte inventarisatie is geen uitspraak te doen over de praktijkresultaten hiermee. Verwacht wordt dat het effect van een feedforward regeling groter is bij propstroomsystemen, waarbij van een grote tijdvertraging sprake is.
13. De meeste aandacht van de waterbeheerders gaat uit naar de regeling van de beluchting. Optimalisatie van dit deelproces kan zowel een verbeterde effluentkwaliteit als energiereductie opleveren. Het aandeel van de beluchting in de totale exploitatielasten van een RWZI is aanzienlijk (Beoordelingssystematiek voor RWZI's, STOWA, in voorbereiding).
14. In alle regelstrategieën is het belangrijk dat adequaat wordt gereageerd op afwijkende omstandigheden of veranderingen in de aanvoer. In het geval van de beluchtingsregeling kunnen on-line metingen van ammonium en nitraat hier in principe een nuttige bijdrage aan leveren. Hierbij moet worden aangetekend dat bestaande regelstrategieën die van deze metingen gebruik maken niet in alle gevallen beter presteren dan de basiszuurstofregeling. Het toepassen van meer complexe regelingen in de praktijk is feitelijk een proces in ontwikkeling; het is hierbij van belang dat regelstrategieën verder worden geoptimaliseerd

en in de praktijk worden getest en vergeleken.

15. De optimalisatie van regelstrategieën voor de besturing van het retourslib- en het spuislibdebiet heeft in de praktijk tweede prioriteit. Geoptimaliseerde regelstrategieën kunnen echter wel bijdragen aan het voorkomen van slibuitspoeling, hetgeen zowel door waterbeheerders als in de literatuur als wenselijke verbetering wordt aangemerkt.
16. De beheersing van de slibindex kan in strijd zijn met een effectief geregelde beluchting. De bewaking van het verloop van de SVI, eventueel gevolgd door een automatische ingreep in het proces, vormt een uiteindelijke oplossing voor dit probleem.
17. De verschillende deelprocessen beluchting, interne recirculatie, slibgroei en slibrecirculatie beïnvloeden elkaar, maar worden in de praktijk over het algemeen onafhankelijk van elkaar in afzonderlijke regelkringen gestuurd. Door deze regelkringen te koppelen in een overkoepelende supervisieregeling kan in theorie effectiever worden geregeld.

Invloed van de menselijke factor

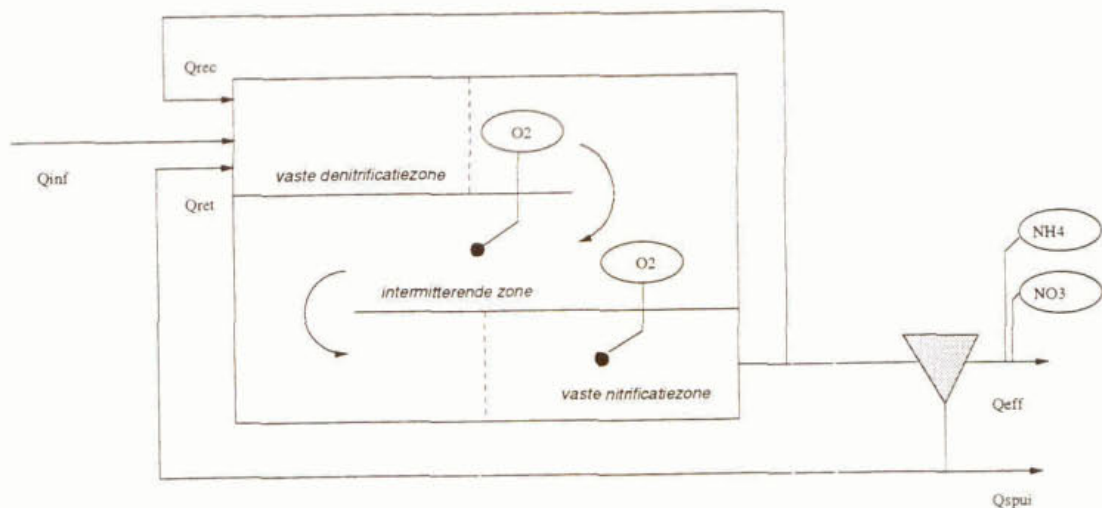
18. Door bijna alle geïnterviewde waterbeheerders wordt gesteld dat in principe de invloed van de menselijke factor van belang is voor de prestaties van de RWZI. Als er meer aandacht is voor het proces presteert de RWZI beter. Specifieke waarnemingen die een reactie vereisen, zijn verandering van temperatuur, verandering van de SVI en bijzondere lozingen. Daarnaast zou men in toenemende mate gebruik kunnen maken van informatie over het dag- en nachtritme en het optreden van RWA. Voor het ontwerp van een fuzzy regeling kan het van belang zijn in meer detail na te gaan waaruit deze aandacht precies bestaat.

6 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN VAN DE SIMULATIESTUDIE

6.1 Opzet

Er is een simulatiestudie uitgevoerd in SIMBA, met als doel op een gedetailleerd niveau inzicht te verkrijgen in de wijze waarop een fuzzy-regeling wordt ontworpen. De uitgevoerde studie heeft geleid tot het ontwerp van twee fuzzy-regelingen, die zijn vergeleken met conventionele regelingen. In de voorliggende hoofdstukken wordt daar verslag van gedaan, waarmee de eigenschappen van fuzzy control, zoals besproken in hoofdstuk 2, worden toegelicht aan de hand van een concreet voorbeeld.

De gesimuleerde RWZI is een propstroomsysteem met interne recirculatie van nitraatrijk slibwatermengsel. Het betreft een actiefslibstelsysteem voor voorbezonden afvalwater met een stikstofbelasting van 0,021 kg N/kg ds.dag en een BZV-belasting van 0,056 kg BZV/kg ds.dag. Het beluchtingsbassin is onderverdeeld in drie zones: één voordennitrificatiezone waarin nooit beluchting plaatsvindt, een zone waarin intermitterend wordt belucht gevolgd door een vaste nitrificatiezone waarin altijd wordt belucht. Het processchema is weergegeven in figuur 17.



Figuur 17. Processchema van de RWZI in het simulatiemodel.

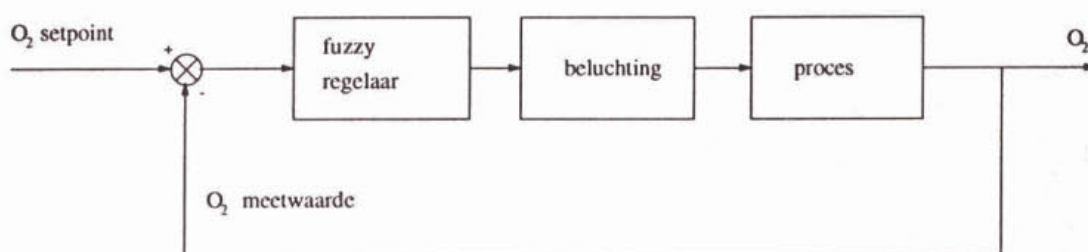
De beluchting in de intermitterende zone wordt geregeld op basis van de zuurstof- en de ammoniumconcentratie. De ammoniumconcentratie bepaalt of de beluchting aan of uit gaat door het zuurstofsetpoint een bepaalde waarde te geven of het zuurstofsetpoint op nul te zetten. Het verschil tussen de werkelijke concentratie zuurstof en het zuurstofsetpoint bepaalt de mate van beluchting, zoals dit in de basiszuurstofregeling in figuur 9 is weergegeven. Deze regeling wordt ook toegepast in de vaste nitrificatiezone. Bij het testen van de regelingen zijn twee aanvoerpatronen gehanteerd: een DWA-patroon en een RWA-patroon. Het DWA-patroon is gebaseerd op meetgegevens uit de praktijk. Bij het RWA-patroon is uitgegaan van een verhoogd debiet met dezelfde CZV-vracht als bij DWA: er is dus sprake van een verdunde aanvoer zonder verhoging van de influentvracht. Meer gedetailleerde informatie over de aanvoerpatronen en de procestechnologische gegevens van de RWZI is gegeven in bijlage 1.

6.2 Geteste regelaars

Als eerste onderdeel van de simulatiestudie is een directe fuzzy regelaar ontworpen voor de beluchting in de intermitterende zone, waarbij de volgende werkwijze is toegepast:

1. Een bestaande PI-regelaar voor de basiszuurstofregeling is geoptimaliseerd in de zin dat de P- en I-constanten zijn aangepast.
2. De geoptimaliseerde PI-regelaar is met behulp van in de regeltechniek bestaande methoden [Jager, '95] "omgezet" in een directe fuzzy regelaar, die in principe hetzelfde regelgedrag vertoont als deze PI-regelaar.
3. De verkregen directe fuzzy regelaar is geoptimaliseerd door kennisregels toe te voegen, zodat onder bepaalde omstandigheden het gedrag van de regelaar niet-lineair is.

De systeemstructuur en de kennisregels van de geoptimaliseerde fuzzy regelaar zijn respectievelijk weergegeven in figuur 18 en tabel 4. In de simulatiestudie is de geoptimaliseerde fuzzy regelaar vergeleken met de geoptimaliseerde PI-regelaar.



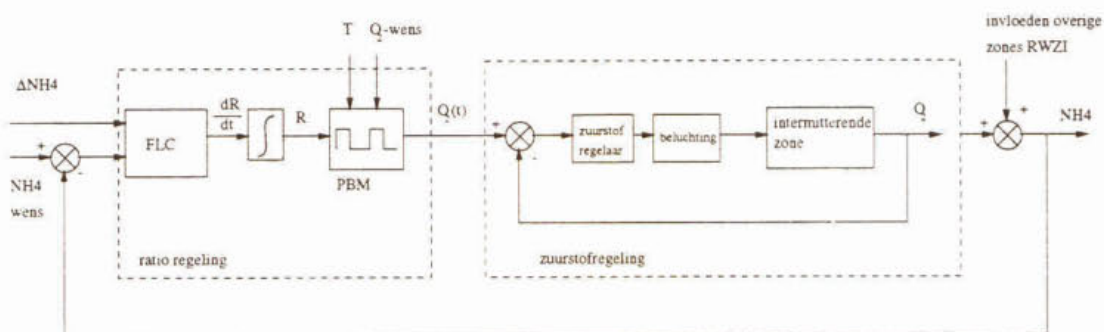
Figuur 18. Systeemstructuur van de directe fuzzy regeling.

Tabel 4: Belangrijkste kennisregels van de directe fuzzy zuurstofregelaar. Deze kennisregels worden gedurende het proces tegelijkertijd beschouwd, waarbij wordt beoordeeld in welke mate de betreffende kennisregels van toepassing zijn. Uiteindelijk leidt dit tot het bepalen van een "scherp" uitgangssignaal (zie figuur 1).

Fout in DO = afwijking tussen het setpoint en de gemeten zuurstofconcentratie.

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. ALS de fout in DO zeer negatief is,
DAN belucht niet;2. ALS de fout in DO nul is EN de integraal van de fout nul is,
DAN handhaaf de beluchting in enige mate;3. ALS de fout in DO nul is EN de integraal van de fout zeer hoog is,
DAN belucht in hoge mate;4. ALS de fout in DO zeer positief is EN de integraal van de fout nul is,
DAN belucht in gemiddelde mate;5. ALS de fout in DO zeer positief is EN de integraal van de fout extreem positief is,
DAN belucht in extreme mate. |
|--|

Als tweede onderdeel van de simulatiestudie is een fuzzy ammoniumregeling ontworpen. In deze regeling wordt de verhouding tussen de beluchte en de onbeluchte periode bepaald in het deel van de beluchte ruimte, dat intermitterend belucht wordt. De ontwikkelde ammoniumregeling wordt in dit rapport "ratio-regeling" genoemd. De ratio-regeling bepaalt de gewenste verhouding tussen de beluchte periode en de onbeluchte periode voor een bepaalde tijdsperiode T . Gedurende deze periode wordt de beluchting in principe éénmaal aan- en éénmaal uitgeschakeld. Als de ratio nul is, blijft de beluchting de gehele periode T uit; als de ratio één is, blijft de beluchting aan. De duur van de totale tijdsperiode T en de streefwaarde voor de ammoniumconcentratie zijn instelbaar. Aan het begin van iedere tijdsperiode T wordt de gewenste verandering in de ratio opnieuw bepaald op basis van de gemeten ammoniumconcentratie in het effluent en de verandering daarin. In de ratio-regeling wordt deze informatie omgezet in een gewenste waarde voor de actuele zuurstofconcentratie: het zuurstofsetpoint. De systeemstructuur en de belangrijkste kennisregels van de ratio-regeling zijn weergegeven in figuur 19 en tabel 5.



Figuur 19. Systeemstructuur van de ratio-regeling

Legenda:

NH_{4wens}	=	gewenste waarde ammoniumconcentratie
ΔNH_4	=	verandering van de ammoniumconcentratie
FLC	=	fuzzy regelaar
R	=	ratio beluchte/onbeluchte periode
T	=	beluchte + onbeluchte periode
O_{2wens}	=	gewenste zuurstofsetpoint tijdens beluchte periode
$O_{2(t)}$	=	zuurstofsetpoint op tijdstip t
O_2	=	actuele zuurstofconcentratie

Tabel 5: Belangrijkste kennisregels van de ratioregeling. Deze kennisregels worden gedurende het proces tegelijkertijd beschouwd waarbij wordt beoordeeld in welke mate de betreffende kennisregels van toepassing zijn, hetgeen leidt tot de berekening van een "scherp" uitgangssignaal (zie figuur 1).

1.	ALS de fout in NH_4 negatief is EN de verandering van NH_4 negatief is, DAN maak de ratio iets groter;
2.	ALS de fout in NH_4 negatief is EN NH_4 verandert niet, DAN maak de ratio gemiddeld groter;
3.	ALS de fout in NH_4 negatief is EN de verandering van NH_4 zeer positief, DAN maak de ratio extreem veel groter;
4.	ALS de fout in NH_4 positief is EN de verandering van NH_4 negatief is, DAN maak de ratio veel kleiner;
5.	ALS de fout in NH_4 positief is EN de verandering van NH_4 nul is, DAN maak de ratio gemiddeld kleiner;
6.	ALS de fout in NH_4 positief is EN de verandering van NH_4 zeer positief is, DAN maak de ratio iets groter.

De ratio-regeling is vergeleken met een geoptimaliseerde schakelende regeling en een geoptimaliseerde looptijd/wachttijd-regeling; in paragraaf 6.4 wordt dit nader toegelicht.

6.3 Resultaten van de directe fuzzy basiszuurstofregeling

De directe fuzzy zuurstofregelaar is vergeleken met een geoptimaliseerde PI-regelaar door de reactie op een "stapfunctie" te simuleren. Dit houdt in dat de reactie van de beluchters en de zuurstofconcentratie wordt gevolgd bij een stapsgewijze verandering in de gewenste concentratie.

In dit geval komt de stapfunctie overeen met een setpointverhoging respectievelijk setpointverlaging bij een vast debiet. De reactie daarop vertoont enige overeenkomst met de reactie op een plotselinge verandering in de zuurstofvraag door een verandering in de aanvoer.

De reactie van beide regelaars op de stapfunctie is beoordeeld op basis van de volgende criteria:

- stijgtijd: de tijd die het kost om het setpoint te bereiken na een setpointverhoging;
- daaltijd: de tijd die het kost om het setpoint te bereiken na een setpointverhoging;
- overshoot: de mate waarin de zuurstofconcentratie "doorschiet" als reactie op een setpointverhoging; de laatste reactie zal meer geleidelijk plaatsvinden;
- steady state fout: de afwijking van het setpoint in het geval er geen sprake is van verstoringen of setpointveranderingen;
- energieverbruik: het luchtdebiet dat de regelaar zou genereren;
- effluentkwaliteit: de concentratie anorganische stikstof die gerealiseerd zou worden bij toepassing als basiszuurstofregelaar in een deltaregeling.

Het gedrag en de beoordeling van de directe fuzzy - en PI-regelaar zijn weergegeven in respectievelijk figuur 20 en tabel 6. Van beide regelaars zijn de instellingen geoptimaliseerd.

Tabel 6: Vergelijking van de directe zuurstofregelaars

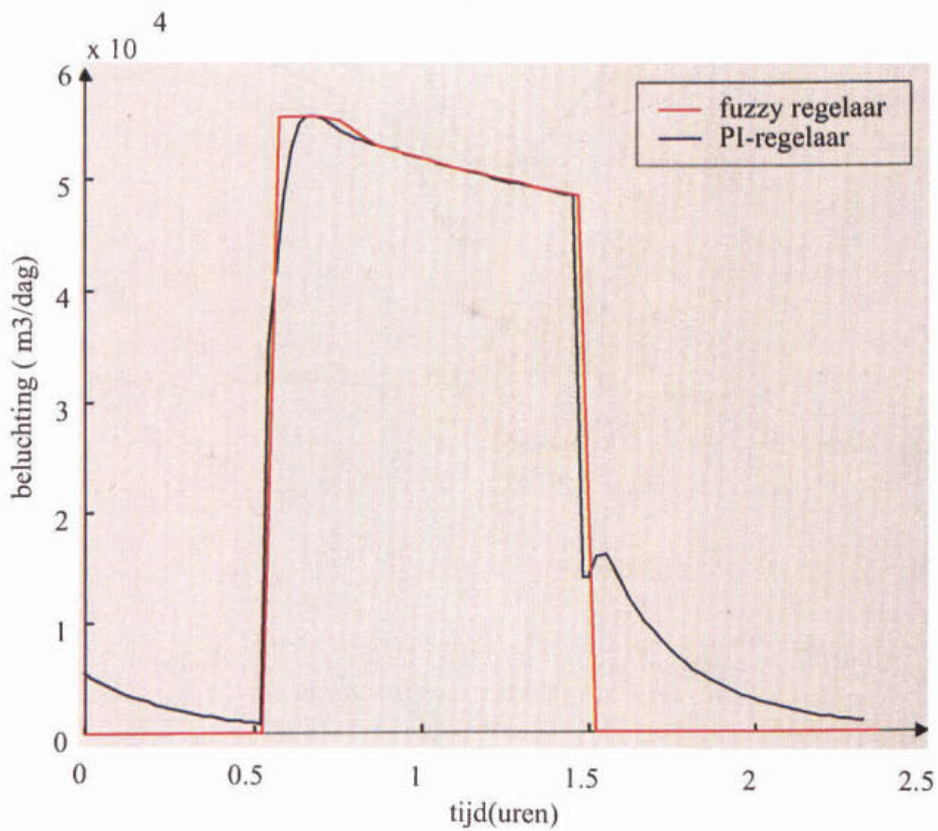
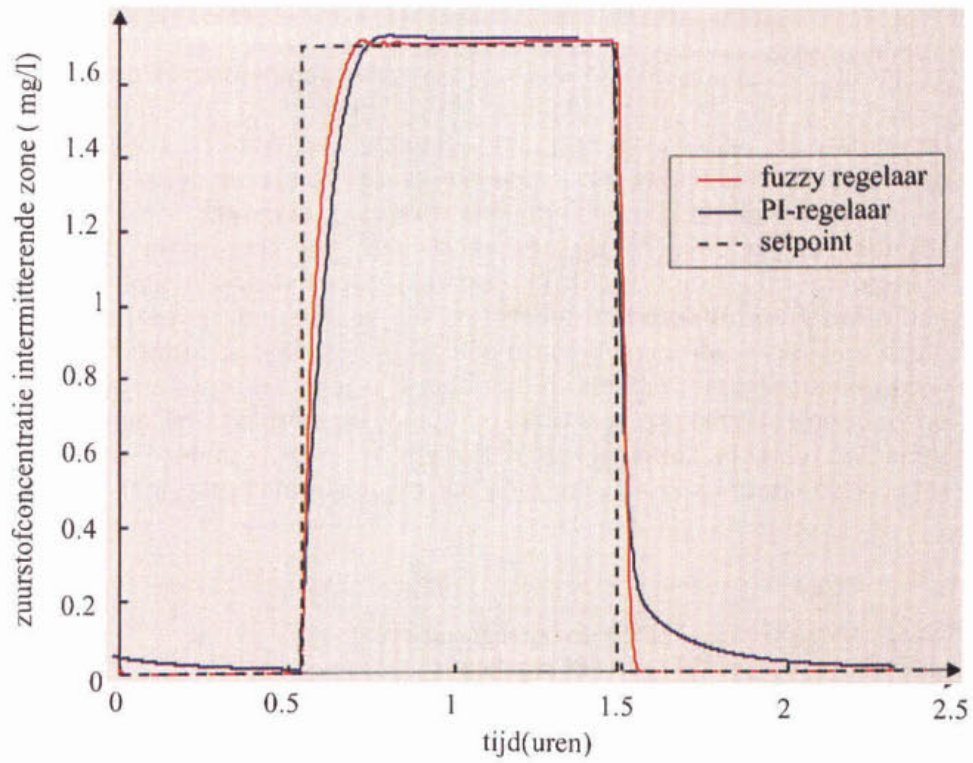
regelaar	fuzzy regelaar	PI-regelaar
Beoordelingscriteria		
Regelgedrag		
Stijgtijd (minuten)	4,5	12,5
Daaltijd (minuten)	4,5	> 30
Overschoot (mg/l, %)	0,015 (0,5%)	0,023 (1,4%)
Energieverbruik		
Luchtdebiet ^{*1)} (m ³ /dag)	9.358	10.149
Effluentkwaliteit^{*2)}		
N _{anorganisch} (mg/l)	8,9	8,9
NH ₄ (mg/l)	1,8	1,8
NO ₃ (mg/l)	7,1	7,1

*1) luchtdebiet in de intermitterende zone.

*2) volumeproportionele dagmonsters bij de gesimuleerde toepassing van de regelaar in de ratioregeling.

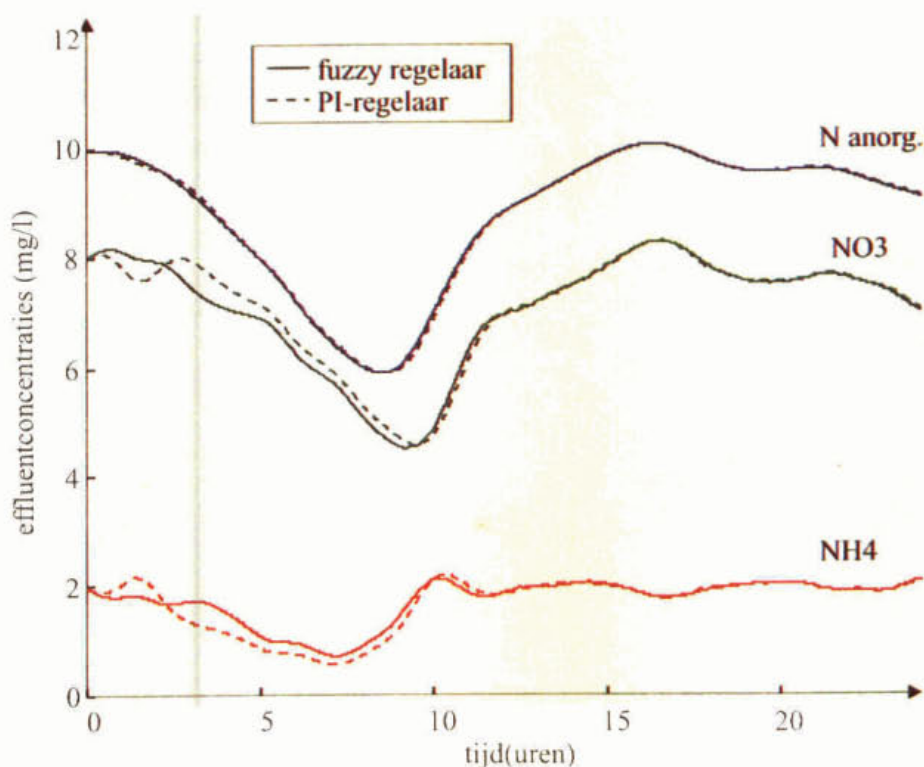
In figuur 20 en tabel 6 is te zien dat de fuzzy regelaar sneller reageert op setpointveranderingen dan de PI-regelaar. Dit wordt veroorzaakt door een kennisregel die de P-actie groter maakt bij grotere afwijkingen en die bij een setpointverlaging tot nul de beluchting direct terugregelt. Het verschil tussen beide regelaars is het meest duidelijk bij een setpointverlaging. De PI-regelaar heeft namelijk een lange daaltijd.

Dit veroorzaakt tijdelijke overbeluchting op momenten dat beluchting niet gewenst is of er sprake is van een verminderde zuurstofvraag. De gemiddelde beluchtingscapaciteit die nodig zou zijn bij de PI-regelaar is 8 procent hoger dan die bij de fuzzy regelaar. Dit wordt met name veroorzaakt door het najijlen van de PI-regelaar bij een verlaging van het zuurstofsetpoint. Het genoemde percentage geldt voor het luchtdebiet in de intermitterende zone, dat bij benadering één derde is van het totale luchtdebiet.



Figuur 20. De respons van de directe fuzzy regeling op een stapfunctie van het setpoint.
 Bovenste figuur: gedrag van de zuurstofconcentratie.
 Onderste figuur: gedrag van de beluchting.

In figuur 21 zijn de simulatieresultaten weergegeven die verkregen worden bij toepassing van de fuzzy regelaar en de PI-regelaar als zuurstofregelaar in de 'binnenste lus' van de ratio-regeling. In deze figuur is te zien dat de bovengenoemde verschillen tussen de fuzzy regelaar en de PI-regelaar weinig invloed hebben op de effluentkwaliteit. De belangrijkste reden om een directe fuzzy regelaar in deze situatie toe te passen zou een mogelijke energiereductie zijn. Aangezien de energiereductie vooral wordt veroorzaakt door het na-ijleffect van de PI-regelaar nadat het zuurstofsetpoint nul wordt, zijn er ook andere methoden denkbaar om dit te realiseren. Men zou bijvoorbeeld direct op de beluchting kunnen ingrijpen bij het beëindigen van de beluchte periode. Dergelijke methoden zijn niet onderzocht en hebben mogelijk weer andere nadelen, bijvoorbeeld bij een meer geleidelijke verlaging van de zuurstofvraag. Bovendien zou in andere situaties de hogere responsnelheid van de fuzzy regelaar meer voordelen kunnen opleveren.



Figuur 21. De simulatieresultaten bij DWA bij toepassing van de fuzzy regelaar en de PI-regelaar in de ratioregeling.

Resultaten van de ratio-regeling

Uitgevoerde vergelijkingen

De ratioregeling is vergeleken met een schakelende beluchtingsregeling waarbij de beluchte periode start bij de overschrijding van een ammoniumsetpoint en stopt bij de onderschrijding van een lager ammoniumsetpoint (zie figuur 11). Tevens heeft vergelijking plaats gevonden met een looptijd/wachttijdregeling, waarin de tijdsduur van de beluchte en onbeluchte periode een instelbare vaste waarde heeft (zie figuur 10). Tijdens de beluchte periode wordt als basiszuurstofregeling een PI-

regelaar gehanteerd, zowel in de logische als in de looptijd/wachttijdregeling. Er zijn twee dagpatronen gesimuleerd: een DWA-patroon en een RWA-patroon met twee regenbuien. Hieronder worden de resultaten gepresenteerd van de simulaties met de volgende instellingen:

Ratioregeling:

- de gewenste ammoniumconcentratie is 2 mg/l;
- het zuurstofsetpoint is 0 of 1,7 mg/l;
- de totale tijdsduur T van de beluchte en onbeluchte periode is 25 minuten; dit blijkt op grond van de uitgevoerde simulaties een goede instelling.

Schakelende regeling:

- ammoniumsetpoint beluchting aan: 2,5 mg NH₄/l;
- ammoniumsetpoint beluchting uit: 1,5 mg NH₄/l;
- het zuurstofsetpoint is 0 of 1,7 mg/l.

Looptijd/wachttijdregeling:

- tijdsduur beluchte + onbeluchte periode: 25 minuten.
- het zuurstofsetpoint is 0 of 1,7 mg/l;
- de ratio tussen de onbeluchte en beluchte periode is vastgesteld door uit te gaan van de gemiddelde ratio die is toegepast bij de ratioregeling bij DWA.

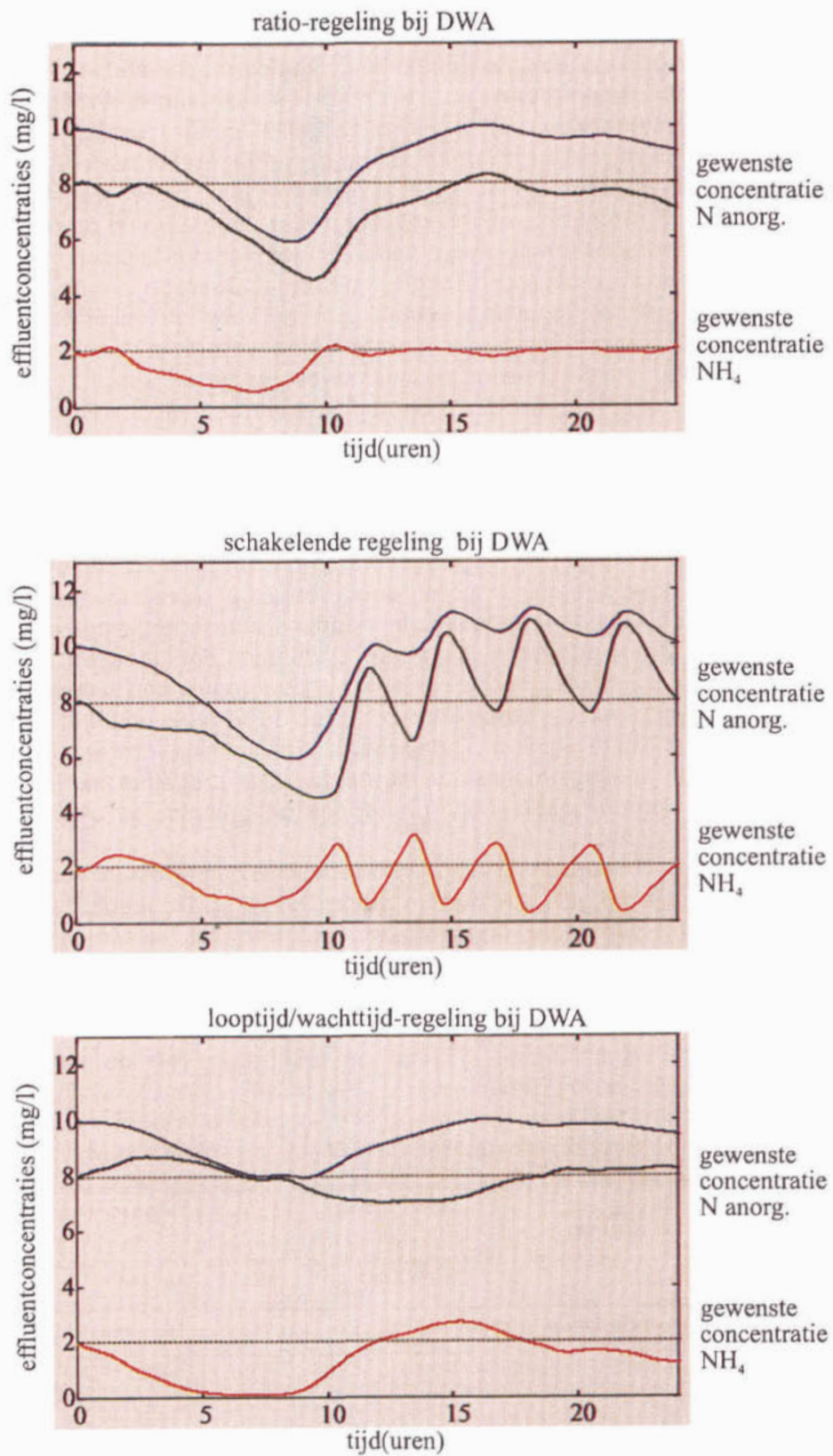
De instellingen van de ratio-regeling zijn in enige mate geoptimaliseerd. Verwacht wordt dat een door een fijnere bijstelling verdere optimalisatie mogelijk is. Er is naar gestreefd de fuzzy ratio-regeling te vergelijken met geoptimaliseerde conventionele regelingen. Voor de optimale instelling van de verhouding tussen beluchte periode en de onbeluchte periode bij de looptijd/wachttijdregeling zijn de resultaten van de ratio-regeling gebruikt. Bij de schakelende regeling zijn de grenswaarden van de ammoniumconcentratie symmetrisch om de gewenste ammoniumconcentratie gekozen. Er is een aantal simulaties uitgevoerd om de optimale bandbreedte vast te stellen: het bleek dat deze instellingen nauwelijks effect hadden op het regelgedrag door de optredende vertraging tussen de veranderingen in het proces en de meting in het effluent.

Effluentkwaliteit bij DWA

In figuur 22 en tabel 7 zijn de simulatieresultaten weergegeven bij DWA. In de tabel is onderscheid gemaakt tussen de effluentkwaliteit gedurende het gehele etmaal op basis van volumeproportionele dagmonsters en de resultaten exclusief de vroege ochtend van twee uur 's nachts tot half tien 's ochtends, wanneer de effluentconcentraties lager zijn. Bij de vergelijking van de regeling valt namelijk op dat het gedurende de vroege ochtend weinig verschil maakt op welke manier geregeld wordt.

Tabel 7: Simulatieresultaten bij DWA

Regeling Beoordelingscriteria	Ratioregeling met fuzzy regelaar als basiszuurstofregeling	Ratioregeling met PI- regelaar als basis- zuurstofregeling	Schakelen- de regeling	Looptijd/ wachtijd- regeling
Resultaten over het gehele etmaal, volumeproportioneel dagmonster				
Luchtdebiet m ³ /dag	9.358	10.149	11.250	12.679
N _{anorganisch} mg/l ⁽¹⁾	8,9	8,9	9,5	9,3
NH ₄ mg/l ⁽¹⁾	1,8	1,8	1,6	1,6
NO ₃ mg/l ⁽¹⁾	7,1	7,1	7,9	7,7
Aantal schakelingen	45	43	4	58
Resultaten exclusief de vroege ochtend, gemiddelde en variatie				
Luchtdebiet m ³ /dag	12.257	13.753	15.165	15.718
N _{anorganisch} mg/l	9,1 ± 0,5	9,1 ± 0,5	10,8 ± 1,1	11,4 ± 1,0
NH ₄ mg/l	1,9 ± 0,2	1,9 ± 0,2	1,9 ± 0,9	1,8 ± 0,9
NO ₃ mg/l	7,2 ± 0,4	7,2 ± 0,4	8,9 ± 1,8	9,6 ± 0,5
Aantal schakelingen	44	43	4	39



Figuur 22. Simulatieresultaten van de verschillende regelingen bij DWA.

In grote lijnen is de effluentkwaliteit bij de verschillende regelingen vergelijkbaar. In vergelijking met de schakelende regelaar presteert de ratio-regelaar enigszins beter, met name waar het de prestaties exclusief de vroege ochtend betreft. De ammoniumconcentraties zijn bijna gelijk, circa 1,9 mg/l, maar de concentratie anorganisch stikstof is gedurende de periode exclusief de vroege ochtend 10,8 mg/l bij de schakelende regelaar en 9,1 mg/l bij de ratio-regeling. Dit is een verschil van 1,7 mg/l anorganisch stikstof in het voordeel van de ratio-regeling. Voor het volumeproportionele dagmonster is het verschil kleiner in vergelijking met het gemiddelde exclusief de vroege ochtend. Daarvan zijn de concentraties anorganisch stikstof 8,9 respectievelijk 9,5 mg/l; dit verschil is 0,6 mg/l in het voordeel van de ratio-regeling. De ammoniumconcentratie van het volumeproportionele dagmonster is bij de ratio-regeling iets hoger (1,8 mg/l) dan bij de schakelende regeling (1,6 mg/l). De ratio-regeling wijkt namelijk minder af van de waarde van de gewenste ammoniumconcentratie van 2 mg/l. De gemiddelde ammoniumconcentratie is altijd iets lager dan deze gewenste waarde, omdat gedurende de nacht een lagere ammoniumconcentratie behaald wordt.

De looptijd/wachttijd-regeling presteert in vergelijking met de schakelende regeling even goed als deze wordt beoordeeld op basis van de volumeproportionele dagmonsters; in feite levert de looptijd/wachttijdregeling zelfs een verbetering op van 0,2 mg/l anorganisch stikstof. Dit simulatieresultaat verklaart wellicht waarom waterbeheerders goed te spreken zijn over regelingen alleen op basis van zuurstof. Op basis van de prestaties exclusief de vroege ochtend functioneert de looptijd/wachttijd-regeling minder goed dan de schakelende regeling. In vergelijking met de ratio-regeling presteert de looptijd/wachttijdregeling minder goed voor zowel het volumeproportionele dagmonster als de gemiddelde concentratie exclusief de vroege ochtend.

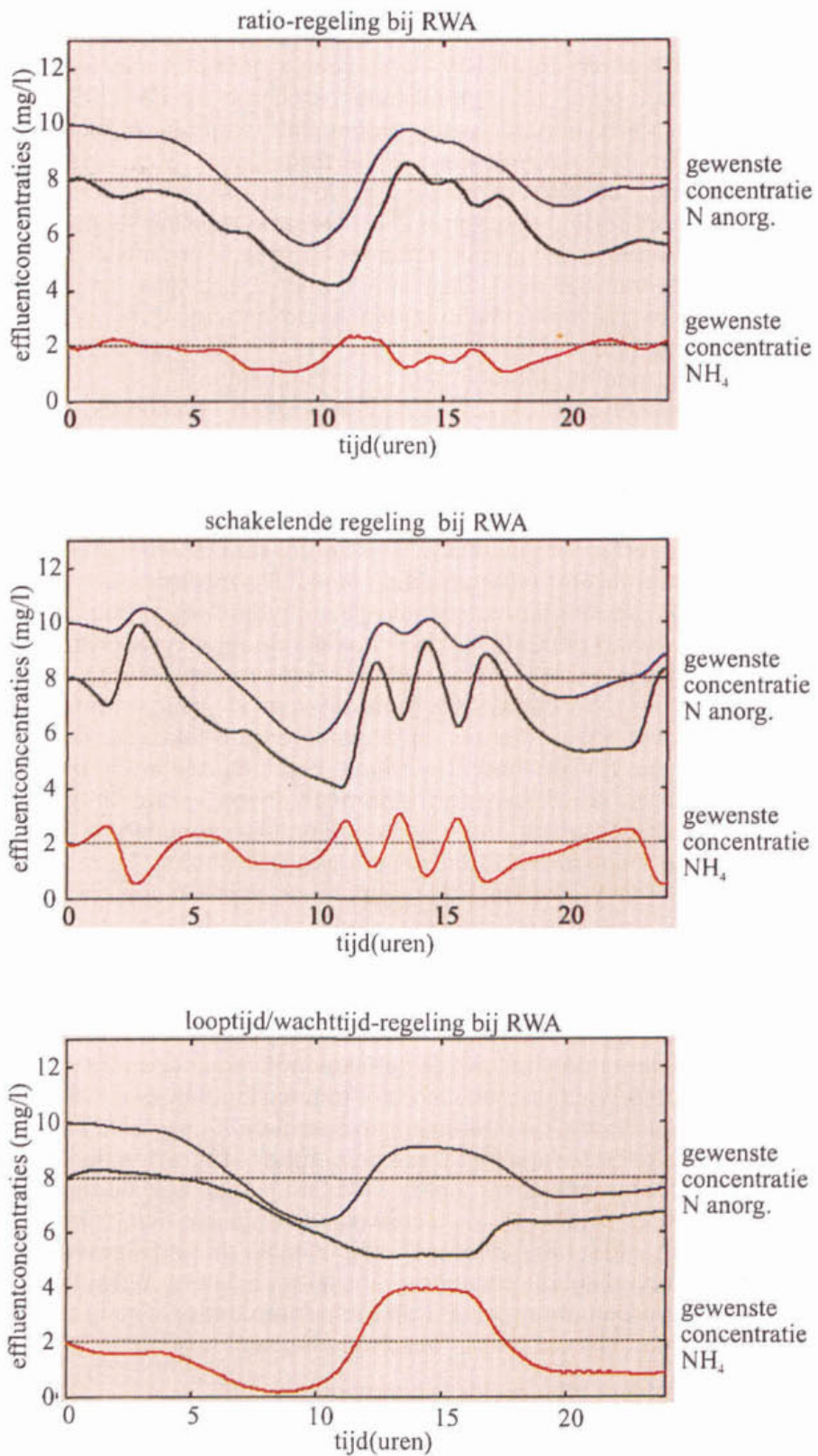
Het verschil tussen de volumeproportionele dagmonsters van de looptijd/wachttijd- en de ratio-regeling is niet zo groot: 0,4 mg/l. De resultaten exclusief de vroege ochtend zijn meer uitgesproken: het verschil tussen de ratio-regeling en de looptijd/wachttijdregeling is dan 2,5 mg/l in het voordeel van de ratio-regeling.

Effluentkwaliteit bij RWA

In tabel 8 en figuur 23 zijn de resultaten van de verschillende regelingen weergegeven bij RWA.

Tabel 8: Simulatieresultaten bij RWA

Regeling Beoordelingscriteria		Ratioregeling	Schakelende regeling	Looptijd/wachttijdregeling
Luchtdebiet		10.777	11.244	13.471
Volumeproportioneel dagmonster				
N _{anorganisch}	mg/l	8,3	8,6	8,7
NH ₄	mg/l	1,7	1,8	3,4
NO ₃	mg/l	6,5	6,8	5,4



Figuur 23. Simulatieresultaten van de verschillende regelingen bij RWA.

Alle geteste regelingen vertonen bij RWA meer variaties dan bij DWA. Door verdunning is de effluentconcentratie lager bij RWA. Door het verhoogde debiet is de effluentvracht bij RWA ongeveer anderhalf maal zo groot als bij DWA. Zowel de verlaging van de hydraulische verblijftijd als de lagere substraatconcentratie kunnen hierbij een rol spelen. Bovendien reageren de regelingen minder adequaat door een verandering van de vertragingstijd. Het verschil tussen de geteste regelingen bij RWA is niet zo groot met betrekking tot de concentraties in het volumeproportionele dagmonster. De ratio-regeling functioneert iets beter dan de schakelende regeling met een concentratie anorganisch stikstof van 8,3 mg/l ten opzichte van 8,6 mg/l. De ammoniumconcentraties zijn gelijk. De looptijd/wachttijdregeling voldoet slechter dan beide andere regelingen, met name omdat de ammoniumconcentratie veel hoger is: 3,4 mg/l ten opzichte van 1,7 mg/l. Deze regeling neemt immers het ammoniumsignaal niet in beschouwing. Juist bij piekaanvoer blijkt dit - zoals te verwachten - belangrijk.

Variaties in effluentkwaliteit

De effluentkwaliteit vertoont bij DWA en RWA bij de ratio-regeling minder variaties dan bij de andere regelingen waardoor meer zekerheid wordt verkregen ten aanzien van het verwachte resultaat. Er is vooral sprake van een meer stabiele ammoniumconcentratie. Het waargenomen verschil is intrinsiek aan de gevolgde regelstrategieën. Bij de looptijd/wachttijdregeling wordt het ammoniumsignaal geheel buiten beschouwing gelaten. Bij de schakelende regeling wordt een ondergrens- en een bovengrens gesteld. In de onderhavige simulatie waren deze 2,5 en 1,5 mg/l. In het effluent worden echter grotere variaties waargenomen, hetgeen ook gebeurt als deze grenzen dicht bij elkaar worden gekozen. De oorzaak hiervan is de vertraging tussen het effect van een veranderende beluchting en de meting daarvan in het effluent: dit fenomeen speelt vooral bij propstroomsystemen een rol. Daardoor wordt onder bepaalde omstandigheden te veel belucht. Bij de ratio-regeling vindt dezelfde tijdsvertraging ook plaats. De ratio-regeling houdt echter ook rekening met de mate waarin de ammoniumconcentratie afwijkt van de gewenste waarde en met de verandering van de ammoniumconcentratie. Daardoor wordt gedurende de dag steeds de gewenste ammoniumconcentratie behaald.

Energieverbruik

Het energieverbruik van de ratio-regeling bij DWA is in de intermitterende zone 10 procent lager dan dat van de schakelende regelaar en 23 procent lager dan dat van de looptijd/wachttijdregeling. De toepassing van een directe fuzzy regelaar in de ratioregeling zou resulteren in een energiereductie van 17 procent ten opzichte van de schakelende regeling. Deze percentages betreffen de intermitterende zone van het beluchtingsbassin. Hierin vindt ongeveer één derde gedeelte van de totale beluchting plaats. Bij de schakelende regeling wordt waarschijnlijk belucht op momenten dat het niet meer nodig is, maar dit nog niet wordt gesignaleerd als een onderschrijding van de ondergrens in het effluent. Bij de looptijd/wachttijdregeling vindt overbeluchting plaats op momenten dat er weinig ammonium is, omdat het ammoniumsignaal niet in beschouwing wordt genomen.

6.5 Ontwerpaspecten en instelbaarheid

De looptijd/wachttijd-regeling en de schakelende regeling zijn eenvoudig te ontwerpen. Het ontwerp van de ratioregeling heeft meer tijd gekost. Dit heeft vooral te maken met het ontwerp van de regelstrategie, die afwijkt van gangbare strategieën in de praktijk. De ratioregeling maakt bovendien gebruik van meer informatie. Als eenmaal de regelstrategie bekend is, is het vrij eenvoudig om de kennisregels op te stellen. In zekere zin komt namelijk het ontwerp van de regelstrategie overeen

met het vaststellen van de kennisregels. Vervolgens dienen de vage verzamelingen te worden vastgesteld, wat overeenkomt met het vinden van de juiste regeltechnische instellingen. Hoewel over het algemeen wordt aangenomen dat dit veel tijd kost door het grote aantal vrijheidsgraden, viel dit gedurende de simulatiestudie mee. De instellingen zijn vastgesteld op basis van proceskennis (grove tuning) en analyse van uitgevoerde simulaties (fijne tuning). In totaal is hier een week tijd aan besteed. Extra inspanningen op dit gebied leiden naar verwachting tot verdere verbetering, met name in de ratio-regeling. Het vinden van de juiste regeltechnische instellingen was voor de directe PID-regelaar betrekkelijk lastig, omdat de optimale instellingen verschilden bij verschillende aanvoerdebieten. Bij de schakelende regeling en de looptijd/wachttijdregeling is eigenlijk geen sprake van regeltechnische instellingen.

Het vinden van de juiste technologische instellingen zoals setpoints en grenswaarden is het meest eenvoudig bij de ratio-regeling. De gewenste ammoniumconcentratie en het maximum aantal schakelingen zijn als zodanig op te geven aan de regeling. Bij de andere regelingen is dit moeilijker en is een trial-and-error methode noodzakelijk. Bij de looptijd/wachttijd-regeling moet de optimale verhouding tussen de beluchte en de onbeluchte periode in de praktijk worden vastgesteld. Bij de schakelende regeling moet de bandbreedte worden vastgesteld tussen concentraties ammonium waarbij de beluchting aan- respectievelijk afschakelt. Onder meer in verband met de tijdvertraging die optreedt tussen het effect van een ander beluchtingsregime en de meting van dat effect is het niet eenvoudig te voorspellen wat de beste instelling is. Evenmin is het aantal schakelingen te voorspellen.

6.6 Mogelijke verbeteringen

De ratio-regelaar kan naar verwachting worden verbeterd op de volgende aspecten:

- Er kan kennis toegevoegd worden omtrent de gewenste reacties op het dag- en nachtritme, waardoor er 's nachts beter gebruik kan worden gemaakt van de denitrificatiecapaciteit.
- De reactie op RWA zou naar alle waarschijnlijkheid verbeteren door gebruik te maken van een feed forward signaal van het debiet.
- Het toevoegen van nitraat als inputvariabele heeft vooral zin als de RWZI zodanig belast is dat met gemak lagere ammoniumconcentraties worden behaald. In het onderhavige geval zou dat bijvoorbeeld in de zomer zijn, of gedurende de nacht. Ook in gevallen met een sterk variërende aanvoer zou een nitraatsignaal een nuttige bijdrage kunnen leveren.
- Mogelijk leidt een verdere tuning van de ratio-regelaar tot een verbetering van het hier beschreven resultaat.

6.7 Conclusies en aanbevelingen

1. Een directe fuzzy regelaar met hetzelfde regelgedrag als een directe PI-regelaar is betrekkelijk eenvoudig te realiseren. Door het toevoegen van kennisregels is de verkregen directe fuzzy regelaar te optimaliseren. In de uitgevoerde simulaties heeft toepassing van een directe fuzzy regelaar weinig invloed op de effluentkwaliteit, hoewel de fuzzy regelaar sneller en rustiger reageert op wijzigingen in het zuurstofsetpoint. Door middel van de directe

voornamelijk doordat er geen naijleffect van de beluchting is na een setpoint-verlaging. In het bestudeerde geval van intermitterende beluchting had dit naijleffect ook door middel van andere regeltechnieken voorkomen kunnen worden; dergelijke methoden zijn niet onderzocht.

2. Er is een adequate multivariabele fuzzy regeling ontwikkeld voor de beluchting, die gebruikmakend van het ammonium- en het zuurstofsignaal de gewenste verhouding tussen de beluchte en onbeluchte periode bepaalt. De ratioregeling is vergeleken met een schakelende regeling die schakelt op vaste ammoniumsetpoints en een regeling met een vaste beluchte en onbeluchte periode. Het energieverbruik wordt in vergelijking met de schakelende regeling en de looptijd/wachttijdregeling gereduceerd met 10 respectievelijk 23 procent. De waargenomen energiereductie betreft het luchtdebiet in de intermitterende zone. Dit is ongeveer één derde gedeelte van het totale luchtdebiet. Tegelijkertijd verbetert de effluentkwaliteit bij de ratioregeling in enige mate met 0,6 mg/l $N_{\text{anorganisch}}$ ten opzichte van de schakelende regeling. De variaties in de effluentkwaliteit zijn bij de ratio-regeling kleiner dan bij de andere regelingen, zeker voor de ammoniumconcentratie waarop gestuurd wordt.
3. Het valt op dat de schakelende regeling en de looptijd/wachttijdregeling resulteren in een vergelijkbare effluentkwaliteit, terwijl de eerstgenoemde regeling wel en de laatstgenoemde regeling niet gebruik maakt van een ammoniumsignaal. De variatie in de effluentkwaliteit is wel groter bij de looptijd/wachttijdregeling en de reactie op RWA is minder goed. Ook verbruikt de beluchting bij de looptijd/wachttijd-regeling aanzienlijk meer energie.
4. Alle geteste regelingen vertonen meer variaties bij RWA, de ratio-regeling in de geringste mate. De looptijd/wachttijdregeling reageert het minst adequaat op RWA omdat er geen reactie volgt op hoge ammoniumconcentraties in het effluent.
5. Het ontwerp van de ratio-regeling kost meer tijd dan dat van de schakelende regeling en de looptijd/wachttijd-regeling. Dit wordt met name veroorzaakt door het ontwerp van een nieuwe regelstrategie.
6. De ratio-regeling is eenvoudig instelbaar, omdat de gewenste ammoniumconcentratie en het maximum aantal schakelingen als zodanig kunnen worden opgegeven.
7. Aanbevolen wordt de ratio-regeling verder te verbeteren door kennisregels toe te voegen van het dag/nachtritme en de gewenste reactie op RWA. In beide gevallen zou sprake zijn van een feedforward signaal. In specifieke situaties wordt verwacht dat door kennis toe te voegen omtrent de nitraatconcentratie verbeteringen mogelijk zijn.

7 TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN FUZZY CONTROL

7.1 Inleiding

In het voorliggende hoofdstuk worden de gewenste verbeteringen van regelingen doorgenomen en worden mogelijke oplossingen die gebruik maken van fuzzy control geschetst. Hierbij wordt aangegeven wat het specifieke voordeel van fuzzy control is ten opzichte van andere regeltechnieken, op basis van de theorie, de literatuurstudie en de simulatieresultaten. De gewenste verbeteringen zijn als volgt gegroepeerd:

- optimalisatie van de beluchtingsregeling;
- optimalisatie van slibregelingen;
- slibindexbeheersing;
- koppeling van regelkringen;
- foutdetectie en monitoring;
- reconstructie en voorspelling van niet-gemeten variabelen.

Gewenste verbeteringen die feitelijk buiten het kader van het onderzoek vallen en hier niet verder besproken worden zijn:

- verdergaande besturing van het slibontwateringsproces; hiermee zijn goede resultaten gerapporteerd met fuzzy control;
- een meer geïntegreerde besturing van riolering en RWZI. De mogelijkheden van fuzzy control hiervoor zijn niet aan de orde gekomen.

7.2 Optimalisatie van de beluchtingsregeling

7.2.1 Optimalisatie van de basiszuurstofregeling

Er wordt verwacht dat de basiszuurstofregeling (zie figuur 9) verder geoptimaliseerd kan worden: uit de literatuurstudie en de uitgevoerde simulatiestudie blijkt dat dit een belangrijke bijdrage kan geven aan de reductie van het energieverbruik en mogelijk ook aan de verbetering van de effluentkwaliteit. De reden hiervoor is dat geoptimaliseerde regelingen in principe sneller het zuurstofsetpoint bereiken en minder lang overbeluchten na een verlaging van het setpoint. Hierdoor wordt zo snel mogelijk ingespeeld op veranderingen in de zuurstofvraag zonder dat tijdelijk wordt overbelucht of te weinig belucht.

Directe fuzzy regelaar

Om de basiszuurstofregeling te optimaliseren kan - op basis van de theorie en ervaring met fuzzy control in andere processen - worden gedacht aan de implementatie van een laag niveau directe fuzzy regelaar, die op basis van het zuurstofgehalte de beluchting aanstuurt. In de uitgevoerde simulatiestudie blijkt dat de basiszuurstofregeling inderdaad te optimaliseren is door middel van een directe fuzzy regelaar door de regelaar in bepaalde werkgebieden niet-lineair te maken. Dit heeft vooral effect op het energieverbruik en niet op de effluentkwaliteit. De belangrijkste verbeteringen die in de directe fuzzy regelaar zijn aangebracht kunnen mogelijk ook met andere regeltechnieken gerealiseerd worden, met name bij een intermitterend beluchtingsregime. Desalniettemin is door het toevoegen van een extra kennisregel een reductie van het energieverbruik gerealiseerd in de betreffende simulatie. In de onderzochte situatie verbeterde de effluentkwaliteit nauwelijks waarneembaar bij toepassing van een directe fuzzy regelaar. In de

literatuur wordt wel melding gemaakt van een verbeterde effluentkwaliteit (Rasch, 1996).

Fuzzy supervisieregeling

Een fuzzy supervisieregeling, die de instellingen van een directe PI(D)- of fuzzy regelaar aanpast naar gelang de procesomstandigheden, kan waarschijnlijk nog verdere verbeteringen opleveren. Het is namelijk te verwachten dat de optimale PI(D)-instellingen afhankelijk zijn van de procescondities. In een fuzzy supervisieregeling kunnen de PID-instellingen afhankelijk worden gemaakt van bijvoorbeeld het debiet, de temperatuur of het zuurstofsetpoint. Een dergelijke regeling is weergegeven in figuur 7. Een voorbeeld van de betreffende kennisregels is:

Als Q is laag Dan $P = P_{\text{laag}}, I = I_{\text{laag}}, D = D_{\text{laag}}$
Als Q is hoog Dan $P = P_{\text{hoog}}, I = I_{\text{hoog}}, D = D_{\text{hoog}}$

Een dergelijke fuzzy supervisieregeling is in Duitsland toegepast en heeft inderdaad een snelle respons op veranderende omstandigheden; over de effluentkwaliteit en het energieverbruik is niet gerapporteerd (Bongards, 1996).

Op basis van het aangegeven knelpunt in de praktijk dat de optimale PID-instellingen afhankelijk zijn van het debiet, zou een fuzzy supervisieregeling beter moeten presteren dan een directe fuzzy regelaar.

7.2.2 Het toepassen van multivariabele fuzzy regelingen

Multivariabele regelaar die direct de beluchting aanstuurt

Indien meer procesvariabelen in beschouwing worden genomen in één regelblok is sprake van een multivariabele regelaar. Een LQ(G)-regelaar is hiervan een voorbeeld. Indien een lineair regelmodel beschikbaar is zoals bij deze regelaar, is het eenvoudig de theoretisch optimale regeltechnische instellingen te vinden. In de praktijk kan deze instelling moeizamer verlopen omdat de onderlinge verbanden in werkelijkheid niet-lineair zijn. Door middel van kennisregels kan ook een fuzzy multivariabele regelaar ontworpen worden. In vergelijking met een LQ(G)-regelaar is een fuzzy multivariabele regelaar meer inzichtelijk voor niet-regeltechnici, omdat de kennisregels voor processtechnologen en bedrijfsvoerders begrijpelijk zijn. Er moet daarbij voor worden gewaakt dat het aantal kennisregels niet te groot wordt. De theoretisch optimale instellingen van een fuzzy regelaar kunnen niet analytisch worden berekend, maar wel door middel van computersimulatie worden vastgesteld.

Multivariabele regelingen die gebruik maken van een basiszuurstofregeling

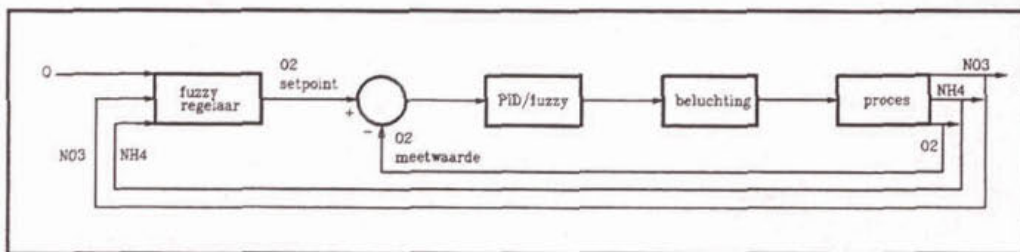
Voor een effectieve regeling van de beluchting worden in toenemende mate meer procesvariabelen dan alleen de zuurstofconcentratie in beschouwing genomen. De ammonium- en nitraatconcentratie zijn hiervan de belangrijkste. In de meeste gevallen vormt het hart van de regeling een basiszuurstofregeling, waarvan het setpoint door de andere procesvariabelen wordt bepaald. Het blijkt in de praktijk vaak veel tijd te kosten de juiste instellingen te vinden van deze regelingen. In het geval van een intermitterende beluchting kan dat ondermeer worden veroorzaakt door het feit dat "op scherpe waarden" moet worden geschakeld. Het is voorstelbaar dat het moeilijk is een optimum te vinden voor dit soort "harde" instellingen.

In het geval van een continue beluchting is er veelal sprake van een cascaderegeling, waarbij het zuurstofsetpoint door een discrete - of een PI(D)-regelaar bepaald wordt. Ook hierbij kunnen knelpunten ontstaan doordat de onderlinge relaties worden verondersteld lineair te zijn terwijl dit in werkelijkheid niet zo is. Bij een fuzzy multivariabele regeling kunnen de relaties tussen ingangs- en uitgangssignaal ook niet-lineair zijn, waardoor bij niet-lineaire processen een beter regelgedrag verkregen kan worden. Dit is theoretisch te onderbouwen en aangetoond bij andere processen.

Uit de uitgevoerde simulatiestudie blijkt dat het mogelijk is een fuzzy regeling te ontwerpen voor de intermitterende beluchting van een actiefslibstelsysteem. Deze regeling levert met behulp van dezelfde ammoniummeting een beter resultaat op dan een schakelende regeling, zowel met betrekking tot de effluentkwaliteit als tot het energieverbruik. De ontworpen fuzzy regeling gebruikt ook de verandering van het ammoniumsignaal als invoervariabele en beschouwt bovendien de mate waarin het signaal afwijkt en verandert. Hierdoor reageert de fuzzy regeling "intelligenter". In de literatuur zijn diverse voorbeelden beschreven van multivariabele fuzzy regelingen in simulatiemodellen en in de praktijk, die een verbeterde stikstofverwijdering en/of een energiereductie bewerkstelligen. Meestal is geen representatieve vergelijking uitgevoerd, waarschijnlijk omdat het ontwerp van een vergelijkbare conventionele regeling veel tijd kost.

Multivariabele regelingen die gebruik maken van een feedforward signaal

Het influentdebiet kan de invoervariabele zijn van een multivariabele regeling, waarmee een feedforward signaal geïntroduceerd wordt. In theorie wordt hierdoor het regelgedrag verbeterd, zowel bij niet-fuzzy als bij fuzzy regelingen. Een belangrijke voorwaarde daarbij is dat het verband tussen het influentdebiet en het gewenste setpoint in voldoende mate bekend moet zijn. Bij toepassing van fuzzy control kan dit verband "vager" omschreven worden, waardoor de regeling meer tolerant is bij een minder juiste weergave van de werkelijkheid. In de literatuur zijn hier diverse voorbeelden van gegeven. In figuur 24 is een voorbeeld gegeven van een systeemstructuur van een multivariabele fuzzy regeling die de setpoints van de zuurstofregeling bepaalt.



Figuur 24. Een mogelijke systeemstructuur voor een fuzzy regeling die de setpoints voor de beluchtingsregeling vaststelt.

7.3 Optimalisatie van slibregelingen

De regeling van het slibgehalte in het beluchtingsbassin en de slibdekenhoogte in de nabezinker door middel van het spui- en retourslibdebiet is in de praktijk op redelijk uniforme wijze geregeld. Op grond van ervaringen in de praktijk met slibspiegelmeters en van beschreven onderzoeken in de literatuur wordt verwacht dat optimalisatie van deze regelstrategieën mogelijk is. Dit levert in potentie een verbetering van de effluentkwaliteit op doordat uitspoeling van zwevende stof voorkomen wordt. Bovendien is het denkbaar dat door verbeterde regelstrategieën of verbeterde mogelijkheden om tijdig te anticiperen op dreigende slibuitspoeling een hoger slibgehalte in het beluchtingsbassin kan worden gehanteerd. Dit is bij overbelaste RWZI's een manier om de stikstofverwijdering te optimaliseren.

Modellen op het gebied van slibbezinking zijn minder ver ontwikkeld dan modellen op het gebied van de biologische omzettingsprocessen; met name waar het de vlokvorming en de invloed daarvan op de effluentkwaliteit betreft. Het zal daarom minder eenvoudig zijn regelingen te baseren op modellen. Verwacht wordt daarom dat fuzzy regelingen op basis van ervaringskennis en data-analyse een bijdrage kunnen leveren aan de verdere optimalisatie van slibregelingen. In de literatuur (Tsai *et al*, 1996) is hiervan een voorbeeld gerapporteerd.

7.4 Slibindexbeheersing

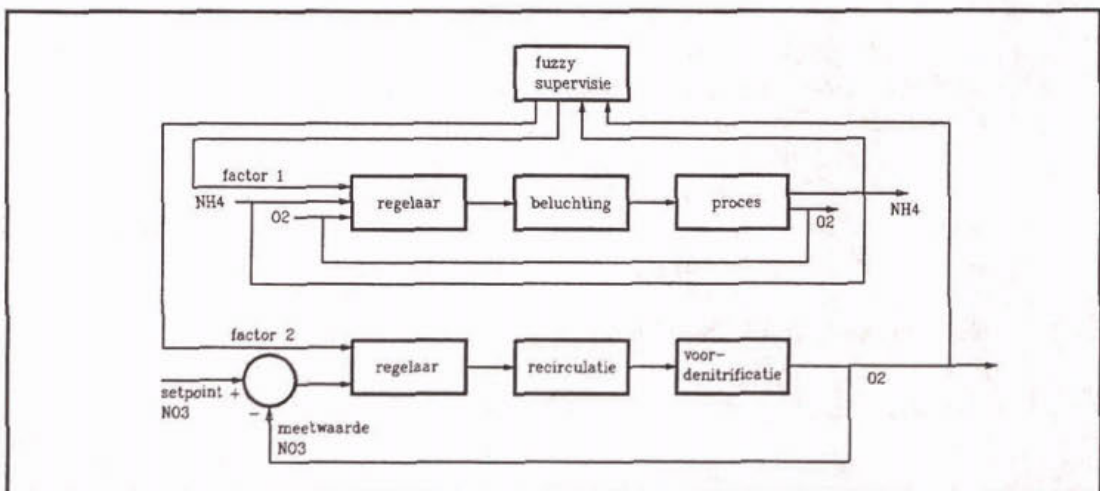
De slibindexbeheersing is een belangrijk aandachtspunt voor de verbetering van procesregelingen. Beluchtingsregelingen die optimaal functioneren voor de biologische omzettingsprocessen worden regelmatig met de hand "overruled" door het verhogen van zuurstofsetpoints om stijging van de slibindex te voorkomen. Oplossingen hiervoor zijn het structureel voorkomen van licht slib door ontwerp-aanpassingen en het incidenteel voorkomen van licht slib door on-line monitoring en vroegtijdige waarschuwing. Inmiddels is hiertoe een aantal stappen gezet. Een bijdrage van fuzzy modelleringstechnieken en fuzzy control is hierbij zeker niet ondenkbaar, gezien het feit dat bij het signaleren en oplossen van dit probleem vooral ervaringskennis een rol speelt en "scherpe" grenzen moeilijk definieerbaar zullen zijn. Hier is al ervaring mee opgedaan door Geselbracht *et al* (1998) en Watanabe *et al* (1993). Bij deze toepassing behoeft niet noodzakelijkerwijs sturing plaats te vinden; het is in eerste instantie wellicht beter een beslissingsondersteunend en bewakend systeem toe te passen.

7.5 Koppeling van regelkringen

In de praktijk worden de verschillende deelprocessen van het actiefslibstelsel geregeld in afzonderlijke regelkringen. Door de regelkringen voor de aanvoer, de beluchting, de interne recirculatie, het spuislib en het retourslib met elkaar te koppelen in een overkoepelende supervisieregeling kan in theorie effectiever worden geregeld. Op basis van de theorie en ervaring met andere processen is te onderbouwen dat processen die technologisch gekoppeld zijn, zoals bijvoorbeeld de interne recirculatie en de beluchting of de aanvoer en het slibgehalte, beter op elkaar worden afgestemd door gekoppelde regelkringen. In de literatuur is een aantal voorbeelden gepresenteerd waaruit blijkt dat dit op betrekkelijk eenvoudige wijze door middel van fuzzy control te realiseren is. In de praktijk worden ook complexere voorbeelden al toegepast (Cohen *et al*, 1996). Het ligt voor de hand hierbij een stapsgewijze aanpak te kiezen. In eerste instantie zouden de regelingen

voor de beluchting en de interne recirculatie gekoppeld kunnen worden. In tweede instantie zouden de regelingen voor slibstromen en de regeling van de aanvoer verder kunnen worden geïntegreerd in dezelfde systeemstructuur. In figuur 25 wordt een voorbeeld gegeven van een systeemstructuur waarbij de afzonderlijke regelkringen zijn gekoppeld.

Om regelkringen te koppelen kan gebruik worden gemaakt van verschillende regeltechnieken. Voor koppeling van bestaande regelkringen is fuzzy control een aantrekkelijke optie, omdat de onderlinge verbanden waarschijnlijk het meest eenvoudig door middel van niet-scherpe ervaringskennis te formuleren zijn of door middel van data-analyse vast te stellen zijn. In dit geval hoeven de bestaande regelstructuren niet te veranderen. Overigens kan een dergelijke supervisieregeling ook als beslissingsondersteunend systeem dienen, bijvoorbeeld als eerste stap alvorens tot daadwerkelijk regelen wordt overgegaan.



Figuur 25. Een mogelijke systeemstructuur waarin de regelkringen voor de beluchting en de interne recirculatie gekoppeld zijn.

7.6 Foutdetectie, monitoring en diagnose

7.6.1 Foutdetectie

De bedrijfszekerheid van sensoren wordt nog niet als optimaal ervaren. In de gangbare literatuur over procesregelingen in het algemeen worden veelal fuzzy technieken gerapporteerd voor een verbetering van de foutdetectie. Patroonherkenning kan een rol spelen bij het signaleren van de noodzaak tot ijking. Een ander aspect van sensoren is de gewenste nauwkeurigheid. Met niet-lineaire technieken zoals fuzzy control zou gemakkelijker gebruik kunnen worden gemaakt van minder nauwkeurige sensoren, of van sensoren die "afgeleide" variabelen meten, zoals bijvoorbeeld een redoxmeting die informatie geeft over de nitraatconcentratie. In de bestudeerde literatuur wordt overigens geen melding van dergelijke toepassingen gemaakt. Bij andere processen is op dit gebied wel ervaring met fuzzy control.

7.6.2 Verbetering van de "mens-machine-interface"

Onder de "mens-machine-interface" wordt verstaan de communicatie tussen het bedienend personeel en de procesregeling. Door deze communicatie te verbeteren kan de inzichtelijkheid van complexere regelingen vergroot worden. Een visuele weergave van het hoe en waarom van het gedrag van de regelaar kan behulpzaam zijn bij het evalueren van de acties van de procesregeling. Bij toepassing van lineaire regeltechnieken zoals PI(D)-regelingen of LQ-regelingen is het niet mogelijk visueel waar te nemen hoe en waarom de regeling tot een bepaalde stuuractie overgaat. Bij toepassing van supervisieregelingen op basis van klassieke logica is het mogelijk in een beslissingsdiagram aan te geven waar de procesregeling zich als het ware bevindt. Dit is ook mogelijk bij fuzzy supervisie en fuzzy multivariabele regelingen, doordat de kennisregels en stuuracties die van toepassing zijn, weergegeven kunnen worden tijdens het proces.

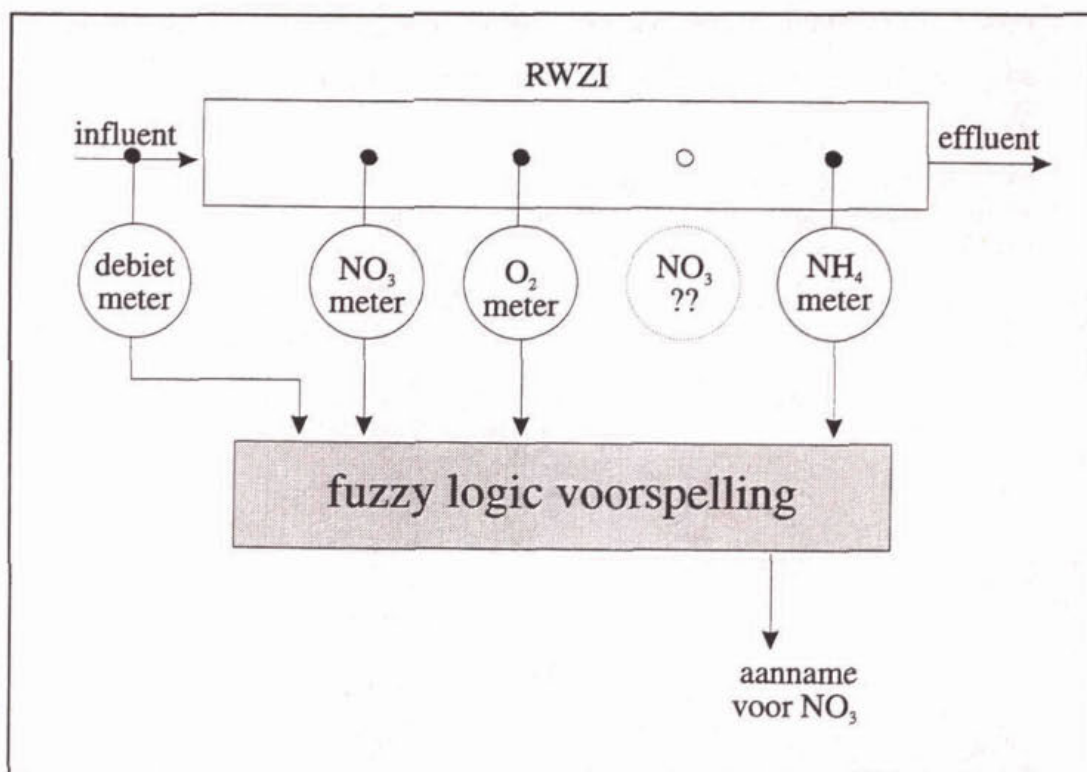
7.6.3 Diagnose

Een verbeterde interpretatie van afwijkende metingen door middel van een automatische diagnose zou niet alleen bijdragen aan het detecteren van foute sensormetingen, maar ook aan het reduceren van valse alarmen en het detecteren van andersoortige afwijkingen in de procesvoering. In de literatuur is hier een voorbeeld van (Bergh en Olsson), waarbij fuzzy control genoemd wordt als mogelijkheid om het onderzochte systeem te verbeteren. Het betreft hier een bewakend systeem dat gemeten data analyseert en waarschuwt bij afwijkingen.

7.7 **Reconstructie en voorspelling van niet-gemeten variabelen**

7.7.1 Vervanging van extra sensoren

Geavanceerde regelstrategieën, waarbij een willekeurige regeltechniek wordt toegepast, zijn in potentie effectiever wanneer meer metingen beschikbaar zijn. De betreffende sensoren zijn echter in veel gevallen kostbaar en vergen onderhoud. Het kan in dergelijke gevallen een oplossing zijn bepaalde variabelen te reconstrueren of te voorspellen. Dit kan plaatsvinden als "vervanging" van sensoren die in het geheel niet worden aangeschaft, maar ook als vervanging van een meting die elders in de RWZI wel plaatsvindt, maar niet in het betreffende compartiment. Deze laatste mogelijkheid is naar verwachting vooral aantrekkelijk in het geval van propstroomsystemen. Van reconstructie wordt gesproken als de betreffende procesvariabele wordt vastgesteld met behulp van metingen van andere procesvariabelen of (berekende) waarden van de betreffende procesvariabele in het verleden. Van voorspelling wordt gesproken als een toekomstige waarde van een procesvariabele bepaald wordt. In feite is er dan sprake van een feedforward signaal. De schatting van een procesvariabele in een propstroomsysteem is daarvan een voorbeeld, dat wordt weergegeven in figuur 26. In de literatuur wordt geen melding gemaakt van een dergelijke toepassing. In andere processen komen dergelijke toepassingen van fuzzy control voor.



Figuur 26. Voorspelling van een niet-gemeten nitraatconcentratie in een propstroomsysteem.

7.7.2 Technieken voor reconstructie en voorspelling

Lineair filter

Er is een aantal technieken beschikbaar voor de reconstructie en voorspelling van niet-gemeten variabelen. Een voorbeeld hiervan is een lineair filter, dat een bepaalde variabele berekent als de gewogen som van andere variabelen. Een lineair filter voor de reconstructie van de nitraatconcentratie zou er als volgt uit kunnen zien:

$$\text{NO}_3(k) = a_1\text{NO}_3(k-1) + a_2\text{NO}_3(k-2) + \dots + b_1\text{NH}_4(k-1) + b_2\text{NH}_4(k-2) + \dots + c_1\text{O}_2(k-1) + c_2\text{O}_2(k-2) + \dots + d_1Q(k-1) + d_2Q(k-2) + \dots$$

In dit voorbeeld worden on-line metingen gebruikt van NH_4 en het debiet. Voor NO_3 worden berekeningen gebruikt uit het recente verleden. Hiervoor kan bijvoorbeeld ook een off-line gemeten daggemiddelde worden gebruikt. Reconstructie van variabelen kan ook plaatsvinden door het toepassen van een model. Een bekend voorbeeld hiervan is het Kalman-filter, dat vaak gebruikt wordt in combinatie met een LQ-regelaar (zie hoofdstuk 2).

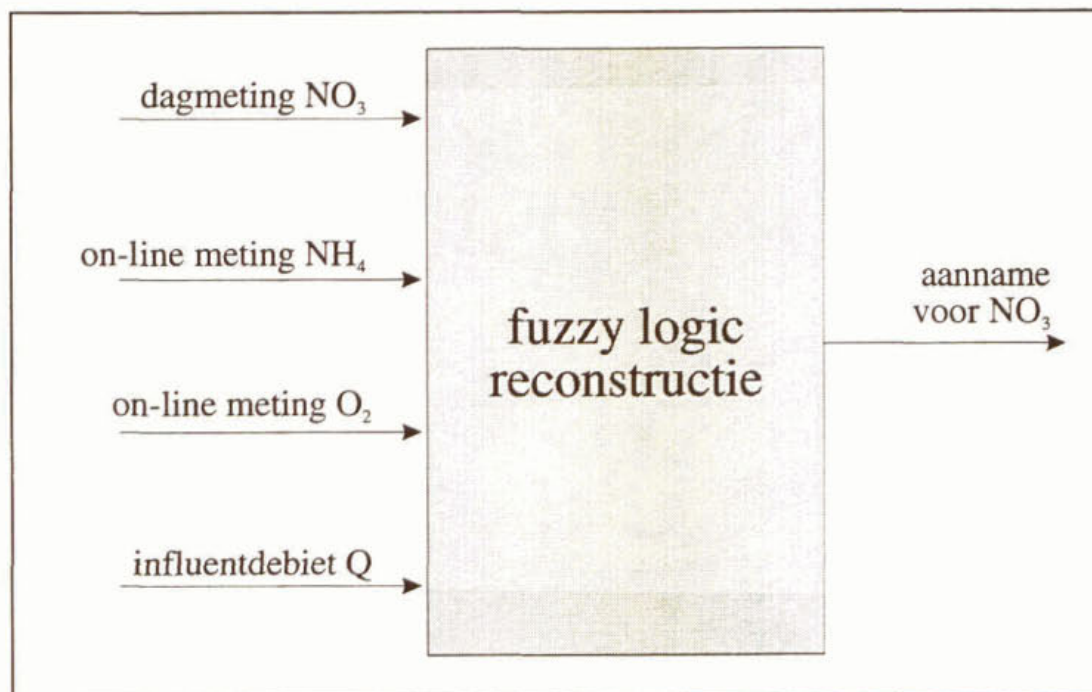
Fuzzy reconstructie of voorspelling

Als de relatie tussen de gemeten variabelen en de reconstructievariabele niet-lineair is, kan ook gebruik worden gemaakt van fuzzy logic. Een voorbeeld daarvan wordt gegeven in figuur 27.

Een voorbeeld van een kennisregel die in figuur 27 toegepast kan worden is:

Als delta NH₄ is zeer negatief dan delta nitraat is zeer positief

Ook kunnen dergelijke kennisregels worden toegepast in combinatie met de formules die in lineaire filters gehanteerd worden. In de literatuur is geen melding gemaakt van dergelijke toepassingen. In andere processen komen dergelijke toepassingen van fuzzy control voor.

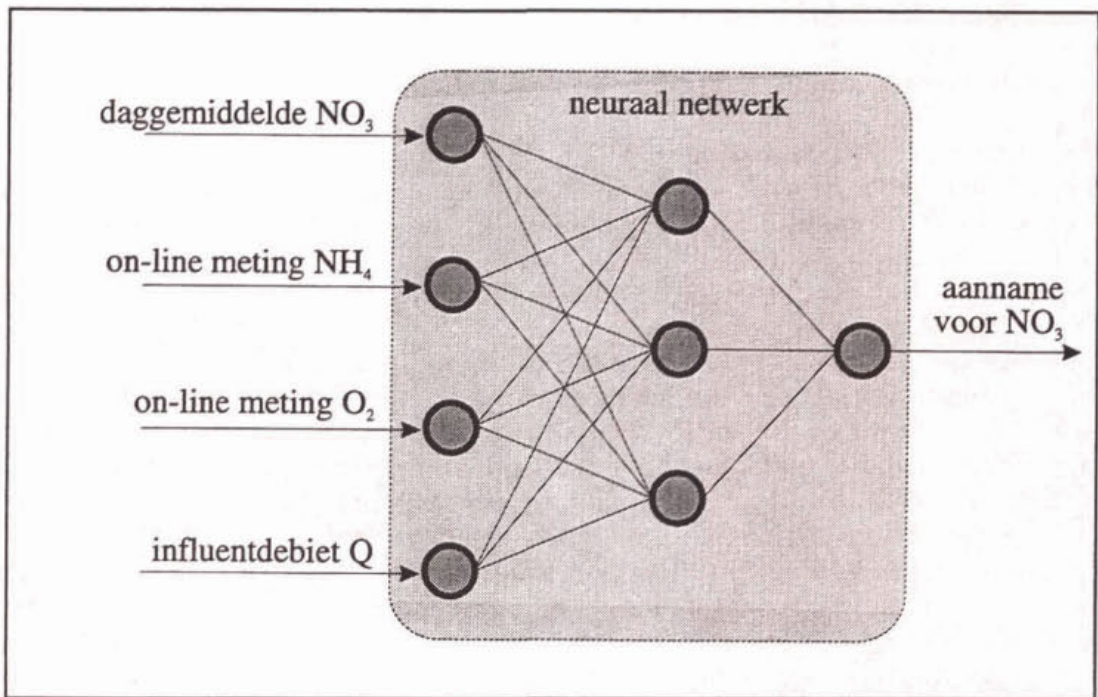


Figuur 27. Schematische weergave van de fuzzy reconstructie van een nitraatmeting.

Neurale netwerken

Bij de toepassing van neurale netwerken wordt voor een benadering gekozen die alleen van data gebruik maakt en niet van wiskundige verbanden of ervaringskennis. Een voordeel daarvan is dat er alleen numerieke gegevens nodig zijn om bepaalde voorspellingen te doen. Een nadeel is het feit dat een neurale netwerk een "black-box" is en geen ruimte geeft voor interpretatie of de toepassing van beschikbare kennis. Bovendien moet er een betrouwbare set gegevens met voldoende spreiding zijn om het netwerk te trainen, met andere woorden: er moeten betrouwbare waarden beschikbaar zijn van de invoervariabelen en de bijbehorende uitvoervariabele, die later geschat zal worden. In figuur 28 wordt een voorbeeld gegeven van de schatting van een nitraatconcentratie door middel van een neurale netwerk.

In de literatuur wordt éénmaal melding gemaakt van een dergelijke toepassing door Cohen *et al* (1996) die in een aanvoerregeling gebruik maakt van een neurale netwerk dat op basis van een aantal eenvoudige metingen de BZV-vracht van het influent bepaalt.



Figuur 28. Reconstructie van de nitraatconcentratie door middel van een
neuraal netwerk.

8 EVALUATIE EN CONCLUSIES

8.1 Behoeften vanuit de praktijk

Regeling van de aanvoer

De aanvoer naar de RWZI wordt nog nauwelijks geregeld. Geïntegreerde sturing van riolering en RWZI is perspectiefvol, vooral als het mogelijk zou zijn DWA te bufferen.

Regeling van de beluchting

Er is een ruime ervaring met beluchtingsregelingen. In veel gevallen is het zuurstofsignaal de enige ingangsvariabele. In toenemende mate worden ammonium-, nitraat- en redoxmetingen gebruikt. In enkele gevallen worden gegevens over de aanvoer of het dag/nachtritme gebruikt in de besturing. Er is behoefte aan een verbeterde reactie op veranderende procescondities. Daarnaast blijken regelstrategieën die ammonium- en nitraatmetingen gebruiken niet altijd het verwachte resultaat op te leveren. Het is in alle gevallen van belang de juiste regelstrategieën te volgen en zoveel mogelijk informatie afkomstig van het meetsignaal te gebruiken. Op grond van de uitgevoerde simulatiestudie en de bestudeerde literatuur kan worden geconcludeerd dat dit kan bijdragen aan een verdere verbetering van de effluentkwaliteit. Dit wordt ook verwacht van een feedforward signaal voor de aanvoer. Een feedforward signaal heeft waarschijnlijk het meeste effect bij propstroomsystemen doordat er een grotere vertragingstijd is tussen de verandering van het influent en de meting van de effecten daarvan.

De beluchting levert een belangrijke bijdrage aan het energieverbruik van een RWZI. Uit de simulatie en de bestudeerde literatuur blijkt dat hier een belangrijk effect is te verwachten van verbeterde multivariabele regelingen en regelstrategieën.

Dosering van chemicaliën

Uit de praktijk blijkt dat de dosering van chemicaliën ten behoeve van de fosfaatverwijdering op eenvoudige wijze kan worden geregeld. Hier is geen behoefte aan verbetering. Uit de uitgevoerde literatuurstudie blijkt dat in het slibontwateringsproces wel belangrijke verbeteringen mogelijk zijn die het drogestofgehalte verder verhogen; in de onderhavige studie is dit proces verder niet beschouwd.

Slibregelingen

In de praktijk worden eenvoudige slibregelingen toegepast. In het kader van de aandacht voor nutriëntverwijdering krijgen andere regelingen meestal prioriteit. Naar verwachting echter betekent zwevende stof in het effluent een niet-verwaarloosbaar aandeel in de totale effluentkwaliteit. In enkele gevallen wordt slibuitspoeling inderdaad als knelpunt aangegeven, evenals het feit dat er bij RWA te weinig slib in het beluchtingsbassin aanwezig is. Uit de uitgevoerde literatuurstudie blijkt dat er verbeterde regelstrategieën denkbaar zijn, met name voor de retourslibregeling.

Beheersing van licht slib

In het kader van het implementeren van verbeterde beluchtingsregelingen komt vaak als knelpunt naar voren dat men onzeker is over het verwachte effect op de SVI. Het is van groot belang dat hier aandacht aan geschonken wordt in de vorm

van verbeterde bewakings-, diagnose- en beslissingsondersteunende systemen.

Foutdetectie en diagnose

De bedrijfszekerheid, het benodigde onderhoud en de hoge kosten van sensoren worden nog steeds als knelpunt ervaren. De foutdetectie en het signaleren van de noodzaak tot ijking is hier een belangrijk verbeterpunt, waaraan door sensorontwikkelaars - in samenwerking met procesexperts - aandacht besteed moet worden. Daarnaast is de interpretatie van het meetsignaal een belangrijk aandachtspunt, bijvoorbeeld ook om de veelheid aan informatie en meetgegevens te reduceren.

Inzichtelijkheid, instelbaarheid en monitoring

Zodra procesregelingen complexer worden, bestaat de kans dat deze minder inzichtelijk worden. De inzichtelijkheid kan worden bevorderd door het invoeren van algemeen toepasbare regelingen en door de doelstellingen en randvoorwaarden van de regeling helder als invoervariabele van de regeling op te nemen. Het laatste bevordert eveneens de instelbaarheid. Daarnaast is het van belang dat de regeling goed gevolgd kan worden door bedrijfsvoerders en technologen. Het moet, bijvoorbeeld op het computerscherm, duidelijk zijn waarom de regeling een bepaalde actie onderneemt.

8.2 Eigenschappen van fuzzy control

In de voorliggende hoofdstukken is aangegeven op welke wijze fuzzy control kan bijdragen aan de verbetering van regelingen voor het actiefslibstelsysteem. Er zijn daarvoor diverse toepassingsmogelijkheden aangegeven. De volgende specifieke eigenschappen van fuzzy control vormen de belangrijkste redenen om daartoe over te gaan:

1. *De mogelijkheid ervaringskennis op te nemen in regelingen*

Er hoeft geen gebruik te worden gemaakt van wiskundige modellen en/of lineaire verbanden tussen ingangs- en stuursignalen. De ervaringskennis die in fuzzy regelingen kan worden opgenomen behoeft niet noodzakelijkerwijs afkomstig te zijn van bedrijfsvoerders of technologen. Door middel van data-analyse is het mogelijk kennisregels op te stellen die bestaande regelstrategieën kunnen verbeteren.

2. *De mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag*

Door niet-lineair te regelen kan sneller worden gereageerd op afwijkende omstandigheden. Bij de beluchtingsregeling blijkt dit bijvoorbeeld te resulteren in een energiebesparing.

3. *De inzichtelijkheid voor niet-regeltechnici*

Doordat kennisregels taalkundig worden geformuleerd kunnen bedrijfsvoerders en technologen beter betrokken worden bij het ontwerp van regelingen.

4. *De mogelijkheid aan te sluiten bij bestaande regelingen*

Fuzzy control dient te worden beschouwd als een aanvulling op andere regeltechnieken. Het is goed mogelijk alleen fuzzy control toe te passen voor bepaalde onderdelen van regelstructuren, of als aansturing van reeds bestaande regelingen. Als eenmaal een fuzzy regeling geïmplementeerd is, is deze uit te breiden met extra kennisregels zonder de systeemstructuur te veranderen.

Een nadeel van fuzzy control is dat de regeltechnische instellingen niet theoretisch te berekenen zijn. Hierdoor zou het optimaliseren van de regeling extra tijd kunnen kosten. Bij lineaire regeltechnieken kunnen de optimale regeltechnische instellingen theoretisch berekend worden, gegeven een lineair model. Het is hierbij echter niet zeker of het gehanteerde lineaire model een voldoende goede benadering van de werkelijkheid is. Overigens worden in de praktijk de instellingen van PID-regelingen meestal niet theoretisch berekend. Bij fuzzy control kunnen de optimale instellingen door middel van computersimulatie worden nagegaan.

8.3 Nader uit te werken toepassingsmogelijkheden

Uit het voorgaande blijkt dat de volgende toepassingsmogelijkheden overwogen kunnen worden om nader uit te werken:

1. Het ontwerpen en implementeren van een directe monovariabele fuzzy zuurstofregelaar.
2. Het ontwerpen en implementeren van een fuzzy supervisieregeling voor de instelling van PI(D)-constanten van een zuurstofregelaar.
3. Het ontwerpen en implementeren van een multivariabele fuzzy regeling voor de verwijdering van stikstof.
4. Het ontwerpen en implementeren van alternatieve regelstrategieën voor het retourslib- en spuislibregime door gebruik te maken van fuzzy modellerings-technieken.
5. Het koppelen van regelingen van twee of meer deelprocessen.
6. Ontwikkeling van fuzzy modellen met het doel de kans op licht slib te voorspellen, mogelijk in combinatie met regelingen die vroegtijdig een stijging van de SVI signaleren.
7. Het verbeteren van de interpretatie van metingen door gebruik te maken van fuzzy technieken voor foutdetectie, monitoring en diagnose.
8. Het reconstrueren en voorspellen van waarden van procesvariabelen die niet of elders gemeten worden.

De hierboven beschreven toepassingen van fuzzy control kunnen alle beschouwd worden als perspectievolle mogelijkheden om de automatische besturing van het actiefslibstelsysteem verder te ontwikkelen. In deze paragraaf zullen hieraan prioriteiten worden gesteld. Daarvoor kunnen de volgende criteria worden geformuleerd.

1. De toegevoegde waarde van de toegepaste fuzzy regeling ten opzichte van andere regeltechnieken.
2. Het verwachte effect van een dergelijke regeling en het belang daarvan voor de waterbeheerders. Als belangrijke effecten gelden: een verbeterde effluentkwaliteit, een reductie in het energie- of chemicaliënverbruik en een reductie in de vereiste inspanningen, bijvoorbeeld het inregelen.
3. De mogelijkheid de regeling te implementeren als aanvulling op reeds bestaande regelingen.
4. De beschikbare kennis en ervaring en de verwachte inspanningen die nodig zijn om een regeling te realiseren, in combinatie met de mogelijkheid om de regeling voorafgaand aan implementatie te testen, bijvoorbeeld door middel van simulatie.

In tabel 9 worden de geformuleerde toepassingsmogelijkheden beoordeeld op basis van de genoemde criteria.

Tabel 9: Beoordeling van de geformuleerde toepassingsmogelijkheden van fuzzy control voor de besturing van het actiefsilbsysteem

Prioriteit	Kennis, ervaring en inspanningen				Aanvulling/vervang- ing bestaande regeling	Verwachte effect voor de waterbeheerder	Reductie ener- gie/chemica- inspanningen	Verbetering effluent/ voorkomen uitbreiding	waarde van fuzzy control	1. Monovariabele zuur- stofregelaar	2. Supervisiereregeling voor PID-constantes	3. Multivariabele be- luchtingsregeling	4. Alternatieven voor bestaande silbregelin- gen	5. Koppeling van regel- kringen	6. Signalering en voor- spelling van afwijken- de silbbezinking	7a. Foutdetectie	7b. Diagnose	8. Reconstructie en voorspelling van niet- gemeten variabelen
	Eraring met fuzzy control	Simulatiemo- gelijkheden	Verwachte inspanningen	Prioriteit														
3	++	++	weinig	0	vervanging	+	-/±	±	±	±	0	+	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling
2	++	++	gemiddeld	0	aanvulling	++	-/±	++	++	++	0	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
1	++	++	gemiddeld	+	beide mogelijk	+	+	+	+	+	+	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
2	++	±/+	gemiddeld	+	beide mogelijk	±	++	++	++	++	0	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
3	+	+	gemiddeld	±	aanvulling	±	+	+	+	+	+	+	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling
1	++	++	gemiddeld	0	beide mogelijk	++	+	+	+	+	0	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
2	++	±/+	gemiddeld	+	beide mogelijk	±	++	++	++	++	0	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
3	±	±	weinig	0	vervanging	+	-/±	±	±	±	0	+	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling
1	±	±	gemiddeld	0	beide mogelijk	+	+	+	+	+	+	+	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk	beide mogelijk
2	++	++	gemiddeld	0	aanvulling	++	-/±	++	++	++	0	+	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling
3	±	±	weinig	0	vervanging	+	-/±	±	±	±	0	+	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling	aanvulling

0 niet of in geringe mate

± enigszins

+ redelijk veel

++ veel

Prioriteitsstelling:

1 = zeer hoge prioriteit

2 = vrij hoge prioriteit

3 = matig hoge prioriteit

Een *monovariabele directe regelaar voor de beluchting* is te realiseren door middel van vele regeltechnieken. Een fuzzy regelaar biedt in potentie een aantal voordelen door de mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag. Het verwachte effect bestaat uit een stabiel en sneller regelgedrag, waardoor met name een reductie van het energieverbruik wordt verwacht. Met de directe fuzzy regelaar die tijdens de simulatiestudie getest is, werd inderdaad een reductie van het energiegebruik gerealiseerd. De wijze waarop dit werd gerealiseerd was niet zeer specifiek voor fuzzy control. Een directe monovariabele fuzzy regelaar vervangt eventuele bestaande zuurstofregelaars, maar kan wel in combinatie met andere procesregelingen worden gebruikt. Het realiseren van een dergelijke regelaar vereist relatief weinig inspanningen. Er is reeds ervaring opgedaan met deze regelaar in een simulatiemodel (Rasch, 1996) en in de praktijk (Salo *et al*, 1997).

Een *fuzzy supervisieregeling voor de aanpassing van PI(D)-constanten van een zuurstofregelaar* is in dit kader eveneens een aantrekkelijke optie. Deze toepassing is meer specifiek voor fuzzy control dan een directe monovariabele regelaar en het verwachte effect op het energieverbruik is groter, omdat er beter op variaties in de procesomstandigheden kan worden gereageerd. Het effect op de effluentkwaliteit is onzeker. De fuzzy supervisieregeling kan het gedrag van bestaande PI(D)-regelaars verbeteren en is in principe toepasbaar voor elke RWZI met een PI(D)-zuurstofregeling. Het ontwerp van de regeling zal gebaseerd moeten worden op data die in de praktijk on-line gemeten zijn en ervaringskennis van het inregelen. Het vereist meer inspanningen om deze regelaar te realiseren dan een directe regelaar. Er is reeds ervaring opgedaan met dit type regeling (Bongards *et al*, 1996).

Een *multivariabele regeling voor de beluchting* is in principe te realiseren door middel van vele regeltechnieken, waarbij fuzzy control een aantrekkelijk alternatief vormt vanwege de mogelijkheid van niet-lineair regelgedrag zonder schakelende overgangen. In de literatuur is een aantal succesvolle toepassingen van multivariabele fuzzy beluchttingsregelingen gerapporteerd (Hamamoto *et al*, 1997; Yin en Stenstrom, 1996; Alex en Tschepeski, 1994). Ook in de uitgevoerde simulatie in de onderhavige studie zijn een verbeterde stikstofverwijdering en een gereduceerd energieverbruik gerealiseerd. Een nieuw te ontwikkelen multivariabele fuzzy regeling is in principe op een groot aantal RWZI's toepasbaar. Het is mogelijk dat de optimale regelstrategie voor een compleet gemengd systeem afwijkt van een optimale regelstrategie voor een propstroomsysteem door het optreden van grote tijdvertragingen in het propstroomsysteem. Over de onderlinge verbanden tussen de verschillende ingangsvARIABLEN en het stuursignaal zijn vrij veel ervaringskennis en meetgegevens beschikbaar. De regeling kan worden getest door gebruik te maken van simulaties in SIMBA.

De *optimalisatie van de regeling van het slibgehalte door slibretour en -spui* is een interessante optie omdat door middel van ervaringskennis, eventueel aangevuld met uit data geëxtraheerde kennisregels, verbeterde regelstrategieën denkbaar zijn. Eenmaal ontwikkelde regelstrategieën hoeven niet noodzakelijkerwijs door middel van fuzzy control gerealiseerd te worden. Door verbeterde regelstrategieën kan mogelijk de effluentkwaliteit worden verbeterd, met name bij regenweeraanvoer. Dit zou bovendien kunnen resulteren in een verhoging van het haalbare slibgehalte, waardoor uitbreiding van de nabezinkcapaciteit voorkomen kan worden. Er wordt geen direct effect op het energieverbruik verwacht. De ontwikkelde regelstrategieën zijn naar verwachting op een groot aantal RWZI's toepasbaar.

Het kennisniveau op het gebied van slibbezinking is minder hoog dan op het gebied van de biologische omzettingsprocessen, als ook de kwaliteit van de vlokvorming in beschouwing moet worden genomen. Daardoor zijn er minder mogelijkheden om regelstrategieën door middel van simulaties te testen. Dit is echter geen reden om juist door het extraheren van kennisregels uit meetgegevens niet meer kennis op te doen. Er is hiermee ervaring opgedaan door Tsai *et al* (1996).

De koppeling van de verschillende deelprocessen leent zich vooral voor een fuzzy benadering omdat het daarbij relatief eenvoudig is een supervisieregeling te realiseren in aanvulling op bestaande regelkringen. In theorie is een positief effect op de effluentkwaliteit te verwachten. Het kennisniveau van de interacties tussen de deelprocessen is redelijk hoog; de ontwikkeling van een overkoepelende regeling zal echter nog redelijk veel inspanningen vergen. Het ligt bovendien voor de hand eerst de afzonderlijke regelkringen te optimaliseren. Een overkoepelend besturings-systeem zou eerst als beslissingsondersteunend systeem kunnen worden geïmplementeerd. Er zijn in de literatuur voorbeelden van overkoepelende regelingen beschreven (Tong *et al*, 1980; Couillard en Zhu, 1992; Marsili-Libelli *et al*, 1994; Oswald, 1995; Cohen *et al*, 1996).

De slibindexbeheersing is een vakgebied dat zich bij uitstek leent voor een fuzzy benadering. Aangezien de slibindexbeheersing veelvuldig als het knelpunt van beluchttingsregelingen wordt genoemd, verdienen dergelijke ontwikkelingen de aandacht. Het zal echter nog veel inspanningen vergen voordat de kennis, die op dit terrein nog uitgebreid moet worden, in regelingen kan worden opgenomen. Fuzzy modelvorming is in dit stadium belangrijker dan fuzzy control. Een fuzzy model zou als beslissingsondersteunend systeem en als bewaking kunnen dienen, voordat daadwerkelijk geregeld wordt. In de literatuur is een aantal ervaringen op dit gebied beschreven (Watanabe *et al*, 1993; Geselbracht *et al*, 1988).

Foutdetectie heeft prioriteit voor verdere ontwikkeling van de automatisering van afvalwaterzuivering, met name omdat de waterbeheerders het gebrek aan betaalbare en betrouwbare sensoren nog steeds als knelpunt ervaren. Op dit gebied zijn samenwerkingsverbanden noodzakelijk met sensorontwikkelaars. Op dit moment ligt het minder voor de hand dit aspect in een demonstratieproject uit te werken. *Monitoring* van regelingen tijdens de procesvoering is een aspect dat bij de realisatie van alle regelingen in de praktijk ruime aandacht moet krijgen en goed moet worden afgestemd met de eindgebruiker. *Diagnose* is een vakgebied dat verder ontwikkeld moet worden en waaraan fuzzy logic een belangrijke bijdrage kan geven, mogelijk als aanvulling op beslissingsondersteunende systemen.

De reconstructie en voorspelling van niet gemeten procesvariabelen is een aantrekkelijke optie omdat hiermee mogelijk kosten vermeden worden voor sensoren. Hierbij kunnen ook andere technieken dan fuzzy control worden gehanteerd zoals neurale netwerken. Het zal extra inspanningen vergen om een dergelijk fuzzy model of neurale netwerk breed toepasbaar te maken. Per geval zal moeten worden afgewogen of de vereiste inspanningen zich terugverdienen.

LITERATUUR

Alex, J., U. Jumar, R. Tschepetzki, 1994. A Fuzzy Controller for Activated Sludge Waste Water Plants. *Artificial Intelligence in Real Time*, 1994, pp 61-66.

Aoi, T., Y. Okaniwa, K. Hagiwara, K. Motomura, E. Iwaihara, M. Imai, Y. Serizawa, 1992. A Direct ammonium control system using fuzzy inference in a high-load biological denitrification process treating collected human excreta. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 26, No. 5-6, pp 1325 -1334.

Bergh, S.G. 1996. Diagnosis Problems in Wastewater Settling, MSc thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology.

Bergh, S.G. and G. Olsson, 1996. Knowledge based diagnosis of solids-liquid separation problems. *Wat, Sci. Tech.* Vol. 33, No 2, pp. 219-226.

Berthouex P.M., Member, ASCE, Wenje Lai en A. Darjatmoko, 1989. *Journal of Environmental Engineering*, Vol 115, No.3, pp 650-671.

Bongards, M., 1996. Fuzzy adapted PID-Controllers Applied in the Biological Part of Wastewater Treatment Plants. *Proceedings of the Second International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing*, Siegen, Germany.

Cohen, A., G. Janssen, S.D. Brewster, R. Seeley, A.A. Boogert, A.A. Graham, M.R. Mardani, N. Clarke and N.K. Kasabov, 1996. Application of Computational Intelligence for on-line Control of a Sequencing Batch Reactor (SBR) at Morrinsville Sewage Treatment Plant. *Proceedings of 1996 IAWQ-NVA Congress on Advanced Wastewater Treatment*, Amsterdam, The Netherlands.

Couillard, D. and S. Zhu, 1992. Control Strategy for the Activated Sludge Process under Shock Loading. *Wat. Res.* vol. 26, No. 5, 649-655.

Froese, Th., C.v. Altrock, St. Franke, 1994. Optimization of a water-treatment system with fuzzy logic control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* pp 1614-1619.

Gebhardt, F. en Maschlanke J., 1994, *Desalination*, 1996. Possible applications of fuzzy controllers for chemical phosphate elimination. *Desalination*, 96, pp 89-102.

Geselbracht, J.J., E. Downey Brill, John T. Pfeffer, 1988. Rule-Based Model of Design Judgment about Sludge Bulking. *Journal of Environmental Engineering*, Vol 114, No. 1, February. pp. 54-73.

Hamamoto Y., S. Tabata en Y. Okubo, 1997. Development of the intermittent cyclic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal, *Wat. Sci. Tech.* Vol 35., No.1 pp. 145-152.

Harremoës, P., A.G. Capodaglio, B.G. Hellström, M.Henze, K.N. Jensen, A. Lynggaard-Jensen, R. Otterpohl and H. Soeberg, 1993. Wastewater treatment Plants Under Transient Loading - Performance, Modelling and Control. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 27, No. 12. pp 71-115.

Jager, R., 1995. Fuzzy Logic in Control. Proefschrift Technische Universiteit Delft.

Marsili-Libelli, S., S. Beni, P. Cianchi, P. Quercioli, 1994. High-Level Fuzzy Controller for a complex wastewater treatment process. Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent, 59/4a.

Meinema K., H. van der Roest en K.M. van Schagen, 1995. Zuurstofregeling uit de tijd? *H₂O* 15/95 pp 456-459.

Olsson, G., B. Andersson, B.G. Hellström, H. Hölmström, L.G. Reinius, and P. Vopatek, 1989. Measurements, Data-analysis and Control Methods in Wastewater Treatment Plants-State of the Art and Future Trends. Vol. 21, pp. 1333-1345.

Oswald, G., M. Mather, H.J. Schmeidd, K. Königsdorfer, and E.D. Gilles, 1995. Model-based Monitoring and Control of an Industrial Biological Wastewater Treatment Plant. *Biochem. Eng. 3*, Third International Symposium.

Pirsing, A., U. Wiesmann, G. Kelterbach, U. Schaffraniets, H. Röck, B. Eichner, S. Szukal, G. Schultze, 1996. On-line monitoring and modelling based process control of high rate nitrification - lab scale experimental results. *Bioprocess Engineering* 15, pp 181-188.

Schaffraniets, U. en H. Röck, 1994. Regelung des Nitrifikationsprozess bei hochbelasteten Abwässern mittels Fuzzy-Logik. *Automatisierungstechnik*, 42, 4.nitrification - lab scale experimental results. *Bioprocess Engineering*, 15, 181-188.

Tong, R.M., M.B. Beck en A. Latten, 1980. Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process. *Automatica*, 16, pp 659-701.

Tsai, Y.P. C.F. Ouyang, M-Y. Wu, W.L. Chiang, 1996. *Water Environment Research*, 68-6, pp 1045-1053.

Watanabe, S., K. Baba, M. Yoda, W.C. Wu, I. Enbutsu, M. Hiraoka, K. Tsumura, 1993. Intelligent operation support system for activated sludge process. *Wat. Sci. tech.* 28, 11-12, pp 325-332.

Yin, M.T., en M.K. Stenstrom, Fuzzy Logic Process control of HPO-AS Process, 1996. *Journal of Environmental Engineering*, June 1996, pp 484-492.

STOWA-rapport 97W01, Praktijkonderzoek aan de stikstofverwijdering op de RWZI Kralingseveer.

STOWA-rapport 97W03, Ontwikkeling van een procesbesturing voor oxydatiesloten. Vergelijking van een O₂-, een NH₂/O₂- en een NO₃/NH₄/O₂-regeling.

STOWA-rapport 97W06, Ervaringen met regeling op stikstof en zuurstof op de RWZI Gennep.

BEGRIPPENLIJST

Adaptieve regeling	: Een regeling waarbij de instellingen variabel zijn.
Auto-tuning	: Het automatisch vaststellen van de optimale instellingen door de regeling zelf.
Cascaderegeling	: Multivariabele regeling waarbij twee of meer regelkringen in een cascade gekoppeld zijn.
Conventionele regeltechniek	: In deze studie: alle niet-fuzzy regeltechnieken.
Defuzzificatie	: Het geven van een "harde" waarde aan een op zich vaag gedefinieerde actie. Bijvoorbeeld: zuurstof "iets" hoger wordt setpoint voor zuurstof moet 0,1 mg/l omhoog.
Directe regeling	: Synoniem voor laag niveau regeling.
Dynamische simulatie	: Simulatie van een proces in de tijd, al dan niet rekening houdend met veranderingen in de invoerparameters.
Expertsysteem	: Verzameling van (mathematische of niet-mathematische) regels, die het oordeel van een expert over een proces tracht te beschrijven.
Feedback	: Terugkoppeling. Door middel van metingen in het geregelde proces worden de effecten van de stuuracties weer teruggekoppeld naar de regeling. Bij een beluchtersregeling wordt de zuurstofconcentratie gemeten en teruggekoppeld naar de regeling.
Feedforward	: Voorwaartse aansturing. De stuuracties worden afgeleid van signalen die niet in het proces geregeld worden, zoals bijvoorbeeld de temperatuur of het debiet.
Fuzzy control	: Regeltechniek op basis van fuzzy logic waarbij gebruik wordt gemaakt van linguïstische kennisregels en vage verzamelingen.
Fuzzy inferentie	: De bewerking van een aantal <i>fuzzy</i> regels. Voorbeeld "Als de hemel <i>vrij blauw</i> is, en de temperatuur is <i>redelijk</i> hoog dan is het <i>behoorlijk mooi</i> weer". <i>Behoorlijk mooi</i> is het resultaat van de fuzzy inferentie van bewerkingen met de fuzzy omschrijvingen van de hemel en de temperatuur.
Fuzzificatie	: Het "vaag" maken van een hard signaal. Bijvoorbeeld Zuurstofconcentratie is 0,5 mg/l wordt: zuurstof voor 50% vrij laag en voor 50 % zeer laag.
Fuzzy logic	: "Vage logica", die volgens de wiskundige theorie van L. Zadeh gebaseerd is op vage verzamelingen. Dit impliceert dan dat er van gradaties gebruik gemaakt kan worden in plaats van ja/nee logica.
Intermitterende beluchting	: De beluchting is afwisselend aan- en uitgeschakeld.
Intelligente regeltechniek	: Alle regeltechnieken die gebruik maken van methoden uit de kunstmatige intelligentie, zoals fuzzy logic, neurale netwerken en expertsystemen.
Kalman-filter	: Een Kalman-filter is een onderdeel van een regeling dat een schatting maakt van een toestandsvariabele, bijvoorbeeld een schatting van een niet-gemeten variabele. Deze schatting is gebaseerd op een model van het proces.

Linguïstische kennisregel	: Tekstuele beschrijving van informatie van een proces in de vorm van een Als-Dan regel.
Laag niveau regeling	: Regeling die direct ingrijpt op het proces.
Monovariabele regeling	: Single-input/single-output regeling: regeling met één ingangssignaal en één stuuractie.
Multivariabele regeling	: Multi-input/multi-outputregeling: regeling met meer ingangssignalen en één of meer stuuracties.
Ratioregeling	: Een fuzzy regeling die in het kader van het onderhavige STOWA-onderzoek in een simulatiemodel getest is en die de gewenste verhouding tussen de beluchte en onbeluchte periode bepaalt voor een actiefslibstelsysteem met intermitterende beluchting.
Regelaar	: De hardware- of softwarematige component in de regeling, die op basis van één of meer ingangssignalen één of meer stuuracties bepaalt.
Regeldoel	: Het doel waarmee een regeling wordt toegepast, bijvoorbeeld het handhaven van de zuurstofconcentratie op een bepaald setpoint.
Regeling	: De concrete uitwerking van de regelstrategie, in de vorm van een systeem met sensoren, regelaars en sturelementen. De beluchters zijn een voorbeeld van een sturelement. In tegenstelling tot sturing, vindt bij regeling een terugkoppeling plaats met het proces (zie feed-back).
Regelstrategie	: De aanpak die gevolgd wordt om het regeldoel te bereiken.
Supervisieregeling	: Nederlandse vertaling van supervisory control.
Supervisory control	: Overkoepelende regeling die regelingen op een lager niveau bestuurt.
Ziegler Nichols criteria	: Vuistregels die gebruikt worden bij het vaststellen van de P-, I- en D-constanten door middel van een staprespons.

BIJLAGE 1

GEGEVENS OVER HET SIMULATIEMODEL

Bijlage 1: Gegevens over het simulatiemodel

Het simulatiemodel dat is gehanteerd in hoofdstuk 6 is gebaseerd op een bestaande RWZI met een aantal fictieve modificaties van de beluchting, waardoor het beluchtingsvolume flexibel is en de beluchtingselementen traploos geregeld kunnen worden. De volgende procestechnologische gegevens zijn van belang:

- volume AT = 7.650 m³
- slibgehalte AT = 4,5 g/l
- BZV-vracht² (afloop VBT) = 1.922 kg/d
- N_{Kj}-vracht² (afloop VBT) = 735 kg/d

- BZV-belasting = 0,056 BZV/kg d.s.d.
- N_{Kj}-belasting = 21 g N/kg d.s.d.
- DWA-debiet = 18050 m³/d
- RWA-debiet = 27640 m³/d

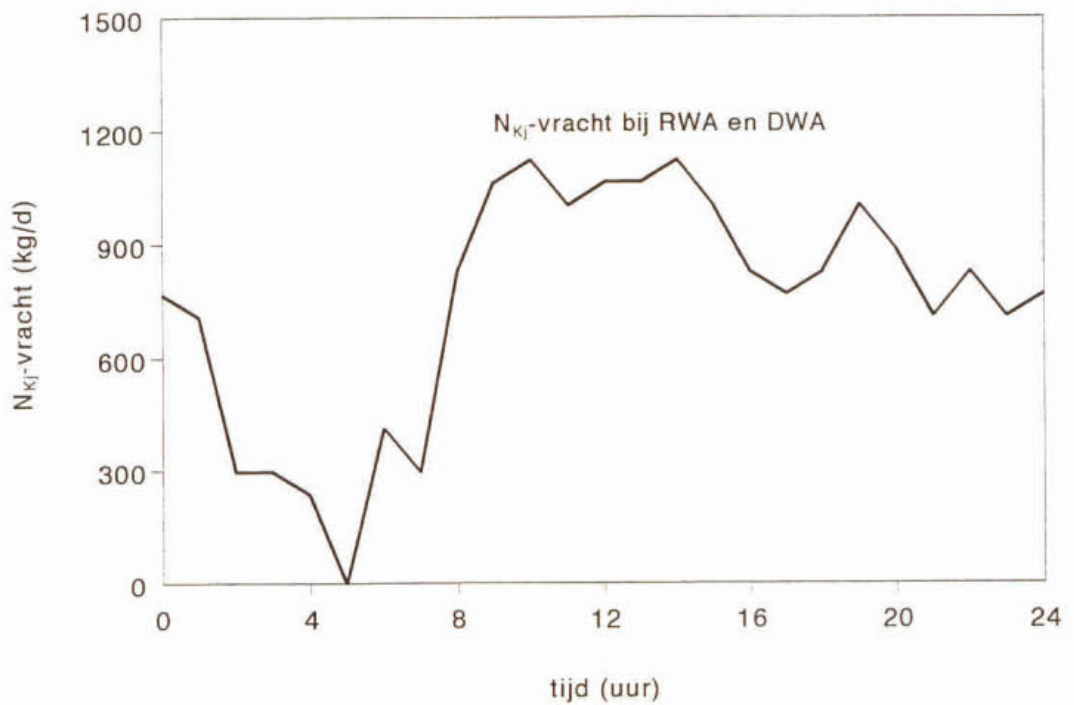
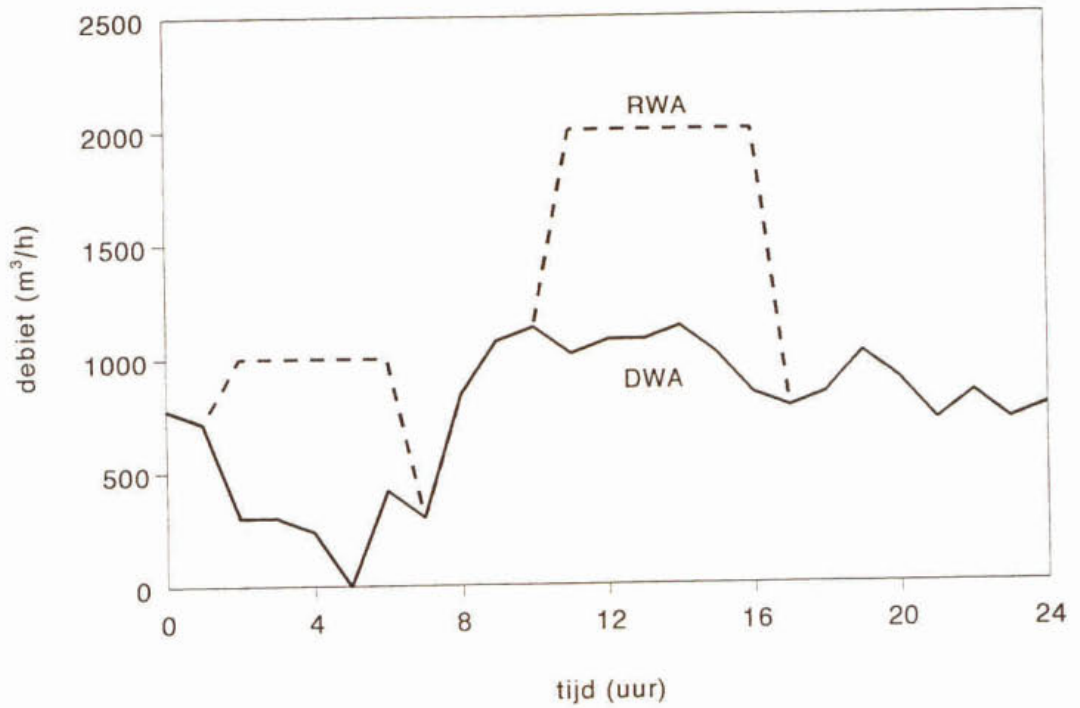
Samenstelling influent na afloop van de voorbezinktank³:

- CZV-totaal = 290 mg/l, waarbij:
 - S_i-fractie = 10%
 - * S_s-fractie = 24%
 - * X_i-fractie = 27%
 - * X_s-fractie = 39%

In figuur I.1 zijn de aanvoerpatronen weergegeven.

² vrachten zijn identiek bij DWA en RWA

³ S_i = opgelost inert CZV
S_s = opgelost snel afbreekbaar CZV
X_i = niet opgelost inert CZV
X_s = niet opgelost langzaam afbreekbaar CZV



Figuur 1.1.

Aanvoerpatronen die bij de simulatie gehanteerd zijn. Bovenste figuur: debieten bij DWA en RWA. Onderste figuur: N_{kj}-vracht bij zowel DWA als RWA.

Bijlage 1: Gegevens over het simulatiemodel

Het simulatiemodel dat is gehanteerd in hoofdstuk 6 is gebaseerd op een bestaande RWZI met een aantal fictieve modificaties van de beluchting, waardoor het beluchtingsvolume flexibel is en de beluchtingselementen traploos geregeld kunnen worden. De volgende procestechnologische gegevens zijn van belang:

- volume AT = 7.650 m^3
- slibgehalte AT = $4,5 \text{ g/l}$
- BZV-vracht² (afloop VBT) = 1.922 kg/d
- N_{Kj} -vracht² (afloop VBT) = 735 kg/d

- BZV-belasting = $0,056 \text{ BZV/kg d.s.d.}$
- N_{Kj} -belasting = 21 g N/kg d.s.d.
- DWA-debiet = $18050 \text{ m}^3/\text{d}$
- RWA-debiet = $27640 \text{ m}^3/\text{d}$

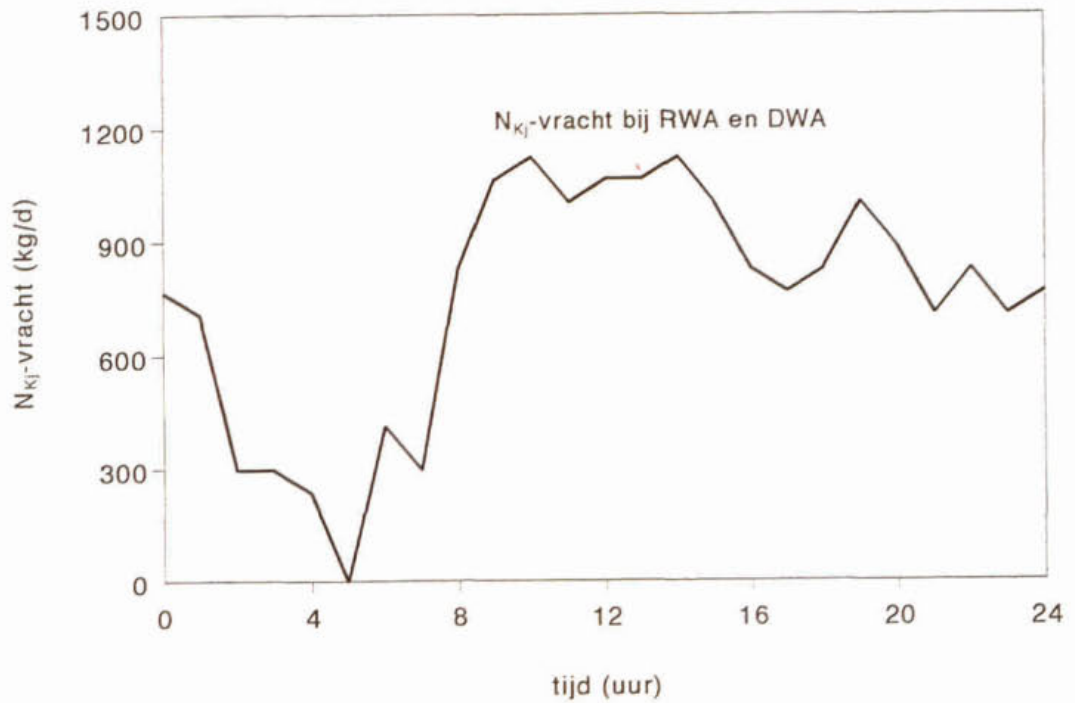
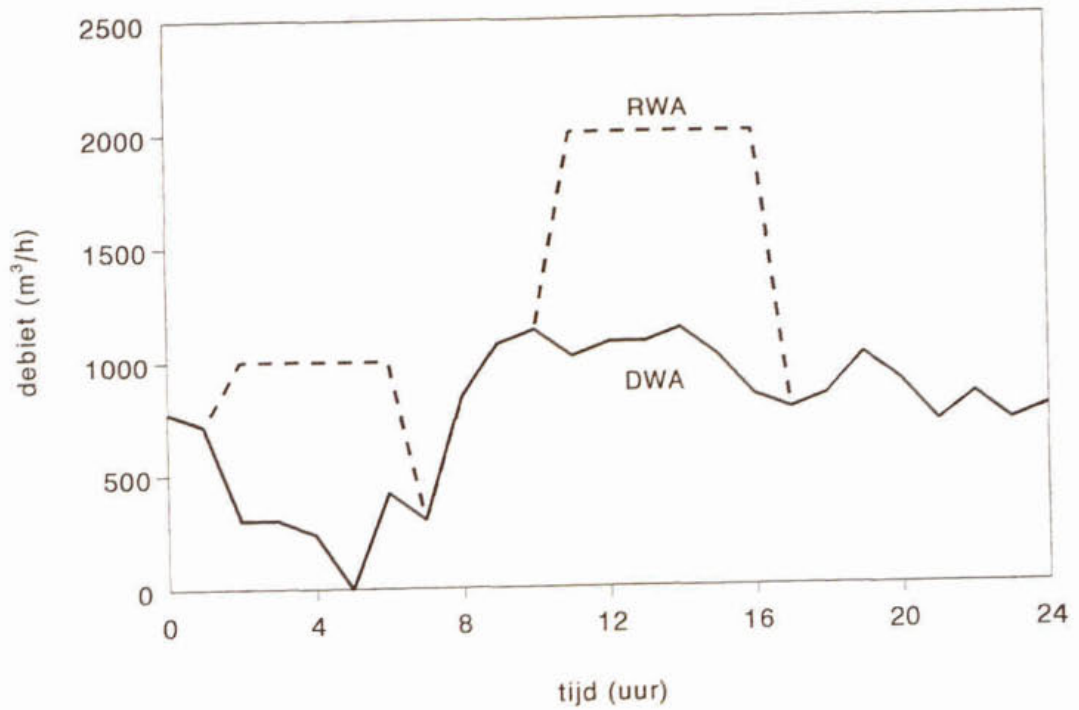
Samenstelling influent na afloop van de voorbezinktank³:

- CZV-totaal = 290 mg/l , waarbij:
 - S_I -fractie = 10%
 - * S_s -fractie = 24%
 - * X_I -fractie = 27%
 - * X_s -fractie = 39%

In figuur I.1 zijn de aanvoerpatronen weergegeven.

² vrachten zijn identiek bij DWA en RWA

³ S_I = opgelost inert CZV
 S_s = opgelost snel afbreekbaar CZV
 X_I = niet opgelost inert CZV
 X_s = niet opgelost langzaam afbreekbaar CZV



Figuur 1.1.

Aanvoerpatronen die bij de simulatie gehanteerd zijn. Bovenste figuur: debieten bij DWA en RWA. Onderste figuur: N_{KJ}-vracht bij zowel DWA als RWA.

