

**Model gebaseerd regelen**  
*voor biologische rioolwaterzuivering*

**Eindrapport**

Eindrapport BWI Stage  
Floris Beltman

Juni 2008



# Model gebaseerd regelen *voor biologische rioolwaterzuivering*

## Eindrapport

Eindrapport BWI Stage  
Floris Beltman

Begeleiding: dr. Fetsje Bijma, dr. Auke Pot (Vrije Universiteit)  
ir. Peter Koenders, dr. ir. Arie de Niet (Witteveen+Bos)

vrije Universiteit amsterdam



vrije Universiteit

Faculteit der Exacte Wetenschappen  
Studierichting Bedrijfswiskunde en Informatica  
De Boelelaan 1081a  
1081 HV Amsterdam

Stagebedrijf:



Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v.  
Afdelingen Informatietechnologie en Riolering  
Van Twickelostraat 2 (hoofdkantoor)  
7411 SC Deventer

Juni 2008



## VOORWOORD

Ter afsluiting van de Master Bedrijfswiskunde en Informatica (Business Mathematics and Informatics) aan de Vrije Universiteit, dient de student een zelfstandig onderzoek te doen in de vorm van een afstudeerstage bij een (commerciële) organisatie. Het doel van de stage is het onderzoeken, het analyseren, het objectiveren en (een aanzet geven tot) het oplossen van een probleem van de organisatie, gebruikmakend van de technieken die de student heeft geleerd tijdens zijn opleiding.

Mijn afstudeerstage heb ik uitgevoerd bij Witteveen+Bos, te Deventer. Daar heb ik onderzoek gedaan naar een statistisch model dat gebruikt kan worden voor het sturen van (een deel van) het biologische proces van een rioolwaterzuiveringsinstallatie. Dit eindrapport is een verslaglegging van het onderzoek.

Ik wil graag Peter Koenders en Arie de Niet, mijn begeleiders bij Witteveen+Bos, bedanken voor de begeleiding, samenwerking en (kritische) commentaren gedurende de stage. Ook mijn eerste begeleider bij de Vrije Universiteit, Fetsje Bijma, wil ik hartelijk bedanken voor haar bijdrage.

Verder wil ik alle andere personen die een bijdrage hebben geleverd aan mijn onderzoek bedanken. In het bijzonder Eric van Essen (Witteveen+Bos) en Ed Brandt (Waternet) voor hun bijdrage rond de (mogelijke) implementatie bij RWZI Westpoort.

Ten slotte wil ik de collega's (Peter, Eric, Jaap, Marcel, Gerrit-Jan en Raymond) op de kamer waar ik gedurende zes maanden verbleef, heel erg bedanken! Zonder de vele bakken koffie en de gezelligheid, zouden de maanden een lange en ongezellige periode geweest zijn.

Floris Beltman  
Juni 2008  
florisbeltman@gmail.com



## **SAMENVATTING**

Tijdens het afstudeeronderzoek is onderzoek gedaan naar een statistisch model voor model gebaseerd regelen binnen het biologische proces van een rioolwaterzuiveringsinstallatie. Er is voor statistische technieken gekozen, omdat het biologische proces een complex en niet lineair proces is. Het statistische model is een voorspellend model. Daarnaast dienen op basis van deze voorspelling optimale waarden geleverd te worden voor de te regelen elementen.

Voorafgaand aan het vormen van het statistische regelmodel is het deelonderzoek "Optimalisatiedoelstelling" uitgevoerd. Het doel van dit deelonderzoek is het identificeren van de gewenste prestaties van model gebaseerd regelen.

<< *VERTROUWELIJK* >>





**INHOUDSOPGAVE**

<b>VOORWOORD</b>	<b>I</b>
<b>SAMENVATTING</b>	<b>III</b>
<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>V</b>
<b><i>DEEL I:      Introductie</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b>1. ALGEMEEN</b>	<b>2</b>
1.1. Witteveen+Bos	2
1.2. Oorsprong van het onderzoek	2
1.3. Opdrachtformulering	2
1.4. Opbouw onderzoek	3
1.5. Indeling rapport	3
<b>2. OMSCHRIJVING PRINCIPES</b>	<b>6</b>
2.1. Rioolwaterzuiveringsinstallatie	6
2.2. Actiefslib proces	6
<b><i>DEEL II:     Optimalisatiedoelstelling</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b>3. ALGEMEEN</b>	<b>12</b>
<b>4. INVALSHOEKEN INTERVIEWS</b>	<b>13</b>
4.1. Sturing	13
4.2. Effluent kwaliteit: wettelijke eisen	13
4.3. Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer	15
4.4. Kosten	16
4.5. Universaliteit	17
4.6. Metingen	18
<b>5. RESULTATEN INTERVIEWS</b>	<b>19</b>
5.1. Sturing	19
5.2. Effluent kwaliteit: wettelijke eisen	20
5.3. Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer	22
5.4. Kosten	22
5.5. Universaliteit	23
5.6. Metingen	24
<b>6. GRENZEN ACTIEFSLIB PROCES</b>	<b>25</b>
6.1. STOWA rapport	25
<b>7. CONCLUSIE OPTIMALISATIEDOELSTELLING</b>	<b>27</b>
7.1. Optimalisatiedoelstelling	27
7.2. Aandachtspunten modelvorming	28
<b><i>DEEL III:    Modelvorming</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>8. ALGEMEEN</b>	<b>30</b>



<b>9. DATA ANALYSE</b>	<b>31</b>
9.1. Datasets	31
9.2. Resultaten	31
9.3. Conclusies	36
<b>10. BESCHRIJVING HUIDIG MODEL</b>	<b>37</b>
10.1. Theoretisch verband	37
10.2. Verandering totaal stikstof	39
10.3. Lineair regressiemodel	39
10.4. Kalman filter	41
10.5. Kwaliteit regressiemodel	46
10.6. Periodieke aanroep	47
10.7. Randvoorwaarden	48
<b>11. ANALYSE AANNAMEN HUIDIG MODEL</b>	<b>50</b>
11.1. Stikstof parabool	50
11.2. Analyse fundamentele vergelijking	56
11.3. Periodieke aanroep	60
11.4. Randvoorwaarden	61
11.5. Conclusie	62
<b>12. INGEBRUIKNAME HUIDIG MODEL</b>	<b>63</b>
12.1. Algemeen	63
12.2. Analyse ingebruikname	65
12.3. Aanpassingen huidig model	68
12.4. Conclusie	75
<b>13. VORMING ALTERNATIEVE MODELLEN</b>	<b>76</b>
13.1. Uitgangspunten	76
13.2. Kunstmatige dataset en theoretisch verband	79
13.3. Meervoudige lineaire regressie	81
13.4. Niet-lineaire regressie	92
13.5. Conclusie	103
<b>14. VERTALING NAAR DE WERKELIJKHEID</b>	<b>104</b>
14.1. Implementatie	104
14.2. Modelparameters	104
14.3. Robuustheid regeling	106
14.4. Resultaten	107
14.5. Universaliteit	107
14.6. Conclusie	108
<b>15. INTERNE RECIRCULATIE</b>	<b>109</b>
<b>16. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>110</b>
16.1. Huidig model	110
16.2. Alternatief model	110
16.3. Aandachtspunten	111
16.4. Slotconclusie	112
<b>AFKORTINGENLIJST</b>	<b>113</b>
<b>VERKLARENDE WOORDENLIJST</b>	<b>114</b>
<b>BRONVERMELDING</b>	<b>115</b>

<b>BIJLAGE A - LIJST DATA GEBRUIKT BIJ VORMING HUIDIG MODEL</b>	<b>117</b>
<b>BIJLAGE B - LEIDRAAD INTERVIEWS PROBLEEMANALYSE</b>	<b>119</b>
<b>BIJLAGE C - DATA ANALYSE</b>	<b>121</b>
C-1. Beschrijving beschikbare datasets	121
C-2. Temperatuur actiefslib	123
C-3. Zuurstofsetpoints blowers	131
C-4. Analyse realtime metingen	135
C-5. Meteorologische gegevens	178
C-6. Analyse zuurstofprotocollen	183
<b>BIJLAGE D - VOORSPELLEN INFLUENT DEBIET</b>	<b>191</b>
D-1. Algemeen	191
D-2. Dagpatroon samenstelling	191
D-3. Modelkeuze	193
D-4. Conclusie	195



# DEEL I: INTRODUCTIE



## 1. ALGEMEEN

In dit rapport wordt het afstudeeronderzoek “Model gebaseerd regelen, voor biologische rioolwaterzuivering” beschreven, uitgevoerd tijdens de afstudeerstage bij Witteveen+Bos, te Deventer. Het betreft het onderzoek naar een statistisch model voor model gebaseerd regelen binnen het actiefslib proces<sup>1</sup> van een rioolwaterzuiveringsinstallatie<sup>2</sup>.

Dit hoofdstuk vormt een inleiding voor het onderzoek en het bijbehorende rapport. Er wordt een beschrijving gegeven van het bedrijf Witteveen+Bos. De oorsprong van het onderzoek en de opdrachtformulering komen aan bod, daarnaast wordt de opbouw van het onderzoek kort toegelicht. Ten slotte wordt in paragraaf 1.5 de indeling van dit eindrapport gegeven.

### 1.1. Witteveen+Bos

Witteveen+Bos is een adviesbureau, dat oplossingen levert voor complexe, technische en maatschappelijke vraagstukken op het gebied van water, infrastructuur, milieu en bouw. De afstudeerstage is uitgevoerd bij de afdeling Informatietechnologie (groep Procesautomatisering). Daarnaast was er ondersteuning van de groep Statistiek (afdeling Riolerings). Deze afdelingen vallen onder de sector Water en houden zich onder andere bezig met de procesautomatisering van waterzuiveringsinstallaties en het ontwerpen van rioleringsystemen.

### 1.2. Oorsprong van het onderzoek

Witteveen+Bos heeft voor waterschap Waternet een voorspellend model gemaakt van het actiefslib proces van rioolwaterzuiveringsinstallatie Westpoort. Met dit model kan de beluchting van het actiefslib proces geregeld worden. Dit wordt model based control (MBC, model gebaseerd regelen) genoemd.

Het actiefslib proces is een complex, niet lineair proces. Er zijn modellen ontwikkeld die dit proces beschrijven. Een wetenschappelijk veel gebruikt model is het “IAWQ Activated Sludge Model No. 1”. Dit model is echter niet geschikt voor dynamisch regelen (zie paragraaf 2.2.5). Daarom is er door Witteveen+Bos een haalbaarheidsstudie [28] uitgevoerd, om te onderzoeken of het mogelijk is om het actiefslib proces statistisch te modelleren. In dit onderzoek wordt geconcludeerd dat statistische modellen voldoende nauwkeurig voorspellen, om op basis daarvan het actiefslib proces te regelen. Vervolgens heeft Witteveen+Bos een statistisch regelmodel ontworpen [29]. Dit model wordt uitgebreid behandeld in DEEL III: Modelvorming.

NB. Wanneer in dit document naar het ‘huidige model’ wordt verwezen, wordt het model dat Witteveen+Bos heeft ontworpen bedoeld.

### 1.3. Opdrachtformulering

De opdracht is het onderzoek naar een geschikt statistisch model voor een model gebaseerde regeling binnen het actiefslib proces van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI). Het statistische model is opgebouwd uit twee delen. Ten eerste is het een voorspellend model. Daarnaast dient het model op basis van deze voorspelling optimale waarden te leveren voor de te regelen elementen.

Het statistische model zal in beginsel voor RWZI Westpoort worden ontwikkeld. Er dient echter ook rekening te worden gehouden met een mogelijke toepassing op andere zuiveringen.

---

<sup>1</sup> Voor een uitleg van het actiefslib proces, zie 2.2

<sup>2</sup> Voor een omschrijving van een rioolwaterzuiveringsinstallatie, zie 2.1

De vraag die parallel loopt aan dit onderzoek is: is het huidige model 'goed'? Hierbij kan gedacht worden aan de prestaties van het huidige model, maar ook aan de gedane aannamen en gemaakte keuzes, op basis waarvan het huidige model gevormd is.

#### **1.4. Opbouw onderzoek**

Het onderzoek wordt opgedeeld in twee deelonderzoeken; optimalisatiedoelstelling en modelvorming.

##### **1.4.1. Optimalisatiedoelstelling**

In het eerste deelonderzoek, het onderzoek naar de optimalisatiedoelstelling, wordt onderzocht wat de uitgangspunten, aandachtspunten en gewenste resultaten voor het statistische model zijn. De insteek van dit onderzoek is breed; alle mogelijke invloedsfactoren op zowel de optimalisatiedoelstelling als randvoorwaarden en aandachtspunten voor het model worden beschouwd.

Dit deelonderzoek wordt gedaan op basis van literatuur en kennis van verschillende specialisten. De kennis van specialisten wordt vergaard door middel van interviews.

Het deelonderzoek resulteert in een (opnieuw gedefinieerde) optimalisatiedoelstelling voor het statistische model. Daarnaast zullen er uitgangspunten van en aandachtspunten voor het model worden gegeven, welke van belang zijn tijdens de vorming van het model. De optimalisatiedoelstelling en uitgangspunten zullen worden vergeleken met die voor het huidige model.

##### **1.4.2. Modelvorming**

Het tweede deelonderzoek betreft de modelvorming. Hier wordt op basis van de resultaten uit het onderzoek naar de optimalisatiedoelstelling een statistisch model gevormd.

Ten grondslag aan deze modelvorming ligt een data analyse. Daarnaast kan de vorming van het huidige model een rol spelen (de keuzes die daarbij zijn gemaakt). Er zal gebruik worden gemaakt van statistische technieken.

Het resultaat is een alternatief model of mogelijke aanpassingen op het huidige model. Dit model kan generiek zijn of specifiek voor RWZI Westpoort, de zuivering waarop het project van Witteveen+Bos betrekking heeft.

#### **1.5. Indeling rapport**

Dit rapport is als volgt opgebouwd.

##### ***DEEL I: Introductie***

Dit deel geeft een introductie van het afstudeeronderzoek en dit bijbehorende eindrapport. De hoofdstukken beschrijven de volgende onderwerpen:

###### *Hoofdstuk 1. Algemeen*

Dit hoofdstuk geeft een introductie van de opdracht en een beschrijving van het onderzoek.

###### *Hoofdstuk 2. Omschrijving principes*

Om het rapport te kunnen lezen en begrijpen dient er basiskennis van enkele principes rondom een RWZI te zijn. Dit hoofdstuk beschrijft deze principes.



## **DEEL II: Optimalisatie-doelstelling**

Het deelonderzoek “Optimalisatie-doelstelling” wordt in dit deel beschreven, zowel de totstandkoming als de conclusies.

### *Hoofdstuk 3. Algemeen*

Dit hoofdstuk vormt een inleiding van het deelonderzoek “Optimalisatie-doelstelling”.

### *Hoofdstuk 4. Invalshoeken interviews*

De basis van het deelonderzoek wordt gevormd door interviews met specialisten. De invalshoeken die gebruikt zijn voor deze interviews, zijn in dit hoofdstuk uitgewerkt op basis van literatuur.

### *Hoofdstuk 5. Resultaten interviews*

Hoofdstuk 5 is een verslaggeving van de visies van de gesprekspartners en de uitkomsten van de interviews, ten aanzien van de invalshoeken. Deze resultaten worden in dit hoofdstuk niet geïnterpreteerd!

### *Hoofdstuk 6. Grenzen actiefslib proces*

De potentie binnen het actiefslib proces, ten aanzien van de verwijdering van afvalstoffen, wordt op basis van literatuur in dit hoofdstuk beschreven. Dit geeft een idee over de mogelijkheden van een regelmodel.

### *Hoofdstuk 7. Conclusie*

Op basis van de resultaten van de interviews en het inzicht in het potentieel van het actiefslib proces, worden de optimalisatie-doelstelling, uitgangspunten en aandachtspunten voor het model geformuleerd.

## **DEEL III: Modelvorming**

Dit deel beschrijft de vorming van het statistische regelmodel. Als basis dient een data analyse. Verder wordt het huidige model behandeld, alsmede mogelijke aanpassingen voor dit model en alternatieve modellen.

### *Hoofdstuk 8. Algemeen*

Een introductie van dit deel van het rapport.

### *Hoofdstuk 9. Data analyse*

Het gedrag van de processen binnen RWZI Westpoort is aan de hand van de beschikbaar gestelde data uitvoerig bestudeerd en geanalyseerd. In dit hoofdstuk wordt een beschrijving van deze data analyse gegeven. Het betreft een beknopt verslag, de volledige data analyse is als bijlage toegevoegd aan dit eindrapport (0).

### *Hoofdstuk 10. Beschrijving huidig model*

Het regelmodel dat ontworpen is door Witteveen+Bos (het huidige model) en de aannamen en keuzes die daarbij gemaakt zijn worden in dit hoofdstuk behandeld.

### *Hoofdstuk 11. Analyse aannamen huidig model*

Het huidige model en de aannamen worden geanalyseerd en beoordeeld.

### *Hoofdstuk 12. Ingebruikname huidig model*

Het huidige model is tijdens dit onderzoek in gebruik genomen op RWZI Westpoort. Deze ingebruikname en de daarbij behorende resultaten worden behandeld in hoofdstuk 12. Ook worden aanpassingen op dit model beschreven en beoordeeld.



### *Hoofdstuk 13. Vorming alternatieve modellen*

Het huidige model blijkt niet naar wens te regelen. Er is onderzoek gedaan naar alternatieve regelmodellen, wat in dit hoofdstuk beschreven wordt. Deze alternatieven worden tevens beoordeeld.

### *Hoofdstuk 14. Vertaling naar de werkelijkheid*

De alternatieve modellen en bijbehorende resultaten beschreven in het voorgaande hoofdstuk, zijn gevormd op basis van simulaties. De vraag is of deze modellen de zelfde resultaten zullen leveren, wanneer deze werkelijk worden geïmplementeerd. In dit hoofdstuk wordt dit beschreven, alsmede aanpassingen en aandachtspunten bij een eventuele implementatie.

### *Hoofdstuk 15. Interne recirculatie*

Het onderzoek richt zich met name op een model gebaseerde regeling voor de beluchting. Uit het deelonderzoek "Optimalisatiedoelstelling" blijkt ook dat de interne recirculatie mogelijk model gebaseerd gestuurd kan worden. Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de mogelijkheden.

### *Hoofdstuk 16. Conclusies en aanbevelingen*

Ten slotte worden in hoofdstuk 16 de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek gegeven.



## 2. OMSCHRIJVING PRINCIPES

Er dient enige basiskennis van rioolwaterzuiveringsinstallaties en het actiefslib proces te zijn, om dit rapport te lezen en te begrijpen. In dit hoofdstuk is getracht deze elementen op eenvoudige wijze uit te leggen, zonder diep op de materie in te gaan.

De principes rioolwaterzuiveringsinstallatie (paragraaf 2.1) en actiefslib proces (paragraaf 2.2) met de daarbij behorende terminologie worden in dit hoofdstuk behandeld.

### 2.1. Rioolwaterzuiveringsinstallatie

In een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) vindt waterzuivering plaats.

“Waterzuivering is het reinigen van afvalwater van organische en chemische afvalstoffen, zodat het biologisch leven in rivieren na het lozen van dit gezuiverd afvalwater daar geen hinder van ondervindt.” [26]

Kunstmatige waterzuivering vindt plaats in communale zuiveringen (rioolwaterzuiveringen) en industriële zuiveringen. Communale zuiveringen zuiveren afvalwater dat afkomstig is uit het rioolstelsel, wat voornamelijk bestaat uit afvalwater dat huishoudens produceren (bijvoorbeeld water afkomstig van toilet, douche of gootsteen) en regenwater. Afvalwater dat door de industrie wordt geproduceerd en niet in het riool terechtkomt wordt in industriële zuiveringen gezuiverd<sup>3</sup>. Dit afvalwater is over het algemeen veel sterker verontreinigd en dient zodoende een andere zuiveringsaanpak te hebben dan rioolwater.

Een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) is een communale zuivering. In Nederland zijn momenteel ongeveer 370 RWZI's, welke onder de verantwoordelijkheid vallen van 27 verschillende waterschappen.

De behandeling van afvalwater binnen RWZI's in Nederland geschiedt in bijna alle gevallen (99%) [2] door toepassing van een vorm van het zogenaamde actiefslib proces (paragraaf 2.2). In dit biologische proces worden organisch (zuurstofverbruikend) materiaal en nutriënten stikstof en fosfaat (gedeeltelijk) afgebroken. Dit is gewenst, omdat deze stoffen schadelijk zijn voor het biologisch leven in het oppervlaktewater.

### 2.2. Actiefslib proces

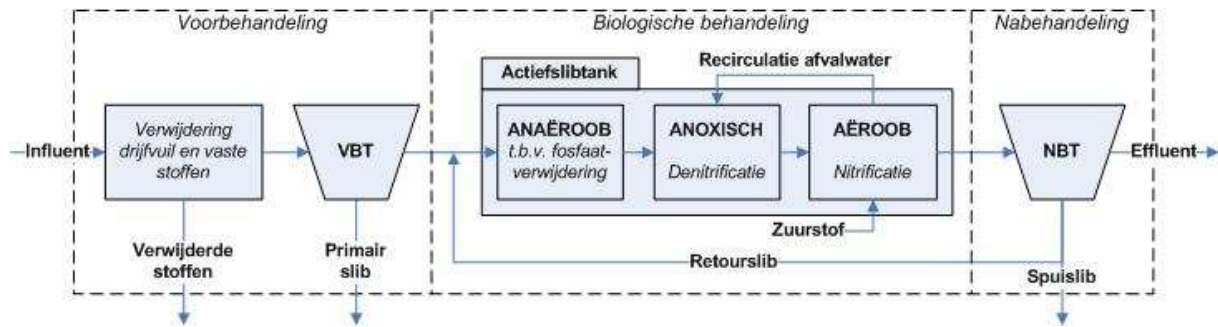
Het actiefslib proces is een biologisch proces dat binnen RWZI's gebruikt kan worden om het afvalwater te zuiveren. Het afvalwater dat de RWZI binnenkomt (het influent) ondergaat verschillende stappen, alvorens het water de zuivering verlaat (het effluent) en op het oppervlaktewater geloosd wordt.

In globale lijnen verloopt het actiefslib proces als volgt: (mechanische) voorbehandeling<sup>4</sup>, biologische behandeling, nabehandeling.

---

<sup>3</sup> Het afvalwater van (kleine) industrie kan op het rioolnetwerk aangesloten zijn.

<sup>4</sup> Soms wordt de voorbehandeling niet tot het actiefslib proces gerekend, maar als een losstaand proces gezien.



**Figuur 2.1: Schematisch overzicht algemene configuratie actiefslib proces**

In Figuur 2.1 is een basis configuratie van een RWZI schematisch weergegeven, waarin deze drie stappen zijn verwerkt. Dit schematische overzicht wordt in paragraaf 2.2.4 verder besproken. Eerst worden de afzonderlijke stappen besproken.

### 2.2.1. Voorbehandeling

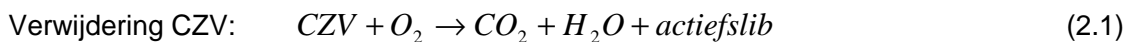
Het influent wordt allereerst ontdaan van drijfvuil en vaste stoffen (bijvoorbeeld plastic flessen of takken), om vervolgens tot rust te komen in de voorbezinktank, waar de overgebleven vaste stoffen (slib) bezinken. Dit slib (primair slib) wordt afgevoerd en verder verwerkt, wat zowel binnen als buiten de RWZI plaats kan vinden.

### 2.2.2. Biologische behandeling

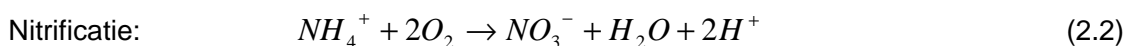
Na de mechanische voorbehandeling van het influent, volgt het daadwerkelijke actiefslib proces. In dit biologische proces worden het organisch (zuurstofverbruikend) materiaal en de nutriënten stikstof en fosfaat (gedeeltelijk) afgebroken. Het afvalwater wordt in de actiefslibtank geleid, waar het wordt gemengd met het actiefslib. Dit zijn slibvlokken waarin verschillende bacteriën leven. Deze bacteriën zorgen voor verschillende biologische reacties, waardoor (een versnelling van) de biologische afbraak van het organisch materiaal en de nutriënten optreedt. De biologische reacties zorgen er tevens voor dat er nieuw actiefslib wordt gevormd.

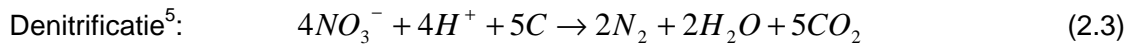
NB. Men spreekt vaak over (bio)chemisch zuurstofverbruik (BZV, CZV), wanneer men de hoeveelheid zuurstofverbruikend organisch materiaal aanduidt. Hierbij is chemisch zuurstofverbruik (CZV) de totale hoeveelheid zuurstofverbruikend organisch materiaal (CZV = BZV + overig zuurstofverbruikend organisch materiaal). In de rest van dit hoofdstuk zal dit echter worden weggelaten en zal alleen worden gesproken over organisch materiaal of organische stoffen.

In de actiefslibtank vindt beluchting plaats, waardoor zuurstofarme en zuurstofrijke zones gecreëerd worden. In de zuurstofrijke zone zorgen bepaalde bacteriën in het actiefslib er voor dat er een reactie (aërobe oxidatie) plaatsvindt tussen zuurstof en organische stoffen, waardoor de organische stoffen worden afgebroken (vergelijking (2.1)).



De verwijdering van stikstof (ammonium, nitriet, nitraat) gebeurt ook in de actiefslibtank. In de zuurstofrijke zone vindt *nitrificatie* plaats. In deze reactie, veroorzaakt door actiefslib bacteriën, wordt ammonium in een reactie met zuurstof omgezet in nitriet en vervolgens in nitraat (totaalvergelijking (2.2)). In de zuurstofarme zone zorgen bepaalde bacteriën samen met organische stoffen er voor dat het gevormde nitraat wordt gereduceerd tot stikstofgas (wat de tank verlaat in de vorm van belletjes), deze reactie wordt *denitrificatie* genoemd (vergelijking (2.3)). Tijdens denitrificatie worden dus ook organische stoffen afgebroken. Ter verduidelijking kunnen de reacties als volgt (vereenvoudigd) worden geschreven.





Het afvalwater doorloopt meerdere malen de zuurstofarme en zuurstofrijke zones, waardoor afwisselend denitrificatie en nitrificatie optreedt. Hiermee wordt getracht een zo goed mogelijke zuivering te behalen. Dit wordt veelal bewerkstelligd door het (veelvuldig) recirculeren van het afvalwater tussen deze zones, afhankelijk van het type actiefslib installatie.

Een voorwaarde voor het optreden van de biologische reacties is de sibleeftijd<sup>6</sup>. Aërobe oxidatie van organisch materiaal behoeft een lage sibleeftijd, de sibleeftijd voor het optreden van nitrificatie is een stuk hoger. In de aanwezigheid van voldoende zuurstof zal aërobe oxidatie relatief eenvoudig te bewerkstelligen zijn ten opzichte van nitrificatie.

De basis voor de biologische 'verwijdering' van fosfaat vindt plaats in een aparte zuurstofarme (anaërobe) tank, waar het afvalwater doorheen stroomt voordat het de beluchtingstank (de cyclus van zuurstofarme en zuurstofrijke zones) bereikt. Door de aanwezigheid van bepaalde bacteriën in het actiefslib, zal een reactie optreden die voor een afgifte van fosfaat zorgt. Er dient geen zuurstof en nitraat aanwezig te zijn om deze reactie te laten verlopen. Daarom vindt dit plaats in een aparte tank, omdat in het zuurstofarme gedeelte van de beluchtingstank nitraat aanwezig is. De vrije fosfaatdeeltjes zullen vervolgens in de zuurstofrijke omgeving van de beluchtingstank weer worden opgenomen door het slib. De hoeveelheid die hier opgenomen wordt is groter dan de hoeveelheid die in de anaërobe tank wordt afgegeven, wat tot gevolg heeft dat er een betere verwijdering van fosfaat plaats zal vinden. Uiteindelijk zal het gebonden (opgenomen) fosfaat via het spuislib (zie paragraaf 2.2.3) het systeem verlaten.

NB. Fosfaat wordt in sommige gevallen naast biologische verwijdering, ook via een chemische weg verwijderd. Dit wordt bewerkstelligd door het toedienen van ijzer (fosfaatdeeltjes binden zich hieraan, waardoor ze bezinken in de nabezinktank en via het spuislib verwijderd worden).

### 2.2.3. Nabehandeling

Na de actiefslibtank volgt de nabehandeling in de vorm van bezinking. In de nabezinktank wordt het (actief)slib met de gebonden afvalstoffen gescheiden van het afvalwater. Dit gescheiden water is het effluent van de zuivering, wat op het oppervlaktewater wordt geloosd<sup>7</sup>.

Het slib dat in de nabezinktank gescheiden wordt, wordt deels teruggevoerd naar de actiefslibtank om de concentratie actiefslib (bacteriën) op peil te houden. Dit wordt het retourslib genoemd. Het overige deel van het slib wordt afgevoerd en verwerkt, wat spuislib (of surplusslib) wordt genoemd.

### 2.2.4. Schematisch overzicht

Er bestaan veel verschillende configuraties voor het actiefslib proces. Hieronder wordt een algemene configuratie besproken (weergegeven in Figuur 2.1), waarop vele variaties bestaan, maar waarbij het basisprincipe hetzelfde is.

De voorbehandeling wordt afgesloten door bezinking in de voorbezinktank (VBT). Vervolgens wordt het afvalwater naar een zuurstofarme (anaërobe) zone geleid ten behoeve van de fosfaatverwijdering. Dit wordt gevolgd door afwisselend zuurstofarme (anoxische) en zuurstofrijke (aërobe) zones, ten behoeve van respectievelijk denitrificatie en nitrificatie. De afwisseling wordt gerealiseerd door recirculatie van het afvalwater. Uiteindelijk zal het afvalwater via de nabezinktank (NBT), waar het actiefslib wordt gescheiden van het water, als effluent de zuivering verlaten.

<sup>5</sup> Tijdens denitrificatie worden ook organische stoffen afgebroken, weergegeven als koolstofatomen (C).

<sup>6</sup> De verblijftijd van het slib in het systeem. De groei van nieuwe bacteriën zorgt er voor dat er bacteriën afgevoerd dienen te worden, waardoor het slib een bepaalde verblijftijd zal hebben.

<sup>7</sup> In sommige gevallen vindt er nog verdere nabehandeling van dit afvalwater plaats.

Het slib uit de voorbezinktank (primaair slib) wordt afgevoerd. Het slib uit de nabezinktank wordt deels teruggevoerd (retourslib), om het actiefslib gehalte in de actiefslibtank te handhaven, en deels afgevoerd (spuislib).

### 2.2.5. Activated Sludge Model (IAWQ)

Het actiefslib proces is een complex, niet lineair proces. De International Association on Water Quality (IAWQ) heeft een dynamisch model van het actiefslib proces ontwikkeld, welke veel gebruikt wordt in de wetenschap ten behoeve van modellering en simulatie van rioolwaterzuiveringen. De eerste versie van dit model, gepubliceerd in 1987 [6], wordt het "IAWQ Activated Sludge Model No. 1" genoemd, kortweg Activated Sludge Model (ASM)<sup>8</sup>. Met deze eerste versie van dit mathematisch model kunnen realistische voorspellingen worden gedaan over de prestaties van een actiefslib proces voor nitrificatie, denitrificatie en de verwijdering van organisch materiaal. Later is dit model uitgebreid met onder andere biologische fosfaatverwijdering [7].

Om het proces te modelleren, wordt in het Activated Sludge Model gebruik gemaakt van zeer gespecificeerde scheikundige elementen. Het overgrote deel van deze elementen zijn alleen te bepalen door middel van laboratoriumanalyse. Daarom zal ASM niet bruikbaar zijn bij de toepassing van model gebaseerd regelen binnen het actiefslib proces. De realtime metingen die binnen het actiefslib proces worden uitgevoerd geven onvoldoende informatie om ASM te gebruiken, als deze metingen al nauwkeurig genoeg zijn voor toepassing van dit model. Daarnaast is het model zeer complex. Dit zorgt er voor dat berekeningen veel tijd vergen, waardoor het realtime toepassen van ASM niet mogelijk zal zijn.

Dit zijn twee belangrijke redenen waarom dit onderzoek zich richt op het vinden van een statistisch model.

---

<sup>8</sup> Een overzichtelijke beschrijving van het "IAWQ Activated Sludge Model No.1" wordt gegeven in de paper "RWZI Modellen: Basisprincipes" van Vanrolleghem e.a. [21]



## DEEL II: OPTIMALISATIEDOELSTELLING



### 3. ALGEMEEN

In het begin stadium van het ontwerp van het huidige statistische model zijn keuzes gemaakt en aannamen gedaan ten aanzien van de optimalisatiedoelstelling.

Het minimaliseren van totaal stikstof, vereenvoudigd naar ammonium en nitraat, is als optimalisatiedoel van het statistische model gekozen. Ook het optimaal inzetten van middelen (energieverbruik) wordt genoemd als doelstelling. De beluchting (het inbrengen van zuurstof) is gekozen als sturingselement binnen de regeling. Aangenomen wordt dat het minimaliseren van totaal stikstof door het model voor optimaal regelen van de beluchting zorgt. Dit zorgt voor besparing op het energieverbruik van de beluchting.

Tijdens het deelonderzoek “Optimalisatiedoelstelling” zullen deze keuzes en aannamen heroverwogen worden. Het doel is het formuleren van een optimalisatiedoelstelling en uitgangspunten voor het statistische model en het aangeven van randvoorwaarden en aandachtspunten voor de vorming van het model.

Het doel wordt bereikt door informatie te verkrijgen uit literatuur en uit interviews met specialisten met verschillende achtergrondkennis. Tijdens de interviews worden verschillende invalshoeken belicht, om zodoende een zo breed mogelijk beeld te krijgen. Deze invalshoeken worden in hoofdstuk 4 beschreven en zijn opgebouwd op basis van algemene en specifieke literatuur. Deze beschrijvingen kunnen ook worden gebruikt tijdens het opstellen van de conclusie (hoofdstuk 7) van het deelonderzoek. De conclusie wordt verder gevormd op basis van de resultaten van de interviews (hoofdstuk 5) en de prestatie mogelijkheden binnen het actiefslib proces (hoofdstuk 6).



## 4. INVALSHOEKEN INTERVIEWS

In dit hoofdstuk worden de invalshoeken voor de interviews beschreven. Deze zijn opgebouwd op basis van algemene en specifieke literatuur.

De model gebaseerde regeling zal de manier van sturen van een of meerdere elementen gaan bepalen (paragraaf 4.1). Een aantal basiselementen zal van invloed kunnen zijn op de optimalisatiedoelstelling en de uitgangspunten. Deze elementen zijn wettelijke eisen (huidige eisen en Europese eisen voor de toekomst, paragraaf 4.2), prestatienormen (verwerkt in de Bedrijfsvergelijk Zuiveringsbeheer, paragraaf 4.3) en kosten (paragraaf 4.4). Belangrijk is ook om een beeld te krijgen van de universaliteit van de doelstelling en het vormen van een generiek model (paragraaf 4.5).

Tijdens de interviews dient tevens geïnformeerd te worden naar de ideeën van de persoon ten aanzien van de (realtime) metingen binnen het actieslib proces: de plaats, het type en de betrouwbaarheid van de metingen. In paragraaf 4.6 wordt dit verder toegelicht.

De vragen en aandachtspunten tijdens de interviews, opgesteld op basis van deze invalshoeken, zijn terug te vinden in Bijlage B.

### 4.1. Sturing

De optimalisatiedoelstelling bepaalt datgene dat het statistische regelmodel zou moeten proberen te benaderen. Dit kan het model bewerkstelligen door aan 'knoppen' in het actieslib proces te draaien, om zo het gewenste resultaat te behalen. Deze knoppen zijn de sturingselementen.

In het huidige model wordt gebruikgemaakt van één sturingselement, namelijk beluchting. Dit zal naar verwachting een belangrijk sturingselement blijven, omdat het invloed heeft op het scheikundige proces en tevens een belangrijke kostenpost is. Daarnaast is er van de beluchting data beschikbaar, zodat het mogelijk wordt om dit element te gebruiken in het statistische model.

Het is van belang dat tijdens de interviews (en uit literatuur) duidelijk wordt, welke elementen gestuurd kunnen worden, naast de beluchting. Ook dient naar voren te komen welke van deze elementen (behoorlijke) invloed op het proces uitoefenen en zodoende interessant zijn om eventueel als sturingselement in het model op te nemen. Alleen elementen waar data van beschikbaar is, zullen mogelijk in het model opgenomen kunnen worden. Hier dient dus ook duidelijkheid over te komen, dit kan behandeld worden bij de vraagstelling naar metingen (paragraaf 4.6).

### 4.2. Effluent kwaliteit: wettelijke eisen

Volgens de Nederlandse wet- en regelgeving moet afvalwater dat in het oppervlaktewater wordt geloosd aan bepaalde eisen voldoen, zodat wordt voorkomen dat een overmatige hoeveelheid schadelijke stoffen ten aanzien van de ecologische toestand, in het oppervlaktewater terechtkomt. Een rioolwaterzuiveringsinstallatie moet dus het afvalwater zodanig zuiveren dat het effluent aan deze eisen voldoet.

Bij het definiëren van de optimalisatiedoelstelling voor het model moet niet alleen gekeken worden naar de huidige eisen (paragraaf 4.2.1). In de Kaderrichtlijn Water (paragraaf 4.2.2) zijn normen vastgesteld waaraan het effluent in de toekomst moet voldoen. Dit zal ook meegenomen moeten worden in het bepalen van de optimalisatiedoelstelling.

Een ander interessant aspect met betrekking tot de wettelijke eisen, is het potentieel van huidige actieslib installaties ten aanzien van de kwaliteit van het effluent. Dit wordt behandeld in hoofdstuk 6.



#### 4.2.1. Huidige wettelijke eisen

De eisen, ten aanzien van het effluent voor rioolwaterzuiveringsinstallaties, die momenteel gelden zijn vastgelegd in het 'Lozingenbesluit Wvo stedelijk afvalwater' [15], welke voortkomt uit de Wet verontreiniging oppervlaktewater (Wvo). In dit besluit staan grenswaarden voor een aantal bestanddelen van afvalwater, welke schadelijk zijn voor de ecologische toestand van het water waarin het effluent van de RWZI wordt geloosd. Het gaat hierbij om organische stoffen (in de vorm van BZV of CZV), de nutriënten stikstof en fosfaat en de totale hoeveelheid onopgeloste bestanddelen. De grenswaarden voor deze bestanddelen, vermeld in bijlage 2 van het lozingenbesluit, staan in Tabel 4.1.

<b>Bestanddeel</b>	<b>Grenswaarde</b>
Biochemisch zuurstofverbruik (BZV bij 20°C)	20 mg O <sub>2</sub> /l
Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	125 mg O <sub>2</sub> /l
Totaal stikstof (N <sub>tot</sub> )	10-15 mg N/l
Totaal fosfaat (P <sub>tot</sub> )	1-2 mg P/l
Totale hoeveelheid onopgeloste bestanddelen	30 mg/l

**Tabel 4.1: Grenswaarden 'Lozingenbesluit Wvo stedelijk afvalwater'**

Voor totaal stikstof en totaal fosfaat gelden twee grenswaarden, welke afhangen van de ontwerpcapaciteit van de zuivering. De lagere (strengere) grenswaarden gelden voor RWZI's met een grote ontwerpcapaciteit. Dit omslagpunt zit voor N<sub>tot</sub> en P<sub>tot</sub> bij een capaciteit van respectievelijk 20.000 en 100.000 inwonerequivalent (i.e.)<sup>9</sup>.

De grenswaarde ten aanzien van totaal stikstof heeft betrekking op de kalenderjaar berekende jaargemiddelde concentratie totaal stikstof. Ten aanzien van totaal fosfaat wordt dit uitgedrukt als de voortschrijdend gemiddelde concentratie totaal fosfaat in 10 opeenvolgende etmaalmonsters ([15], bijlage 1B, lid 1d en 1c).

Uit de bovenstaande grenswaarden voor N<sub>tot</sub> en P<sub>tot</sub> kan afgeleid worden dat wanneer de grenzen worden gesteld op 10 mg/l respectievelijk 1 mg/l, een RWZI aan de wettelijke eisen voldoet, ongeacht de ontwerpcapaciteit. Deze waarden worden vanaf nu gebruikt wanneer er wordt gesproken over de huidige wettelijke eisen.

#### 4.2.2. Kaderrichtlijn Water

De Europese Unie heeft de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) [1] opgesteld, welke op 22 december 2000 van kracht is geworden. De KRW heeft als doel de kwaliteit van de Europese wateren in een 'goede toestand' te brengen en te houden. Het effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) komt in de Europese wateren terecht, de kwaliteit hiervan heeft dus zodoende directe gevolgen op de kwaliteit van de wateren. Met kwaliteit wordt de samenstelling van het water bedoeld, het gaat dan om de aanwezigheid van stoffen die door de Europese Unie zijn aangewezen als schadelijk.

#### STOWA rapport

In het STOWA rapport "Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW" [17] worden de schadelijke stoffen benoemd die van belang zijn voor RWZI's en wordt vastgesteld welke van deze stoffen momenteel niet voldoen aan de normen gesteld in de KRW en dus verdergaande verwijdering behoeven om in de toekomst aan deze normen te voldoen.

- Op basis van de huidige informatie kunnen als RWZI-relevante stoffen worden aangemerkt:
- de nutriënten stikstof en fosfor;
  - enkele polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen;
  - de bestrijdingsmiddelen hexachloorcyclohexaan, atrazine en diuron;

<sup>9</sup> Maat voor de vuillast. Eén i.e. staat voor de hoeveelheid afvalwater en de daarin aanwezige vuillast die gemiddeld door één persoon per dag wordt geproduceerd.

- de metalen cadmium, koper, zink, lood en nikkel;
- een weekmaker DEHP (di(2-ethylhexyl)ftalaat).

([17], pagina 8)

De vraag is echter wel of de sturing door het model invloed kan uitoefenen op de aanwezigheid van deze stoffen in het effluent. Dit dient duidelijk te worden uit de interviews.

Naast de stoffen, worden in het STOWA rapport zuiveringstechnieken besproken die kunnen worden ingezet om de emissie van deze stoffen verder terug te dringen. Het gaat hierbij om aanvullende technieken op het huidige actiefslib systeem; nageschakelde of geïntegreerde technieken.

Door gebruik te maken van optimalisatie van het huidige actiefslib systeem in RWZI's, blijken volgens het STOWA rapport effluentconcentraties voor stikstof ( $N_{tot}$ ) en fosfaat ( $P_{tot}$ ) haalbaar (4-6 mg  $N_{tot}/l$ ; 0,3-0,7 mg  $P_{tot}/l$ ), welke aanzienlijk lager zijn dan de huidige wettelijke eisen (10 mg  $N_{tot}/l$ ; 1 mg  $P_{tot}/l$ ). De toekomstige eisen ten aanzien van het oppervlaktewater zullen echter lager liggen, namelijk 2,2 mg  $N_{tot}/l$  en 0,15 mg  $P_{tot}/l$ . Aan deze eisen zal in 2015 voldaan moeten zijn. Om aan deze eisen te voldoen zullen aanvullende technieken op het actiefslib systeem nodig zijn. (concentraties uit [17], pagina 13)

Ten aanzien van de organische stoffen (in de vorm van BZV of CZV) worden geen aangescherpte eisen genoemd vanuit de implementatie van de KRW.

#### **Invloed KRW op optimalisatiedoelstelling**

De Kaderrichtlijn Water kan een grote rol spelen in het bepalen van de optimalisatiedoelstelling. Immers, het beschrijft in richtlijnen wat de wettelijke eisen in de toekomst zullen gaan worden met betrekking tot de waterkwaliteit. Uit het STOWA rapport [17] blijkt dat aanvullende technieken op het huidige actiefslib systeem nodig zijn om aan deze toekomstige eisen te voldoen. Dit houdt in dat de optimalisatiedoelstelling voor de model gebaseerde regeling de normen die gesteld worden door de KRW niet volledig zal kunnen nastreven. Uit de interviews moet blijken in hoeverre een model gebaseerde regeling invloed kan hebben op deze toekomstige normen en in hoeverre de normen invloed hebben op de optimalisatiedoelstelling.

#### **4.2.3. Invloed wettelijke eisen op optimalisatiedoelstelling**

De wettelijke eisen zullen een zeer belangrijke rol spelen in het opstellen van de optimalisatiedoelstelling, dit blijkt ook uit de doelstelling van het huidige model. Er zal naar de eisen van de huidige wetgeving (korte termijn) moeten worden gekeken, maar ook naar de eisen gesteld in de KRW (lange termijn). Misschien is een tussenweg (middellange termijn) een goed uitgangspunt. Voor de uitgangspunten van het model zullen niet alle stoffen (met een wettelijke eis) die het effluent bevat van belang zijn. Het zal alleen mogelijk zijn om de eisen mee te nemen ten aanzien van stoffen welke (realtime) gemeten kunnen worden en waarop de sturing invloed kan hebben.

#### **4.3. Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer**

De prestaties van de waterschappen worden vergeleken in het rapport Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer, dat wordt opgesteld in opdracht van de Unie van Waterschappen. De bedrijfsvergelijking is een geschikt instrument om de effectiviteit van het zuiveringsbeheer door de waterschappen aan te tonen. Er zijn op het moment van schrijven drie rapporten verschenen. De eerste bedrijfsvergelijking verscheen in het jaar 2001 en behandelde de resultaten van de waterschappen in het jaar 1999. Het tweede rapport verscheen in 2003, over het jaar 2002 [19]. De derde Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer is tijdens de beginfase van dit onderzoek (eind 2007) afgerond en neemt het jaar 2006 onder de loep [20].



#### 4.3.1. Methodiek

Om de vergelijking te maken, hebben de opstellers van de Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer gebruik gemaakt van de methodiek van Kaplan en Norton; de Balanced ScoreCard.

De Balanced ScoreCard [10][11][12] is een wetenschappelijk getoetst model dat organisaties vanuit vier perspectieven belicht. Het idee erachter is dat men beter inzicht krijgt in de prestaties van een organisatie wanneer vanuit meerdere invalshoeken naar de bedrijfsvoering wordt gekeken. ([19], pagina 11)

De Balanced Scorecard bestaat oorspronkelijk uit vier perspectieven, namelijk 'financiën', 'interne processen', 'innovatie' en 'klanten'. Voor de Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer is een vijfde perspectief toegevoegd, namelijk 'milieu'. De samenstellers hebben dit gedaan, omdat zij vinden dat aandacht voor het milieu voor het zuiveringsbeheer een zeer belangrijke component is. De perspectieven 'interne processen' en 'klanten' zijn vertaald naar respectievelijk 'functioneren installaties' en 'belanghebbenden'.

Op basis van deze vijf perspectieven zijn een elftal kengetallen opgesteld. Deze kengetallen geven allen een score op basis waarvan de waterschappen vergeleken worden. De kengetallen ten aanzien van de perspectieven zijn:

- Functioneren installaties: "Zuiveringsprestatie" (1) en "Voldoen aan de afnameverplichting" (2)
- Financiën: "Wvo-tarief" (3) en "Totale kosten zuiveringsbeheer" (4)
- Milieu: "Stikstofverwijdering boven de 75%" (5), "Fosfaatverwijdering boven de 75%" (6) en "Milieubewust werken" (7)
- Innovatie: "Jurywaardering technologische innovatie" (8), "Samenwerkingsprojecten" (9) en "Nieuwe diensten" (10)
- Belanghebbenden: "Klanttevredenheidsscore" (11)

Voor een uitgebreide beschrijving van de methodiek en de kengetallen die gebruikt worden bij het samenstellen van de bedrijfsvergelijking, zie paragraaf 1.4 van Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer 2002 [19].

#### 4.3.2. Invloed bedrijfsvergelijking op optimalisatiedoelstelling

De bedrijfsvergelijking kan een rol spelen in het opstellen van de optimalisatiedoelstelling. Wanneer een waterschap zich ten doel stelt om beter te presteren dan andere waterschappen of om een betere prestatie te leveren dan in het verleden, kunnen de kengetallen (zie paragraaf 4.3.1) van de Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer worden meegenomen in het bepalen van de optimalisatiedoelstelling. Wel is het zo dat een deel van deze kengetallen gebaseerd is op andere basiselementen. Het meewegen van de andere basiselementen in de optimalisatiedoelstelling kan dus indirect de score in de bedrijfsvergelijking (positief) beïnvloeden.

De bedrijfsvergelijking zal niet alleen in het beginstadium van het onderzoek, bij het bepalen van de doelstelling, van belang kunnen zijn, maar ook in het eindstadium van het onderzoek, bij de evaluatie van de gevolgen van het model. De veranderingen die het model tot gevolg zou kunnen hebben, kunnen dan voor een aantal kengetallen direct worden vertaald naar mogelijke veranderingen in de verschillende kengetallen van de bedrijfsvergelijking. Het zal hier dan wel gaan om indicaties van veranderingen, omdat het statistische regelmodel voor een enkele RWZI ontwikkeld wordt en de bedrijfsvergelijking de prestaties per waterschap (welke gemiddeld meer dan tien RWZI's beheren) bekijkt.

#### 4.4. Kosten

De kosten die een rioolwaterzuiveringsinstallatie maakt kunnen een belangrijk onderwerp zijn bij het definiëren van de optimalisatiedoelstelling. Het minimaliseren van kosten wordt genoemd bij de doelen voor het ontwerp van het huidige model (dit is echter niet direct in de optimalisatiedoelstelling verwerkt).

Het energieverbruik binnen een RWZI is een groot onderdeel van de operationele kosten, hierop zou bespaard kunnen worden. Ook zou gedacht kunnen worden aan besparingen ten aanzien van afschrijvingen op machines en het uitstellen van investeringen.

#### 4.4.1. Energieverbruik

In de 'Handleiding Rioolwaterzuiveringsinrichtingen' van InfoMil [8] worden mogelijke besparingen op energiekosten besproken. De energie besparingen binnen de waterlijn die genoemd worden, hebben veelal betrekking op investeringen in beluchtingstechnieken of metingen. Dit staat los van het opstellen van de optimalisatiedoelstelling, omdat het model geen directe invloed op energiebesparende investeringen uit kan oefenen. Er wordt ook gesproken over het regelen van de beluchting, wat besparingen ten aanzien van de energiekosten zou kunnen opleveren.

Het energiegebruik van een RWZI wordt met name bepaald door het elektriciteitsgebruik, waarvan het belangrijkste deel voor de beluchting wordt ingezet. Het energiegebruik is afhankelijk van de grootte van de RWZI en het toegepaste zuiveringssysteem en heeft een directe relatie met de kwaliteitseisen van het effluent. [...] Op het totale energiegebruik neemt de beluchting het grootste aandeel in (gemiddeld 55 - 60%). ([8], pagina 14/15)

Het model zal invloed gaan uitoefenen op de beluchting, waardoor het een rol kan gaan spelen in een groot gedeelte van het energiegebruik. Wanneer het model zou sturen op minder beluchting, zal de elektriciteitsbehoefte dalen en zal er dus een besparing in (energie)kosten optreden.

#### 4.4.2. Invloed kosten op optimalisatiedoelstelling

De kosten kunnen een rol gaan spelen voor het definiëren van de optimalisatiedoelstelling, althans besparing op de kosten door gebruik te maken van model gebaseerd regelen. Het energieverbruik van de beluchting zal hierin een grote rol kunnen spelen. Ook veranderingen ten aanzien van afschrijving op machines binnen de waterlijn, wat het geval kan zijn als het model anders gaat regelen dan de huidige situatie, zal een rol kunnen gaan spelen in het besparen van kosten. Alsmede het uitstellen van investeringen, wanneer model gebaseerd regelen voor een kwalitatief betere zuivering zal zorgen.

Deze elementen zullen tijdens de interviews aan de orde moeten komen, om zodoende duidelijk te krijgen hoe belangrijk dit zal zijn voor de doelstelling en hoe hier in het model mee omgegaan zou kunnen worden. Ook zal er uit de interviews moeten blijken of er op andere vlakken besparingen kunnen worden gerealiseerd ten aanzien van de kosten, waar het model invloed op kan uitoefenen.

#### 4.5. Universaliteit

De optimalisatiedoelstelling die gebruikt is bij het vormen van het huidige model, is speciaal gevormd voor de rioolwaterzuiveringsinstallatie Westpoort. Een belangrijke vraag is of deze doelstelling ook geldt voor een willekeurige andere RWZI.

Tijdens het tweede deel van de stage, het deel waarin het model wordt gevormd, wordt naast de data van RWZI Westpoort, ook gebruik gemaakt van data van twee andere RWZI's met andere eigenschappen. Het influent van RWZI Westpoort bevat deels industrieel afvalwater en het type beluchtingstank kan gekenmerkt worden als carrousel. De twee andere zuiveringen hebben voornamelijk huishoudelijk afvalwater, waarvan één eenzelfde beluchtingstank type heeft als Westpoort en de andere als propstomer kan worden getypeerd.

De samenstelling van het influent is afhankelijk van de locatie van de rioolwaterzuiveringsinstallatie. Dit zal kunnen betekenen dat het voldoet aan een bepaalde eis voor de ene zuivering lastig kan zijn, terwijl dit voor een andere zuivering niet het geval is. Ook kan de locatie van de RWZI zorgen voor een aanscherping van de eisen ten aanzien van het effluent, bijvoorbeeld wanneer een RWZI zijn effluent loost in oppervlaktewater dat zich in of nabij een natuurgebied bevindt.



Het is om deze redenen van belang dat er bij het definiëren van de optimalisatiedoelstelling moet worden gekeken of de doelstelling universeel is voor een RWZI met een actiefslib systeem of dat deze afhangt van de eigenschappen (samenstelling influent, type beluchtingstank, locatie) van de RWZI.

#### **4.6. Metingen**

De metingen vormen de basis waarop het model voor de regeling wordt gebouwd. Het is daarom belangrijk om duidelijk te hebben dat er met 'goede metingen' wordt gewerkt. Allereerst is het van belang dat metingen betrouwbaar zijn (validatie) en dat er gemeten wordt wat verondersteld wordt dat er gemeten wordt (verificatie). Daarnaast is het interessant om een beeld te krijgen van de mogelijkheden van aanvullende metingen. Er kan dan gedacht worden aan dezelfde type metingen op een andere plaats in het zuiveringsproces, maar ook aan andere type metingen. Dit kunnen bijvoorbeeld concentraties van stoffen zijn die nog niet gemeten worden, maar wel invloed zouden kunnen hebben in het (vormen van het) model.

Er dient ook geïnformeerd te worden naar metingen die standaard door RWZI's worden gedaan en interessant kunnen zijn voor het statistische regelmodel, maar waarvan momenteel nog geen data beschikbaar is.

In de interviews dienen deze onderwerpen aan de orde te komen. Er dient geïnformeerd te worden naar de ideeën van de persoon ten aanzien van de metingen. Dit zal niet zozeer van invloed zijn op de optimalisatiedoelstelling, maar kan wel gebruikt worden tijdens het vormen van het model en het geven van aanbevelingen.

## 5. RESULTATEN INTERVIEWS

Op basis van de uitgangspunten behandeld in hoofdstuk 4 zijn interviews gehouden met verschillende specialisten. De uitkomsten en signaleringen uit deze interviews staan in dit hoofdstuk per onderwerp beschreven. De uitwerkingen zijn gebaseerd op het inzicht en de visie van de gesprekspartners. Dit houdt in dat er in dit hoofdstuk geen interpretaties worden gedaan of conclusies worden getrokken na aanleiding van deze tekst, ten aanzien van de optimalisatiedoelstelling. Wanneer er wordt geschreven over mogelijkheden voor het vervolg van het onderzoek, dan betreft dit opmerkingen die naar voren kwamen tijdens de interviews.

*De personen binnen Witteveen+Bos waarmee gesproken is, zijn (in gespreksvolgorde): Teun Keurhorst (werktuigbouwkundige), Herman Evenblij (technoloog communaal), Mark Groeneveld (technoloog industrieel), Klaas Gorter (technoloog communaal), Arjen van Nieuwenhuijzen (technoloog communaal), Hans Korving (statistiek; riolering).*

Hoofdstuk 5 dient dus gelezen te worden als een verslaggeving van de interviews, met daarin de belangrijkste elementen die in de interviews naar voren kwamen. In hoofdstuk 7 worden onder meer op basis van deze uitkomsten de optimalisatiedoelstelling en de uitgangspunten voor het model geformuleerd.

<< VERTROUWELIJK >>



## 6. GRENZEN ACTIEFSLIB PROCES

Uit de resultaten van de interviews (hoofdstuk 5) blijkt dat het interessant is om een beeld te krijgen van de mogelijke verwijdering van nutriënten (stikstof en fosfaat) binnen het actiefslib proces. Dit kan gebruikt worden bij de verwachting van de mogelijkheden van de model gebaseerde regeling. Het zal tevens een rol spelen bij het opstellen van de optimalisatiedoelstelling; is de doelstelling voor de regeling wel realistisch?

De STOWA heeft een (bureau)studie laten uitvoeren om hier een beeld van te krijgen. In dit hoofdstuk wordt een weergave van de mogelijkheden gegeven, op basis van de bevindingen welke beschreven staan in het rapport "Het actief-slibproces: de mogelijkheden en grenzen" [18] behorende bij deze studie.

### 6.1. STOWA rapport

In het STOWA rapport "Het actief-slibproces: de mogelijkheden en grenzen" [18] is een studie gedaan naar de mogelijkheden en beperkingen van het actiefslib proces. Hierin staat onder andere beschreven welke concentraties van belangrijke stoffen, zoals totaal stikstof en fosfaat, in het effluent haalbaar zijn, wanneer huidige actiefslib systemen optimaal geregeld zouden worden zonder gebruik te maken van aanvullende zuiveringstechnieken. Dit geeft een indicatie van wat de model gebaseerde regeling (maximaal) zou kunnen bewerkstelligen.

De reden voor deze studie is de invoering van de Kaderrichtlijn Water en de daarbij horende strengere eisen ten aanzien van de zuivering van stedelijk afvalwater. De eisen ten aanzien van totaal stikstof ( $N_{tot}$ ) en totaal fosfaat ( $P_{tot}$ ) in het effluent, gesteld in de KRW, worden in het STOWA rapport als A-kwaliteit aangeduid; 2,2 mg  $N_{tot}/l$  en 0,15 mg  $P_{tot}/l$ . Ook wordt er een B-kwaliteit ten aanzien van het effluent gedefinieerd; 5 mg  $N_{tot}/l$  en 0,3 mg  $P_{tot}/l$ . Het betreft hier gemiddelde waarden, zoals ook het geval is bij de huidige wettelijke eisen.

Uit een inventarisatie van de zuiveringsprestaties van RWZI's in het jaar 2005 blijkt dat het effluent van een behoorlijk aantal RWZI's (ruim 50 van in totaal ongeveer 370 RWZI's in Nederland) binnen de stikstof eis van de B-kwaliteit ( $< 5$  mg  $N_{tot}/l$ ) valt. Een aantal RWZI's komt zelfs in de buurt van de A-kwaliteit. Voor de verwijdering van fosfaat voldoen minder zuiveringen (7 stuks) aan de effluent eis van de B-kwaliteit. Een reden die hiervoor wordt gegeven is dat zuiveringen veelal voldoen aan de huidige eis en geen reden zien om meer fosfaat te verwijderen.

Er is onderzocht of er een relatie is tussen invloedsfactoren en het effluent voor de zuiveringen die goed presteren. Deze blijken niet aan te geven. Het gaat om zuiveringen die werken onder normale omstandigheden.

Naast de inventarisatie van huidige effluent kwaliteiten zijn er modelberekeningen met actiefslib modellen uitgevoerd. Er is gebruik gemaakt van het statische HSA<sup>10</sup> model en het dynamische ASM (Activated Sludge Model, gesimuleerd in SIMBA<sup>11</sup>). De berekeningen zijn voor een viertal verschillende procesconfiguraties<sup>12</sup> uitgevoerd. Ook de uitkomsten van deze modelberekeningen laten zien dat er binnen het huidige actiefslib proces ruimte is om betere effluent kwaliteiten te bewerkstelligen. De effluentwaarden van de modelberekeningen van ASM modellering voor de verschillende configuraties liggen tussen 2,8 mg/l en 4,1 mg/l voor totaal stikstof en tussen 0,12 mg/l en 0,15 mg/l voor totaal fosfaat. Er dient wel opgemerkt te worden dat het hier modelberekeningen, dus een simplificatie van de werkelijkheid, betreft. De resultaten dienen dus met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden.

<sup>10</sup> HochSchulGruppenAnsatz, voor een uitgebreide beschrijving van het HSA model, zie Hoofdstuk 4 van het STOWA rapport "Evaluatie van het HSA-model voor toepassing in Nederland" [16].

<sup>11</sup> Een grafisch simulatie programma voor het modelleren van RWZI's gebruikmakend van ASM, op basis van MATLAB.

<sup>12</sup> De configuratie van RWZI Hoogvliet en de algemene procesconfiguraties PhoSim, PhoRedox & (m)UCT. Voor een beschrijving van deze configuraties, zie bijlage 1 van [18].



De resultaten van de inventarisatie en de modelberekeningen laten zien dat er binnen de huidige configuratie van actiefslib systemen ruimte is om beter te presteren dan de huidige eisen, zonder dat er gebruikt gemaakt dient te worden van aanvullende technieken. Een (statistisch) model gebaseerde regeling heeft dus de potentie om een betere effluent kwaliteit te leveren door optimaal te regelen. Het potentieel ligt, volgens de resultaten van deze studie, ergens tussen de B-kwaliteit en de A-kwaliteit (eisen KRW, vanaf 2015). Het rapport schrijft zelfs dat het misschien niet onmogelijk is om met behulp verbeterde meet- en regelsystemen aan de eisen van de KRW te voldoen. Dat zal dan wel sterk afhangen van de omstandigheden van de desbetreffende RWZI.



## 7. CONCLUSIE OPTIMALISATIEDOELSTELLING

<< *VERTROUWELIJK* >>

## DEEL III: MODELVORMING



## 8. ALGEMEEN

Het deelonderzoek “Modelvorming” wordt in dit deel besproken. De basis voor de modelvorming vormt een uitgebreide analyse van de data van RWZI Westpoort. De resultaten van deze analyse worden samengevat in hoofdstuk 9.

Er is door Witteveen+Bos een model gevormd, het ‘huidige model’, waarmee de beluchting geregeld kan worden binnen het biologisch proces van RWZI Westpoort. Dit model dient als uitgangspunt. Het model wordt geanalyseerd en er worden mogelijke aanpassingen en alternatieven besproken.

Allereerst worden in hoofdstuk 10 het model en de aannamen die daarbij zijn gemaakt beschreven. In hoofdstuk 11 wordt dit vervolgens geanalyseerd en beoordeeld. Tijdens het onderzoek is het huidige model in gebruik genomen op RWZI Westpoort. De analyse en bevindingen van deze ingebruikname worden in hoofdstuk 12 beschreven. Hoofdstuk 13 betreft de beschrijving van aanpassingen op het huidige model en alternatieve modellen. Dit wordt tevens beoordeeld worden. In hoofdstuk 14 wordt het model dat voortvloeit uit hoofdstuk 13 gekoppeld aan de werkelijke situatie. Is dit resulterend model direct toepasbaar? Zijn de gestelde resultaten die dit model levert van toepassing op de werkelijkheid?

Hoofdstuk 15 vormt een korte beschrijving van de mogelijkheid tot het model gebaseerd regelen van de interne recirculatie, daar waar de voorgaande hoofdstukken betrekking hebben op model gebaseerd regelen van de beluchting.

Ten slotte worden in hoofdstuk 16 de conclusies van dit onderzoek beschreven en worden er aanbevelingen gedaan.

## 9. DATA ANALYSE

Dit hoofdstuk geeft een samenvatting met daarin de bevindingen en conclusies ten aanzien van de data analyse, uitgevoerd tijdens het onderzoek. De argumenten hiervoor zijn in 0 te vinden. Deze bijlage betreft de uitwerking van de volledige data analyse.

<< *VERTROUWELIJK* >>



## 10. BESCHRIJVING HUIDIG MODEL

Dit hoofdstuk betreft de beschrijving van het huidige model en de daarbij gemaakte aannamen en keuzes.

<< *VERTROUWELIJK* >>

## 11. ANALYSE AANNAMEN HUIDIG MODEL

Tijdens het vormen van het huidige model zijn enkele fundamentele aannamen gemaakt. In dit hoofdstuk worden deze aannamen geanalyseerd.

<< *VERTROUWELIJK* >>



## 12. INGEBRUIKNAME HUIDIG MODEL

<< *VERTROUWELIJK* >>



### 13. VORMING ALTERNATIEVE MODELLEN

<< *VERTROUWELIJK* >>



## 14. VERTALING NAAR DE WERKELIJKHEID

<< *VERTROUWELIJK* >>

## 15. INTERNE RECIRCULATIE

<< VERTROUWELIJK >>



## 16. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

<< *VERTROUWELIJK* >>

## AFKORTINGENLIJST

ASM	Activated Sludge Model
BZV	Biochemisch zuurstofverbruik
CZV	Chemisch zuurstofverbruik
dwa	droogweer aanvoer
EU	Europese Unie
KRW	Kaderrichtlijn Water
kwh	kilowattheure (kilowattuur)
i.e.	inwonerequivalent
IAWQ	International Association on Water Quality
MBC	Model Based Control (model gebaseerd regelen)
MSE	Mean Squared Error (gemiddelde kwadratische afwijking)
NBT	Nabezinktank
$N_{\text{tot}}$	Totaal stikstof
PLC	Programmable Logic Controller (Programmeerbare Logische Eenheid)
$P_{\text{tot}}$	Totaal fosfaat
rwa	regenwater aanvoer
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
VBT	Voorbezinktank
Wvo	Wet verontreiniging oppervlaktewater

## Scheikundige afkortingen

$CO_2$	Koolstofdioxide
$H_2O$	Water
$N_2$	Stikstof(gas)
$NH_4^+$	Ammonium
$NO_2^-$	Nitriet
$NO_3^-$	Nitraat
$O_2$	Zuurstof



## VERKLARENDE WOORDENLIJST

actiefslib	slibvlokken met bacteriën die zorgen voor het optreden van verschillende biologische reacties
actiefslibtank	tank waarin biologische reacties plaatsvinden door aanwezigheid van actiefslib
aëroob	zuurstof behoevend, verbruikend
anaëroob	zonder zuurstof plaatsvindend of kunnende leven
anoxisch	zonder zuurstof, zuurstofarm
bezinktank	tank waar slib bezinkt
debiet	maat voor watercapaciteit, (afgeleide van) kubieke meters per seconde (m <sup>3</sup> /s)
denitrificatie	biologische reactie; nitraat wordt omgezet in stikstofgas in afwezigheid van zuurstof en aanwezigheid van actiefslib
effluent	afvalwater dat (een gedeelte van) een zuivering verlaat
influent	afvalwater dat (een gedeelte van) een zuivering binnenkomt
nabezinktank	bezinktank volgend op de actiefslibtank
nitrificatie	biologische reactie; ammonium wordt omgezet in nitraat in aanwezigheid van zuurstof en actiefslib
oxisch	met zuurstof, zuurstofrijk
primaair slib	slib afkomstig uit de voorbezinktank, wordt verwerkt
retourslib	slib afkomstig uit de nabezinktank, wordt teruggevoerd naar de actiefslibtank
slibleeftijd	verblijftijd van het (actief)slib in het systeem
spuislib	slib afkomstig uit de nabezinktank, wordt verwerkt
surplusslib	<i>zie spuislib</i>
voorbezinktank	bezinktank voorafgaand aan de actiefslibtank

**BRONVERMELDING**

- [1] Europese Unie (2000), *Richtlijn 2000/60/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 oktober 2000 tot vaststelling van een kader voor communautaire maatregelen betreffende het waterbeleid*, Brussel.
- [2] Evenblij, H. (2006), *Filtration Characteristics in Membrane Bioreactors*, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft.
- [3] Graaf, J.H.J.M. van der (1995), *Behandeling van afvalwater I*, Technische Universiteit Delft, Delft.
- [4] Gunst, M.C.M. de en A.W. van der Vaart (1995), *Statistische Data Analyse*, Faculteit Wiskunde en Informatica, Vrije Universiteit, Amsterdam, 2004 (ongewijzigde druk).
- [5] Gunst, M.C.M. de (2001), *Statistical Models*, Faculteit Wiskunde en Informatica, Vrije Universiteit, Amsterdam, 2006 (herdruk).
- [6] Henze M., Grady C.P.L.Jr., W. Gujer, G.V.R. Marais en T. Matsuo (1987), *Activated Sludge Model No. 1*, in: IAWQ Scientific and Technical Reports No. 1, Londen.
- [7] Henze M., Gujer W., T. Mino, T. Matsuo, M.C. Wentzel en G.v.R. Marais (1995), *Activated Sludge Model No. 2*, in: IAWQ Scientific and Technical Reports No. 3, Londen.
- [8] InfoMil (2006), *Handleiding Rioolwaterzuiveringsinrichtingen; Ten behoeve van energie in de milieuvergunning*, herziene versie, SenterNovem.
- [9] Kalman, R.E. (1960) *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, in: Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering (maart 1960), p. 35-45.
- [10] Kaplan, R.S. en D.P. Norton (1992), *The balanced scorecard, measures that drive performance*, in: Harvard Business Review, januari - februari 1992.
- [11] Kaplan, R.S. en D.P. Norton (1993), *Putting the balanced scorecard to work*, in: Harvard Business Review, september - oktober 1993.
- [12] Kaplan, R.S. en D.P. Norton (1996), *Using the balanced scorecard as a strategic management system*, in: Harvard Business Review, januari - februari 1996.
- [13] KNMI (2008), *Meteorologische daggegevens Schiphol – periode 01-01-2001 t/m 05-03-2008*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, 16:53 06-03-2008.  
<http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/>
- [14] Maybeck, Peter S. (1979) *Stochastic Models, Estimation, and Control, Volume 1*, Academic Press, Inc., New York.
- [15] Ministerie van Verkeer en Waterstaat (24 februari 1996), *Lozingenbesluit Wvo stedelijk afvalwater*, Nederlandse overheid.
- [16] STOWA (1995), *Evaluatie van het HSA-model voor toepassing in Nederland*, Rapportnummer 1995-19, STOWA, Utrecht.
- [17] STOWA (2005), *Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW*, Rapportnummer 2005-28, STOWA, Utrecht.
- [18] STOWA (2007), *Het actief-slibproces: de mogelijkheden en grenzen*, Rapportnummer 2007-24, STOWA, Utrecht.



- [19] Unie van Waterschappen (2003), *Zuiver afvalwater 02; Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer 2002*, Deloitte/Vertis, Den Haag.
- [20] Unie van Waterschappen (2007), *Zuiver Afvalwater 2006; Landelijke bedrijfsvergelijking van de waterschappen over het zuiveringsbeheer*, Den Haag.
- [21] Vanrolleghem, P.A., B. de Clercq en H. Vanhooren (1997) *RWZI Modellen: Basisprincipes*, in: Postacademisch Onderwijs Cursus Regelen en Besturen van Actief-slibinstallaties, oktober 28-30 1997, p.12, Delft.
- [22] Veersma, A.M.J., H.F. van der Roest en K. Meinema (1995) *Stationaire berekeningen met een dynamisch model?*, in: H2O - Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer, 28, nr. 14, p. 432-436.
- [23] Weijers, S. (2000) *Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal*, proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [24] Welch, Greg en Gary Bishop (2006) *An Introduction to the Kalman Filter*, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill.
- [25] Wikipedia (2007), *Rioolwaterzuiveringsinstallatie*, Wikipedia, de vrije encyclopedie, 16:51 12-12-2007.  
<http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Rioolwaterzuiveringsinstallatie&oldid=10476410>
- [26] Wikipedia (2007), *Waterzuivering*, Wikipedia, de vrije encyclopedie, 17:39 29-11-2007.  
<http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Waterzuivering&oldid=10326025>
- [27] Wikipedia (2008), *Sewage treatment*, Wikipedia, the free encyclopedia, 15:47 02-01-2008.  
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sewage\\_treatment&oldid=181618565](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sewage_treatment&oldid=181618565)
- [28] Witteveen+Bos (2006), *Haalbaarheidsstudie MBC RWZI Westpoort (definitief)*, Projectcode ASD915-1, Deventer.
- [29] Witteveen+Bos (2007), *Definitief ontwerp model gebaseerde regelaar RWZI Westpoort (concept)*, Projectcode ASD1006-1, Deventer.



## BIJLAGE A - LIJST DATA GEBRUIKT BIJ VORMING HUIDIG MODEL

<< *VERTROUWELIJK* >>



## BIJLAGE B - LEIDRAAD INTERVIEWS PROBLEEMANALYSE

<< *VERTROUWELIJK* >>



### **BIJLAGE C - DATA ANALYSE**

Deze bijlage betreft de beschrijving van de data analyse. Er zijn verschillende datasets gebruikt voor de analyse.

<< *VERTROUWELIJK* >>

## BIJLAGE D - VOORSPELLEN INFLUENT DEBIET

<< *VERTROUWELIJK* >>