875

Relatie tussen riolering en de samenstelling van het influent

Deel 1

augustus 2001

M. Herbergs

TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Sectie Gezondheidstechniek

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Watermanagement
Sectie Gezondheidstechniek
Leerstoel Rioleringstechniek

Relatie tussen riolering en de samenstelling van het influent

Afstudeerrapport

Student	:	M. Herbergs
Hoogleraar	:	prof.dr.ir. F.H.L.R. Clemens
Afstudeercommissie	:	ir. J.G. Langeveld
		dr.ir.J. de Koning
		prof.dr. M. Donze

Delft, augustus 2001

Relatie tussen riolering en de samenstelling van het influent

Afstudeerrapport

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van mijn afstudeeronderzoek, uitgevoerd bij de sectie Gezondheidstechniek aan de subfaculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen van de TU Delft. Het maakt onderdeel uit van het promotieonderzoek 'Interacties binnen het afvalwatersysteem'. Deze afstudeeropdracht is gericht op de relatie tussen de kenmerken van het rioolstelsel en de samenstelling van het influent van de afvalwaterzuivering.

Graag wil ik mijn begeleider Jeroen Langeveld bedanken voor zijn enthousiaste begeleiding, adviezen en de prettige samenwerking de afgelopen maanden. Ook professor Clemens ben ik dank verschuldigd, ik heb zijn sturing en adviezen als motiverend en leerzaam ervaren. Verder gaat mijn dank uit naar verschillende medewerkers van Witteveen + Bos, Arcadis en Grontmij en in het bijzonder Ir. J.T.D. Tiegelaar, voor het beschikbaar stellen van tijd en gegevens en voor het beantwoorden van al mijn vragen.

Marjolijne Herbergs
Delft, augustus 2001

Samenvatting

In de huidige praktijk worden de riolering en zuivering vaak als afzonderlijke delen gezien. Hierdoor zijn de interacties tussen beide deelsystemen de afgelopen jaren onderbelicht gebleven. Binnen afzienbare termijn echter zal in de Nederlandse praktijk een afstemming plaatsvinden tussen het beheer van de riolering en de zuivering. Daarvoor is kennis nodig met name met betrekking tot het dynamisch systeemgedrag. Dikwijls is gesteld dat de hoeveelheid en samenstelling van afvalwater wordt beïnvloed door het ontwerp en beheer van de riolering. Desondanks bestaat nog weinig inzicht in de wijze waarop en de mate waarin processen binnen de riolering van invloed zijn op de influentsamenstelling en in hoeverre dit te verklaren is door de analyse van beschikbare gegevens.

Het doel van dit onderzoek is drieledig:

- Het inventariseren van aspecten die van invloed zijn op de samenstelling van afvalwater.
- Het maken van een systematische analyse van beschikbare gegevens door het bekijken van een aantal cases.
- Het vergelijken van gegevens die beschikbaar zijn en benodigd om processen en hun invloed op de influentsamenstelling te beoordelen.

Afvalwater bestaat uit een mengsel van huishoudelijk en industrieel afvalwater en regenwater. Het rioolstelsel zorgt voor de hygiënische inzameling van afvalwater en het transport naar de zuiveringsinstallatie. Tijdens het verblijf in het riool vinden allerlei fysische, chemische en biochemische processen plaats die de samenstelling van het water beïnvloeden. Zo vinden biologische omzettingen van organisch materiaal plaats in de waterfase, biofilm of in het sediment. Parameters als de stroomsnelheid en de waterhoogte bij DWA zijn hierop van invloed. Verder komen organische en anorganische vaste stoffen en daaraan gekoppelde verontreinigingen door meevoering via regenwater in het riool terecht. De mogelijke sedimentatie van deze vaste stoffen wordt beïnvloed door bijvoorbeeld de turbulentie, stroomsnelheid en schuifspanning in de stroming. Mengingsprocessen gaan een rol spelen wanneer zowel afvalwater als neerslag moet worden afgevoerd. Vooral bij persleidingen kan propstroming optreden waardoor een geconcentreerde vuilvracht naar de zuivering wordt afgevoerd. Wanneer een stelsel niet goed waterdicht is tenslotte, kan er ook vreemd water het stelsel in- dan wel exfiltreren. Alle aspecten die op deze manier de samenstelling van het influent beïnvloeden zijn aan de hand van een literatuurstudie en met de hulp van deskundigen geïnventariseerd.

Voor het analyseren van beschikbare gegevens is een onderzoeksprotocol opgesteld. De cases zijn op gestructureerde wijze aangepakt en verschillende onderzoekers hebben op overeenkomstige wijze gewerkt zodat de resultaten onderling vergeleken konden worden.

In de eerste caseanalyse is het rioolstelsel in Haarlem Zuidoost bestudeerd. De in het influent van Haarlem gemeten stofconcentraties zijn significant lager dan landelijk gemiddeld. Ook berekende verhoudingsgetallen tussen stofconcentraties blijken significant te verschillen. Dit wijst op het plaatshebben van omzettingsprocessen binnen het riool en mogelijk op de infiltratie van water. Deze infiltratie van water wordt bevestigd door een opgestelde waterbalans en stikstofberekening. Het blijkt hier vooral te gaan om oppervlaktewater dat via een kapotte overstort het stelsel instroomt, maar

waarschijnlijk wordt ook drainagewater op het riool geloosd. Voor de omzettingsprocessen zijn basisgegevens van het riool achterhaald aan de hand van rapporten en kaarten. Met behulp van simulaties in het stromingsprogramma Hydroworks zijn parameters als de waterstand en stroomsnelheid bij DWA, maar ook het mogelijk biofilmoppervlak, het waterspiegeloppervlak, de zuurstofoverdracht en de biofilmactiviteit berekend. Doordat gegevens m.b.t persleidingen beperkt zijn is het niet mogelijk iets te zeggen over anaerobe omzettingen binnen het riool. Het blijkt moeilijk parameters, en zeker riooleigenschappen, te koppelen aan de influentsamenstelling.

Een volgende studie is verricht naar het stelsel in Zaandam Oost. Bij de influentanalyse valt op dat de gemeten concentraties en verhoudingsgetallen juist hoger zijn dan het landelijk gemiddelde. Ook zwevende stof metingen zijn beschikbaar. De resultaten van de influentanalyse zijn niet eenduidig en dus zijn verdere analysemogelijkheden verkend. Tijdreeksanalyse blijkt onmogelijk doordat de metingen met onregelmatige tussenstap zijn gedaan. Een regressieanalyse laat zien dat aan de hand van de metingen bestaande verbanden nauwelijks kunnen worden aangetoond, waardoor het bewijzen van vermoedens onmogelijk lijkt. De omzettingsprocessen en in-/exfiltratie worden significant bevonden en zijn nader onderzocht. Ondanks de verhoogde concentraties die worden gemeten, blijkt er sprake te zijn van infiltratie. De beschikbare stelselgegevens beperken zich echter tot Zaandam Oost, terwijl het influent wordt aangevuld door drie omliggende gemeenten. Daardoor is het in deze case nog moeilijker de geanalyseerde stelseleigenschappen te relateren aan waarnemingen aan het influent.

Christian Schaum, heeft een derde casestudie uitgevoerd naar het stelsel in Apeldoorn. Hier worden concentraties en verhoudingsgetallen gevonden die lager zijn dan landelijk gemiddeld. Bij de stelselanalyse is ook in dit geval gekeken naar de omzettingsprocessen en de in-/exfiltratie in het stelsel. In Apeldoorn blijkt een behoorlijk aandeel van het DWA debiet te bestaan uit lekwater. De gebrekkige of soms zelfs ontbrekende metingen maken de beoordeling van de biologische activiteit in het riool opnieuw lastig.

Het onderzoek is afgesloten met een vergelijking van de drie casestudies. De stelsels in Apeldoorn en Haarlem komen wat betreft gemeten stofconcentraties erg overeen. Parameters die de grootte van het influentdebiet en de grootte en lengte van het stelsel beschrijven blijken zich te verhouden als 4:1. Verder hebben beide stelsels een vergelijkbaar aandeel lekwater, waterstand bij DWA en verhouding tussen volume en waterspiegeloppervlak. De verhoudingen tussen stofconcentraties komen juist bij de stelsels in Zaandam en Haarlem erg overeen. Uit de stelselanalyses blijkt dat het verval en de verhoudingen tussen biofilmoppervlak of waterspiegeloppervlak en DWA debiet voor de beide stelsels grote overeenkomsten vertonen.

De verschillende processen die in het riool plaatsvinden zijn van invloed op de influentsamenstelling en worden indirect beïnvloed door de kenmerken van het rioolstelsel. Met de beschikbare hoeveelheid influentgegevens was het echter nauwelijks mogelijk verbanden tussen influent en processen aan te tonen, waardoor het bewijzen van de relatie tussen stelselparameters en influentsamenstelling praktisch onmogelijk werd. In de toekomst kan wellicht veel meer informatie verkregen worden wanneer de meetwijze niet alleen beheerdoeleinden als uitgangspunt heeft, maar ook rekening gehouden wordt met de procesvariatie.

Inhoudsopgave

Voorwoord i
Samenvatting iii
Inhoudsopgave v

Lijst met figuren viii
Lijst met tabellen x

Hoofdstuk 1: Inleiding 1

Hoofdstuk 2: Literatuurstudie 3
2.1 Inleiding 3
2.2 Afvalwater 4
2.2.1 Droogweerafvoer 4
2.2.2 Regenwaterafvoer 5
2.2.3 Samenstelling afvalwater 6
2.3 Omzettingsprocessen binnen de riolering 8
2.3.1 Omzettingen in de waterfase 8
2.3.2 Omzettingen in de biofilm 9
2.3.3 Omzettingen in het sediment 11
2.4 Sedimentatieprocessen binnen de riolering 11
2.5 Mengingsprocessen binnen de riolering 13
2.6 De zuiveringsinstallatie 15
2.7 Invloedsaspecten 17

Hoofdstuk 3: Probleemanalyse en onderzoeksaanpak 19
3.1. Inleiding 19
3.2. Probleemstelling 19
3.3. Doelstelling 20
3.4. Uitgangspunten 20
3.5. Onderzoeksopbouw 21
3.6. Onderzoeksaanpak 23

Hoofdstuk 4: Casestudie Haarlem Zuidoost 33
4.1 Inleiding 33
4.2 Stelselconfiguratie Haarlem 33
4.3 Analyse van het influent 35
4.3.1 Algemene analyse 35
4.3.2 Droogweerafvoer en regenwaterafvoer analyse 36
4.3.3 Seizoensanalyse 37
4.3.4 Analyse zwevend stofgehalte 37
4.4 Significante processen en parameters 38
4.5 Vervolgonderzoek 39
4.5.1 In-/Exfiltratie van water 39
4.5.2 Omzettingsprocessen binnen het riool 41
4.6 Slotanalyse 45

Hoofdstuk 5: Casestudie Zaandam-Oost **47**
5.1 Inleiding 47
5.2 Stelselconfiguratie Zaandam-Oost 47
5.3 Analyse van het influent 49
5.3.1 Algemene analyse 49
5.3.2 Tijdreeksanalyse 52
5.3.3 Resultaten van regressieanalyse 54
5.3.4 Conclusies en vervolgonderzoek 57
5.4 Vervolgonderzoek 58
5.4.1 In-/Exfiltratie 58
5.4.2 Omzettingsprocessen binnen het riool 60
5.5 Slotanalyse 62

Hoofdstuk 6: Casestudie Apeldoorn **65**
6.1 Inleiding 65
6.2 Stelselconfiguratie Apeldoorn 65
6.3 Influentanalyse 66
6.3.1 DWA/RWA analyse 66
6.3.2 Seizoensanalyse 67
6.4 Vervolgonderzoek 68
6.4.1 In-/Exfiltratie van water 68
6.4.2 Omzettingsprocessen 69
6.5 Slotanalyse 70

Hoofdstuk 7: Vergelijking van de cases **73**
7.1 Inleiding 73
7.2 Vergelijking van het influent 73
7.3 Vergelijking stelselparameters 75
7.4 Beperkingen, onzekerheden en onnauwkeurigheden 78
7.4.1 Beperkingen 78
7.4.2 Onzekerheden 78
7.4.3 Onnauwkeurigheden 79
7.5 Toekomstvisie 81

Hoofdstuk 8: Conclusies en aanbevelingen **85**
8.1 Conclusies 85
8.2 Aanbevelingen 85

Literatuurlijst **87**

Lijst met begrippen en afkortingen **89**

Bijlagen:
Bijlage 1 - Invloedsparameters
Bijlage 2 - Influentanalyse
2-1 Influentanalyse Haarlem Zuidoost
2-2 Influentanalyse Zaandam Oost

2-3 Influentanalyse Apeldoorn
Bijlage 3 – In-/Exfiltratie berekeningen
Bijlage 4 - Stelselanalyse
4-1 Stelselanalyse Haarlem Zuidoost
4-2 Stelselanalyse Zaandam Oost
4-3 Stelselanalyse Apeldoorn
Bijlage 5 - Berekening stelselparameters
Bijlage 6 - Verblijftijden
6-1 Verblijftijden Haarlem Zuidoost
6-2 Verblijftijden Zaandam Oost
Bijlage 7 – Schematisatie stelsel Apeldoorn
Bijlage 8 – Auto- en kruiscorrelaties
Bijlage 9 – Volumeberekening voor gedeeltelijk gevulde hellende buizen
Bijlage 10 – Minimale buiswaterstanden
Bijlage 11- Verhouding DWA volume en waterspiegeloppervlak

Lijst met figuren

Figuur 2.1: Het afvalwatersysteem 3
Figuur 2.2: Dagelijkse DWA schommelingen (Wiggers, 1998) 4
Figuur 2.3: Neerslag verdeling over het jaar 1999 (KNMI) 5
Figuur 2.4: Vaste stoffen zoals ze voorkomen in afvalwater (Almeida,1999) 7
Figuur 2.5: Omzettingsprocessen in waterfase, biofilm en sediment 8
Figuur 2.6: Schematische beschrijving van biofilmvorming op een vaste ondergrond (TU Munchen) 9
Figuur 2.7: Dikte van de biofilm als functie van de tijd en zuurstofconcentratie (Norsker et al., 1995) 10
Figuur 2.8: De afhankelijkheid van de maximale gemiddelde groei van de biofilm en de wandschuifspanning (Wolff en Reiff, 1996) 11
Figuur 2.9: De beweging van vaste stoffen in een rioolbuis bij droogweerafvoer 12
Figuur 2.10: Stroming bij DWA en RWA: propstroming en volledige menging 14
Figuur 2.11: Optreden first flush in Nederland 14
Figuur 2.12: Afvlakking pieken in AWZI (Urbaniak, 1998) 16
Figuur 2.13: Systematische indeling van het riool 17
Figuur 3.1: Afvalwatersysteem als geheel, inclusief systeemgrens 21
Figuur 3.2: De empirische cyclus 22
Figuur 3.3: Onderzoeksaanpak schematisch weergegeven 24
Figuur 3.4: Schematische weergave influentanalyse 25
Figuur 4.1: Kaartje Haarlem Zuidoost 34
Figuur 4.2: Concentraties gemeten in het influent van het stelsel in Haarlem en gemiddelde waarden gemeten door het CBS 36
Figuur 4.3: Verhoudingsgetallen voor influentmetingen Haarlem en CBS-waarden 36
Figuur 4.4: Alle debieten gemeten in 1999 36
Figuur 4.5: Verhouding tussen de gemeten concentraties en de CBS-waarden voor de zomer en winter. 37
Figuur 4.6: Droogrest uitgezet tegen het debiet (1999) 38
Figuur 5.1: Overzichtstekening Zaandam-Oost 48
Figuur 5.2: Stofconcentraties gemeten in Zaandam en de gemiddelde concentraties bepaald door het CBS 49
Figuur 5.3: Diagram met de tussen 1997 en 2000 optredende debieten 50
Figuur 5.4: Concentratie onopgeloste stof bij droogweerafvoer en regenwaterafvoer voor drie opeenvolgende jaren 50
Figuur 5.5: BZV-N verhouding tijdens DWA en RWA voor drie jaren 51
Figuur 5.6: Concentratie CZV voor verschillende seizoenen in drie jaren 51
Figuur 5.7: Debieten van 1997-2000 uitgezet tegen de neerslagmetingen 54
Figuur 5.8: Verloop van het debiet en de neerslag in het jaar 1998 55
Figuur 5.9: Links: Zwevende stof uitgezet tegen neerslag (1997). Rechts: Zwevende stof uitgezet tegen het debiet 55
Figuur 5.10: N-Kjeldahl uitgezet tegen het debiet voor 1997 56
Figuur 5.11: Links: Verband tussen de concentratie zwevende stof en CZV. Rechts: Verhouding CZV-Zwevende stof uitgezet tegen het debiet 56
Figuur 5.12: Links: N-Kjeldahl uitgezet tegen CZV (1997). Rechts: CZV-N uitgezet tegen het debiet 57
Figuur 5.13: Links: Verhouding BZV-CZV uitgezet in verschillende seizoenen (1997). Rechts: Verhouding BZV-N uitgezet voor winter en zomer 57

Figuur 6.1: Afvalwatersysteem Apeldoorn 65
Figuur 6.2: Het verloop van de temperatuur van het afvalwater in de beluchtingstank voor actief slib 67
Figuur 6.3: Concentratieverloop in het influent van Apeldoorn voor CZV, BZV en N 67
Figuur 6.4: Droogweerafvoer naar de zuivering bij Apeldoorn en de grondwaterstanden voor 1997 68
Figuur 6.5: Persleiding vanuit Beekbergen 70
Figuur 7.1: Verhouding tussen de gemiddeld gemeten stofconcentraties in influent en de gemiddelde waarde zoals bepaald door het CBS 74
Figuur 7.2: Verhouding BZV/CZV in Zaandam Oost voor vier seizoenen (1997) 75

Lijst met tabellen

Tabel 3.1:	Gemiddelde concentratie Nederlands influent in '97-'98	26
Tabel 3.2:	Openbare zuiveringsinrichtingen: ratio tussen gemeten parameters in influent	26
Tabel 3.3:	Standaardinfluent volgens STOWA 1998-2	27
Tabel 3.4:	Relaties tussen processen en stelseleigenschappen	29
Tabel 3.5:	Indicatie van relaties tussen processen en vervuilingsparameters	29
Tabel 4.1:	Verhard oppervlak Haarlem, per type. Exclusief Zuiderpolder	34
Tabel 4.2:	Pomp- en pompovercapaciteiten in Zuiderpolder en Haarlem Zuidoost	35
Tabel 4.3:	Theoretische en gemeten vuilvrachten in Haarlem bij DWA	37
Tabel 4.4:	Relevante stelseleigenschappen en processen voor de case Haarlem	39
Tabel 4.5:	In- en uitgaande waterstromen bij droogweerafvoer	40
Tabel 4.6:	Resultaten van simulaties in Hydroworks	44
Tabel 5.1:	Op de riolering in Zaandam aangesloten afvoerend oppervlak	48
Tabel 5.2:	Procentueel verschil tussen gemeten/berekende verhoudingen en vastgestelde CBS-waarde	49
Tabel 5.3:	Analysetechnieken voor tijdreeksen, geclassificeerd naar de aard van de variabele en de afstand tussen de metingen (Davis, 1982)	53
Tabel 5.4:	In- en uitgaande waterstromen bij droogweerafvoer	59
Tabel 5.5:	Resultaten van simulaties in Hydroworks voor Zaandam Oost	61
Tabel 6.1:	Gemiddelde concentraties in het influent van Apeldoorn	66
Tabel 6.2:	Resultaten van simulaties in Hydroworks voor Apeldoorn	69
Tabel 6.3:	Pompcapaciteiten in het stelsel van Apeldoorn	69
Tabel 7.1:	Kentallen van drie stelsels	73
Tabel 7.2:	Gemiddelden van concentraties en verhoudingen van drie stelsels	74
Tabel 7.3:	Stelselparameters voor drie stelsels. Grootste overeenkomst tussen Haarlem en Apeldoorn	75
Tabel 7.4:	Stelselparameters voor drie stelsels. Verschillen tussen Haarlem en Apeldoorn	76
Tabel 7.5:	Stelselparameters voor drie stelsels. Grootste overeenkomst tussen Haarlem en Zaandam	76
Tabel 7.6:	Stelselparameters voor drie stelsels. Verschillen tussen Haarlem en Zaandam	76
Tabel 7.7:	Relatie tussen volume DWA en het waterspiegeloppervlak voor drie stelsels.	77
Tabel 7.8:	Gevonden range voor verschillende uitgangswaarden en de maximale doorwerkende fout die daarbij hoort.	79
Tabel 7.9:	Mogelijke waarden voor stelselparameters in Zaandam	80

Hoofdstuk 1: Inleiding

Riolering en afvalwaterzuivering maken samen deel uit van het afvalwatersysteem. In de huidige praktijk worden de riolering en de zuivering veelal als afzonderlijke delen gezien. Dat is zo gegroeid omdat de verantwoordelijkheid voor de riolering bij de gemeente ligt en die voor de zuivering bij het waterschap. De overgang tussen riolering en zuivering is de afgelopen jaren, in vergelijking met de afzonderlijke deelgebieden, relatief onderbelicht gebleven. Voor een goede onderlinge afstemming van riolering en zuivering is het meenemen van deze interacties juist essentieel. Door namelijk de aandacht te vestigen op het vlak van interacties, neem het aantal mogelijke constructieve, maar ook bedrijfstechnische oplossingen, voor optimalisatie van het afvalwatersysteem als geheel, toe.

Sinds oktober 1999 loopt het aan de TU Delft opgestarte promotieonderzoek 'Interacties binnen het afvalwatersysteem', waarin wordt gezocht naar de mogelijkheden voor een goede afstemming tussen de riolering en zuivering. Het onderzoek wordt uitgevoerd in samenwerking met drie ingenieursbureaus (Arcadis, Witteveen + Bos en Grontmij) en kent twee speerpunten:

- Het verkrijgen van inzicht in de fysieke invloed die de riolering via het influent uitoefent op de afvalwaterzuivering. Regelmatig is gesteld dat de eigenschappen van de riolering voor een deel het verloop van de samenstelling en de hoeveelheid influent bepalen, dat aankomt bij de zuivering. Het influent heeft op zijn beurt weer invloed op de werking van de zuivering waardoor maatregelen aan de riolering het functioneren van de AWZI kunnen beïnvloeden.
- Het beschouwen van de mogelijkheden om het afvalwatersysteem als geheel optimaal te laten functioneren. Wanneer bijvoorbeeld een reductie van de jaarlijkse vuilvracht gewenst is, in verband met lozen op het oppervlaktewater, worden zowel maatregelen aan de zuivering als aan de riolering bekeken en onderling vergeleken.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op het rioolstelsel en zijn invloed op het influent. Inmiddels is duidelijk dat variaties in samenstelling en hoeveelheid influent aanzienlijk kunnen zijn. Dit wordt gedeeltelijk veroorzaakt door aanwezige variaties in het aanbod van het afvalwater. De in de riolering optredende fysische, chemische en biochemische processen zijn echter ook van invloed. Het is hierbij de vraag òf en in welke mate specifieke eigenschappen van de riolering invloed uitoefenen op deze processen en of deze invloed op basis van beschikbare gegevens kan worden vastgesteld en gekwantificeerd. Aan de hand van een aantal cases is voor verschillende rioolstelsels nagegaan op welke wijze zij de samenstelling van het influent beïnvloeden.

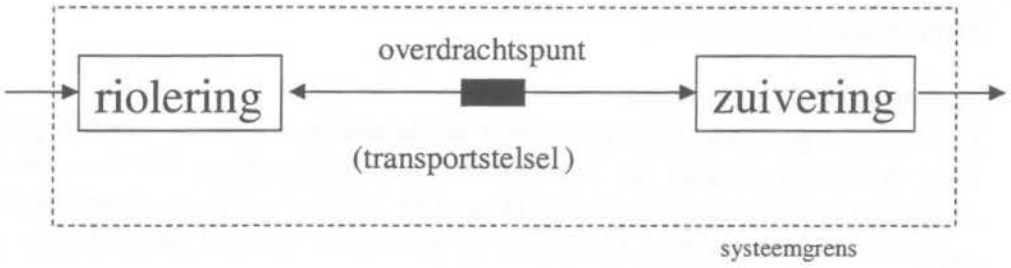
Dit rapport begint met een overzicht van de bestaande kennis. Middels een literatuurstudie is informatie verzameld over het afvalwater zelf, processen die plaatsvinden binnen het riool en de zuiveringsinstallatie. Zo komen verschillende aspecten naar voren die de kwantiteit en kwaliteit van afvalwater beïnvloeden

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een uitgebreide probleemanalyse en onderzoeksaanpak gegeven. Een geheel van voorschriften en regels (protocol) is opgesteld, om een gestructureerde en eenduidige manier van analyseren te bewerkstelligen. De hoofdstukken 4, 5 en 6 behandelen achtereenvolgens de casestudies van Haarlem Zuidoost, Zaandam-Oost en Apeldoorn. Hierbij is steeds onderscheid gemaakt tussen een uitgebreide influentanalyse en een daaraan gekoppelde stelselanalyse. De resultaten van deze casestudies worden met elkaar vergeleken in hoofdstuk 7. Ook komen beperkingen, onzekerheden en onnauwkeurigheden naar voren die in dit onderzoek een rol spelen. Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

Hoofdstuk 2: Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Een rioolstelsel wordt aangelegd om afvalwater op hygiënische wijze in te zamelen en transporteren. Riolen kunnen afvalwater en neerslag gemengd of via een gescheiden stelsel afvoeren. In Nederland is de overgrote meerderheid van de rioolstelsels gemengd. Met behulp van het stelsel wordt het water getransporteerd naar een afvalwaterzuiveringsinstallatie. Hier ondergaat het water een aantal zuiveringsprocessen, waarna het schoon genoeg is om op het oppervlaktewater geloosd te worden of in bepaalde gevallen te worden hergebruikt. Het rioolstelsel, van huisaansluiting tot gemaal en de afvalwaterzuiveringsinrichting vormen samen het afvalwatersysteem (zie figuur 2.1).



Figuur 2.1: Het afvalwatersysteem

In de praktijk worden riolering en zuivering vaak als afzonderlijke delen beschouwd. In de toekomst is het echter de bedoeling het ontwerp en beheer van zowel riolering als zuivering steeds verder op elkaar af te stemmen. Om dit mogelijk te maken moet inzicht worden verkregen in:

- de invloed van de riolering op de hoeveelheid en samenstelling van het influent
- de invloed van dat influent op de werking van de zuivering
- de mogelijkheden bij de zuivering om op fluctuaties in te spelen.

De nadruk binnen dit afstudeeronderzoek ligt op het rioolstelsel en zijn invloed op het influent. Inmiddels is duidelijk dat de variaties in samenstelling en hoeveelheid influent aanzienlijk kunnen zijn. Dit wordt gedeeltelijk bepaald door aanwezige variaties in het aanbod van de afzonderlijke componenten van het afvalwater. In de riolering vinden echter ook allerlei fysische, chemische en biochemische processen plaats die van invloed zijn.

In dit hoofdstuk zijn de resultaten verwerkt van een literatuurstudie naar processen die plaatsvinden in het riool. Het is bedoeld als introductie in de materie. Om te beginnen worden de verschillende componenten waaruit afvalwater bestaat en de verontreinigingen die zich erin bevinden. In paragraaf 2.3, 2.4 en 2.5 worden achtereenvolgens de omzettingsprocessen, de sedimentatieprocessen en de mengingsprocessen zoals die in het riool plaatsvinden, uiteengezet. Vervolgens wordt kort aandacht geschonken aan de afvalwaterzuivering en hoe variaties in het influent de werking kunnen beïnvloeden. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van de aspecten die van invloed zijn op de samenstelling van het afvalwater dat bij de zuivering aankomt.

2.2 Afvalwater

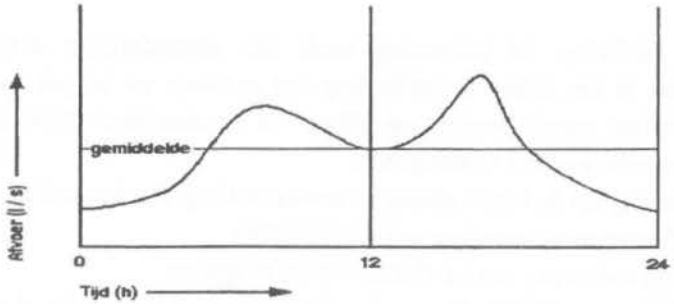
Water dat via de riolering wordt afgevoerd bestaat uit afvalwater, regenwater of een mengsel van beide. Het afvalwater is een redelijk continue stroom en wordt ook wel de droogweerafvoer (DWA) genoemd. De regenwaterafvoer (RWA) is een veelvoud van de droogweerafvoer en vaak ongeveer 3 tot 6 keer zo groot. De samenstelling van het influent wordt voor een groot deel bepaald door variaties in het aanbod van de afzonderlijke componenten van het afvalwater. De concentraties van bepaalde verontreinigingen die aanwezig zijn in het afvalwater, worden gebruikt als parameters om de samenstelling van bijvoorbeeld influent te karakteriseren. Deze paragraaf geeft een overzicht van de afzonderlijke componenten van het afvalwater en de verontreinigingen in afvalwater die voor dit onderzoek relevant zijn.

2.2.1 Droogweerafvoer

De droogweerafvoer wordt onderverdeeld in huishoudelijk afvalwater, industrieel afvalwater en vreemd water.

Huishoudelijk afvalwater

De dagelijks geproduceerde hoeveelheid huishoudelijk afvalwater wordt bepaald door gewoontes rondom het watergebruik van de bevolking. De hoeveelheid afvalwater in Nederland ligt gemiddeld rond de 120 liter per persoon per dag. De geproduceerde hoeveelheid afvalwater op huisniveau vertoont een ochtend- en avondpiek en is zeer gering gedurende de nacht.



Figuur 2.2: Dagelijkse DWA schommelingen (Wiggers, 1998)

De ochtendpiek is vooral voor ammonium duidelijk waarneembaar. Het tijdstip op de dag waarop neerslag valt, kan dan ook een groot effect hebben op de ammoniumuitstoot. Een CZV-piek treedt ongeveer twee uur later op (Urbaniak, 1998). Behalve een dagelijks profiel bestaat ook een wekelijks profiel, waarbij grote verschillen zijn te ontdekken tussen weekdagen en het weekend. Dit is opnieuw afhankelijk van de (lokale) gewoontes rondom het watergebruik,

Industrieel afvalwater

In de industrie wordt op veel verschillende manieren gebruik gemaakt van water. Zo is er water nodig voor transport, om te spoelen of reinigen, als koelwater of soms voor het industriële proces zelf. De samenstelling van het afvalwater is vaak zeer specifiek en afhankelijk van het soort industrie. De vervuilingskracht van industrieel water is om te rekenen naar inwonerequivalenten. Hierbij wordt aangenomen dat een inwonerequivalent overeenkomt met een zuurstofbindend

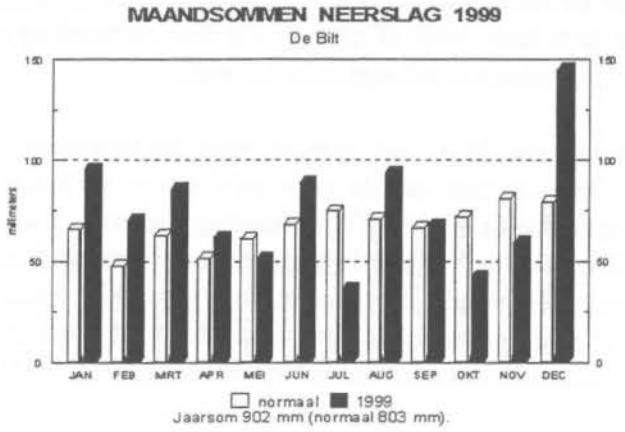
vermogen van 136 g O_2/dag (v.d.Graaf, 1995). Meestal mogen industrieën hun afvalwater pas lozen wanneer het voldoet aan bepaalde voorwaarden.

Vreemd water

Oudere rioolstelsels zijn in veel gevallen niet zo waterdicht als ze wel behoren te zijn. Dit kan leiden tot de in- of exfiltratie van water. In Nederland hebben we te maken met een hoge grondwaterstand, waardoor lekkages bijna altijd de infiltratie van grondwater tot gevolg hebben. In de internationale literatuur gaat de aandacht veeleer uit naar juist de exfiltratie van afvalwater uit het riool, met bijbehorende gevolgen voor de bodem of het dieper liggend grondwater. Ook kunnen op sommige plaatsen overkluisde watergangen en drainage of bronnering deel uitmaken van de riolering, waardoor een extra debiet wordt aangevoerd.

2.2.2 Regenwaterafvoer

In Nederland valt gemiddeld ongeveer 800 mm neerslag per jaar. De verdeling van de neerslag over een jaar, zoals te zien in figuur 2.3, blijkt gemiddeld vrij gelijkmatig. Het is dan ook moeilijk ten aanzien van de neerslag een duidelijke seizoensinvloed aan te wijzen. De hoeveelheid neerslag kan sterk variëren per dag en ook de neerslagintensiteit loopt behoorlijk uiteen. Deze twee parameters zijn van grote invloed op de kwaliteit van het afvalwater. De waterkwaliteit is ook afhankelijk van onder andere de buiduur, aard en locatie van het oppervlak, de lengte van de voorafgaande droogweerperiode en de kwaliteit van de neerslag zelf.



Figuur 2.3: Neerslag verdeling over het jaar 1999

Veranderingen in samenstelling worden ook veroorzaakt doordat een aantal seizoensafhankelijke verschijnselen optreedt, waaronder de volgende:

- Het gebruik van strooizout dat een hoog chloride gehalte veroorzaakt.
- Bloemen of bladeren uit bomen die een hoog gehalte aan nutriënten veroorzaken.
- Lekke riolen waar grondwater instroomt die zorgen voor een sterke verdunning van het afvalwater.

Dit laatste geval komt met name voor in gebieden met een sterk wisselende grondwaterstand. Afhankelijk van de samenstelling van het grondwater kan zo ook een verhoogd chloride- of nitraatgehalte worden gemeten.

In Nederland regent het ongeveer 7% van de tijd. Het effect van neerslag op het afvalwatersysteem is echter tot ongeveer 25% van de tijd merkbaar. Het gedrag van

een afvalwatersysteem onder RWA-omstandigheden is dan ook een van de belangrijkste aandachtspunten bij de beoordeling van het functioneren. Toch zijn maar weinig gegevens beschikbaar over de samenstelling van het influent tijdens RWA. Het is wel mogelijk aan de hand van influent- en overstortmetingen een range aan te geven waartussen de influentkwaliteit zich beweegt tijdens RWA. Deze is echter weinig betrouwbaar, omdat influentmetingen slechts wekelijks plaatsvinden en monsters gemengd worden geanalyseerd. Bovendien is het werkelijk verloop van de influentsamenstelling tijdens RWA dynamisch. Pas wanneer een duidelijk beeld is verkregen van dit verloop, is het mogelijk in te spelen op dit dynamische gedrag.

2.2.3 Samenstelling afvalwater

De gemiddelde samenstelling van het influent in Nederland is al jarenlang vrij constant, maar kan per zuivering behoorlijk verschillen. In afvalwater worden vele soorten verontreinigingen aangetroffen. De karakterisering van het influent is dan ook van groot belang.

Organische koolstofverbindingen

Organische koolstofverbindingen worden geoxideerd onder verbruik van zuurstof en weergegeven door het Biochemisch Zuurstofverbruik (100-450 mg/l), of algemener, het Chemisch Zuurstofverbruik (300-800 mg/l). Omdat bij de BZV bepaling alleen de afbreekbare stoffen door de bacteriën worden geoxydeerd is deze lager dan het CZV. Naarmate de verhouding BZV/CZV groter is, is het afvalwater beter biologisch afbreekbaar. In huishoudelijk afvalwater ligt deze verhouding rond de 0,47. Het zuurstofgehalte in afvalwater bedraagt zo'n 2-6 mg/l.

De samenstelling van het influent blijkt uit verschillende onderzoeken toch seizoensafhankelijk te zijn. Dit is te zien aan de verschuiving van verschillende fracties, waarbij vooral de gemiddelde CZV-BZV verhouding varieert. Voor een deel kan dit verklaard worden door de variatie in temperatuur tijdens seizoenen. Omdat het aangeboden afvalwater weinig in samenstelling verandert, moet het tijdens het verblijf in het riool significante wijzigingen in samenstelling ondergaan. Iets wat vooral gedurende de warmere maanden een rol speelt (Langeveld, 2000).

Kjeldahl-stikstof

Stikstof komt voor in verschillende vormen: als organisch gebonden stikstof (eiwitten of aminozuren) en in anorganische vorm (ammoniak of ammonium). Zuurstofverbruik door ammonium stikstof en organisch gebonden stikstof wordt vastgesteld in de Kjeldahl bepaling. Bij de oxydatie van ammonium wordt per gram stikstof 4,57 gram zuurstof verbruikt. Stikstof is in afvalwater vooral in opgeloste vorm aanwezig en zal daarom in grote mate onafhankelijk zijn van bezinking in de riolering. Omzetting door biologische processen vindt niet of nauwelijks plaats (Mulder, 1999).

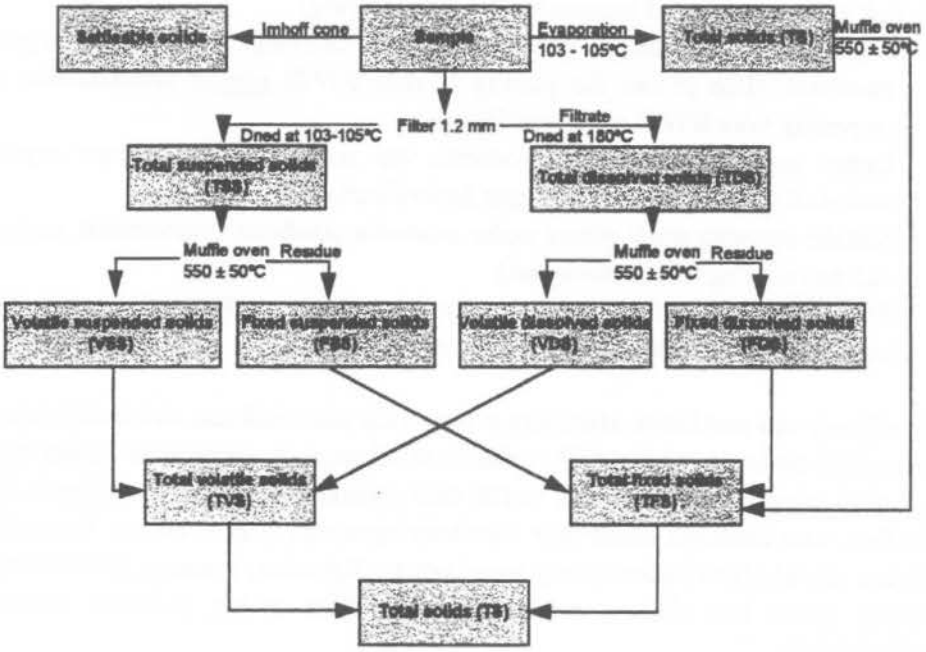
Fosfaten

Fosfor komt in water en afvalwater bijna alleen maar voor in de vorm van fosfaten. Fosfaten zijn te vinden in opgeloste vorm, in deeltjes of los materiaal, of in het lichaam van een waterorganisme. Ondanks het feit dat micro-organismen voor hun celopbouw en energietransport gebruik maken van fosfor is het, vanwege de lage

concentratie in huishoudelijk afvalwater (ongeveer 8 mg/l), niet waarschijnlijk dat de afbraak ervan plaatsvindt tijdens transport in riolen (Almeida, 1999).

Zwevende Stof

Het schema in figuur 2.4 geeft de doorgaans gebruikte indeling van vaste stoffen in afvalwater weer. De scheiding in opgeloste en zwevende stoffen is in dit geval het belangrijkst, omdat het gedrag van beide soorten stoffen binnen het riool erg verschilt. Niet-opgeloste stoffen, ook wel zwevende stof genoemd, spelen een rol bij sedimentatieprocessen en worden gescheiden van de opgeloste stoffen door filtratie. Het materiaal dat op het filter achterblijft is het totaal aan niet opgeloste stoffen (Total Suspended Solids).

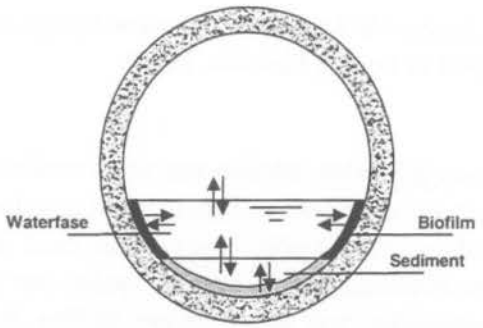


Figuur 2.4: Vaste stoffen zoals ze voorkomen in afvalwater (Almeida, 1999)

2.3 Omzettingsprocessen binnen de riolering

Bij het transport van het afvalwater vinden biologische omzettingsprocessen plaats. Organische stof wordt hierbij geoxideerd en deels omgezet tot celmateriaal. Soms ontbreekt zuurstof, zodat organisch materiaal op anaërobe wijze moet worden afgebroken, grotendeels via dissimilatieprocessen. Zowel aerobe als anaerobe processen treden op in de waterfase, biofilm en in het aanwezig sediment. Figuur 2.5 geeft het massatransport tussen deze fasen weer.

Een belangrijke parameter bij verschillende processen binnen het riool is de verblijftijd, ofwel de tijd die een vloeistofelement in het rioolstelsel aanwezig is geweest. De verblijftijd is onder meer afhankelijk van de plek waar water een riool instroomt, de route die daarna wordt afgelegd en de stromingscondities binnen de buis. Ook de temperatuur en zuurgraad van het water zijn van grote invloed op zuiveringsprocessen.



Figuur 2.5: Omzettingsprocessen in waterfase, biofilm en sediment. De pijlen geven microbiologische processen weer.

De omzettingsprocessen hebben positieve en negatieve effecten binnen de riolering, die ook weer van invloed kunnen zijn op de zuivering:

- Onder aërobe condities: verwijdering van makkelijk afbreekbaar organisch materiaal. (Een proces dat gunstig is voor RWZI zonder denitrificatie, maar ongunstig voor RWZI met denitrificatie)
- Onder anaërobe condities: productie van makkelijk afbreekbaar organisch materiaal (gunstig voor RWZI met denitrificatie)
- Sulfide vorming vindt plaats onder anaërobe condities (veroorzaakt aantasting van de riolering en stankoverlast)
- Bij infiltratie van nitraathoudend grondwater, kan in vlakke riolen met slechte zuurstoftoevoer denitrificatie plaatsvinden.

De afbraak van makkelijk afbreekbaar organisch materiaal kan aanzienlijk zijn. Het is moeilijk op basis van het CZV-totaal in te schatten in welke mate omzettingen in het riool plaatsvinden. Daarom wordt vaak gekeken naar de verschillende CZV-fracties, waar duidelijk onderlinge verschuivingen zijn waar te nemen. Omzettingen vinden vooral plaats onder 'droog weer' omstandigheden, wanneer uitwisseling van stoffen plaats kan vinden, zonder dat de biofilm of het sediment aan erosie onderhevig is.

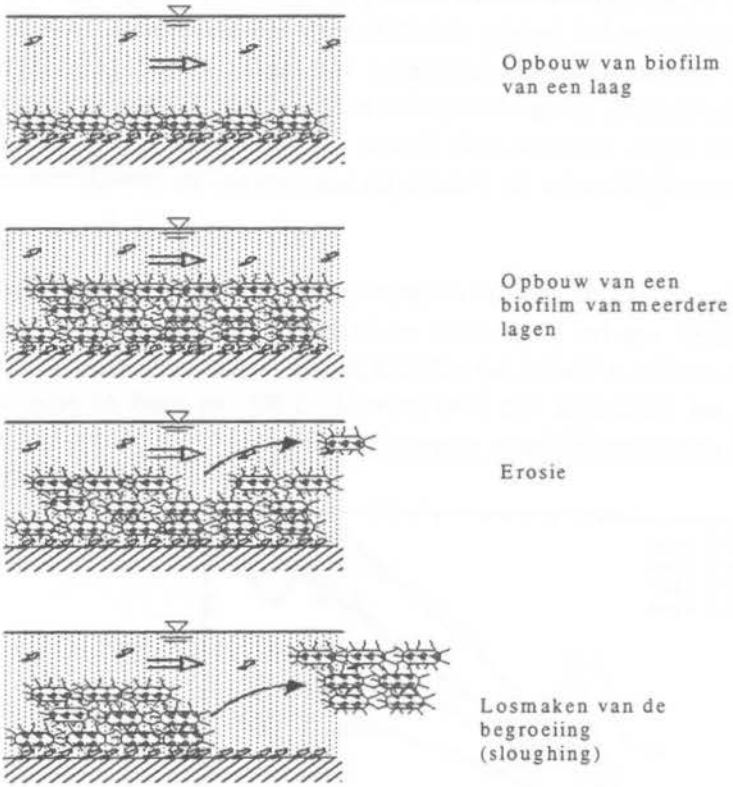
2.3.1 Omzettingen in de waterfase

Het water in de riolering bevat doorgaans gesuspendeerde biomassa. Dit actief-slib breekt organisch materiaal af. De vergelijking met actief slib in de AWZI gaat echter niet volledig op. De biomassa is namelijk slechts in lage concentraties aanwezig en er bevinden zich binnen de riolering hoge substraatgehaltes. Toch wordt voor het beschouwen van de omzettingen in de waterfase steeds vaker aangesloten op het door Henze et al. (uit Langeveld, 2000) geïntroduceerde modelconcept voor actief slib modellering. Het actief slib model wordt aangepast aan de riolering door een aantal niet relevante processen weg te laten (afsterving) of door juist processen toe te voegen (zwavelcyclus) en door het aanpassen van de fractionering. Verschillende onderzoekers hebben een eigen variant op dit model ontwikkeld.

2.3.2 Omzettingen in de biofilm

In de riolering kan aan de buiswanden een biofilm ontstaan. Micro-organismen hechten zich aan grensvlakken tussen de vaste en vloeibare fase, de gas- en vloeibare fase of zelfs de grens tussen twee vloeibare fasen (bijv. olie en water). De biofilm groeit eerst vooral aan het oppervlak van het grensvlak. Later vindt ook

groei in meerdere lagen plaats waardoor uiteindelijk een driedimensionale structuur ontstaat. De cellen van de micro-organismen hechten zich aan de grensvlakken door elektrostatische aantrekking, van der Waalskrachten, of waterstofbruggen.



Figuur 2.6: Schematische beschrijving van biofilmvorming op een vaste ondergrond (TU München)

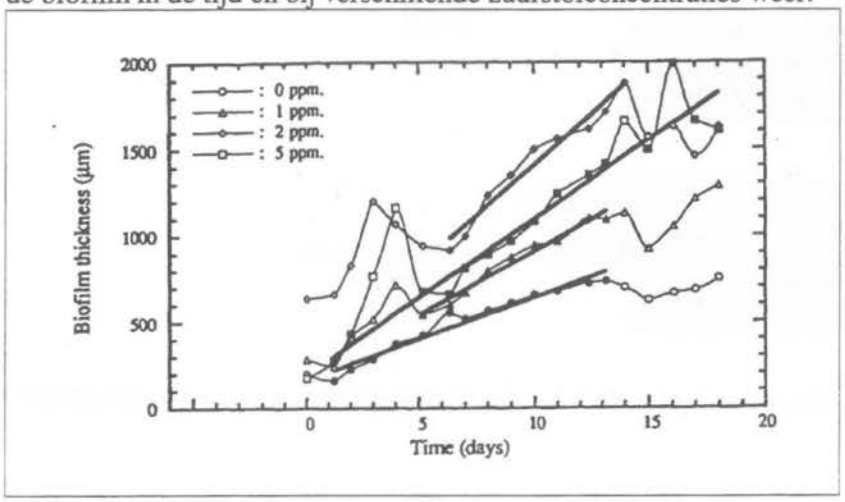
Het oppervlak van de biofilm waar water overheen stroomt is aan een wandschuifspanning onderhevig. De krachten die hierdoor worden veroorzaakt zorgen ervoor dat micro-organismen uit de biofilm worden getrokken en meegevoerd (erosie). De schuifspanning wordt bepaald door de hydraulische toestand in het riool en wordt groter naarmate de groei van de biofilm voor een verkleining van de dwarsdoorsnede van buizen zorgt. De dikte van de biofilm wordt op deze manier begrensd door de mate van erosie. Daarbij komt dat een toename van de dikte van de biofilm ook voor een verzwaring zorgt, waardoor delen kunnen loslaten. Tenslotte kunnen langdurige tekorten aan substraat of zuurstof in de diepere lagen van de biofilm, of gevormde gasbellen (door bijvoorbeeld denitrificatie) ook de samenhang van delen van de biofilm verstoren. Uit onderzoek blijkt dat tijdens neerslag de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal voor tot wel 30% uit losgeslagen slijmhuid kan bestaan.

Biofilms spelen een belangrijke rol bij het vormen van sulfide. In het afvalwater zijn in de biofilm altijd anaërobe zones te vinden waar sulfidevorming plaatsvindt, vooral wanneer die biofilm is gegroeid onder anaërobe omstandigheden. Ook blijkt de biofilm in staat te zijn tot het omzetten van CZV, met snelheden tot 3,6 g/m^2*h.

Over het gedrag van biofilms in riolen bestaan nog veel onduidelijkheden, waardoor de gedetailleerde modellering ervan tot op heden niet goed mogelijk is

gebleken. Modellen die worden toegepast zijn gebaseerd op empirische vergelijkingen of op een benadering waarin de omzetting binnen de biofilm en de diffusie van zuurstof en substraat worden beschouwd. De vele onduidelijkheden zijn onder andere te wijten aan het feit dat het erg lastig is directe metingen uit te voeren in de riolering zonder het gedrag van de biofilm te beïnvloeden. Ook blijkt het niet mogelijk de kennis van de eigenschappen van biofilms uit bioreactoren te vertalen naar biofilms in riolen omdat deze totaal andere eigenschappen hebben. De biofilmeigenschappen lopen tenslotte ook binnen het riool sterk uiteen, doordat bijvoorbeeld het zuurstofgehalte en de belastingsgraad boven- en benedenstrooms verschilt.

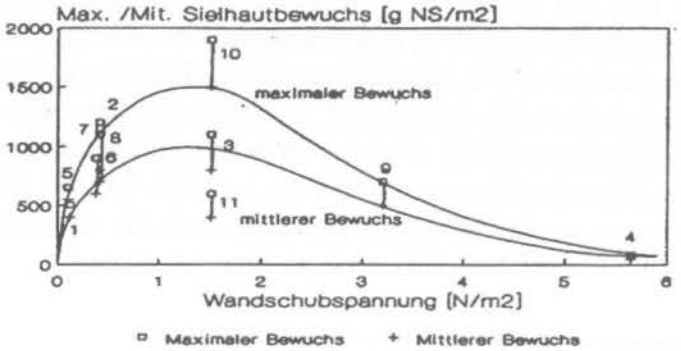
Wel is duidelijk dat groei van de biofilm afhankelijk is van omgevingscondities en dan vooral de kwaliteit van het afvalwater en de hydraulische condities. Bij de kwaliteit van het afvalwater is vooral het zuurstofgehalte van belang. De grafiek in figuur 2.7 komt uit een onderzoek van Norsker et al. (1995) en geeft de groei van de biofilm in de tijd en bij verschillende zuurstofconcentraties weer.



Figuur 2.7: Dikte van de biofilm als functie van de tijd en zuurstofconcentratie (Norsker et al. 1995)

Hieruit volgt dat de groei maximaal is bij een zuurstofconcentratie van 2 mg/l en ongeveer 115 micrometer per dag bedraagt. Ook werd de zuurstofopname in de biofilm gemeten, zodat daaruit de afbouw van organisch materiaal kon worden afgeleid. Verder onderzoek moet uitwijzen in hoeverre de gevonden waarden ook van toepassing zijn op praktijksituaties.

Ook de hydraulische omstandigheden zijn van grote invloed op de groei van de biofilm. Zo laat figuur 2.8 bijvoorbeeld het verband zien tussen de groei van de biofilm en de wandschuifspanning. Deze groei is maximaal bij een wandschuifspanning van 1,5 N/m^2, onder of boven deze waarde gaat de groei naar nul (Wolff en Reiff, 1996). Ook de hoogte van de waterstand, stroomsnelheid en turbulentie spelen een belangrijke rol. Een verband tussen het buismateriaal en de groei van de biofilm kon tijdens onderzoek niet worden vastgesteld.



Figuur 2.8: De afhankelijkheid van de maximale/gemiddelde groei van de biofilm in g/m² en de wandschuifspanning. (Wolff en Reiff, 1996)

2.3.3 Omzettingen in het sediment

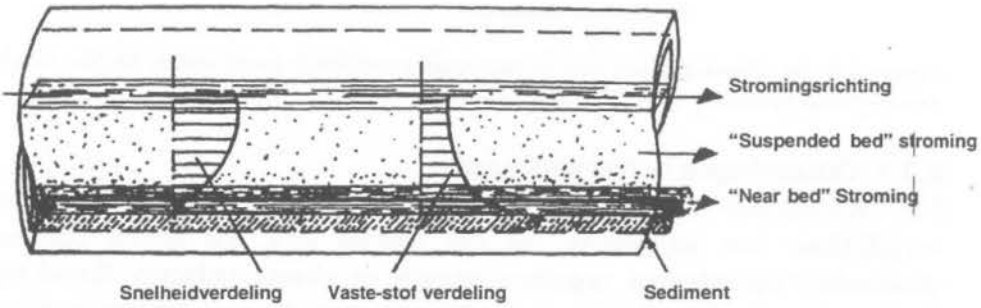
Het sedimentbed kan tijdens DWA omstandigheden een gedrag vertonen vergelijkbaar met het gedrag van een biofilm voor wat betreft opname en uitwisseling van substraat, opgeloste zuurstof en afbraakproducten. Zowel bij een biofilm als sedimentlaag vinden in de bovenlaag aërobe processen en in de dieper gelegen lagen anaërobe processen plaats. De uitwisseling tussen sediment en afvalwater is echter veel intensiever dan bij een biofilm. Toch kan bij de modellering van omzettingen binnen het rioolstelsel soms worden volstaan met het modelleren van de biofilm en het gesuspendeerd materiaal. Aandachtspunt binnen huidig onderzoek is vooral het omzettingsproces van organisch materiaal in het sedimentbed, zodat de potentiële vuilvracht tijdens RWA en overstorten kan worden voorspeld. Er bestaan uitgebreide beschrijvingen van de verandering van de eigenschappen van het sediment in de loop van de tijd en over de hoogte van het sedimentbed (Ristenpart, 1995). De leeftijd van het sediment en stroomkarakteristieken als de turbulentie en stroomsnelheid zijn van invloed op de omzettingen in het sediment.

Karakteristieke tijdschalen met betrekking tot processen die optreden gedurende DWA zijn moeilijk te schatten omdat ze zeer afhankelijk zijn van de specifieke situatie (rioolstelsel, uitgangspunten, etc.). De omzettingen in en de groei van de biofilm worden respectievelijk per uur en per dag berekend. Om het hydraulisch gedrag van een stelsel bij DWA te kunnen beschrijven, wordt een frequentie van monstername een orde van grootte van 1000-5000 seconden als indicatie worden gebruikt (Clemens, F, 2001).

2.4 Sedimentatieprocessen binnen de riolering

Afvalwater wordt afgevoerd via huis aansluitingen en regenwater vindt door afvoer over het oppervlak naar straatkolken of via regenpijpen zijn weg naar het riool. Organische en anorganische vaste stoffen komen zo door meevoering in het riool terecht. Deze vaste stoffen en de daaraan gekoppelde verontreinigingen hebben een belangrijke invloed op het functioneren van het riool. De AWZI en het oppervlaktewater worden voor een groot deel belast met tijdens RWA losgekomen vaste stoffen.

Alvorens men iets kan zeggen over de erosie en sedimentatieprocessen die plaatsvinden in het riool, is het nodig te weten welke parameters op deze processen van invloed zijn. Sediment wordt ingedeeld naar hydraulische en sedimentologische kenmerken. Meestal wordt hiervoor gebruik gemaakt van de classificatie zoals die is opgesteld door Crabtree (1989). Dit kan van belang zijn omdat bepaalde delen van het sediment bijvoorbeeld een groot deel van het totale CZV en BZV (de 'near bed solids') bevatten terwijl zij slechts een klein deel van het totale sediment uitmaken.



Figuur 2.9: De beweging van vaste stoffen in een rioolbuis bij droogweerafvoer.

Het deel van het sediment dat zich steeds in de buurt van de bodem of op de bodem beweegt, wordt 'bed load' genoemd. Het resterende deel van het sediment dat vaak wat fijner en lichter van samenstelling is, wordt de 'suspended load' genoemd en beweegt zich overwegend zonder contact met de bodem. Wat er plaatsvindt op het grensvlak tussen deze twee is niet goed duidelijk. De mate van turbulentie is van grote invloed op de wijze waarop sediment getransporteerd wordt. Het totaal aan zwevende en opgeloste stoffen beweegt door het rioolstelsel als gevolg van advectie en dispersie. Het advectie proces overheerst en zorgt voor een beweging van de vervuilingen en zwevende stoffen in dezelfde richting als en met de gemiddelde snelheid van het afvalwater. Tijdens neerslag of soms zelfs bij DWA zorgt dispersie ervoor dat vervuilingen en zwevende stof op die manier bewegen dat de concentratie gradiënten in de lengterichting van het riool beperkt worden. Snelheidsgradienten en turbulentie zijn de belangrijkste factoren binnen het stromingskarakter die dispersie veroorzaken.

Wanneer de stroming binnen het riool laag is of op plekken waar de stroomsnelheid en schuifspanning laag zijn hebben zwevende stoffen de neiging naar de bodem van het riool te zinken. Deze sedimentatie is afhankelijk van veel factoren zoals de grootte en dichtheid van de deeltjes en het soort stroming. Een stijging in afvoer kan weer zorgen voor de erosie van bezonken sediment. Erosie is afhankelijk van de stroomsnelheid, de breedte van het sedimentbed en de karakteristieken van het sediment, maar toch vooral van de schuifspanning. Wanneer de kritische schuifspanning wordt overschreden, treedt erosie op. De schuifspanning neemt toe bij de bodem en is maximaal aan de rand of bij het sedimentbed. Soms kan door mineralisering en drukkracht op het sedimentbed het sediment verstevigen, hierdoor neemt dan de voor erosie benodigde schuifspanning toe. Uiteindelijk stelt zich een evenwicht in tussen afzetting en erosie, dat onderbroken wordt door dagvariaties, reinigen van het riool, of menging van droogweerafvoer met neerslag. Bij het

transport van vaste stoffen speelt ook de transportcapaciteit, de maximale concentratie vaste stoffen waarbij net nog geen afzetting plaatsvindt, van het afvalwater een rol.

Het schatten van karakteristieke tijdschalen is ook voor sedimentatieprocessen moeilijk. Wanneer na een hevige regenbui het meeste sediment uit het stelsel verwijderd is, duurt het vermoedelijk een aantal dagen tot een week voordat een nieuwe sedimentlaag is opgebouwd. Sedimentatieprocessen worden grotendeels beïnvloed door de hydraulische toestand van het riool. Voor de beoordeling van het hydraulisch gedrag van een stelsel wordt voor de monstername de indicatieve waarde van 100-10.000 seconden voor het vollopen en 1.000-50.000 seconden voor het leeglopen van een riool aangehouden (Clemens, 2001).

Het voorspellen van stoftransport is cruciaal voor het voorspellen van de tijdens DWA en RWA optredende vuilconcentraties. De processen worden echter nog niet volledig begrepen waardoor modellering ervan slechts op empirische basis (en veelal locatiespecifiek) mogelijk is. Problemen die optreden bij de modellering ontstaan door de volgende onzekerheden:

- Er is een grote variatie in de mate van cohesiviteit van sediment in riolen. Deze is afhankelijk van bijvoorbeeld de aanwezigheid van vetten/oliën en de biologische activiteit.
- Aan de hand van stromingscondities stelt zich in ieder riool een evenwicht in aan- en afvoer van sediment in. Doordat stromingscondities varieren als gevolg van het afwisselen van DWA (die ook varieert) en RWA, is de hoeveelheid sediment beschikbaar voor transport niet constant en afhankelijk van de voorafgaande periode.
- Fysische processen binnen het riool zorgen ervoor dat de grootte van het sediment afneemt tijdens het transport in het riool. Een groot deel van het sediment belandt in een sedimentbed waar allerlei fysische/chemische en biologische processen (consolidatie en de omzetting van organisch materiaal) plaatsvinden die de eigenschappen van het sediment veranderen. Gevolg van deze processen is dat de benodigde schuifspanning om het sediment te eroderen doorgaans een stuk hoger ligt dan de schuifspanning waarbij net depositie van sediment plaatsvindt.

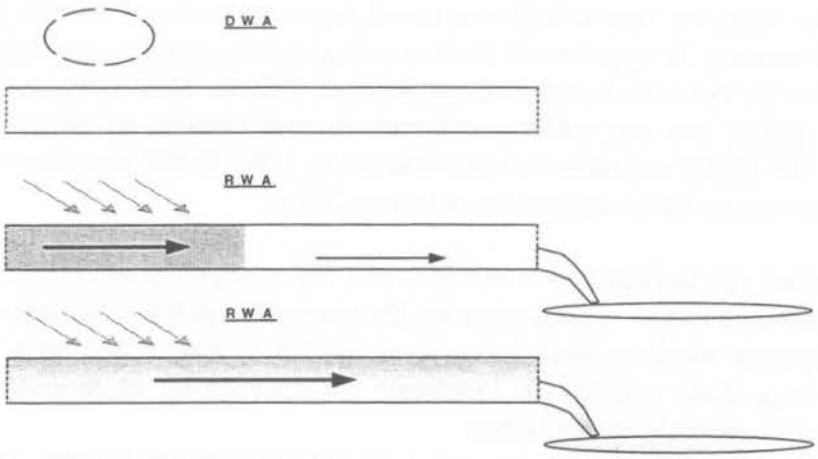
2.5 Mengingsprocessen binnen de riolering

Door gemengde rioolstelsels stroomt op elk moment van de dag een redelijk continue droogweerafvoer. Op het moment dat ook neerslag afgevoerd dient te worden gaan mengingsprocessen een rol spelen. Twee uiterste situaties doen zich voor:

- Er vindt geen menging plaats en het regenwater duwt de reeds aanwezige DWA als een prop de leiding door (figuur 2.10, situatie 2)
- Het regenwater mengt zich volledig met de droogweerafvoer (situatie 3).

Het eerste verschijnsel wordt propstroming genoemd en berust op de aanname dat een stof zich tijdens het transport niet voor- en achterwaarts in de stroomrichting (x-richting) vermengt. Bij persleidingen is vaak sprake van propstroming wat van groot belang is voor de zuivering, in verband met de geconcentreerde vuillast. Het

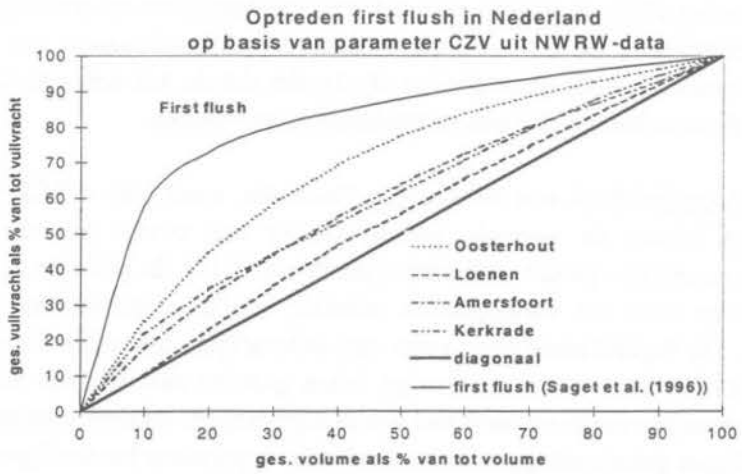
water dat vanuit stelsels op het oppervlaktewater overstort is juist redelijk goed gemengd. Een aandachtspunt bij mengingsprocessen kan de hoeveelheid dode berging in een stelsel zijn. Ook de aanwezigheid van bergingstanks en de manier en plaats van aansluiten (geldt ook voor persleidingen) kunnen van invloed zijn op de menging van DWA en neerslag.



Figuur 2.10: Stroming bij DWA en RWA: propstroming en volledige menging

Het verloop van de samenstelling van het influent wordt vaak gekarakteriseerd door te kijken naar first flush. Het flush gedrag van de riolering geeft aan welk deel van de totale vuillast zich bevindt in een bepaald volume afvalwater. Er is sprake van first flush (Saget et al., uit Langeveld, 2000) wanneer 80 procent van de vuilvracht zich bevindt in de eerste 30 procent van het totale volume afvalwater. Volgens deze strenge definitie komt first flush vrijwel zelden voor, wat een slechts beperkt dynamisch verloop van de afvalwatersamenstelling tijdens RWA zou betekenen. Oorspronkelijk werden first flush metingen gedaan voor de analyse van overstortingen en ontwerpen van bergingstanks.

In Nederland blijkt, uit onderzoek van de NWRW, nauwelijks sprake van het optreden van first flush. Binnen 50% van de afvoer bevindt zich tussen de 55-70% van de totale vuilvracht. Gelijke bevindingen werden gedaan in Denemarken, Duitsland en Oostenrijk. Onderzoek in Engeland heeft uitgewezen dat de belangrijkste invloedsfactoren voor het optreden van first flush, de piekneerslagintensiteit, de buiduur en de voorafgaande droogweerperiode zijn. Er werd geen duidelijke relatie ontdekt met rioolstelsel- of gebiedseigenschappen.



Figuur 2.11: Optreden first flush in Nederland

Over de meest geschikte parameter voor het meten van first flush zijn de verschillende onderzoekers het nog niet eens. Zowel BZV, CZV als gesuspendeerde stoffen (TSS) blijken te voldoen als parameter, met slechts kleine onderlinge verschillen. De nadruk ligt bij gebruik van deze parameters wel op de uitspoeling van gesuspendeerd materiaal, waardoor afwijkend gedrag van een opgeloste stof als ammonium, in afvalwater binnen het riool, buiten beschouwing blijft.

Bij onderzoek van Krebs et al.(1998-99) is niet gekeken naar first flush gedrag maar of gedurende een bui een bepaald kenmerkend patroon van opeenvolgende processen kon worden vastgesteld. Metingen aan het rioolstelsel van Dresden (vergelijkbaar met de Nederlandse situatie, omdat ook hier sprake is van een groot, vlak gebied) wijzen uit dat het verloop van de influentsamenstelling bij de zuivering tijdens neerslag karakteristiek is. Er blijken vier opeenvolgende fasen te zijn:

- uitspoeling opgeloste stoffen (m.n. ammonium)
- toename van de last aan vaste deeltjes
- verdunning
- instellen van een nieuw evenwicht

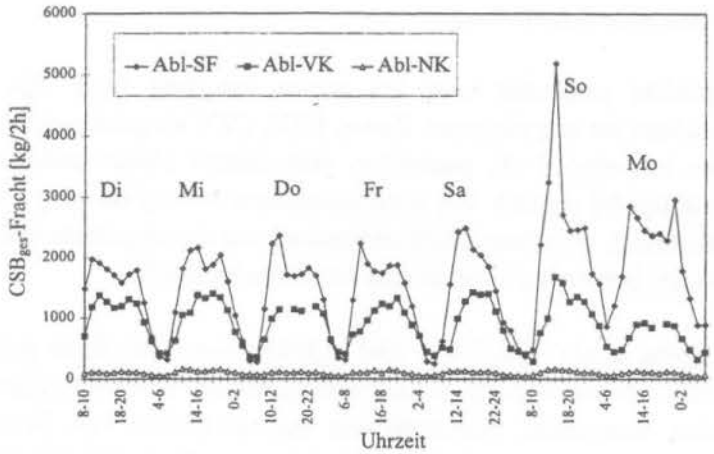
Elk rioolstelsel kent zijn eigen stromingspatroon. De resultaten zijn daarom niet direct overdraagbaar op andere stelsels. Er ontstaan op deze manier echter wel mogelijkheden om op de optredende processen in te spelen.

Zoals gezegd worden influentmetingen ongeveer eens per week gedaan, waarbij monsters gemengd worden geanalyseerd. Het afvalwater en regenwater, afkomstig uit persleidingen en vrij verval stelsel, heeft dan ruim de tijd gehad om te mengen. Over de mengingsprocessen binnen het riool is aan de hand van deze gegevens dan ook weinig te zeggen. Meerdere metingen op een dag in combinatie met neerslag gegevens (tijdstip gebeurtenis, duur, intensiteit) zijn daarom vereist bij de beoordeling van menging in het riool.

2.6 De zuiveringsinstallatie

De afvalwaterzuivering krijgt te maken met behoorlijke dagelijkse en wekelijkse fluctuaties in samenstelling en hoeveelheid influent. Het functioneren van de installatie wordt hierdoor beïnvloed omdat het afvalwater dat de zuivering verlaat, een samenstelling dient te hebben die aan vastgestelde eisen voldoet.

Het normale DWA-profiel kent een behoorlijke fluctuatie, maar een AWZI kan over het algemeen binnen de normale bedrijfsvoering een sterke reductie en afvlakking van de dagelijkse pieken realiseren (zie figuur 2.12). In principe zorgt iedere zuiveringsstap voor een verdergaande reductie van de concentraties aan verontreinigingen. De regenwaterafvoer voert een behoorlijke hoeveelheid zand met zich mee, vooral wanneer het om hevige buien gaat na een langere droge periode. Wanneer deze hoeveelheid zand niet wordt afgevangen, kunnen binnen de zuivering o.a. leidingen gaan verstoppen en mechanische apparatuur beschadigen.



Abl-SF: influent na zandvang
Abl-VK: voorbezonken afvalwater
Abl-NK: effluent

Figuur 2.12: Afvlakking pieken in AWZI (Urbaniak, 1998)

Wanneer influentfluctuaties de dagelijkse pieken of de ontwerpcapaciteit overschrijden, kan dat een negatief effect hebben op de effluentkwaliteit. Om deze effecten te kunnen beoordelen is het noodzakelijk te bepalen welke stoffen een piek vertonen en in welke hoedanigheid deze stoffen de AWZI bereiken. Influentkarakterisering is dan ook van groot belang bij het analyseren van het functioneren van de zuivering. Uit literatuur en onderzoek komt naar voren dat het moment waarop de maximale piek wordt bereikt verschilt per stof en voor verschillende afvoeren (RWA versus DWA). Een analyse van het influent in mengmonsters van 2 uur voor de analyse van het functioneren van de zuivering blijkt te volstaan.

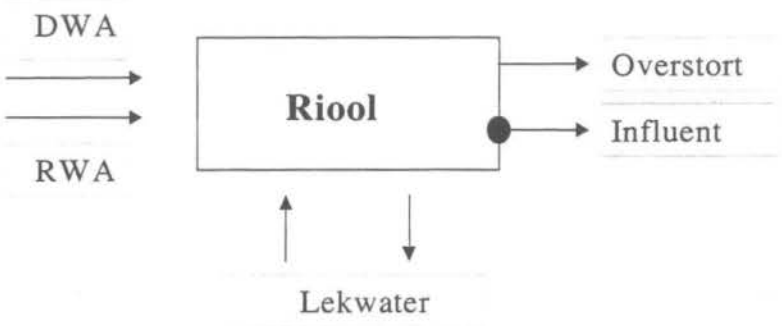
De kritieke processen voor het functioneren van de zuivering tijdens RWA zijn de nitrificatie en het functioneren van de nabezinktank. Kritiek bij de nabezinktank is het risico dat tijdens sterk verhoogde belasting onder RWA-omstandigheden het slib uitspoelt. Inzicht verkrijgen in dit proces blijkt moeilijk, omdat het modelleren van de nabezinking tot op heden erg lastig is. De aanwezige hoeveelheid nitrificeerders bepaalt samen met de temperatuur de nitrificatiecapaciteit. Hun groei

is relatief langzaam, waardoor zij niet in staat zijn zich aan te passen aan een tijdelijk verhoogd aanbod van ammonium. De ammoniumpieken die voorkomen in de DWA-verdeling zullen dus snel terug te vinden zijn in een achteruitgang van de effluentkwaliteit. Het ammonium komt daarnaast grotendeels in opgeloste vorm aan op de AWZI. Hierdoor kan geen verwijdering plaatsvinden in de voorbezinking, zoals bij een groot deel van het CZV wel gebeurt.

Het functioneren van afvalwaterzuiveringsinstallaties tijdens RWA is al meerdere malen onderwerp geweest van onderzoek. Vaak bleek dat zuiveringen over een grote reservecapaciteit beschikken, waardoor een soms aanzienlijke belastingtoename nog gemakkelijk kan worden verwerkt. Er is echter nog geen onderzoek bekend, dat op systematische wijze bepaald heeft welke variaties in het influent een specifieke zuivering wel en niet meer kan verwerken.

2.7 Invloedsaspecten

De riolering kan schematisch worden weergegeven zoals in figuur 2.13. De invoer, opgebouwd uit DWA, RWA en eventueel lekwater, heeft een grote invloed op de samenstelling van het influent, maar wordt door omstandigheden van buiten 'opgelegd'. Het zijn parameters waarmee de ontwerper of beheerder van een riolering wel rekening houdt, maar waarop geen invloed kan worden uitgeoefend.



Figuur 2.13: Systematische indeling van het systeem

Van groter belang voor dit onderzoek is daarom het riool zelf. Met betrekking tot de processen die binnen het riool een rol spelen, bestaan nog veel onzekerheden zoals bleek uit voorgaande paragrafen. Duidelijk is wel dat factoren als de turbulentie van de stroming, de stroomsnelheid, de waterstand bij DWA, de aerobe/ anoxische/anaerobe toestand in het riool, de grootte van het oppervlak van scheidingsvlak water en lucht en het contactvlak tussen water en buis, de samenstelling van het afvalwater beïnvloeden Deze factoren worden gedeeltelijk bepaald door de stelselkenmerken van het riool. Hierbij kan gedacht worden aan kenmerken als de totale lengte van het stelsel, het verval en het aantal persleidingen en bergingstanks. Maar ook de dimensies van stelselonderdelen als buizen (diameter, aantal, profiel), putten (aantal, soort), pompen (capaciteit, berging, pompovercapaciteit) en andere kunstwerken, spelen een rol.

Natuurlijk zegt ook de staat waarin een rioolstelsel verkeert, veel over de processen die in de buizen plaatsvinden. Het jaar waarin een stelsel is aangelegd is belangrijk en de frequentie waarmee rioolonderdelen zijn vervangen. De waterdichtheid en stabiliteit van een stelsel zijn van invloed op de in- of exfiltrerende hoeveelheid

water. Ook de rioolreiniging speelt een rol. Hier wordt zowel de manier waarop gereinigd wordt als de frequentie van reiniging bedoeld. Belemmering van de doorstroming door ophopingen van materiaal bijvoorbeeld, beïnvloedt de sedimentatieprocessen in de buis en daarmee de influentsamenstelling. Tenslotte is ook de manier waarop het rioolstelsel gecontroleerd wordt, van belang. Als men in de toekomst beschikt over meer proceskennis kan de wijze van monitoren daarop worden afgestemd.

Aan de hand van de informatie uit de beschikbare literatuur en met de hulp van een aantal deskundigen, zijn zoveel mogelijk aspecten verzameld die de samenstelling van het afvalwater beïnvloeden Het resultaat is een lijst met circa 75 invloedsaspecten die is opgenomen in bijlage 1. Er is onderscheid gemaakt in aspecten die betrekking hebben op de inloop, het rioolstelsel zelf of het beheer ervan. Alleen de aspecten die niet als 'opgelegd' worden gezien zijn van belang voor de rest van dit onderzoek. Deze invloedsaspecten zijn als uitgangspunten gebruikt voor het onderzoeksprotocol dat in Hoofdstuk 3 behandeld wordt.

Hoofdstuk 3: Probleemanalyse en onderzoeksaanpak

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen in de volgende twee paragrafen achtereenvolgens de probleem- en doelstelling die op dit afstudeeronderzoek van toepassing zijn, aan de orde. Vervolgens wordt het geformuleerde probleem afgebakend aan de hand van enkele uitgangspunten. Paragraaf 3.5 richt zich op de theoretische onderzoeksopbouw en het laatste deel van dit hoofdstuk behelst de daadwerkelijke onderzoeksaanpak. Dit is een geheel van voorschriften en regels waaraan tijdens het onderzoek voldaan is. Het zogenaamde protocol is opgesteld om er zeker van te zijn dat cases op gestructureerde wijze worden aangepakt en dat verschillende onderzoekers op een overeenkomstige manier werken. Het is op die manier beter mogelijk en verantwoord de resultaten van de verschillende cases met elkaar te vergelijken.

3.2 Probleemstelling

Bij het optimaliseren van het afvalwatersysteem als geheel, blijkt er een gebrek aan inzicht te bestaan in de interactie tussen riolering en afvalwaterzuivering. Eén van de kernvragen hierbij is hoe en in welke mate de hoeveelheid en samenstelling van het influent wordt bepaald door eigenschappen van het rioolstelsel.

Voor dit afstudeeronderzoek kan nu de volgende probleemstelling worden geformuleerd:

Dikwijls is gesteld dat de hoeveelheid en samenstelling van afvalwater wordt beïnvloed door het ontwerp en beheer van de riolering. Desondanks bestaat nog weinig inzicht in de wijze waaròp en de mate waarìn processen binnen de riolering van invloed zijn op de influentsamenstelling en in hoeverre dit te verklaren is door de analyse van beschikbare gegevens.

3.3 Doelstelling

Het onderzoek 'Interacties binnen het afvalwatersysteem' is er op gericht een instrumentarium te ontwikkelen voor het onderling optimaal afstemmen van het ontwerp en het beheer van de riolering en de zuivering. Optimalisatie van de afvalwaterketen als geheel kan daardoor plaatsvinden. Daaraan voorafgaand is het nodig o.a. inzicht te verkrijgen in de invloed van de riolering op de samenstelling van het influent. Dit afstudeeronderzoek zal hieraan een bijdrage leveren.

Doel van het onderzoek zal zijn :

- **Het inventariseren van aspecten van de riolering die van invloed kunnen zijn op de samenstelling van het afvalwater.**

- **Het maken van een systematische analyse van de bij gemeentes, waterschappen en ingenieursbureaus aanwezige gegevens m.b.t. rioolstelsels en waterkwaliteitsmetingen, door het bekijken van een aantal cases. Hierbij worden de eerder gevonden invloedsaspecten als uitgangspunten gebruikt.**
- **Het in kaart brengen van gegevens die nodig zijn om processen en hun invloeden op de samenstelling van het influent te kunnen beoordelen en de vergelijking ervan met de kennis en gegevens die op dit moment beschikbaar zijn.**

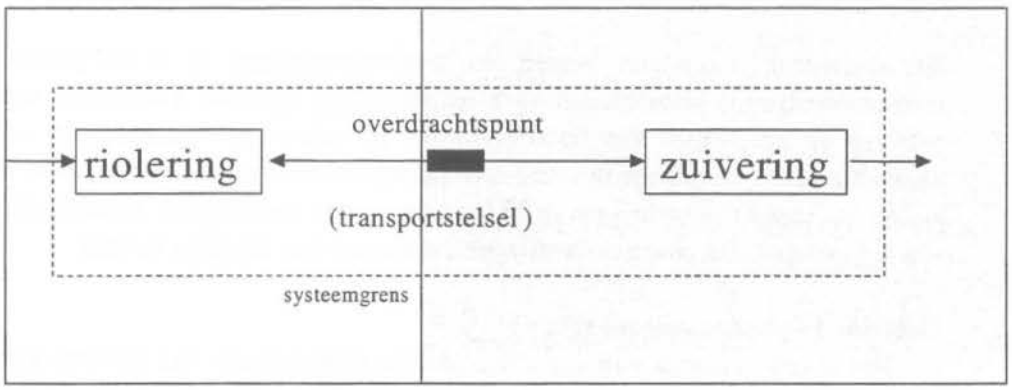
Zo kunnen aan de hand van dit onderzoek, of eventueel vervolgonderzoek, parameters worden bepaald die in de toekomst bij het optimaliseren van het afvalwatersysteem worden betrokken. De resultaten van dit afstudeeronderzoek dragen uiteindelijk bij aan het opstellen van een methode voor het kwantificeren van de invloed van riooleigenschappen en maatregelen of aanpassingen aan de riolering, op de samenstelling van het influent.

3.4 Uitgangspunten

Om het probleem oplosbaar te maken, is het nodig het af te bakenen. In dit geval zijn er nauwelijks randvoorwaarden die van buiten af zijn opgelegd. Wel is een aantal uitgangspunten opgesteld, die van toepassing zijn op het onderzoek in zijn geheel, de stelselparameters en processen, of het modelleren.

Algemeen:

- De lijst met invloedsaspecten, te vinden in bijlage 1, is op te delen in aspecten die als 'opgelegd' kunnen worden beschouwd en aspecten die beïnvloed kunnen worden door het ontwerp en beheer van een stelsel. Deze laatste aspecten zijn van groot belang bij het optimaliseren van het afvalwatersysteem als geheel en staan daarom binnen dit afstudeeronderzoek centraal.
- Tijdens dit afstudeeronderzoek is geen rekening gehouden met de afvalwaterzuiveringsinstallatie en eventuele processen die daar plaatsvinden. Er zal binnen het afvalwatersysteem puur worden gekeken naar het rioolstelsel en de influentsamenstelling. De systeemgrens is duidelijk te zien in figuur 3.1 (witte deel).



Figuur 3.1: Afvalwatersysteem als geheel, inclusief systeemgrens

Stelselparameters en processen:

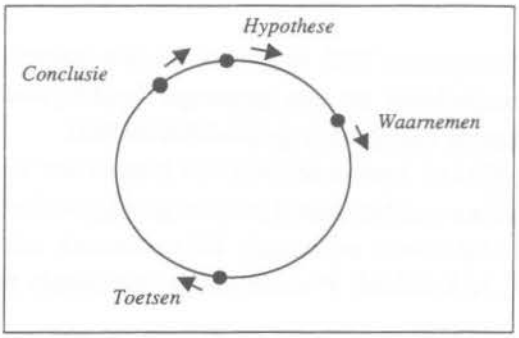
- Van de rioolstelsels in Nederland is ongeveer 70% gemengd. Vaak worden ook gescheiden stelsels uiteindelijk aangesloten op een gemengd hoofdsysteem. Daarom wordt geen specifieke aandacht besteed aan gescheiden stelsels.
- Bij de procesanalyse wordt niet gekeken naar processen die binnen het riool plaatsvinden en bijvoorbeeld aantasting van het stelsel zelf tot gevolg hebben
- Parameters die het afvalwater karakteriseren en binnen dit onderzoek zullen worden bekeken zijn: CZV, BZV, N-Kjeldahl, P-totaal en het zwevende stof gehalte (TSS).
- De huishoudelijke afvalwaterproductie wordt aangenomen op 120 liter per persoon per dag. Het zuurstofbindend vermogen per inwoner, wat gebruikt wordt bij het omrekenen naar inwonerequivalenten, wordt aangenomen op 136 g O_2/dag.

Modelleren:

- Voor het modelleren wordt gewerkt met het hydrodynamisch stromingsmodel Hydroworks, op dit moment wereldwijd een van de meest toegepaste computerprogramma's op het gebied van de rioleringstechniek.
- Hydroworks beschikt, net als de meeste rioleringsmodellen, over een waterkwaliteitsmodule. De proceskennis m.b.t. het stoftransport is tot op heden echter onvoldoende om te kunnen spreken van een betrouwbaar model. Daarom zal alleen gebruik worden gemaakt van de hydraulische module.
- Droogweeromstandigheden worden aan de hand van een nulbui (lege regenbui) en een standaard afvalwater document (wastewater generator, ofwel .wwg file) gesimuleerd.
- Voor eventuele regenwaterafvoer berekeningen worden default-waarden aangehouden, zoals beschreven in de Leidraad Riolering, module C2100.

3.5 Onderzoeksopbouw

Empirisch onderzoek is te omschrijven als een cyclisch proces. Begonnen wordt met het opstellen van een aantal hypothesen aan de hand van opgedane kennis uit literatuurstudie of praktijksituaties. Aan de hand van waarnemingen, of door het verzamelen van gegevens en de analyse ervan, kunnen de geformuleerde hypothesen worden getoetst. Bij toetsing blijkt of de waarnemingen de geformuleerde hypothese bevestigen, of dat deze dient te worden bijgesteld (of eventueel verworpen). Vaak is het nodig de hypothese opnieuw te formuleren, waarna weer aanvullende waarnemingen nodig zijn, die de 'nieuwe' hypothese kunnen bevestigen. Zo ontstaat een iteratief proces (zie ook figuur 3.2).



Figuur 3.2: De empirische cyclus

Ook dit afstudeeronderzoek is te omschrijven als een empirisch onderzoek. Zoals eerder geformuleerd, ontbreekt het aan inzicht in de manier waarop de samenstelling van het influent wordt beïnvloed door het ontwerp en beheer van de voorliggende riolering. Aan de hand van de probleem- en doelstelling is het mogelijk de volgende hypothesen op te stellen.

Hypothese 1: Binnen het riool vinden processen plaats die de samenstelling van het afvalwater significant beïnvloeden.
Hypothese 2: Karakteristieke eigenschappen van een rioolstelsel zijn van invloed op deze processen.
Hypothese 3: Door de analyse van influentmetingen en stelseleigenschappen is het mogelijk iets te zeggen over dit verondersteld verband.

Aan de hand van waarnemingen en met de in paragraaf 3.6 geformuleerde onderzoeksaanpak zijn de voorgaande hypothesen getoetst. Het resultaat wijst uit of de geformuleerde hypothesen juist zijn, verworpen dienen te worden of moeten worden bijgesteld.

Onderzoeksmethodologie

Binnen de onderzoeksmethodologie kunnen verschillende onderzoeksstrategieën worden onderscheiden (Hendriks, 1997). De vijf belangrijkste zijn: het survey-onderzoek, het experiment, de gevalstudie, de gefundeerde theoriebenadering en het bureauonderzoek. Elk van deze strategieën staat voor een bepaalde mix van kernbeslissingen. Kernbeslissingen zijn bijvoorbeeld: breedte versus diepgang, kwalitatief versus kwantitatief onderzoek, empirisch versus bureauonderzoek.

Binnen deze hoofdvormen van onderzoek kan dit afstudeeronderzoek het best omschreven worden als een gevalstudie. Dit betekent dat er sprake is van een relatief klein aantal onderzoekseenheden, waardoor men is aangewezen op een kwalitatieve manier van onderzoek doen. Dat kleine aantal onderzoekseenheden zorgt er ook voor dat vooral in de diepte en niet zozeer in de breedte wordt gewerkt. Deze diepgang kan worden bereikt door te werken met meerdere en meer arbeidsintensieve vormen van datageneratie (bijvoorbeeld individuele interviews i.p.v. een schriftelijke enquête). Tenslotte maakt het kleine aantal cases het noodzakelijk de steekproeftrekking op strategische wijze te laten plaatsvinden. Dit houdt in dat de onderzoeker zich bij de selectie van onderzoekseenheden bewust laat leiden door datgene wat zij/hij over de onderzoekseenheden te weten wil komen.

In principe is er een aantal manieren om een strategische steekproeftrekking te doen, bijvoorbeeld minimaal of juist maximaal verschillende cases. Een derde methode is het zogenaamde *snowball sampling* waar in dit geval gebruik van wordt gemaakt. Hierbij worden de cases één voor één geselecteerd. De eerste case wordt bestudeerd en pas op grond van bevind van zaken wordt de tweede case geselecteerd, enzovoort. Deze methodiek wordt vaak gehanteerd wanneer van het terrein in kwestie weinig bekend is en is dus bij uitstek geschikt voor dit onderzoek.

Bij gevalstudies wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende modaliteiten en varianten, waarvan de belangrijkste de enkelvoudige gevalstudie en de vergelijkende gevalstudie zijn. In dit geval is er sprake van een vergelijkende gevalstudie, wat wil zeggen dat meerdere cases worden onderzocht in onderlinge vergelijking. Ook hierin zijn twee subvarianten te onderscheiden: de hiërarchische methode en de sequentiële methode. Gekozen is te vergelijken aan de hand van de hiërarchische methode. Dit houdt in dat in de eerste fase cases worden onderzocht als betrof het een serie van enkelvoudige gevalstudies, bij de analyse en het weergeven van de onderzoeksresultaten wordt bij voorkeur een vast patroon gevolgd (getuige dit protocol). In de tweede fase worden vervolgens de resultaten van de eerste fase als input gebruikt voor een vergelijkende analyse van alle onderzochte cases, waarin gezocht wordt naar een verklaring voor de overeenkomsten en verschillen die naar voren komen.

3.6 Onderzoeksaanpak

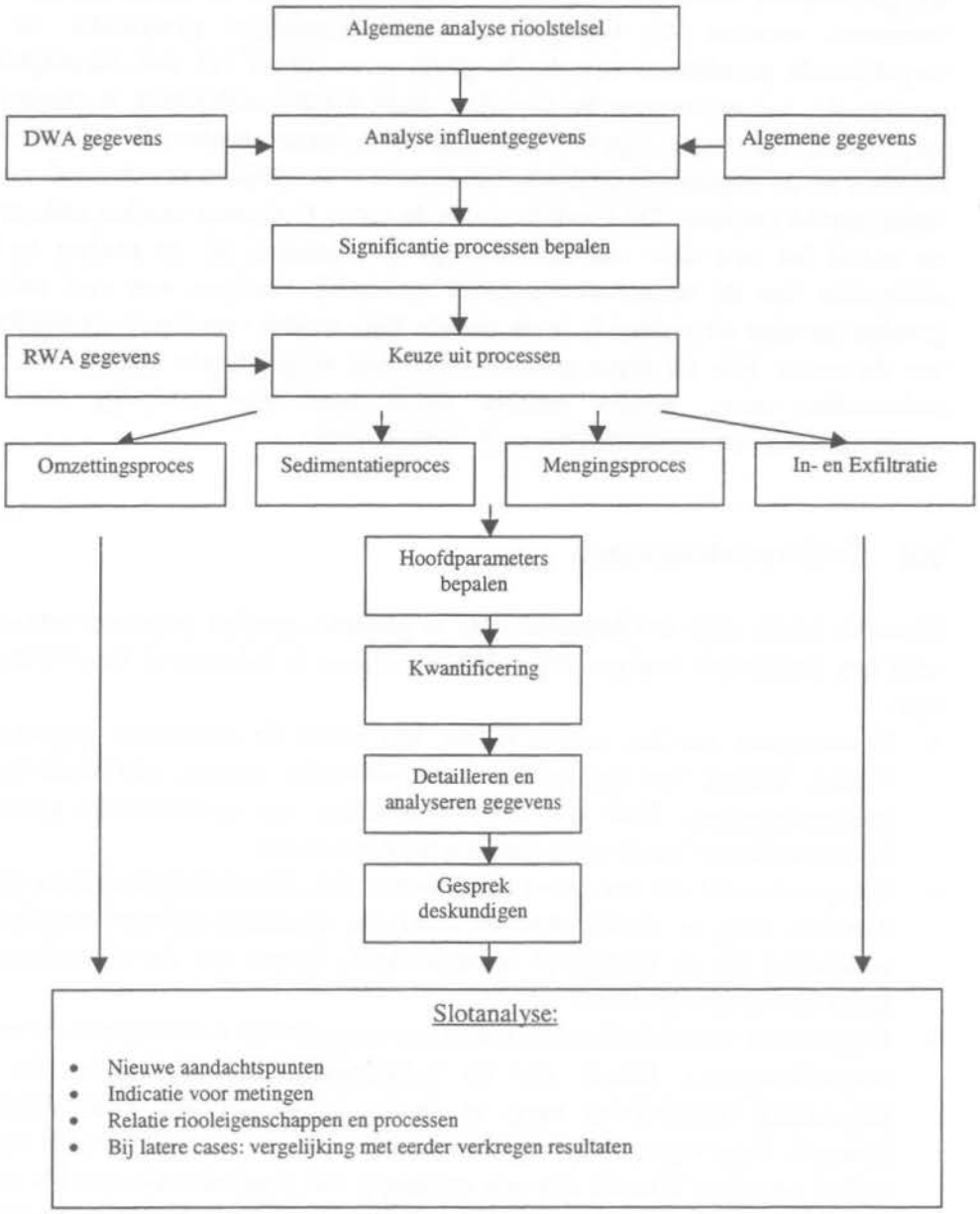
Nadat de keuze voor een bepaalde case is gemaakt, worden gegevens verzameld voor een uitgebreide analyse. Bij iedere case dient in ieder geval beschikbaar te zijn:

- Tekening(en) van het stelsel. Hierin zijn vooral de technische gegevens te vinden: ligging van het stelsel, lengte/diameter buizen, maaiveldhoogten, overstortplaatsen. Vaak zijn ook oppervlakten van verschillende gebieden, inwonertallen en bergingscapaciteiten terug te vinden.
- Computermodel van het stelsel (in Hydroworks). Alle stelselparameters zijn in datafiles terug te vinden. Aan de hand van simulaties kunnen waardevolle parameters als de verblijftijd, watersnelheid, hoogte van de waterspiegel in korte tijd worden berekend.
- Rapport(en) van adviesbureaus (en/of een gemeentelijk rioleringsplan of recent inspectierapport). Hierin zijn de belangrijkste stelselparameters in een uitgebreide omschrijving terug te vinden (vaak ook met gedetailleerdere kaarten). Deze rapporten bevatten extra informatie over problemen die bij een stelsel optreden. Meestal zijn ook resultaten van simulaties die met het stelsel zijn uitgevoerd, terug te vinden. Inspectierapporten bevatten specifieke informatie over de staat waarin het riool verkeert. (waterdichtheid, stabiliteit, etc.)

Verder zijn metingen nodig van de zuivering, gedaan bij de ingang van de zuivering en uitgesplitst in CZV, BZV, Kjeldahl-N en P. Bij voorkeur zijn ook zwevende stofmetingen (TSS) beschikbaar. De gegevens dienen in ieder geval een

jaar te beslaan. Aan de hand hiervan kunnen patronen in de afvalwatersamenstelling worden ontdekt en afwijkingen ten opzichte van 'gemiddeld afvalwater' worden gesignaleerd.

Het schema in figuur 3.3 en de tekst in deze paragraaf lichten toe, hoe op gestructureerde wijze met de verkregen informatie is omgegaan. Deze onderzoeksaanpak is voor alle te behandelen cases toegepast zodat de uiteindelijke resultaten op dezelfde wijze zijn verkregen en het verantwoord is de cases met elkaar te vergelijken.



Figuur 3.3: Onderzoeksaanpak schematisch weergegeven

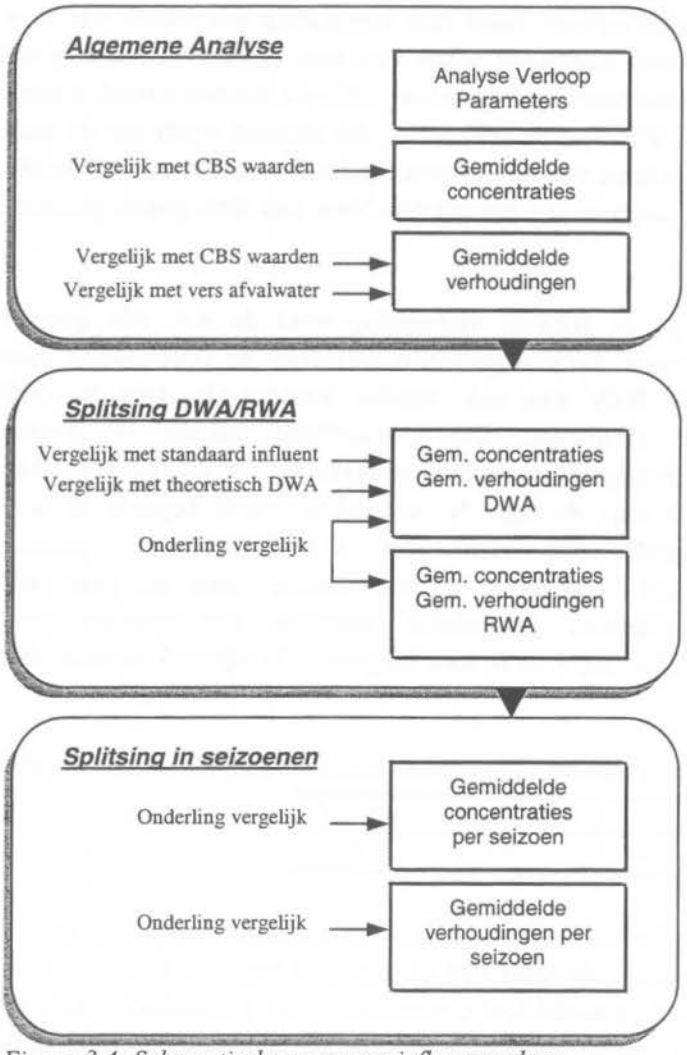
Algemene analyse rioolstelsel

Eerst wordt een algemeen beeld van het rioolstelsel verkregen. Daartoe zijn de tekeningen, het computermodel en globaal de beschikbare rapporten doorgenomen. Zo is geïnventariseerd van welk type stelsel er sprake is (overheersend gescheiden of gemengd, bijvoorbeeld in een percentage), wat het totale buisvolume is van het

stelsel en hoe groot de onderdrempelberging, de pompcapaciteit en de pompovercapaciteit zijn. In sommige gevallen is het wellicht al mogelijk de onderhoudstoestand van het rioolstelsel in kaart te brengen, met behulp van bijvoorbeeld gegevens over de laatst uitgevoerde werkzaamheden en het jaar van aanleg van het stelsel.

Analyse van influentgegevens

Voor de analyse van het influent is een dataset uitgezocht die (ongeveer) een jaar beslaat. Het schema in figuur 3.4 geeft de analyse stapsgewijs weer.



Figuur 3.4: Schematische weergave influentanalyse

Allereerst is het verloop in de concentraties van verschillende parameters (BZV, CZV, P, N-Kjeldahl en indien beschikbaar zwevende stof) tijdens het jaar bekeken. Ook de gemiddelde waarden van de parameters zijn bepaald. Deze gemiddelden zijn vergeleken met een vastgestelde standaardwaarde ('Algemene gegevens' in figuur 3.2). In dit geval is hiervoor gebruik gemaakt van de gemiddelde concentraties in het influent in mg/l zoals die door het CBS in 2000 zijn vastgesteld. De meest recente gegevens zijn die uit het jaar 1998. Deze verschillen echter nogal van die uit 1997. Als vergelijkingswaarde wordt daarom het gemiddelde van beide jaren gebruikt. Voor de gemiddelde concentratie zwevende stof zijn geen concrete CBS gegevens beschikbaar. Wel is bekend dat voor een

'standaardinfluent' opgesteld voor DWA berekeningen (Stowa 1998-2), de concentratie zwevende stof 250 mg/l bedraagt.

Tabel 3.1: Gemiddelde concentraties Nederlands influent in '97-'98 (in mg/l)

	BZV	CZV	N	P
Gemiddeld '97-'98	198,5	513	47,9	7,85

Hierna worden de BZV-CZV (of omgekeerd) en BZV-N verhoudingen berekend. Een lage CZV-BZV verhouding betekent dat het afvalwater licht biologisch afbreekbaar is. In 'vers' afvalwater heeft deze verhouding een waarde van 2,14. Bij de afvoer van afvalwaterzuiveringen wordt een veel hogere verhoudingswaarde gemeten. Moeilijk afbreekbare organische verbindingen hebben namelijk een hoog CZV en een laag BZV. Wanneer de verhouding die bepaald wordt aan de hand van de metingen van het influent van de zuivering inderdaad hoger is dan die bij vers afvalwater kunnen we uitgaan van het plaatshebben van biologische processen in het riool.

In vers afvalwater ligt de BZV-N verhouding rond de 4,8. Als gevolg van omzettingsprocessen wordt BZV afgebroken waardoor de concentratie afneemt. Een lage concentratie BZV kan ook worden veroorzaakt door bijvoorbeeld verdunning van het afvalwater. De concentratie stikstof is grotendeels onafhankelijk van bezinkingsprocessen en omzettingen in de riolering (Mulder, 1999). Door te kijken naar de BZV-N verhouding wordt bepaald in hoeverre afbraakprocessen binnen een riool een significante rol spelen. De verhoudingsgetallen zijn beoordeeld op hun verloop door het jaar heen en vergeleken met aangenomen gemiddelde waarden. De waarden voor de verhoudingen tussen CZV, BZV en N voor het jaar 1998 zijn ook bepaald door het CBS.

Tabel 3.2: Openbare zuiveringsinrichtingen: ratio tussen gemeten parameters in influent

	CZV/BZV	BZV/N
Gemiddelde waarde in 1998	2,69	3,85

De influentgegevens zijn vervolgens gesplitst in metingen bij droog weer en bij neerslag. Deze grens is aan de hand van de gegevens bepaald. Opnieuw zijn voor zowel DWA als RWA gemiddelde concentraties en gemiddelde verhoudingsgetallen berekend. Bij neerslag stroomt een grote hoeveelheid water het stelsel in. Dit water is van origine redelijk schoon, maar wordt vervuild tijdens de afvoer over het oppervlak. Het verdunningseffect van de hoeveelheid neerslag is bijna altijd groter dan de extra toevoer van afvalstoffen. De totale vuilvracht bij de zuivering neemt daarom bij neerslag meestal toe, terwijl de stofconcentraties afnemen. Daarom zijn vooral verschillen in de verhoudingsgetallen van belang. Al deze parameters zijn behalve onderling, ook vergeleken met de aangenomen CBS-waarden.

Bovendien is de samenstelling van het influent tijdens droog weer vergeleken met de voor de desbetreffende case vastgestelde samenstelling van de instromende droogweerafvoer en met het eerder genoemde standaardinfluent dat is weergegeven in tabel 3.3. De concentraties in het standaardinfluent hebben iets hogere waarden

dan de gemiddelde CBS-waarden, omdat het CBS zijn waarden op basis van gemiddelde jaarwaarden, inclusief perioden met regenafvoer, berekent. De theoretische DWA samenstelling is berekend door de belasting van de zuivering in inwonerequivalenten te vermenigvuldigen met het zuurstofbindend vermogen per inwoner. Hieruit volgt dus het totaal aan Kjeldahl-N en CZV dat theoretisch in het water aanwezig moet zijn.

Tabel 3.3: Standaardinfluent volgens STOWA 1998-2

Parameter	Waarde (mg/l)
CZV	600
BZV	220
N-Kjeldahl	55
P	9
Zwevende stof	250

De oorspronkelijke influentgegevens zijn tot slot gesplitst in seizoenen. Per seizoen zijn opnieuw gemiddelde concentraties en verhoudingen berekend, die onderling zijn vergeleken. Zo komen eventuele seizoensinvloeden naar voren.

Uit deze analyse is een beeld verkregen van het influent van een specifieke case: Is er sprake van verdund water, is het water makkelijk (biologisch) afbreekbaar, verandert de afbreekbaarheid van het water tijdens neerslag en is de variatie tussen influentparameters door het jaar heen groot? Zijn er misschien seizoensinvloeden te ontdekken? Wat is er bekend over de hoeveelheid zwevende stof en daarmee de sedimentatie?

Bepalen significantie en keuze van processen

Aan de hand van de analyse van het influent zijn de volgende vragen gesteld:

- Vinden binnen het riool omzettingsprocessen plaats die significant zijn? Ofwel: Wijkt de verhouding CZV/BZV bij de droogweerafvoer meer dan 10% af van dezelfde verhouding in 'vers' afvalwater (=2,14)? Wijken de gevonden gemiddelde waarden voor de verhoudingen tussen BZV en N meer dan 10 % af van de CBS-waarden?

- Vindt binnen het riool een significante sedimentatie plaats? Ofwel: Zijn er metingen van de concentratie zwevende stof? Is het verschil tussen de concentratie zwevende stof in het standaardinfluent en de gemiddelde waarde van de DWA metingen groter dan 10% ?

- Vinden in het riool significante mengingsprocessen plaats? Is er sprake van propstroming en wellicht first flush? Om dit te beoordelen is eigenlijk de hoeveelheid meetgegevens kritiek. Ofwel: Zijn er meetgegevens beschikbaar uit een periode waarin meerdere malen op dezelfde dag gemeten is? Zijn over die periode klimatologische gegevens beschikbaar, zodat regenbuien duidelijk zijn terug te vinden?

- Bestaat het vermoeden dat binnen het stelsel significant lekkage optreedt? Ofwel: Is het verschil tussen de aangenomen standaardconcentraties en de

berekende gemiddelde concentraties groter dan 25% ? Is het verschil tussen de influentconcentraties gemeten bij DWA en de samenstelling van het standaardinfluent groter dan 20 % ?

De antwoorden op bovenstaande vragen geven aan welke processen voor een bepaald stelsel als significant worden gezien. Alleen deze processen worden nader onderzocht.

RWA gegevens

Sedimentatieprocessen en/of mengingsprocessen treden vooral op tijdens regenbuien. Wanneer blijkt dat juist deze processen significant zijn bij een bepaald stelsel, is het nuttig enkele regenwatersimulaties uit te voeren in Hydroworks. Hierbij wordt gesimuleerd met gestandaardiseerde regenbuien en reeksen van regenbuien zoals die te vinden zijn in de Leidraad Rioleringstechniek. Mogelijk is al een aantal van dergelijke simulaties door een adviesbureau uitgevoerd. Voor deze simulaties zijn ook de eerder verzamelde DWA gegevens nodig en de hoeveelheden verhard oppervlak die op het stelsel afwateren.

Hoofdparameters bepalen

De significante processen zijn nader onderzocht. Om te voorkomen dat hierbij alle gegenereerde invloedsaspecten stuk voor stuk moeten worden bekeken, is een tabel opgesteld die de relaties weergeeft tussen verschillende stelseleigenschappen en de te onderzoeken processen. Welke stelseleigenschappen van invloed zijn op een specifiek proces wordt hieruit afgelezen, waarna doelgericht gegevens worden verzameld.

Blijkt bijvoorbeeld uit de influentanalyse van een case, dat sedimentatieprocessen binnen buizen significant zijn, dan is uit tabel 3.4 af te lezen dat vooral gekeken wordt naar de aspecten: verval bodemleidingen, buizen, putten, pompen en gemalen, de belastingsgraad, de toestand van het riool en de manier en frequentie van reinigen van het riool. Ook is te zien dat bij het verval van de leidingbodem, hoofdparameters als de stroomsnelheid van het water in de leidingen, de schuifspanning en het energieverhang van belang zijn.

Tabel 3.4: Relaties tussen processen en stelseleigenschappen

	Omzettings-processen binnen buizen	**Sedimentatie-processen binnen buizen**	**Mengings-processen buizen**	**Infiltratie/ Exfiltratie**
Verval leidingbodem	Verblijftijd Stroomsnelheid	Stroomsnelheid Schuifspanning Energieverhang	Stroomsnelheid	-
Persleidingen	Toestand (anaeroob)	-	Aansluitpunt	-
Bergingstanks	-	-	Legen tank	-
Lengte stelsel	Verblijftijd		Spreiding VT	-
Aansluitingen	-	-	Lokatie aansluiting	-
Buizen	Materiaal	Profielvorm	-	-
Putten	-	Detaillering put	-	-
Pompen en Gemalen	Pompcapaciteit Ledigingstijd	Snelheid	-	-
Overstorten	-	-	Lokatie overstort	-
Ontwerp	-	-	Vermazings-factor	-
Belastingsgraad	-	Stroomsnelheid	-	-
Waterdichtheid	-	-	-	GWS Scheuren Lekken
Toestand riool	-	Doorstroming	-	-
Manier/ Frequentie Rioolreiniging	-	Aanwezigheid en type sediment	-	-

De in het stelsel voorkomende processen zijn ook in verband te brengen met de verschillende stoffen die zich in het afvalwater bevinden. Hoewel nog onduidelijkheid bestaat over deze relaties, is een voorlopige indicatie weergegeven in tabel 3.5. Te zien is dat bijvoorbeeld BZV een rol speelt bij omzettingsprocessen (weergegeven door een '+') en de hoeveelheid zwevende stof niet.

Op deze manier kan de aanwezigheid van een specifieke afvalstof gerelateerd worden aan de verschillende stelselparameters. Zo is het bodemverval van de leidingen van invloed op de omzettingsprocessen die binnen het riool plaatsvinden en daarmee op het gehalte BZV en CZV. De infiltratie van lekwater zorgt in de meeste gevallen slechts voor de verdunning van het afvalwater en is daarom niet opgenomen in de tabel.

Tabel 3.5: Indicatie van relaties tussen processen en vervuilingsparameters

	BZV	**CZV**	**Kjeldahl-N**	**P**	**Zwevende stof**
Omzettingsprocessen	+	+	-	-	-
Sedimentatieprocessen	+	+	-	+/-	+
Mengingsprocessen	+	+	+	+	+

Kwantificeren

Na het bepalen van de belangrijkste stelseleigenschappen zijn de bijbehorende parameters gekwantificeerd. Dit kwantificeren gebeurt aan de hand van de tekeningen van het stelsel, rapporten en het 'drainage systeem data' bestand (.dsd file) van het model in Hydroworks. Het gaat hier om basisgegevens, bewerkte basisgegevens (o.a. gemiddelden) en eenvoudige berekeningen (zoals de ledigingstijd van een stelsel). Wanneer de stelseleigenschap 'persleiding' van belang is, wordt bijvoorbeeld ingevuld hoeveel persleidingen zich in het stelsel bevinden, wat de debieten en lengten zijn en eventueel waar ze zich in het stelsel bevinden.

Detailleren en analyseren gegevens

Onder het detailleren van de gegevens wordt verstaan, het berekenen van een aantal parameters die volgen uit hydraulische simulaties. Die simulaties zijn uitgevoerd in Hydroworks. Het gaat hier om parameters als de verblijftijd, de hoogte van de waterspiegel, het contactvlak tussen buis en water, etc. Wanneer omzettingsprocessen en/of in- en exfiltratie significant zijn, gaat het om DWA-simulaties. Als juist sedimentatie- en/of mengingsprocessen de overhand hebben, worden RWA-simulaties gedaan.

Na het verzamelen van alle gegevens, vindt een eerste analyse plaats. Een overzicht van de case wordt verkregen door te kijken naar het beeld dat inmiddels van het stelsel is ontstaan. Heeft het stelsel een paar karakteristieke eigenschappen? Zijn er parameters gevonden die er uitspringen, doordat er sprake is van opvallend hoge of lage waarden? Misschien is er zelfs al een mogelijke verklaring voor te vinden.

Gesprek met deskundigen

In sommige gevallen is het wellicht nodig een of meerdere deskundigen van betrokken organisaties (waterschap of gemeente bijvoorbeeld) met betrekking tot een specifiek stelsel te interviewen. Vooral informatie over beheer en onderhoud komt niet altijd naar voren uit de eerder verzamelde data. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de waterdichtheid en aantasting van het stelsel en de mate van scheurvorming. Maar ook operationele zaken kunnen op deze manier aan het licht komen. Niemand weet meer van de problemen die bij een specifiek stelsel een rol spelen, dan diegenen die er dagelijks mee te maken hebben.

Slotanalyse

De case is afgesloten met een laatste analyse. Hier is teruggekeken naar de beginhypothesen. Een groot aantal parameters werd verondersteld invloed te hebben op de samenstelling van het influent. Zijn er aan de hand van de uitgewerkte case nieuwe inzichten verworven, die de aandacht vestigen op nieuwe invloeden? En is het al mogelijk relaties te leggen tussen bepaalde riooleigenschappen en processen? Of zijn er invloedsaspecten die na het uitwerken van de case niet van belang blijken te zijn?

Ook is het misschien niet mogelijk geweest onderzoek te doen naar bepaalde processen door een gebrek aan gegevens. Kan er aangegeven worden welke metingen dan wel noodzakelijk zouden zijn om deze processen in het vervolg te kunnen onderzoeken?

Tenslotte is het bij latere cases ook van groot belang de gevonden gegevens (zowel influent als stelselparameters) te vergelijken met gegevens van eerder verwerkte cases. Komen de resultaten overeen? Wat zegt dit over hypothetische relaties? Of verschillen de resultaten juist (weinig verschil in karakterisering influent bijvoorbeeld, maar uiteenlopende stelselparameters)? Wat zou hiervan de oorzaak kunnen zijn? Zijn de cases wellicht niet met elkaar te vergelijken? Hoe zou een vergelijking toch mogelijk gemaakt kunnen worden (wellicht andere parameters)?

Hoofdstuk 4: Casestudie Haarlem Zuidoost

4.1 Inleiding

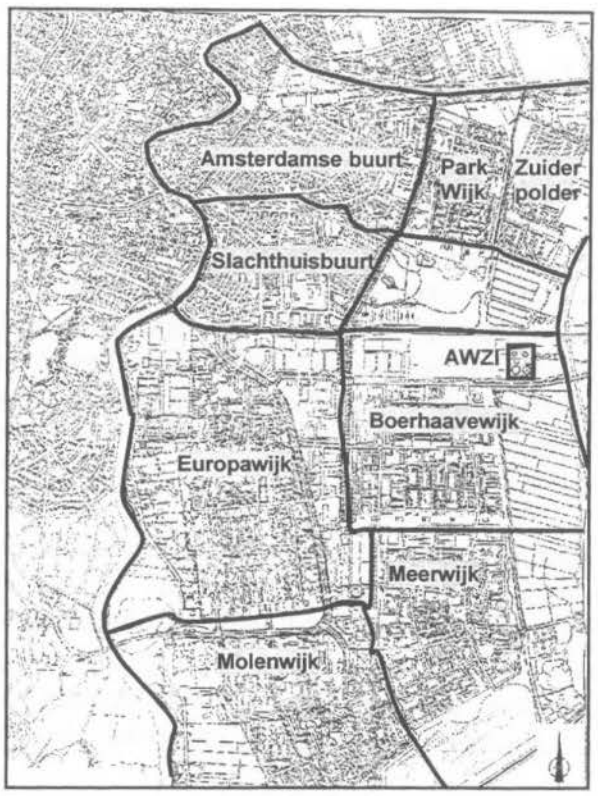
Dit hoofdstuk zal verslag doen van de eerste casestudie. Gekozen is voor de analyse van het rioolstelsel in Haarlem Zuidoost. Het gaat hier om een middelgroot rioolstelsel dat een aantal woonwijken ontsluit en enkele instellingen. Er bevindt zich vrijwel geen industrie. Persleidingen en bergingstanks spelen in dit stelsel een beperkte rol. Dit maakt de case overzichtelijk en zeer geschikt om mee te starten. Voor deze case zijn de benodigde gegevens verstrekt door Witteveen + Bos, met toestemming van de gemeente Haarlem.

In de volgende paragraaf wordt eerst de stelselconfiguratie kort toegelicht, om een algemeen beeld van het rioolstelsel te verkrijgen. Vervolgens worden de beschikbare influentmetingen geanalyseerd. Aan de hand hiervan zijn significante processen en de daarbij behorende hoofdparameters bepaald. In paragraaf 4.5 volgt een uitgebreider onderzoek naar deze processen en een kwantificering van parameters. Het hoofdstuk wordt afgesloten met voorlopige conclusies van deze casestudie.

4.2 Stelselconfiguratie Haarlem

Binnen de gemeente Haarlem bevinden zich de afvalwaterzuiveringsinstallaties Schalkwijk en Waarderpolder. In deze case zal slechts gekeken worden naar de AWZI Schalkwijk en naar het stelsel van Haarlem-Zuidoost dat hierop afwatert. Onder Haarlem Zuidoost wordt het gebied verstaan dat ten oosten van het Spaarne en ten zuiden van de spoorlijn Amsterdam-Haarlem ligt. In het oosten en zuiden wordt het gebied begrensd door het Liewegje en de Ringvaart. Het gebied omvat de wijken Molenwijk, Meerwijk, Europawijk, Boerhaavewijk, Slachthuisbuurt, Amsterdamse buurt, Parkwijk en Zuiderpolder zoals te zien is in figuur 4.1.

Het stelsel in Haarlem Zuidoost is gemengd en stroomt onder vrij verval af in de richting van de AWZI. Dit met uitzondering van het bemalingsgebied Zuiderpolder dat rechtstreeks loost op de ontvangkelder van de zuivering. Het stelsel kan met een gerust hart 'oud' genoemd worden. Sommige buizen liggen er sinds 1910, zodat de kans op verminderde dichtheid van het stelsel groot is. Haarlem Zuidoost bestaat vooral uit woonwijken en er bevindt zich vrijwel geen industrie. Wel is de Hoofdwerkplaats van de Nederlandse Spoorwegen er gevestigd en een aantal kleinere instellingen, waaronder het Huis van Bewaring, winkelcentrum Schalkwijk en het Kennemer Gasthuis. Hun huishoudelijk afvalwater wordt afgewaterd op het stelsel in Zuidoost, bedrijfsafvalwater wordt afgevoerd naar de zuivering Waarderpolder. Alleen enkele parken en sportvelden zijn niet aangesloten op de riolering.



Figuur 4.1: Kaartje Haarlem Zuidoost

Haarlem-Zuidoost heeft ongeveer 49.000 inwoners. Dit is exclusief de wijk Zuiderpolder, waar nog eens zo'n 3.900 mensen wonen. Uitgaande van een maatgevende afvalwaterproductie van 12 liter/inw/h (DWA-max = 120 liter per dag, verdeeld over 10 uur), produceren zij een droogweerafvoer van 632.4 m^3/h. Het bruto-oppervlak van Haarlem-Zuidoost bedraagt circa 560 ha, waarvan 55 à 60 % verhard is. Het op een rioolstelsel aangesloten afvoerend oppervlak bepaalt in hoge mate de hydraulische belasting en wordt daarom zo nauwkeurig mogelijk beschreven. Twaalf typen oppervlak worden onderscheiden (Leidraad Riolering, module C2100). De verdeling van het verhard oppervlak in Haarlem over de verschillende typen is te zien in tabel 4.1.

Tabel 4.1: Verhard oppervlak Haarlem, per type (in hectare). Exclusief Zuiderpolder.

	Daken vlak	Daken hellend	Open verhard	Gesloten verhard	Totaal
Haarlem Zuidoost	70,2	61,1	150,5	49,0	330,8

Het eindgemaal bij de afvalwaterzuivering bestaat uit twee vijzels en een pomp en heeft een capaciteit van 3.000 m^3/h. De verschillende pomp- en pompover-capaciteiten zijn weergegeven in tabel 4.2. Het bemalingsgebied Zuiderpolder loost via een pomp vlak voor het gemaal rechtstreeks op de AWZI. Dit gebied heeft daarmee invloed op de samenstelling van het influent. In Haarlem-Zuidoost bevinden zich geen injecties van andere bemalingsgebieden. Bij de lozing van de Zuiderpolder zit de enige externe drukriolering die het stelsel bevat, inbegrepen. Deze injecteert in het Liewegje in de Zuiderpolder. Verder zijn er enkele kleine onderbemalingen. Het totaal aan DWA-hoeveelheden vanuit deze

onderbemalingsgebieden wordt geloosd op het rioolstelsel. De pompcapaciteit die hiervoor beschikbaar is bedraagt 144 m^3/h.

Tabel 4.2: Pomp- en pompovercapaciteiten in Zuiderpolder en Haarlem Zuidoost

	Pompcap. (m^3/h)	Pompover-cap. (m^3/h)	POC (mm/h)	Onderdrempel Berging (mm))
Zuiderpolder	173	126	0,95	12,1
Haarlem Zuidoost	3.000	1.890	0,57	8,3

4.3 Analyse van het influent

Voor de influentanalyse zijn metingen beschikbaar van de zuivering Schalkwijk uit de jaren 1995 t/m 1999. De AWZI heeft een capaciteit van 80.000 inwonerequivalenten en de belasting (in mei '91 gemeten) bedraagt 59.740 i.e. Ongeveer om de zes dagen wordt het dagdebiet en de stofconcentraties gemeten aan de hand van gemengde monsters. Deze paragraaf beschrijft de belangrijkste bevindingen van de stapsgewijze influentanalyse. Voor de exacte resultaten wordt verwezen naar bijlage 2-1.

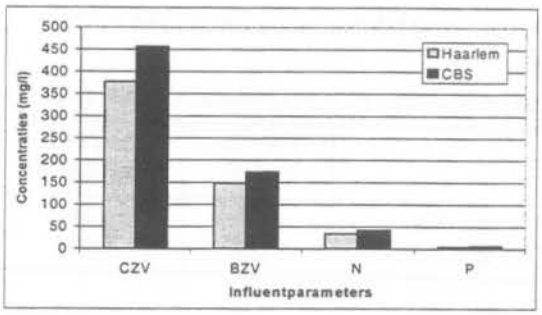
Voor de analyse zijn de meest recente gegevens gebruikt. In het stelsel bevond zich geruime tijd een kapotte overstortmuur, waardoor oppervlaktewater het riool instroomde. Dit werd pas bemerkt nadat de muur gerepareerd was, door een verlaging van het debiet bij de zuivering. Na contact met de gemeente Haarlem blijkt dat het kunstwerk begin 2000 is gerepareerd. Bij de beoordeling van de influentmetingen dient hiermee rekening te worden gehouden.

4.3.1 Algemene analyse

Aan het verloop van de parameters over het jaar 1999 zijn op het eerste gezicht geen opvallende dingen te zien. De variaties lijken te verklaren uit wisselingen in afvoergrootte en de verschillende seizoenen. Bij een uitgebreide analyse van de data, vallen echter de volgende dingen op:

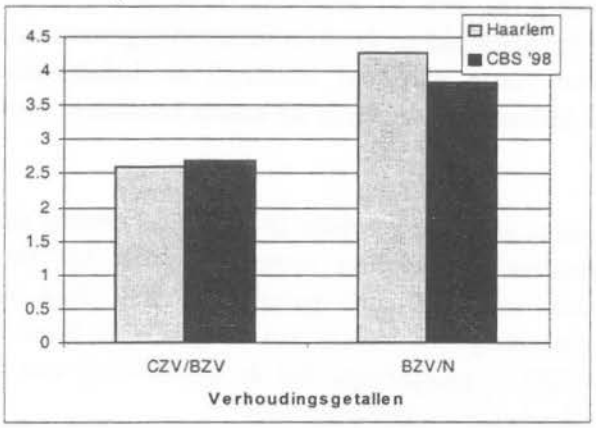
- Alle concentraties die gemeten worden in het influent bij Haarlem Schalkwijk zijn lager dan de gemiddelde concentraties in Nederland zoals berekend door het CBS (zie figuur 4.2).
- Het verschil in concentraties bedraagt minimaal 25% (BZV) en maximaal 41% (fosfaat).
- Opvallend zijn de lage fosfaatconcentraties in het afvalwater in Haarlem.
- De verhouding tussen CZV en BZV wijkt maar weinig af van die gegeven door het CBS (zie figuur 4.3). De verhoudingswaarde in Haarlem is iets lager, wat betekent dat het water iets beter biologisch afbreekbaar is.

Parameter	Haarlem	CBS
CZV	377	513
BZV	148	199
N	35	48
P	5	8



Figuur 4.2: Concentraties(mg/l) gemeten in het influent van het stelsel in Haarlem en gemiddelde waarden van het CBS

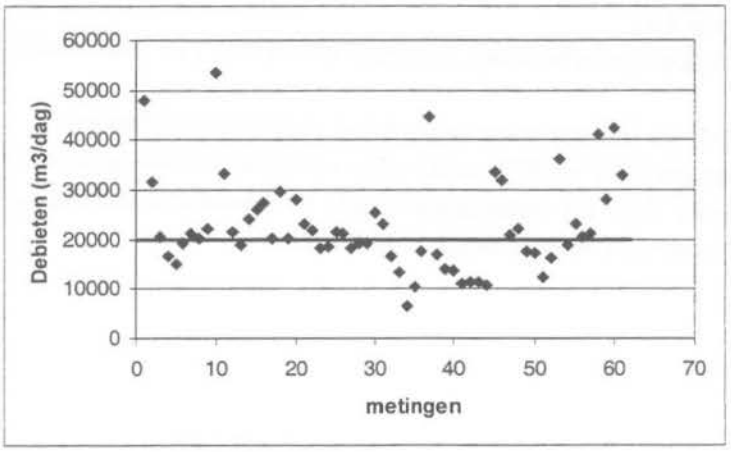
- De BZV/N waarde daarentegen ligt in Haarlem iets meer dan 10% hoger dan de gemiddelde waarde van het CBS, zodat er volgens het protocol sprake is van een significant verschil.



Figuur 4.3: Verhoudingsgetallen voor influentmetingen Haarlem en CBS-waarden.

4.3.2 Droogweerafvoer en regenwaterafvoer analyse

Alle debieten gemeten in het jaar 1999 zijn uitgezet in figuur 4.4. De meeste debieten liggen rond de waarde van 20.000 m^3/dag. Debieten kleiner dan of gelijk aan 20.000 m^3/dag worden daarom als droogweerafvoer gedefinieerd. Na het splitsen van de dataset zijn opnieuw gemiddelde concentraties en verhoudingen bepaald.



Figuur 4.4: Alle debieten gemeten in 1999.

Vergelijking van de DWA en RWA metingen levert het volgende op:

- Neerslag zorgt voor de verdunning van het afvalwater. Dit blijkt uit het feit dat de gemiddelde concentraties bij RWA zo'n 30% lager zijn dan die bij DWA. De totale vuilvracht die per dag de zuivering bereikt neemt toe tijdens neerslag.
- De verandering in BZV/N en CZV/BZV is minimaal te noemen. De biologische afbreekbaarheid van het water blijkt nauwelijks te veranderen bij neerslag.
- Vergelijking van de DWA metingen met het standaardinfluent laat opnieuw zien dat de gemiddelde gemeten concentraties in Haarlem 25% lager zijn dan standaard. Dit wijst op de instroom van minder geconcentreerd afvalwater.
- De theoretische DWA berekening aan de hand van inwonerequivalenten (toegelicht in bijlage 3) laat zien dat de concentraties die gemeten worden slechts 79,3 % bedragen van wat er theoretisch het rioolstelsel instroomt.
- Met de CBS-waarden en het standaardinfluent bij DWA is de theoretische vuilvracht die bij de zuivering aankomt berekend. In tabel 4.3 is ook de daadwerkelijke vuilvracht te zien. De gemeten vuilvracht blijkt, behalve voor fosfaat, een factor 1,2-1,3 groter dan in theorie. Dit betekent dat lekwater dat mogelijk het stelsel instroomt ook nog concentraties CZV, BZV en N bevat.

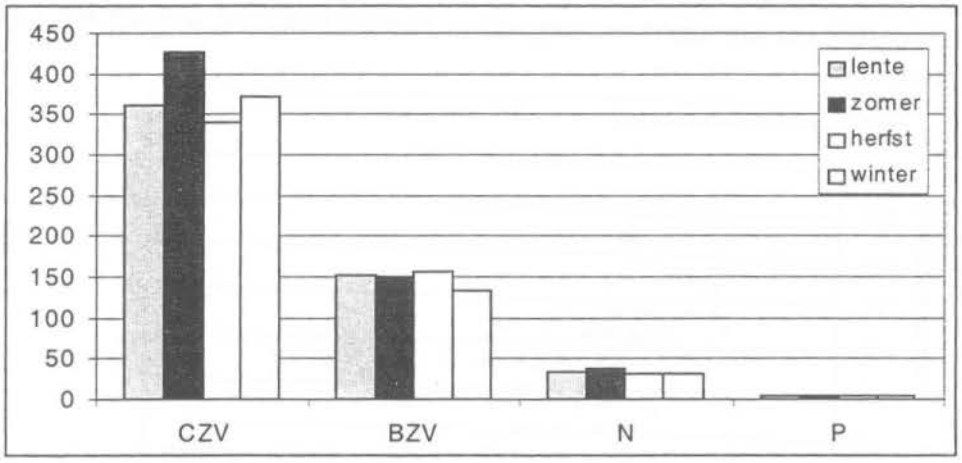
Tabel 4.3:Theoretische en gemeten vuilvrachten in Haarlem bij DWA

Vuilvracht (g/dag)	CZV	BZV	N	P
gemeten	6.950.057	2.886.464	637.916	83.350
theoretisch	5.886.000	2.158.200	539.550	88.290

4.3.3 Seizoensanalyse

Bij het splitsen van de dataset in seizoenen, vallen de volgende dingen op:

- In de zomer zijn de concentraties CZV, N-Kjeldahl en P hoger dan tijdens andere seizoenen.
- In de winter is het BZV gehalte lager dan in andere seizoenen.
- In de zomer zijn de debieten gemiddeld lager en de temperaturen hoger.



Figuur 4.5: Verhouding tussen de gemeten concentraties en de CBS waarden voor de zomer en winter.

- De verhoudingen tussen parameters blijken per seizoen heel weinig te verschillen. Het is daardoor moeilijk omzettingsprocessen te koppelen aan seizoensinvloeden.

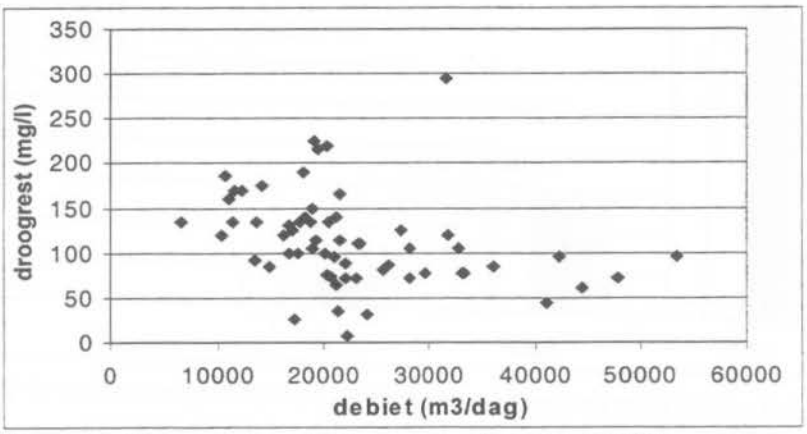
- Standaarddeviaties zijn per seizoen voor de verschillende concentraties bepaald. De gemeten concentraties liggen in de lente het dichtst bij elkaar (lage standaarddeviaties) en de grootste afwijkingen van het gemiddelde zijn te vinden in de zomer (weinig buien, maar vaak hoge neerslagintensiteit).

4.3.4 Analyse zwevend stofgehalte

De sectie Gezondheidstechniek van de subfaculteit Civiele Techniek heeft zelf ook enkele metingen gedaan aan het stelsel in Haarlem. Het gaat hier om in totaal zes metingen, die verspreid over drie dagen (iedere dag twee monsters) zijn gedaan. Hierbij is het zwevende stof gehalte van het afvalwater bepaald. De zes gemeten waarden lopen maar weinig uiteen. Het gemiddelde zwevende stof gehalte bedraagt 69,33 mg/l.

De concentratie zwevende stof in het standaardinfluent bedraagt 250 mg/l. Het gemeten gehalte is dus zeer laag. Ook de concentraties van andere gemeten parameters (CZV, BZV, etc) blijken veel lager uit te vallen dan CBS-waarden of het standaardinfluent. Een verklaring hiervoor is te vinden in het vroege tijdstip waarop de metingen gedaan zijn. Hierdoor worden concentraties waargenomen uit afvalwater dat 's nachts het stelsel instroomt. Lekkage kan zorgen voor een verdere daling in concentraties. De metingen zijn te kort achter elkaar gedaan en er zijn in totaal te weinig metingen om een indruk te krijgen van het verloop van het zwevende stof gehalte in het rioolstelsel. De gemeten waarden liggen bovendien, zoals gezegd, erg dicht bij elkaar (standaard deviatie < 10) en alle metingen zijn bij droog weer uitgevoerd.

De zuivering heeft ook de droogrest in het influent geregistreerd. In figuur 4.6 is de droogrest uitgezet tegen het debiet. Er is een grote gespreide puntenwolk te zien. Bij lage debieten is de spreiding groter, maar zijn ook meer metingen beschikbaar. De gemiddelde droogrest bedraagt 139 mg/l bij DWA, ver onder het zwevende stofgehalte in het standaardinfluent. Aan de hand van deze metingen is het onmogelijk om een algemene uitspraak te kunnen doen over sedimentatie binnen het riool.



Figuur 4.6: Droogrest in mg/l uitgezet tegen het debiet (1999).

4.4 Significante processen en parameters

Aan de hand van de influentanalyse, kunnen met betrekking tot de verschillende processen die binnen de riolering een rol spelen, de volgende conclusies worden getrokken:

- De verhouding CZV/BZV heeft een gemiddelde waarde van 2,54 bij droogweerafvoer. Dat is ongeveer 15% hoger dan diezelfde verhouding bij 'vers' afvalwater, wat wijst op de afbraak van biologisch materiaal. De gemeten waarde is wel lager dan gemiddeld. Verder is de verhouding BZV/N gemiddeld zo'n 11 % hoger dan de waarde die door het CBS wordt gegeven. De afwijkingen mogen volgens het protocol als significant worden beschouwd. Vervolgonderzoek vindt daarom plaats naar parameters die van invloed kunnen zijn op omzettingsprocessen.

- Het verschil tussen CBS-waarden en berekende gemiddelde concentraties is voor alle parameters groter dan 25%. De gemeten waarden bij droogweerafvoer verschillen van 21% (BZV) tot 42% (P) van de concentraties in het standaardinfluent. Het vermoeden bestaat dan ook dat er binnen het stelsel significante lekkage optreedt.

- Het blijkt niet mogelijk iets te zeggen over mengings- en sedimentatieprocessen binnen het stelsel. Er zijn respectievelijk geen of onvoldoende metingen beschikbaar die aan kunnen tonen dat deze processen bij het rioolstelsel van Haarlem een rol spelen. Het is dan ook niet zinvol een aan deze processen gerelateerde stelselanalyse uit te voeren. Omdat de kwantificering van de regenwaterafvoer vooral van belang is wanneer mengings- of sedimentatieprocessen plaatsvinden zal ook hieraan in deze case geen aandacht worden besteed.

Parameters

Het rioolstelsel is vervolgens nader onderzocht. Aan de hand van tabel 3.3 uit het protocol zijn stelseleigenschappen afgelezen die van invloed zijn op de in-/exfiltratie en omzettingsprocessen. Tabel 4.4 geeft een overzicht van de stelseleigenschappen en enkele hoofdparameters.

Tabel 4.4: Relevante stelseleigenschappen en processen voor de case Haarlem

	Omzetprocessen binnen buizen	Infiltratie / exfiltratie
Verval leidingbodem	Verblijftijd, Stroomsnelheid	-
Persleidingen	Anaerobe toestand	-
Lengte stelsel	Verblijftijd	-
Buizen	Materiaal	-
Pompen/gemalen	Pompcapaciteit, Ledigingstijd	-
Waterdichtheid	-	GWS, Scheuren, Voegen

Aan de hand van de beschikbare informatie zijn eerst alle basisgegevens en bewerkte basisgegevens verzameld en eenvoudige berekeningen uitgevoerd. Met behulp van hydraulische berekeningen (in Hydroworks) zijn de gegevens vervolgens gedetailleerd. Omzettingsprocessen en in- en exfiltratie spelen vooral

tijdens droog weer een rol. Daarom zijn alleen DWA-simulaties uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlage 4-1.

4.5 Vervolgonderzoek

4.5.1 In-/Exfiltratie van water

Doordat de stofconcentraties in het influent van de zuivering Schalkwijk veel lager zijn dan de landelijk gemiddelde concentraties bestaat het vermoeden dat er water het stelsel instroomt. Om een indruk te krijgen van de hoeveelheid instromend water, is het zinvol een waterbalans op te stellen. Bij droog weer stroomt een afvoer het stelsel in die wordt geproduceerd door de inwoners van het gebied (Haarlem Zuidoost, inclusief Zuiderpolder), de plaatselijke industrie en eventuele onderbemalingen of injecties. Aan de hand van de influentmetingen kan vervolgens het gemiddelde debiet worden berekend dat bij droog weer bij de zuivering aankomt. Tabel 4.5 geeft een overzicht van alle waterstromen die het stelsel in- en uitgaan. Uit deze tabel blijkt dat een extra debiet het stelsel instroomt van 542,2 m^3/h, ongeveer 35,6 % van het totale DWA-debiet dat bij de zuivering gemeten wordt.

Tabel 4.5.: In- en uitgaande waterstromen bij droogweerafvoer

Ingaand water:	**Debieten in m^3/h**
DWA inwoners Haarlem Zuidoost	588
DWA industrie	202
DWA injecties (inwoners Zuiderpolder)	47
DWA onderbemalingen	144
Totaal DWA	**981**
Uitgaand water:	
Gemeten DWA-debiet	1523,2
Verschil:	**542,2**

Een andere manier om een indruk te krijgen van de omvang van de lekkage in een stelsel, is door debieten te schatten op basis van de concentraties Kjeldahl-stikstof. Stikstof is bijna onafhankelijk van bezinking in de riolering en zal ook niet of nauwelijks worden omgezet door biologische processen (Mulder, 1999). Indien er vanuit wordt gegaan dat huishoudelijk afvalwater overheerst kan een concentratie worden verwacht van 100 mg/l. Deze waarde wordt vergeleken met de gemiddelde concentratie aan N-Kjeldahl gemeten bij DWA, die in Haarlem 40 mg/l bedraagt. Dit betekent dat ca. 58% van het DWA debiet, gemeten bij de zuivering, bestaat uit lekwater. Deze berekening is opgenomen in bijlage 5.

Vreemd water dat het riool instroomt kan van drie mogelijke bronnen afkomstig zijn:

- Grondwater. Een hoge grondwaterstand en lekken in de buizen kunnen leiden tot grondwaterinfiltratie in het riool.
- Industrie. In sommige gevallen lozen industrieën meer water in het riool dan bekend is, of is toegestaan.

- Oppervlaktewater. Soms kunnen sloten of beken (bedoeld of onbedoeld) onderdeel uitmaken van het rioolstelsel. Dat kan ook tot gevolg hebben dat oppervlaktewater het stelsel instroomt.

Uit beschikbare gegevens was bekend dat in het stelsel van Haarlem tot 2000 sprake was van de instroom van oppervlaktewater via een kapotte overstort. In Haarlem Zuidoost bevindt zich weinig industrie, alleen enkele instellingen die bovendien hun afvalwater lozen op de zuivering Waarderpolder. Maar uit onderzoek naar de onderhoudstoestand van het rioolstelsel blijkt dat ook de infiltratie van grondwater in Haarlem tot de mogelijkheden behoort.

Grondwater

In de omgeving van Haarlem ligt het maaiveld op 0 tot 5 meter hoogte ten opzichte van NAP. De grondwaterstand ligt in dit deel van het land ongeveer 1.2 tot 4 meter onder het maaiveld (Dufour, 2000). De grondwaterstand varieert niet alleen per gebied maar ook per seizoen. In principe is de neerslag die in Nederland valt redelijk over het jaar verdeeld. De verdamping is echter 's zomers hoger, door de toename in temperatuur. Dit heeft een lagere grondwaterstand tot gevolg. Ook de DWA blijkt 's zomers lager dan in de winter. De oorzaak hiervan kan dus zijn de verminderde infiltratie van grondwater door de verlaagde grondwaterstand. Concrete gegevens om deze veronderstelling te bewijzen zijn echter niet beschikbaar.

Er is geen specifieke informatie beschikbaar over de grond- of oppervlaktewater-kwaliteit in Haarlem en omgeving. De stofconcentraties in het afvalwater zijn laag, maar de dagelijkse vuilvracht is hoger dan de theoretische. Het instromend vreemd water zal wel concentraties CZV, BZV en N bevatten, maar minder dan het afvalwater in het stelsel. Het rioolstelsel in Haarlem bevindt zich in een gebied waar veengrond voorkomt. De kans is daardoor ook aanwezig, dat humuszuur via het grondwater het rioolstelsel binnenstroomt. Hierdoor kan de afbreekbaarheid van het afvalwater dalen.

Toestand van het riool

De staat waarin een rioolstelsel verkeert, is van directe invloed op de mogelijkheden voor de in-/exfiltratie van grondwater. Hiermee wordt o.a. bedoeld de onderhoudstoestand van het riool (manier en/of frequentie van onderhoud), de leeftijd van het stelsel en de manier van bouwen (materiaal, soort aansluitingen). De onderhoudstoestand kan worden beoordeeld aan de hand van de waterdichtheid (lekkage, verplaatsing van buizen) en de stabiliteit (aantasting, scheuren) van een stelsel. Lekkage treedt meestal op ter plaatse van verbindingen. Het kan hier gaan om de verbinding tussen buizen, maar ook de aansluiting van injecties of kunstwerken. Onderzoek aan een Duits rioolstelsel heeft bewezen dat verbindingsmiddelen die vroeger werden gebruikt dikwijls niet voldoen aan de huidige eisen, waardoor lekkage het gevolg kan zijn (Stein & Niederehe, 1992).

Het stelsel in Haarlem is erg oud; er zijn nog delen in gebruik die dateren uit 1910. Het staat vast dat de riolen die niet onlangs vervangen zijn, lek zijn. Door het gebruik van minder duurzame materialen voor onderlinge verbindingen (tot in de jaren '60) en inwendige aantasting en spanningen in de grond, zijn rioolbuizen lek

geraakt. Bovendien vindt er in de omgeving veel drainage plaats en komt het volgens de gemeente vaak voor dat drainagewater wordt geloosd op het riool.

4.5.2 Omzettingsprocessen binnen het riool

Bij de studie naar omzettingsprocessen is onderscheid gemaakt tussen plaatsen waar een aerobe toestand heerst (vrij verval riolering waar reaeratie kan plaatsvinden) en anaerobe omstandigheden zoals die voorkomen in persleidingen.

Aerobe omstandigheden

In riolen met adequate ventilatie is de atmosfeer wat betreft hoeveelheid zuurstof gelijk aan die in lucht. De aanwezigheid van moleculaire zuurstof is bepalend voor de afbraak van organisch materiaal door micro-organismen en voor de preventie van sulfide productie (Almeida, 1999). Om een zuurstofbalans in riolen op te stellen moet zowel de opgeloste zuurstof als de reaeratie worden geschat. De hoeveelheid opgeloste zuurstof in riolen ligt meestal tussen de 1 en 4 g/m^3. Een eenvoudige zuurstofbalans in het stromende afvalwater kan gegeven worden door de volgende vergelijking (Pomeroy & Parkhurst / Nielsen, uit Almeida, 1999):

$$\frac{dS_o}{dt} = K_{La}(s_{o,s} - s_o) - (r_w + r_b + r_s) \qquad (4.1)$$

Waarin:
A = oppervlak van de doorsnede (m^2)
d_m = gemiddelde hydraulische diepte (m)
$S_{o,s}$ = verzadigingsconcentratie zuurstof (g/m^3)
S_o = aanwezige concentratie zuurstof (g/m^3)
K_{La}= volumetrische reaeratie-coëfficiënt (h^{-1});$K_{La} = K_L{*}A/V = K_L/d_m$
K_L = zuurstofoverdracht coëfficiënt (m/h)
R_w = consumptiesnelheid zuurstof in het afvalwater (g/m^{3*}h)
R_b = consumptiesnelheid zuurstof in de biofilm (g/m^{3*}h)
R_s = consumptiesnelheid zuurstof in het sediment (g/m^{3*}h)
V = volume afvalwater (m^3)

De zuurstofconsumptie door afvalwater varieert aanzienlijk en neemt toe met de verblijftijd in het afvalwatersysteem. Bij lange verblijftijden kunnen snelheden van 20 g/m^3·h worden waargenomen. Ook de concentraties organische stof blijken van invloed. De consumptie van opgeloste zuurstof in de biofilm is afhankelijk van een aantal factoren waaronder voorafgaande hoge afvoeren van water en mechanische onderhoudswerkzaamheden, die bijvoorbeeld de leeftijd van de biofilm en de schuifspanning bepalen. Er zijn geen literatuurwaarden te vinden voor de consumptie van zuurstof in het sediment. Deze waarden zijn waarschijnlijk alleen te verkrijgen uit experimenten in laboratoria, waarbij het erg moeilijk blijkt rioolomstandigheden goed na te bootsen.

Reaeratie in riolen vindt op natuurlijke wijze plaats aan het oppervlak van de vloeistof en wordt verhoogd door watervallen en turbulentie effecten bij verbindingen en putten. De eerste uitdrukking die de overdracht van zuurstof tussen lucht en water voorspelt en toepasbaar is op riolen, is gegeven door Parkhurst en

Pomeroy. Deze uitdrukking was slechts geldig voor turbulente stromingen en is later aangepast door Jensen (tot formule 4.2) zodat toepassing op alle beschikbare gegevens mogelijk werd.

$$K_{la} = f / d_m = 0.86 * \left(1 + 0.20\left(\frac{U^2}{g * d_m}\right)\right) * (J * U)^{3/8} * \frac{1}{d_m} \qquad (4.2)$$

Waarin:
U = snelheid (in m/s)
g = zwaartekracht (m/s^2)
d_m = gemiddelde hydraulische diepte (l/h)
J = energieverhang (m/m)
f = uitwisselingscoefficient (m/h)

Uit de vergelijkingen blijkt dat de reaeratie in afvalwater vooral afhankelijk is van parameters als de stroomsnelheid van het water, die bepaald wordt door kanaaleigenschappen als de lengte en vorm van de buizen en het buisverval. Dit is de reden waarom geprobeerd is de voor omzettingsprocessen relevante stelseleigenschappen te inventariseren en afgeleide parameters te berekenen via eenvoudige bewerkingen of simulatie. Hier volgt een korte behandeling van de verzamelde gegevens.

Verval leidingbodem: Het gemiddeld verval van de buizen bedraagt 2.57‰. Het maximale gevonden verval is 170‰ en het minimale verval is nul, doordat een aantal buizen horizontaal ligt.

Lengte stelsel: Het stelsel heeft een totale buislengte van bijna 140.000 meter. De verblijftijden van een aantal denkbare stroomroutes zijn aan de hand van DWA-simulaties in Hydroworks berekend. De routes zijn terug te vinden in bijlage 6. Het water is gemiddeld 4,5 uur aanwezig in het rioolstelsel. De maximale berekende verblijftijd is 9 uur.

Buizen: Het stelsel bevat in totaal 3.856 buizen, waarvan 59% eivormig is en 41% rond. De gemiddelde diameter van de ronde buizen bedraagt 493 mm en de eivormige buizen hebben een gemiddelde hoogte van 600 mm. Een simulatie van de droogweerafvoer (gelijkmatig over de dag verdeeld) laat zien dat de gemiddelde waterhoogte in de buis 0,06 m bedraagt. Op basis van deze waterhoogte is het contactvlak berekend van het water en de buiswand waar mogelijk biofilm groeit, het totale wateroppervlak dat in contact staat met de lucht in het stelsel en het volume van de droogweerafvoer. De waarden van deze parameters zijn weergegeven in tabel 4.6. De resultaten moeten gezien worden als een schatting omdat bijvoorbeeld geen rekening gehouden is met wisselende waterstanden, maar de maximale waterhoogte is gebruikt. Ook was het in sommige gevallen nodig de doorsneden van de rioolbuizen te vereenvoudigen. Een toelichting op de berekeningsmethode is te vinden in bijlage 5.

Tabel 4.6: Resultaten van simulaties in Hydroworks

Waterstand bij DWA	Contactvlak water/buis	Totaal wateroppervlak	Volume droogweerafvoer
0,06 m	34.951 m^2	29.320 m^2	2.185 m^3

Pompen en gemalen: Zoals eerder vermeld bestaat het gemaal uit twee vijzels en een pomp, met een gezamenlijke capaciteit van 3.000 m^3/h. Voor pomp- en pompovercapaciteiten wordt opnieuw verwezen naar tabel 4.2. Het stelsel heeft een ledigingstijd van iets meer dan 15 uur.

De zuurstofoverdracht tussen lucht en water (in m/h) voor een 'gemiddelde buis' kan nu worden bepaald door de gevonden gegevens in te vullen in formule 4.2. Voor de zwaartekrachtversnelling wordt 9,81 m/s^2 aangehouden. Volgens de formule wordt gerekend met het energieverhang in een buis. Hier is echter voor het gehele stelsel een gemiddelde waarde gekozen. Dit gemiddelde energieverhang blijkt lastig te bepalen in Hydroworks. Omdat het toch gaat om een indicatieve waarde, is voor het gemak gerekend met het gemiddelde buisverhang. Hieruit volgt voor K_l een waarde van 0,034 m/h.

Tenslotte is de biofilmactiviteit bepaald. Kenmerkend voor rioolstelsels is een biofilm activiteit van 10 $g_O/m^2 \cdot d$ bij 20°C (Huisman, 2001). Micro-organismen nemen ongeveer het drievoudige aan organisch materiaal (30 $g_{CZV}/m^2 \cdot d$) op, waarvan 1/3 tot koolstofdioxide wordt afgebroken en 2/3 wordt omgezet in biomassa. Er moet dus onderscheid worden gemaakt tussen de omzetting en afbraak van materiaal. Uit de Nederlandse BZV belasting per inwoner (54 gram per dag) en de verhouding van BZV:CZV in ruw afvalwater (2.14), volgt een CZV belasting van ongeveer 116 gram per inwoner per dag. Met 59.740 inwonerequivalenten die lozen op de zuivering, volgt een totale vracht van 6.929,8 kg/d. De gemiddelde vracht die bij droog weer wordt gemeten bij de zuivering bedraagt 6.771,1 kg/d. Dit zou betekenen dat het verschil tussen beide vrachten wordt omgezet in de riolering (= 158,7 kg/d). Delen van dit verschil door het biofilmoppervlak levert een biofilmactiviteit op van 4,5 gram per dag per m^2. Deze waarde is minder dan de helft van de kenmerkende biofilmactiviteit. De oorzaak hiervoor kan het verschil in afvalwatertemperatuur zijn. Formules die het zuurstofverbruik van de biofilm weergeven bevatten dan ook vaak een temperatuurcoefficient, die wordt weergegeven als θ^{T-20} (Garsdal et al., uit Schaum, 2001). Het uitvoeren van simulaties in een waterkwaliteitsmodel (bijvoorbeeld de waterkwaliteitsmodule in Hydroworks) zal veel meer (kwantitatieve) informatie over de omzettingsprocessen binnen het riool opleveren.

Anaerobe omstandigheden

Zoals gezegd stelt zich in de meeste drukleidingen na enige tijd een anaerobe toestand in, omdat er geen zuurstofaanvoer plaatsvindt. Bij de aerobe omzettingsprocessen worden de organische stoffen van aerobe bacteriën in een stofomzettingsstap tot anorganische eindprodukten geoxideerd. Als de organismen echter onder anaerobe omstandigheden leven, kunnen ze hoogmoleculaire organische substanties niet oxideren, maar alleen reduceren (via gistingsprocessen). Organische substanties zoals bijvoorbeeld cellulose en eiwitten kunnen dan alleen worden afgebroken tot organische tussenprodukten zoals zuren of alcohol. Deze zorgen voor een verandering in het snel en langzaam afbreekbare CZV. Wanneer

veel zuren worden opgebouwd moet een hoger aandeel aan afbreekbaar CZV meetbaar zijn in het influent. Om een vergaande afbraak van afvalstoffen door anaerobe processen te bereiken moet men streven naar een volledige omzetting naar Biogas (CH_4, CO_2), (Böhnke et al., uit Schaum 2001). Dit is in persleidingen echter maar gedeeltelijk mogelijk.

Het stelsel in Haarlem bevat één externe drukriolering die injecteert in het Liewegje in de Zuiderpolder. Het debiet van deze leiding is iets minder dan 0,2% van het totale debiet dat bij DWA aankomt bij de zuiveringsinstallatie. Het afvalwater uit de Zuiderpolder wordt via een pomp direct naar de zuivering getransporteerd. Het debiet dat via deze leiding bij DWA naar de zuivering wordt gepompt is 47 m^3/h. Het maximale debiet is 173 m^3/h. Hiermee komt het totale aandeel water dat bij DWA door een persleiding wordt aangevoerd op 5,1 %.

Het is moeilijk de anaerobe processen in persleidingen te kwantificeren. De beschikbare gegevens met betrekking tot persleidingen zijn helaas beperkt. Debieten zijn bekend, maar lengten en doorsneden bijvoorbeeld niet. Het inschatten van de tijd waarin het afvalwater in anaerobe toestand verkeert, is daarom niet mogelijk. Verder kan niet worden nagegaan of bij neerslag vanuit de persleiding een vuilprop wordt waargenomen in het influent. De gegevens met betrekking tot de neerslag (tijdstip bui, intensiteit, duur) en het aantal metingen zijn te beperkt om hier iets over te kunnen zeggen. Bovendien wordt het influent direct gemengd met het afvalwater dat vanuit Haarlem Zuidoost onder vrij verval de zuivering instroomt. Het is daarom niet mogelijk iets te zeggen over de omzettingen die specifiek in de persleidingen van het stelsel in Haarlem plaatsvinden.

4.6 Slotanalyse

In de eerste caseanalyse is het rioolstelsel in Haarlem Zuidoost en het influent bij de zuivering in Schalkwijk bestudeerd. Het gaat hier om een stelsel met een middelgroot volume. Ongeveer een vijfde van de DWA is afkomstig van industrie, waar in dit geval het huishoudelijk afvalwater van enkele grote instellingen mee bedoeld wordt. Het stelsel is bijna geheel gemengd. Het bevat slechts enkele persleidingen en in zijn geheel geen bergingstanks.

Uit een algemene influentanalyse blijkt dat de in Haarlem gemeten concentraties aanzienlijk lager zijn dan gemiddelde Nederlandse waarden. Vergelijking van de samenstelling van het DWA met het standaardinfluent bij droog weer en met een theoretische DWA aan de hand van inwonerequivalenten, laat hetzelfde zien. Daarom wordt vermoed dat er water infiltreert. Ook de verhoudingsgetallen verschillen significant van CBS-waarden: een indicatie dat omzettingsprocessen binnen dit stelsel een rol spelen. Scheiding van de metingen in DWA en RWA bewijst slechts dat bij neerslag verdunning van het afvalwater plaatsvindt en dat vuilvrachten per dag toenemen. Splitsing in seizoenen laat zien dat de hoogste concentraties waargenomen werden in de zomer, bij gemiddeld het laagste debiet en een hogere temperatuur. Er zijn onvoldoende of geen metingen beschikbaar om iets te zeggen over respectievelijk sedimentatie of menging binnen dit riool.

De infiltratie van water wordt bevestigd door het opstellen van een waterbalans en het uitvoeren van een stikstofberekening. Volgens de waterbalans bestaat ongeveer 35% van het instromend DWA uit lekwater, de stikstofberekening geeft zelfs een lekwaterpercentage van 58%. Omdat er andere oorzaken denkbaar zijn voor een hoge stikstof concentratie (bijv. industriële lozingen), wordt het lekkagepercentage van de waterbalans aangehouden. De infiltratie blijkt vooral veroorzaakt te worden door een kapotte overstort die de instroom van oppervlaktewater tot gevolg heeft. Maar ook de mogelijkheid dat grondwater infiltreert is aanwezig. Het stelsel in Haarlem is oud en grote delen zijn lek. Bovendien is bekend dat er veel drainagewater op het riool geloosd wordt.

Bij het onderzoeken van omzettingsprocessen binnen het stelsel wordt onderscheid gemaakt tussen de aerobe of anaerobe toestand waarin het afvalwater zich bevindt. De aanwezigheid van zuurstof is bepalend voor de afbraak van organisch materiaal en blijkt vooral afhankelijk van parameters als de stroomsnelheid en het buisverval, die bepaald worden door kanaaleigenschappen. Rapporten, kaarten en het computermodel leveren veel informatie op met betrekking tot specifieke riooleigenschappen. Eenvoudige berekeningen zorgen voor een nauwkeurige invulling van een groot deel van de parameters. Bij het uitvoeren van simulaties en aanvullende berekeningen is het nodig een aantal aannamen te doen. De resultaten moeten dan ook gezien worden als een schatting. Dit geldt ook voor de berekende biofilmactiviteit en de zuurstofoverdracht.

Na enige tijd stelt zich in de meeste persleidingen een anaerobe toestand in. Het blijkt onmogelijk iets te zeggen over omzettingen die specifiek in de persleidingen van dit stelsel plaatsvinden. Gegevens met betrekking tot persleidingen zijn beperkt. Debieten zijn bekend, maar geen lengten, diameters of verblijftijden. Ook het voorkomen van propstroming (en daarmee first flush verschijnselen) bij neerslag is door een gebrek aan metingen niet na te gaan. Het blijkt bij deze eerste case nog moeilijk parameters en zeker riooleigenschappen te koppelen aan de samenstelling van het influent. Wel wordt al direct duidelijk dat het ontbreken van (de juiste) gegevens vaak een beperkende factor is. Vermoedens kunnen niet worden bevestigd, doordat de concrete informatie daarvoor ontbreekt.

Hoofdstuk 5: Casestudie Zaandam-Oost

5.1 Inleiding

Een volgende studie is verricht naar het rioolstelsel van Zaandam-Oost. Het gaat hier om een klein stelsel, met een totaal volume van iets meer dan 20.000 m^3. Het stelsel komt echter overeen met dat in Haarlem wat betreft grootte van het DWA-debiet. Het stelsel bevat geen bergingstanks, maar wel veel persleidingen. De stelselgegevens zijn verstrekt door Arcadis Heidemij Advies. Het computermodel was alleen beschikbaar in Mouse-format en is daarom door Witteveen + Bos omgezet naar een Hydroworks-bestand. De influentgegevens zijn beschikbaar gesteld door Uitwaterende Sluizen.

Dit hoofdstuk begint, evenals het vorige, met informatie over de stelselconfiguratie in Zaandam Oost. Dan wordt volgens het protocol het influent geanalyseerd. Een algemene indruk van de hoeveelheid en samenstelling van het influent blijkt aan de hand van deze analyse wel te verkrijgen, het blijkt echter moeilijk aan te geven welke processen bij een specifiek stelsel een rol spelen. Daarom zijn de mogelijkheden verkend voor een tijdreeksanalyse en is een regressieanalyse op de influentgegevens toegepast. Tenslotte zijn opnieuw significante processen en bijbehorende parameters bepaald en geanalyseerd.

5.2 Stelselconfiguratie Zaandam-Oost

Het gebied Zaandam-Oost is gelegen langs de Zaan, in Noord Holland. Dit water vormt de natuurlijke grens aan de westzijde van het gebied. Aan de oostzijde ligt de Watering/De Coeltunnelweg. Het gebied wordt aan de zuidzijde begrensd door het Noordzeekanaal en aan de noordzijde door de Enge Wormer Ringdijk. Onder Zaandam-Oost vallen onder andere de Achtersluispolder, Poelenburg, Peldersveld, Hoornseveld, Kogerveld, Jagersveld, Plan Kalf en Haaldersbroek. Ook het "eiland" in de Voorzaan wordt tot het gebied gerekend. Zaandam-Oost ligt in een waterrijke omgeving in de polder Oostzaan. In figuur 5.1 is een overzichtstekening van het gebied te zien.

Het afvalwatersysteem van Zaandam-Oost kan worden onderverdeeld in drie bemalingsgebieden met een gemengd stelsel, 22 gebieden met een gescheiden stelsel (waarvan 12 gebieden met een drukrioleringssysteem) en twee gebieden met een verbeterd gescheiden stelsel, die door middel van tussengemalen zijn gekoppeld. Het afvalwater wordt onder vrij verval getransporteerd naar de zuivering, waar een opvoergemaal staat. De zuivering is in beheer van Uitwaterende Sluizen en ligt langs de Poelenburg en de Noorder-IJ- en Zeedijk. Omdat de gebieden met een gescheiden en een verbeterd gescheiden stelsel onder vrij verval de droogweerafvoer op het gemengde stelsel lozen worden ze niet als aparte bemalingsgebieden onderscheiden.

Figuur 5.1: Overzichtstekening Zaandam-Oost

Zaandam-Oost heeft iets meer dan 55.000 inwoners. De bedrijfs- en industrielozingen zijn recentelijk gekwantificeerd en uitgedrukt in inwonerequivalenten bij een zuurstofbindend vermogen van 55,2 gram BZV per inwoner per dag. De industriële droogweerafvoer bedraagt bijna 20% van de totale DWA. Het totaal verhard oppervlak van het gebied bedraagt 241,6 hectare. Er is onderscheid gemaakt in vier typen verhard oppervlak, waarvan een overzicht is opgenomen in tabel 5.1. In het stelsel zijn geen bergingstanks aanwezig. De totale onderdrempelberging bedraag 6,9 mm.

Tabel 5.1: Op de riolering in Zaandam aangesloten afvoerend oppervlak

Bemalings-gebied	Afvoerend oppervlak	Daken vlak	Daken Hellend	Gesloten verhard	Open verhard
Zaandam Oost	241,6 ha	23%	22%	8%	47%

Zoals gezegd stroomt het water vanuit het stelsel in Zaandam-Oost de zuivering binnen onder vrij verval. In de influentput waar het water terechtkomt, komt ook afvalwater binnen uit de gemeenten Oostzaan, Landsmeer en Den Ilp. Bij de analyse van de hoeveelheid en samenstelling van het influent dient hiermee rekening gehouden te worden. De debieten die deze drie gemeenten afvoeren naar de zuivering (DWA) zijn bekend, maar er is geen aanvullende informatie beschikbaar over deze drie stelsels. Het gemaal in Zaandam-Oost bestaat uit vier pompen en heeft een totale capaciteit van 2.441 m^3/h. Wanneer alleen naar het stelsel in Zaandam-Oost gekeken wordt blijkt de pompovercapaciteit 1.601 m^3/h te bedragen.

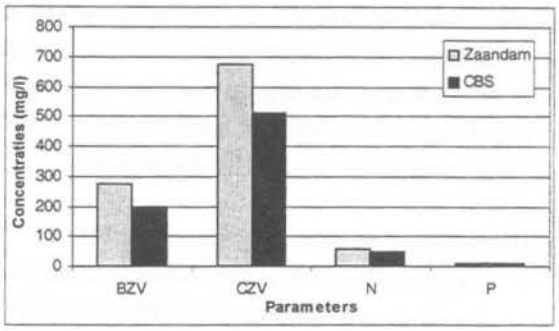
5.3 Analyse van het influent

Van het influent zijn gegevens beschikbaar van de jaren 1997 t/m 2000. In deze jaren is dagelijks het debiet dat bij de zuivering aankomt, de hoeveelheid gevallen neerslag en de PH-waarde gemeten. Ook de concentraties van verschillende stoffen, in dit geval CZV, BZV, N-Kjeldahl, Ptotaal en de hoeveelheid zwevende stof (TSS) zijn gemeten. De metingen zijn niet dagelijks en niet met een vast interval uitgevoerd. Soms wordt er eens in de vijf dagen gemeten, soms een aantal dagen achter elkaar en soms 14 dagen niet.

5.3.1 Algemene analyse

De resultaten van de influentanalyse zijn opgenomen in bijlage 2-2. Eerst is gekeken naar de verschillende parameters en hun concentratieverloop. In figuur 5.2 zijn de gemiddelde concentraties van de beschikbare influentgegevens uitgezet naast de CBS waarden. In het staafdiagram is te zien dat de concentraties die in Zaandam-Oost worden gemeten, hoger zijn dan de gemiddelde concentraties in Nederland. De afwijkingen tussen beide waarden lopen uiteen van meer dan 35% (BZV), tot ongeveer 7% (P).

	Gemiddelde concentratie	CBS-waarde
CZV	674	513
BZV	273	198,5
N	58	47,9
P	8,4	7,9
TSS	226	250



Figuur 5.2: Stofconcentraties gemeten in Zaandam en de gemiddelde concentraties bepaald door het CBS.

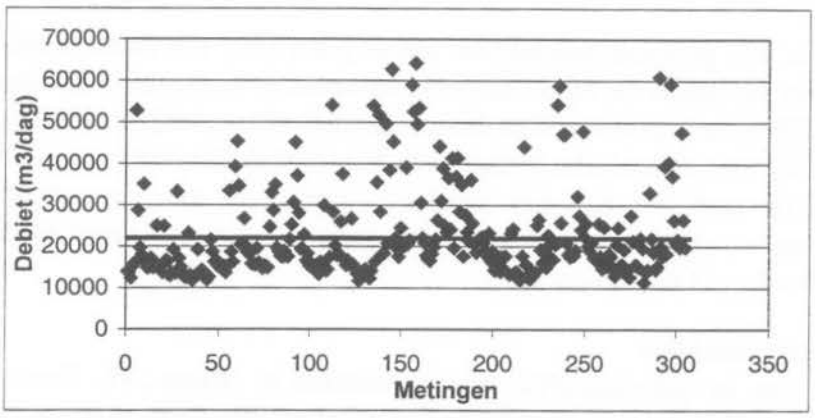
De verhoudingen tussen de verschillende parameters zijn vervolgens berekend. Tabel 5.2 geeft de waarden en de procentuele afwijking weer van de belangrijkste berekende verhoudingsgetallen tot de CBS-waarden. Net als bij de influentmetingen in Haarlem heeft het afvalwater een lage CZV/BZV verhouding, wat wijst op hoge biologische afbreekbaarheid. De verhouding BZV/N is veel hoger dan gemiddeld, wat betekent dat de concentratie BZV in verhouding veel meer afwijkt van de CBS waarde dan de concentratie N. Het verhoudingsgetal zou veel lager liggen wanneer biologische afbraak had plaatsgevonden.

Tabel 5.2: Procentueel verschil tussen de gemeten verhoudingen en vastgestelde CBS-waarde

Verhoudingen	Verhoudings-waarde	Afwijking van CBS-waarde
CZV/BZV	2,42	-10%
BZV/N	4,72	22.6%

DWA/RWA analyse

Allereerst moet de grens tussen de droogweerafvoer en regenwaterafvoer worden vastgesteld. Daartoe zijn alle tussen 1997 en 2000 gemeten debieten bestudeerd, en uitgezet in de grafiek in figuur 5.3. Aan de hand van deze figuur zijn debieten lager of gelijk aan 22.000 m^3/dag als droogweerafvoer gedefinieerd.

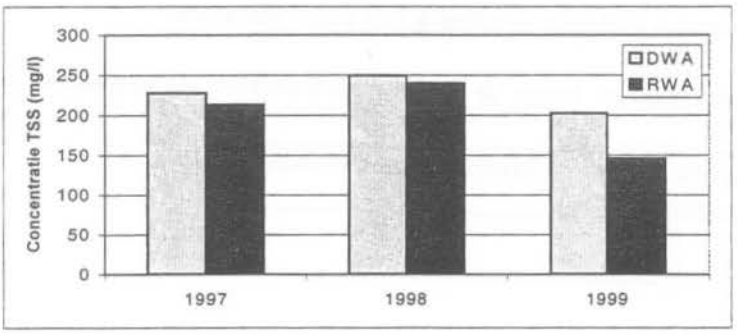


Figuur 5.3: Diagram met de tussen 1997 en 2000 optredende debieten

Volgens het protocol zouden nu de gegevens van ongeveer één jaar uit de dataset worden geselecteerd. Een logische keuze hiervoor is het jaar 1999, omdat dit jaar ook onderzocht is in de studie naar Haarlem-Zuidoost en omdat de beschikbare rapporten ook uitgaan van de situatie in dat jaar. Ter controle is voor 1997 en '98 ook een DWA/RWA en seizoensanalyse uitgevoerd. Verschillen kunnen worden veroorzaakt door verschillen in weersomstandigheden. Bekend is dat 1997 een extreem warm, zonnig en nat jaar was. In 1998 viel veel neerslag (het natste jaar van de eeuw) en was het somber, maar warm. Het jaar 1999 was opnieuw warm en zonnig, maar eerder aan de droge kant.

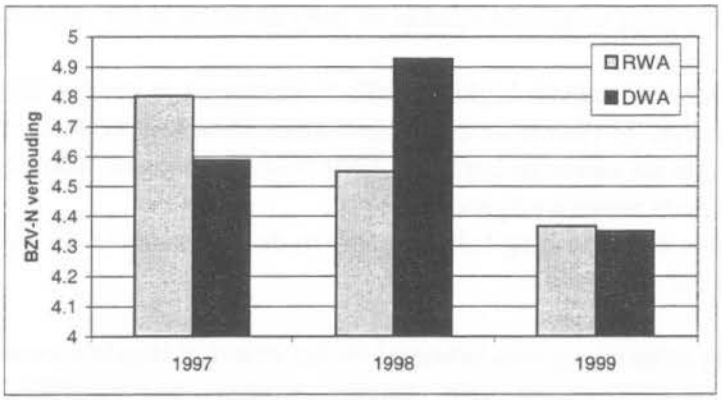
Hier volgen de belangrijkste resultaten:

- De gemiddeld hoogste concentraties worden gemeten in 1997 en de gemiddeld laagste concentraties in 1999. Verschillen in hoeveelheid neerslag lijken hierop niet van invloed, want juist 1997 was een nat jaar en 1999 een droog jaar.
- De verdunning die plaatsheeft bij neerslag is in alledrie de jaren waarneembaar De gemiddelde concentraties liggen 15-35% lager bij regenwaterafvoer.
- Uit de gegevens van 1997 en 1998 (zie ook figuur 5.4) blijkt dat de hoeveelheid zwevende stof nauwelijks verschilt bij RWA en DWA (<5%). In 1999 echter is juist wel een verschil waarneembaar (27%) en dat terwijl dit jaar als ietwat droog wordt omschreven. De waarden liggen behalve in 1998 meer dan 10% onder de waarde van het standaardinfluent (250 mg/l).



Figuur 5.4: Concentratie onopgeloste stof bij droogweerafvoer en regenwaterafvoer voor drie opeenvolgende jaren.

- In 1999 blijft de verhouding BZV/N nagenoeg gelijk bij droogweerafvoer en regenwaterafvoer. Weersomstandigheden lijken niet van invloed op de omzettingsprocessen. In 1998 en 1997 is wel verschil te zien, echter in 1998 wordt de hoogste waarde waargenomen tijdens DWA en in 1997 juist tijdens RWA.



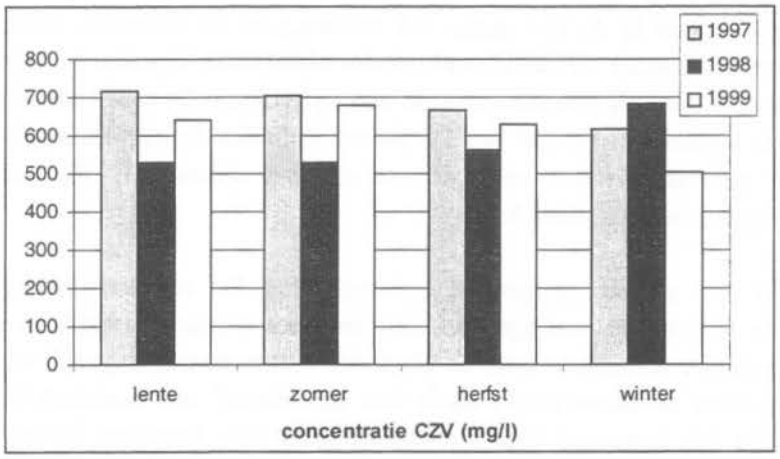
Figuur 5.5: BZV-N verhouding tijdens DWA en RWA voor drie jaren.

- In 1997 en 1998 is het water beter biologisch afbreekbaar tijdens droog weer. In 1999 is de biologische afbreekbaarheid juist hoger bij neerslag.
- Uit vergelijking met het standaardinfluent blijkt nogmaals dat de concentraties gemeten in Zaandam, hoog zijn.
- Volgens de theoretische DWA berekening aan de hand van inwonerequivalenten bedragen in dit geval de theoretische concentraties slechts 82 % van de gemeten concentraties (zie ook bijlage 3). De vervuiling van het water is dus groter dan in theorie verwacht wordt.

Seizoensanalyse

Seizoensonderzoek bij de influentgegevens levert de volgende resultaten op:

- Voor 1997 en 1999: In de winter valt de meeste regen, de zomer is veruit het droogst. In 1998 is juist de winter het droogst en valt de meeste regen in de lente.



Figuur 5.6:Concentratie CZV voor verschillende seizoenen in drie jaren.

- In 1999 worden de hoogste concentraties waargenomen in de zomer, het droogste en warmste seizoen. In 1998 worden de hoogste concentraties waargenomen in de winter, opnieuw het droogste seizoen, maar ook het koudste (zie figuur 5.6). Neerslag lijkt dus een grotere invloed te hebben dan de temperatuur. In 1997 worden echter de hoogste concentraties gemeten in de lente, terwijl in dit jaar de zomer het droogste seizoen is.
- De laagste concentraties worden in alledrie de jaren gemeten in het seizoen dat het natst is.
- De biologische afbreekbaarheid blijkt in 1997 's winters en 's zomers kleiner dan in lente en herfst. In 1998 is de biologische afbreekbaarheid in de lente en zomer groter dan in de winter en herfst. In 1999 wordt de hoogste biologische afbreekbaarheid in de zomer waargenomen.
- In 1997 en 1999 is de verhouding BZV/N hoger in de zomer dan in de winter. Voor 1998 geldt het omgekeerde.

Bij de analyse van de influentgegevens behorend bij het stelsel in Haarlem kwam al naar voren dat concentratieverschillen kunnen worden waargenomen bij vergelijking van metingen met het landelijk gemiddelde. Zo kunnen in-/exfiltratie processen enigszins worden ingeschat. De verschillen in verhoudingsgetallen zijn echter minder groot en de invloeden van afvoervariaties en seizoenen moeilijk te herleiden. Hetzelfde is te zeggen voor de influentanalyse van Zaandam. Ook is gebleken dat de analyse van verschillende jaren geen eenduidige resultaten oplevert.

Een algemene indruk van de hoeveelheid en samenstelling van het influent is aan de hand van de bovenstaande influentanalyse wel te verkrijgen. De schommelingen in samenstelling zijn echter moeilijk te verklaren door bijvoorbeeld seizoensinvloeden of de grootte van het debiet en daardoor is het nauwelijks mogelijk aan te geven welke processen bij een specifiek stelsel een rol spelen. Daarom zijn de mogelijkheden bekeken voor een uitgebreidere gegevensanalyse in de vorm van een tijdreeksanalyse.

5.3.2 Tijdreeksanalyse

Een reeks geordende gegevens wordt ook wel aangeduid als tijdreeks. Meestal zijn deze gegevens geordend in de tijd, maar ook ordening in de dimensie ruimte is mogelijk. Bij het analyseren van aandelenkoersen, elektrische signalen en diverse golfprocessen wordt dikwijls gebruik gemaakt van tijdreeksen. Ook de beschikbare influentgegevens kunnen beschouwd worden als een tijdreeks. Er zijn verschillende technieken die gebruikt worden voor de analyse van tijdreeksen. Een aantal methoden is terug te vinden in tabel 5.3.

In principe zijn drie soorten reeksen te onderscheiden. De reeksen waarbij de afstand (hier: de tijd) tussen metingen varieert en moet worden vastgesteld voor ieder punt. Dan zijn er reeksen waarbij de afstanden tussen metingen gelijk zijn en regelmatig, waardoor de numerieke waarde van de 'ruimte' niet meedoet bij de analyse, maar als een constante kan worden aangenomen. Tenslotte is het ook mogelijk dat de ruimte tussen metingen niet beschouwd wordt, omdat alleen de volgorde van de metingen van belang is. Verder wordt in deze tabel onderscheid gemaakt in variabelen die uitgedrukt worden in rationele getallen en intervallen, of

variabelen die gemeten worden op nominale of ordinale schaal (bijvoorbeeld alleen gehele getallen, letters of symbolen).

Tabel 5.3: Analysetechnieken voor tijdreeksen, geclassificeerd naar de aard van de variabele en de afstand tussen de metingen (Davis, 1982).

Soort variabele	Metingen met onregelmatige tussenafstand	Metingen met gelijke en regelmatige tussenafstand	Tussenafstand buiten beschouwing
Variabele gemeten op interval of schaal van rationele getallen	Interpolatie procedures Regressie analyse	Regressie analyse Tijd-trendanalyse Autocorrelatie en kruiscorrelatie Fourier analyse	Autocorrelatie en kruiscorrelatie
Variabele gemeten op nominale of ordinale schaal	Gebeurtenissen reeks	Autoassociatie en kruisassociatie Omzettingsmatrices 'Runs tests'	Autoassociatie en kruisassociatie Omzettingsmatrices 'Runs tests'

Analysemogelijkheden influent Zaandam

De influentmetingen zijn uitgedrukt in reële getallen. Inmiddels is duidelijk dat de metingen niet met gelijke en regelmatige tussenstappen zijn gedaan. Verder is niet alleen de volgorde van de metingen van belang, maar is er extra informatie te vinden in de ruimte tussen de metingen. Hieruit kan bijvoorbeeld worden afgeleid hoeveel neerslag er is gevallen voorafgaand aan een meting of wanneer zich een droogweerperiode voordeed. Deze informatie is van grote invloed op sedimentatie- en omzettingsprocessen en een eventuele uitspoeling van materiaal. De mogelijkheden om het tussenliggend tijdsinterval buiten beschouwing te laten zijn nader onderzocht, maar worden hier niet verder behandeld. De theoretische achtergrond is terug te vinden in bijlage 9. Hier is slechts gekeken naar de beschikbare technieken voor de analyse van metingen met een onregelmatige tussenstap.

Eén mogelijkheid is het 'invullen' van lege plekken (interpolatie procedures). Er is besloten in dit geval niet tot het schatten van extra punten over te gaan. Voor Zaandam zijn twee à drie metingen per week beschikbaar. Om een volledige tijdreeks te krijgen betekent dit, dat meer dan de helft van de metingen aan de hand van bijvoorbeeld interpolatie zal moeten worden ingevuld. Een tweede reden is het feit dat dit onderzoek is opgezet om eventuele verbanden tussen verschillende parameters in kaart te brengen. Wat vaak vergeten wordt is dat door gebruik te maken van bovenstaande methoden geen nieuwe informatie wordt aangemaakt. Daarom wordt overgegaan tot een regressieanalyse.

Met de methode van de kleinste kwadraten wordt een lijn getrokken door een verzameling waarnemingen. Regressie wordt toegepast om te analyseren hoe een enkele afhankelijke variabele wordt beïnvloed door de waarde van één of meer onafhankelijke variabelen. De afwijking tussen de afhankelijke variabele en de

gevonden lijn wordt daarbij geminimaliseerd. Door de verhouding te bepalen tussen de som van de kwadraten als gevolg van regressie en de totale som van kwadraten wordt R^2 verkregen. Deze parameter geeft de 'goodness-of-fit' van de lijn ten opzichte van de punten weer. Als de lijn een goede schatter is van de data, zal deze verhouding dichtbij één liggen. De wortel van de 'goodness-of-fit' parameter is de veelvoudige correlatiecoëfficiënt weergegeven door de volgende formule:

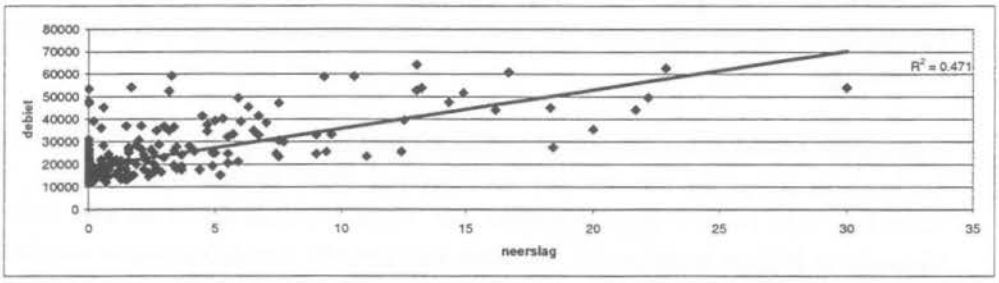
$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\left[n\sum X^2 - (\sum X)^2\right]\left[n\sum Y^2 - (\sum Y)^2\right]}} \qquad (5.1)$$

5.3.3 Resultaten van regressieanalyse

Bij een aantal parameters is gezocht naar het verband met de hoeveelheid neerslag of de grootte van het debiet (CZV/N/TSS stof versus neerslag/debiet). Ook relaties tussen parameters onderling zijn onderzocht (CZV/BZV/N-TSS, CZV-N, verhoudingen-debiet). In de meeste gevallen is ook gekeken of verschillen tussen DWA en RWA en seizoensinvloeden een rol spelen. De belangrijkste resultaten worden hier weergegeven.

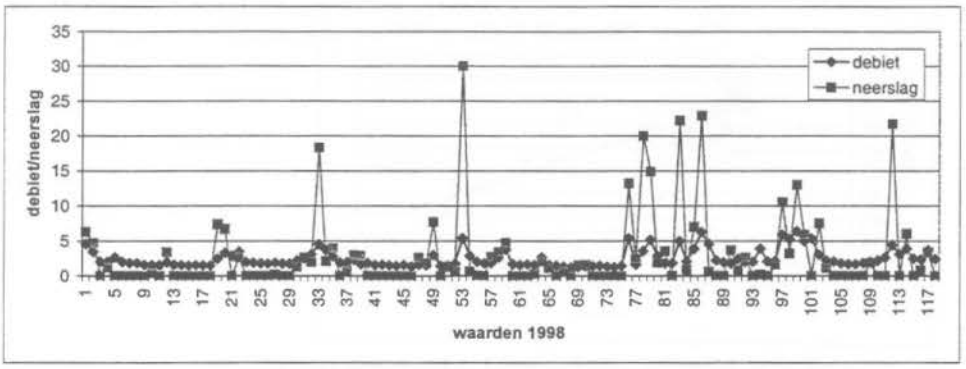
Relatie neerslag-debiet

Verondersteld mag worden dat er een direct verband is tussen de hoeveelheid gevallen neerslag en de grootte van het debiet dat afgevoerd wordt naar de zuivering. In figuur 5.7 is echter te zien dat ook wanneer er geen neerslag valt, de spreiding in het debiet erg groot is. Dit kan veroorzaakt worden door de vertraging tussen het moment waarop neerslag valt en het moment waarop een eventuele toename van het debiet gemeten wordt bij de zuivering. Wanneer neerslag bijvoorbeeld pas laat op de dag valt, is dat pas de dag erna bij de debietmeting zichtbaar. Uitzetten van het debiet en de neerslag in de tijd, op een vergelijkbare schaal (zoals in figuur 5.8), laat wel zien dat een piek in het debiet bijna altijd volgt op een piek in de neerslag.



Figuur 5.7: Debieten (m^3/dag) van 1997-2000 uitgezet tegen de neerslagmetingen (in mm). Met behulp van lineaire regressie is een verband gezocht, waarbij R^2 is weergegeven.

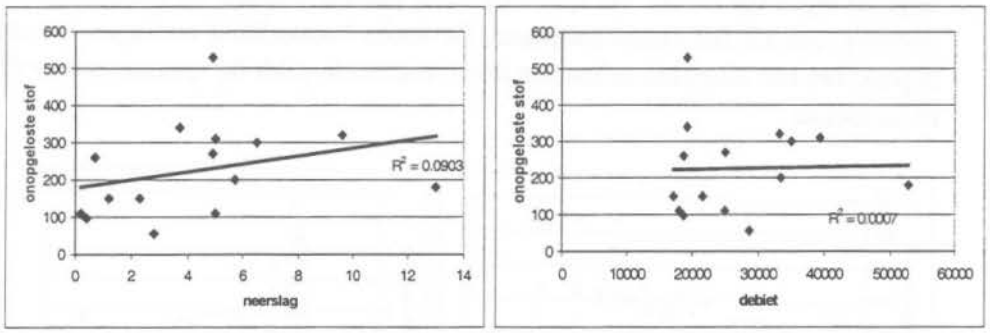
De metingen die op dit moment eens per dag gedaan worden blijken dus niet voldoende om een verband tussen deze twee parameters aan te tonen. Dit maakt het nog moeilijker relaties aan te tonen tussen parameters waarbij slechts vermoedens bestaan over onderlinge verbanden. Wanneer bij metingen ook het verloop van het debiet geregistreerd wordt, of van buien het tijdstip en de intensiteit bekend is, zou er over relaties tussen deze parameters meer te zeggen zijn.



Figuur 5.8: Verloop van het debiet (in 10^4 m^3/dag) en de neerslag (in mm) in het jaar 1998.

Relatie neerslag-onopgeloste stof

Het ligt in de lijn der verwachting dat het zwevende stofgehalte in afvalwater wordt beïnvloed door sedimentatieprocessen en dat neerslag weer zorgt voor de opwoeling van sediment. Dit is bij de zuivering merkbaar door uitspoeling en een daaraan gekoppelde hogere vuilvracht.

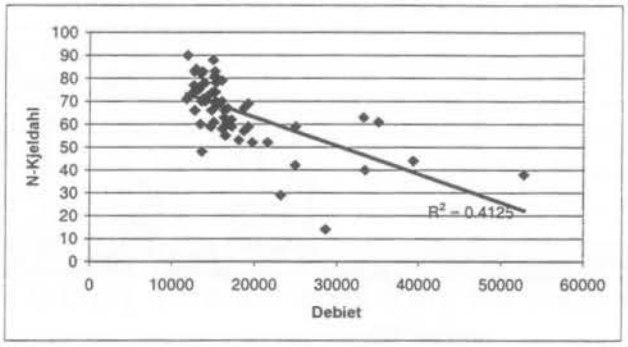


Figuur 5.9: Links: Zwevende stof uitgezet tegen neerslag (1997), trendlijn toegevoegd. Rechts: Zwevende stof uitgezet tegen het debiet, ook hier is een trendlijn toegevoegd.

Wanneer de concentratie zwevende stof wordt uitgezet tegen de bijbehorende neerslag is een grote spreiding in de punten te zien. Ook wanneer geen neerslag valt is de spreiding in de zwevende stof groot. Kennelijk bestaat er geen verband tussen het dagdebiet en de concentratie zwevende stof.

Relatie Debiet-N-Kjeldahl

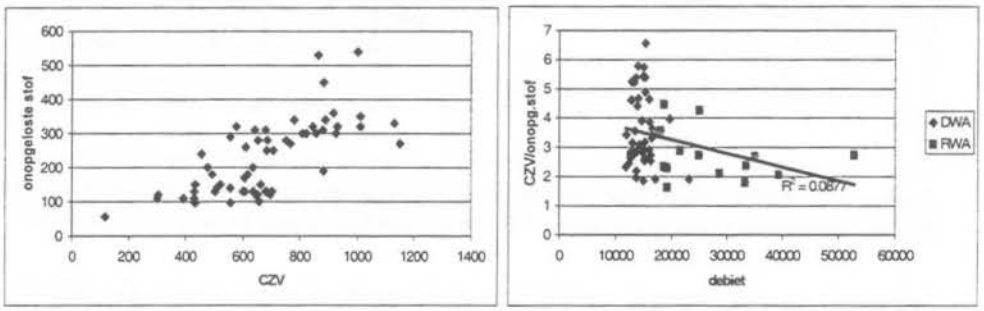
Wanneer de verschillende parameters (CZV/BZV/N) uitgezet worden tegen de neerslag blijkt het verband met de concentratie Kjeldahl-N het grootst. In figuur 5.10 is de concentratie stikstof uitgezet tegen het debiet. Voor R^2 wordt een waarde van 0,41 gevonden.



Figuur 5.10: N-kjeldahl uitgezet tegen het debiet (voor 1997).

Relatie CZV-Onopgelost

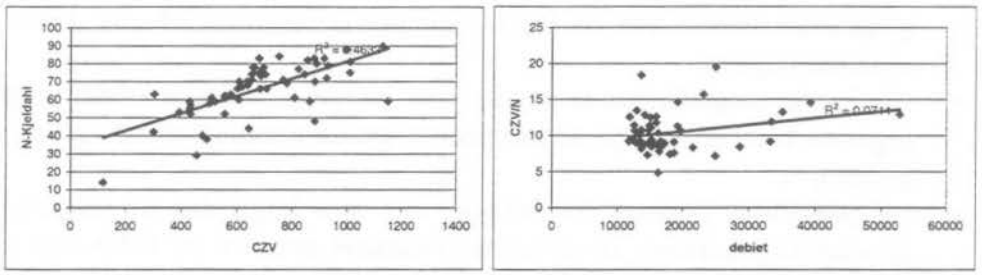
Wanneer de concentratie zwevende stof wordt uitgezet tegen de concentratie CZV is opnieuw een puntenwolk zichtbaar. Hierin zijn grofweg twee groepen met punten te onderscheiden die ook bij de relaties Kjeldahl-N-zwevende stof en BZV-zwevende stof teruggevonden worden. De oorzaak is wellicht het verschil tussen de metingen bij DWA en RWA. In figuur 5.11 is daarom de verhoudingswaarde uitgezet tegen het debiet. De spreiding in de punten is groter bij droog weer dan bij neerslag, net als het aantal metingen. De totale hoeveelheid metingen is echter te beperkt om een uitspraak te kunnen doen. Datzelfde geldt bij splitsen van de dataset in seizoenen.



Figuur 5.11: Links: Verband tussen de concentratie zwevende stof en CZV. Rechts: Verhouding CZV/zwevende stof uitgezet tegen het debiet bij DWA en RWA.

Relatie CZV-N

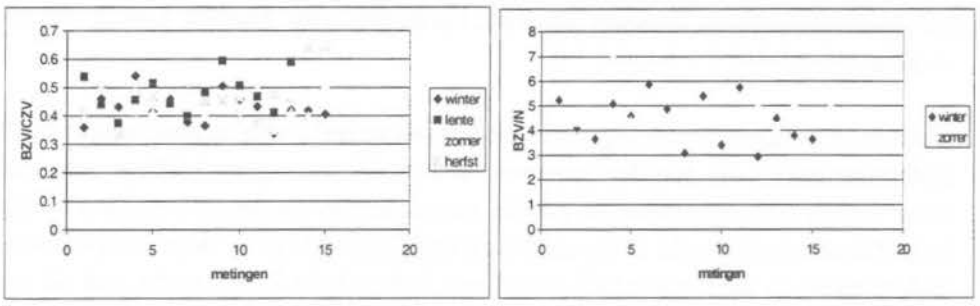
Het lineaire verband tussen de concentraties N-Kjeldahl en CZV blijkt groot te zijn (figuur 5.12, links). Het verhoudingsgetal tussen CZV en N is uitgezet tegen het debiet in het rechterdiagram van figuur 5.12. Bij een toenemend debiet vindt verdunning plaats, met lagere concentraties in het influent als gevolg. Echter door het hoge debiet wordt vermoedelijk meer materiaal losgewoeld en uitgespoeld. Dit zou zorgen voor een verhoogde concentratie CZV, waardoor het verhoudingsgetal zal toenemen bij een hoger debiet. Hoewel in de verhoudingsgetallen die bij RWA worden bepaald, een zekere stijging is waar te nemen, is de spreiding tijdens DWA zo groot dat het diagram deze theorie helemaal niet bevestigt.



Figuur 5.12: Links: N-Kjeldahl uitgezet tegen CZV(1997). Rechts: CZV/N-Kjeldahl uitgezet tegen het debiet (1997). In beide gevallen zijn trendlijnen toegevoegd.

Seizoensinvloeden

Tenslotte is gekeken naar de invloed van seizoenen op de verschillende concentraties en verhoudingsgetallen. Uit de literatuur blijkt dat gedurende de warmere maanden de omzettingsprocessen toenemen. Het gaat hier vooral om verschuivingen in de fracties van het chemisch zuurstofverbruik. Daarom is in eerste instantie gekeken naar de verhouding tussen BZV en CZV. Deze is in figuur 5.13 uitgezet voor de verschillende seizoenen. De spreiding in verhoudingsgetallen blijkt voor alle vier de seizoenen ongeveer gelijk te zijn. Daarnaast is de verhouding BZV/N uitgezet voor de zomer en winter, vanwege het grote temperatuurverschil. De concentratie BZV is in de zomer vermoedelijk in hogere mate aan omzettingsprocessen onderhevig, terwijl de concentratie N-Kjeldahl gedurende alle seizoenen redelijk constant blijft. Een verschil in verhoudingsgetallen blijkt ook echter in deze figuur niet waar te nemen. Aan de hand van de gemeten influentgegevens blijkt het dus moeilijk aan te tonen dat er sprake is van een seizoens- of temperatuursinvloed.



Figuur 5.13: Links: Verhouding BZV/CZV uitgezet in verschillende seizoenen (1997). Rechts: Verhouding BZV/N uitgezet voor winter en zomer (1997)

5.3.4 Conclusies en vervolgonderzoek

Na deze uitgebreide regressieanalyse is teruggekeerd naar de geformuleerde onderzoeksaanpak:

- De verhouding tussen BZV en CZV wijkt meer dan 10% af van de verhoudingswaarde in 'vers afvalwater' en de voor Nederland gemiddelde waarde. Het verschil tussen de gemeten verhouding BZV/N en de CBS-waarde is groter dan 10% (zie hiervoor tabel 5.3). Op basis van deze bevindingen en het protocol wordt geconcludeerd dat er significante omzettingsprocessen plaatsvinden.
- Bij deze case zijn ook metingen beschikbaar van de concentratie zwevende stof. Het verschil tussen de concentratie zwevende stof in het standaardinfluent en de

gemiddelde waarde van de DWA metingen is ongeveer 9%, net onder de significantiegrens.

- Het is niet mogelijk iets te zeggen over mengingsprocessen omdat er geen gegevens beschikbaar zijn uit een periode waarin meerdere malen op een dag gemeten is.
- De gemiddelde gemeten concentraties zijn 24% hoger dan de aangenomen standaardconcentraties. De influentconcentraties gemeten bij DWA zijn voor alle vier de parameters gemiddeld meer dan 20% hoger dan de concentraties in het standaardinfluent. Omdat alle gemeten concentraties hoger zijn dan de standaardwaarden is er geen reden om lekkage te vermoeden.

Uit de voorgaande influent- en regressieanalyse kwam naar voren dat een aantal verbanden niet eenduidig kan worden aangetoond met de beschikbare data. Er zijn behoorlijke sets metingen beschikbaar, die door onderlinge vergelijking een goed beeld opleveren van het influent. Na een algehele influentanalyse en specifiekere regressieanalyse naar verschillende verbanden echter, blijkt het niet goed mogelijk de omzettings- of sedimentatieprocessen te relateren aan deze gegevens.

Bij de keuze voor de nader te onderzoeken processen is daarom rekening gehouden met het volgende: Sedimentatieprocessen zijn op dit moment nog moeilijk te bevatten en de modellering ervan blijkt nog zeer onnauwkeurig (afwijkingen van een factor 10^2). Alvorens iets te kunnen zeggen over de sedimentatie in een rioolstelsel is dan ook veel informatie nodig en een duidelijke indicatie dat sedimentatieprocessen in een specifiek stelsel een rol spelen. Omzettingsprocessen daarentegen kunnen inmiddels al iets beter in kaart worden gebracht. Met behulp van parameters als de verblijftijd van afvalwater in het riool, het wateroppervlak en het biofilmoppervlak kunnen de verschuivingen van fracties aardig voorspeld worden.

Daarom is besloten omzettingsprocessen in het stelsel nader te analyseren. De hoge stofconcentraties die worden gemeten, doen weliswaar geen lekkage vermoeden, maar wijken wel significant af van de vergelijkingswaarden. Bovendien is ook de in-/exfiltratie onderzocht in de case Haarlem Zuidoost. Door dezelfde processen te onderzoeken in dit rioolstelsel, wordt een betere indruk verkregen van de eerder verkregen resultaten en de nauwkeurigheid van de bepaling ervan.

5.4 Vervolgonderzoek

5.4.1 In-/Exfiltratie

De gemeten stofconcentraties in Zaandam zijn hoger dan gemiddeld. Berekening van de in-/exfiltratie op basis van het aantal inwonerequivalenten laat zien dat de theoretisch te verwachten concentraties lager zijn dan de concentraties die worden gemeten. Dit resultaat is gedeeltelijk te verklaren doordat het aantal inwonerequivalenten dat vanuit drie randgemeenten op de zuivering loost onbekend is waardoor de theoretische samenstelling laag uitvalt.

Daarom is opnieuw een waterbalans opgesteld. Het debiet dat theoretisch het stelsel in Zaandam instroomt bestaat uit de droogweerafvoer van inwoners in Zaandam Oost, plaatselijke industrie en recreatie en het afvalwater uit de gemeenten

Oostzaan, Landsmeer en Den Ilp. Het gemiddelde debiet dat bij droog weer bij de zuivering wordt gemeten, is ook bekend. Tabel 5.4 laat de in- en uitgaande waterstromen van het stelsel zien. Verrassend genoeg blijkt er een extra debiet het stelsel in te stromen van 320,7 m^3/h, dat ongeveer 21 % van het totaal gemeten DWA debiet bedraagt.

Tabel 5.4: In- en uitgaande waterstromen bij droogweerafvoer

Ingaand water:	**Debieten in m^3/h**
DWA inwoners Zaandam Oost	662.6
DWA industrie	176
DWA recreatie	1.7
Totaal DWA Zaandam	**840.3**
DWA Den Ilp	18
DWA Oostzaan	174.4
DWA Landsmeer	156
Totaal DWA zuivering	**1188.7**
Uitgaand water:	
Gemeten DWA-debiet	1509.4
Verschil:	**320.7**

Tenslotte is de in-/exfiltratie geschat met behulp van concentraties Kjeldahl-stikstof. Op basis van de gemiddelde vervuilingswaarde en het drinkwaterverbruik wordt een stikstofconcentratie verwacht van 100 mg/l. De gemiddelde concentratie aan N-Kjeldahl gemeten bij DWA bedraagt voor Zaandam-Oost 65 mg/l. Deze concentratie ligt lager dan de theoretische waarde, wat opnieuw wijst op de infiltratie van water. Het instromend debiet moet dan 35% groter zijn dan theoretisch verwacht wordt. Een toelichting op deze berekeningswijze is opgenomen in bijlage 3.

Opvallend is dat hogere stofconcentraties dan gemiddeld worden gemeten, maar dat beide lekkageberekeningen wijzen op de infiltratie van water. Er zijn geen plekken bekend waar watergangen of beken onderdeel uitmaken van het stelsel. De kans dat hierdoor een extra debiet het stelsel instroomt (zeker met hoge vuilconcentraties) is dan ook zeer klein. Het ligt voor de hand dat het infiltrerend water afkomstig is van grondwater. De verhoogde concentraties in het gemeten afvalwater worden hierdoor echter niet verklaard. Bedrijfs- en industrielozingen in Zaandam Oost zijn recent uitgebreid gekwantificeerd. Van de samenstelling van het afvalwater uit de gemeenten Oostzaan, Landsmeer en Den Ilp echter, is niets bekend. De kans is dan ook groot, dat de droogweerafvoer afkomstig uit deze gemeenten hoge concentraties afvalstoffen bevat. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door specifieke industriële lozingen.

Grondwater

Zaandam ligt net als Haarlem in Noord-Holland, maar iets meer landinwaarts. Het maaiveld in deze streek ligt op 0 tot –5 meter ten opzichte van NAP. Het maaiveld in Zaandam zelf ligt gemiddeld op –0,20 NAP. De grondwaterstand ligt hier minder dan 1.2 meter onder het maaiveld (Dufour, 2000). Ook de influentmetingen in

Zaandam laten een lager DWA debiet zien in de zomer. Wanneer de instroom van het grondwater afkomstig is, kan de oorzaak liggen in de door verdamping gedaalde grondwaterstand. Er zijn geen metingen beschikbaar die specifieke informatie verschaffen over de grondwaterkwaliteit in Zaandam Oost. Er is echter geen reden om te vermoeden dat er van vervuiling sprake is. Zaandam bevindt zich net als Haarlem in een gebied met veengrond. Mogelijk bevindt zich door de grondwaterinfiltratie humuszuur in het afvalwater.

Toestand van het riool

Om het hydraulisch en vuiltechnisch functioneren van het rioolstelsel van Zaandam-Oost te kunnen beoordelen is een aantal van de stelselspecifieke eigenschappen door Arcadis getoetst aan de normen zoals deze door de waterkwaliteitsbeheerder zijn aangegeven. Drie van de vijf ernstigste en omvangrijkste knelpunten zijn: Het slecht vuiltechnisch functioneren van de riolen door lekkage (gedrempelde riolen), het slecht vuiltechnisch functioneren als gevolg van verloren berging (gedrempelde riolen) en de aanwezigheid van ernstig verzakte riolen ter plaatse van het Kalf, Hoornseveld, Peldersveld en Poelenburg. De knelpunten lekkage en verloren berging houden direct verband met elkaar. Door de slechte verbindingen tussen de rioolbuizen en de opgetreden ongelijkmatige zetting van de ondergrond zijn lekkages ontstaan. Om te voorkomen dat de lekkende riolen als drain gaan fungeren zijn er interne overstorten aangebracht. De verzakkingen en het aanbrengen van de interne drempels creëren op hun beurt verloren berging.

5.4.2 Omzettingsprocessen binnen het riool

Aerobe omstandigheden

In hoofdstuk 4 werd duidelijk dat de aanwezigheid van zuurstof bepalend is voor de afbraak van organisch materiaal en afhankelijk is van parameters als de stroomsnelheid en het buisverval, die bepaald worden door kanaaleigenschappen. Inventarisatie van rapporten, kaarten, berekeningen en simulaties met het computermodel voor Zaandam-Oost leverden de volgende resultaten op:

Verval leidingbodem: Het gemiddelde verval van de buizen is berekend en bedraagt 2.41‰. Het maximale gevonden verval is 68‰ en het minimale verval is ook in Zaandam nul, door een aantal horizontaal gelegen buizen.

Lengte stelsel: De totale buislengte van het stelsel is 115.059 meter. Opnieuw zijn verblijftijden van een aantal denkbare stroomroutes bepaald (zie bijlage 6). De gemiddelde verblijftijd van het water blijkt bijna 11 uur te bedragen. De maximale berekende verblijftijd is bijna 28 uur.

Buizen: Het stelsel bestaat uit in totaal 4008 buizen. Hiervan is slechts 9% eivormig en wel 91% rond. De gemiddelde diameter van de ronde buizen bedraagt 410 mm en de ei-vormige buizen hebben een gemiddelde hoogte van 460 mm. De DWA-simulatie laat zien dat de gemiddelde waterhoogte in de buis 0,14 m bedraagt. De waarden van andere berekende parameters zijn weergegeven in tabel 5.5. Het stelsel in Zaandam bevat een aanzienlijk aantal buizen dat geheel onder water staat. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verloren berging en beïnvloedt de

nauwkeurigheid van de berekende parameters. Een toelichting hierop is te vinden in hoofdstuk 7 en bijlage 5 van dit rapport.

Pompen en gemalen: Het water wordt vanuit Zaandam Oost door vier pompen met een totale capaciteit van 2.441 m^3/h naar de zuivering gepompt. De totale onderdrempelberging van het stelsel bedraagt 15.972 m^3. Het stelsel heeft een ledigingstijd van ongeveer 10 uur. Dat is lager dan de gemiddelde verblijftijd van het water in het stelsel bij DWA.

Tabel 5.5: Resultaten van simulaties in Hydroworks voor Zaandam Oost

Waterstand bij DWA	Contactvlak water/buis	Totaal wateroppervlak	Volume van de droogweerafvoer
0,14 m	33.073 m^2	26.217 m^2	3.038 m^3

De zuurstofoverdracht voor een 'gemiddelde buis' is ook voor Zaandam-Oost bepaald aan de hand van formule 4.2. Het energieverhang wordt weer vervangen door het gemiddelde bodemverhang. De zuurstofoverdracht K_l bedraagt dan 0,040 m/h. De biofilmactiviteit is berekend bij een CZV belasting van 116 gram per inwoner per dag en 67.923 inwonerequivalenten. Daaruit volgt een totale theoretisch geproduceerde vracht van 7.879,1 kg/dag. Aan de hand van de debieten uit Den Ilp, Oostzaan en Landsmeer is een schatting gemaakt van het aantal inwonerequivalenten dat vanuit deze gebieden loost. De totale theoretisch geproduceerde vracht CZV wordt daarmee 10.636 kg/d. De gemiddelde vracht die bij droog weer wordt gemeten bij de zuivering bedraagt 10.405 kg/d. De biofilmactiviteit komt daarmee op 6 gram per m^2 per dag. De biologische afbraak is daarmee in Zaandam hoger dan in Haarlem. Dit wijst opnieuw op de aanwezigheid van een geconcentreerde industriële lozing in de onbekende DWA.

Anaerobe omstandigheden

Het afvalwatersysteem Zaandam-Oost omvat 22 gebieden met een gescheiden stelsel, waarvan 12 gebieden met een drukrioleringssysteem. Al deze gebieden lozen onder vrij verval de droogweerafvoer op het gemengde stelsel. Het gaat hier om redelijk kleine bemalingsgebieden: het totale debiet van deze 12 persleidingen bedraagt 34,1 m^3/h. De drie persleidingen uit Oostzaan, Landsmeer en Den Ilp hebben een totaal debiet van 1.553,2 m^3/h. Van het debiet dat bij de zuivering wordt gemeten is daarmee iets meer dan 32 % afkomstig uit een persleiding.

Ook in Zaandam bleek het moeilijk de anaerobe processen in persleidingen te kwantificeren. Gegevens beperken zich tot aantallen en debieten in persleidingen. Het bepalen van de verblijftijd van het water in een persleiding wordt daarmee onmogelijk. Bij de metingen in Zaandam is geen periode met meerdere metingen per dag beschikbaar, zodat aan de hand van neerslaggegevens propstromingsverschijnselen kunnen worden onderzocht. Bovendien is het bij dit stelsel, net als in Haarlem, moeilijk de invloed van persleidingen 'apart' te bekijken. Het afvalwater afkomstig uit persleidingen wordt immers altijd gemengd met afvalwater uit vrij verval leidingen.

5.5 Slotanalyse

Het rioolstelsel van Zaandam-Oost kan omschreven worden als middelgroot. Het DWA debiet is vergelijkbaar met dat van het stelsel in Haarlem Zuidoost. Het stelsel bevat een groot aantal persleidingen. De drie grootste zijn afkomstig uit aangrenzende gemeenten en lozen hun droogweerafvoer in dezelfde influentput bij de zuivering. Het ontbreekt aan uitgebreidere gegevens van deze gemeenten. Het stelsel heeft een hoge berging in verhouding tot het buisvolume, maar bevat geen bergingstanks.

Voor de influentanalyse van deze case zijn behalve CZV, BZV, N en P ook de concentraties zwevende stof (TSS) beschikbaar. Alle metingen zijn met onregelmatige tussenstappen gedaan. Direct valt op dat alle gemiddelde concentraties en verhoudingsgetallen hoger zijn dan het landelijk gemiddelde. Gesplitste datasets zijn in dit geval geanalyseerd (RWA/DWA, seizoenen) voor drie verschillende jaren. De resultaten van deze analyse zijn niet eenduidig. Een algemene indruk van het influent is wel te verkrijgen, maar er zijn slechts kleine verschillen in concentraties en verhoudingsgetallen waarneembaar waardoor het moeilijk is aan te geven welke processen nu precies een rol spelen. Tijdreeksanalyse biedt de mogelijkheid om meer informatie uit de gegevens te halen. De beschikbare metingen zijn echter met een onregelmatige tussenstap gedaan, waardoor alleen regressieanalyse kan worden toegepast. Regressieanalyse laat zien dat het lastig is bestaande verbanden aan te tonen aan de hand van de metingen (v.b.: De relatie tussen neerslag en debiet is slecht waarneembaar doordat de vertraging tussen beide niet kan worden bepaald). Dit maakt het bijna onmogelijk 'vermoedelijke' verbanden te bewijzen.

Uiteindelijk worden de omzettingsprocessen en in-/exfiltratie binnen dit stelsel nader onderzocht. Uit een waterbalans en stikstofberekening blijkt verrassend genoeg dat er sprake is van de infiltratie van water, naar alle waarschijnlijkheid afkomstig uit het grondwater. De hoge concentraties kunnen niet verklaard worden uit de beschikbare gegevens, maar vermoed wordt dat een geconcentreerd debiet afkomstig is uit de drie omliggende gemeenten (industriële lozing). Bij vergelijking van de gemeten concentraties met de gemiddelde waarden zoals vastgesteld door het CBS dient rekening gehouden te worden met het feit dat lekkage een in Nederland veel voorkomend probleem is. De CBS-waarden zouden hierdoor wel eens aan de lage kant kunnen zijn.

Ook voor dit stelsel zijn kanaaleigenschappen en stelselparameters goed te achterhalen of redelijk nauwkeurig te berekenen. Voor de detaillering en berekening van zuurstofoverdracht en biofilmactiviteit is opnieuw gekozen voor een indicatieve waarde (door vereenvoudigingen en aannamen). Gegevens met betrekking tot persleidingen zijn ook in dit geval beperkt, waardoor propstromingsverschijnselen en de invloed ervan niet kunnen worden beoordeeld.

Aan de hand van de beschikbare influentmetingen is het moeilijk te zeggen welke processen een rol spelen en welke riooleigenschappen daarop van invloed zijn. Bovendien beperken de beschikbare stelselgegevens zich tot Zaandam-Oost, terwijl het influent wordt aangevuld door drie omliggende gemeenten. Waarnemingen aan

het influent kunnen daardoor niet zonder meer worden gerelateerd aan de geanalyseerde stelseleigenschappen.

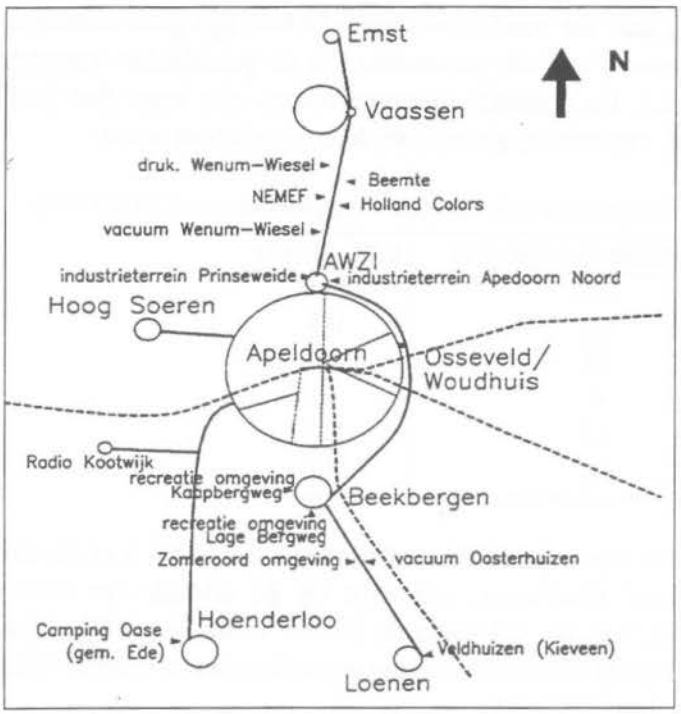
Hoofdstuk 6: Casestudie Apeldoorn

6.1 Inleiding

De derde en laatste case is onderzocht door een Duitse gaststudent. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van zijn onderzoek naar het afvalwatersysteem in Apeldoorn. De opbouw van de twee voorgaande hoofdstukken is daarbij aangehouden. De gegevens worden in het volgende hoofdstuk gebruikt bij de onderlinge vergelijking van de cases. Voor uitgebreidere en gedetailleerde informatie wordt verwezen naar bijlagen 2, 4 en 8, of naar het rapport van Christian Schaum, getiteld: Untersuchung der Prozessabläufe in der Kanalisation am Beispiel Apeldoorn.

6.2 Stelselconfiguratie Apeldoorn

Apeldoorn is een stad van ongeveer 150.000 inwoners in de provincie Gelderland. De stad wordt in tweeën gedeeld door het Apeldoornse kanaal dat van zuid naar noord loopt. Het afvalwatersysteem van Apeldoorn bestaat uit de pompgebieden Apeldoorn Oost, West en enkele omliggende dorpen. De AWZI bevindt zich aan de noordelijke rand van de stad. Het afvalwater van Apeldoorn Oost en West wordt grotendeels onder vrij verval naar deze zuivering getransporteerd. De omliggende dorpen wateren af middels persleidingen.



Figuur 6.1: Afvalwatersysteem Apeldoorn

De stadskern van Apeldoorn kan ook worden opgedeeld in verschillende pompgebieden. Zo bestaat Apeldoorn Oost uit de gebieden De Maten Noord en Zuid, Zevenhuisen en Osseveld/Woudhuis. Het westelijke deel van Apeldoorn kan

worden opgedeeld in de pompgebieden: Wormen, Malkenschoten, Berg en Bos en Stadhoudersmolen. In Apeldoorn West ligt een hoofdriool, dat ongeveer vanaf de kern van de stad, langs het Apeldoornse kanaal naar de zuivering loopt. Persleidingen uit omliggende gebieden, zoals ook uit Apeldoorn Oost komen in dit verzamelriool uit. Voor een schematische weergave van het gehele afvalwatersysteem en een bijbehorende tabel waarin ook de verschillen in soort stelsel en leiding zijn weergegeven, wordt verwezen naar bijlage 8.

Malkenschoten en Stadhoudersmolen zijn industriegebieden. Het stelsel in Malkenschoten bevat gescheiden en gemengde delen. Door een pompstation wordt het afvalwater Apeldoorn West ingepompt. Het industriegebied Stadhoudersmolen heeft een gescheiden stelsel. Een pompstation pompt het afvalwater door een persleiding naar het verzamelriool in de buurt van de zuivering.

Het verzamelriool heeft een capaciteit van 40.000 m^3/h en een rechthoekige doorsnede van 2,5 x 2,25 m^2. Onder normale omstandigheden wordt het afvalwater bij de zuivering door vier pompen met een maximale capaciteit van 12.000 m^3/h naar de zuivering gepompt. Bij neerslag kunnen nog eens drie extra pompen worden ingeschakeld, die het afvalwater in een voorraadbekken pompen.

6.3 Influentanalyse

Voor de analyse zijn influentgegevens beschikbaar van de periode mei 1996 t/m december 1999. Het gaat hier om 24-uurs-metingen. Er is ongeveer iedere 6 dagen gemeten, bij de toeloop naar het voorbezinkbassin. Helaas zijn geen metingen van zwevende stof beschikbaar. Voor alle parameters zijn de gemiddelde concentraties weergegeven in tabel 6.1. De gemeten vuilconcentraties zijn lager dan de CBS-waarden. Mogelijk vindt verdunning plaats door de infiltratie van water.

Tabel 6.1: Gemiddelde concentraties in het influent van Apeldoorn (mei '96-dec'99)

Parameters	Gemiddelde concentratie	CBS waarde
CZV	395	513
BZV	131	199
N-Kjeldahl	35	48
P	6	8
CZV/BZV	3,1	2,7
BZV/N	3,7	3,9

Ook verhoudingswaarden zijn bepaald. De verhouding CZV-BZV is hoger dan die gevonden wordt in 'vers' afvalwater, wat wijst op de afbraak van biologisch materiaal. De afwijking van de CBS-waarde is iets meer dan 15%. Voor de verhouding tussen BZV en N wordt een waarde gevonden van 3,7. De afwijking is dan slechts 3 %.

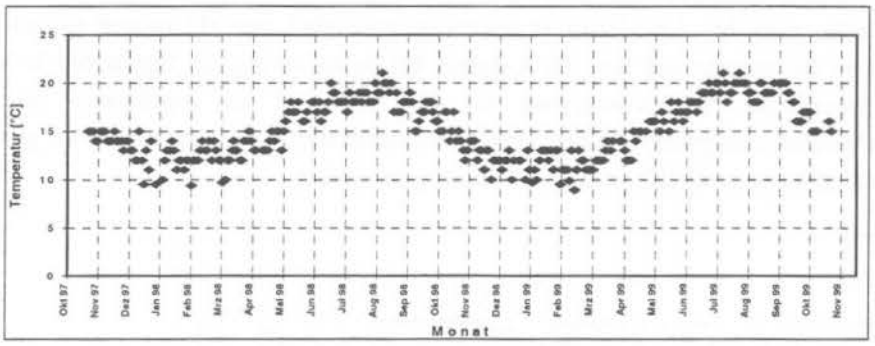
6.3.1 DWA/RWA analyse

De grens tussen de droogweerafvoer en de regenwaterafvoer is bepaald op de in voorgaande hoofdstukken getoonde manier. Alle afvoeren lager of gelijk aan 60.000 m^3/dag worden als DWA gedefinieerd. Splitsing van de gegevens laat

duidelijk afnemende concentraties bij neerslag en een toenemende totale vuilvracht (per dag) bij de zuivering zien. De verhouding tussen BZV en CZV lijkt redelijk constant. Dit kan betekenen dat het afvalwater bij regen weliswaar verdund wordt, maar dat dit niet leidt tot geringere afbraakprocessen. Er is wel een klein verschil waarneembaar in de BZV-N verhouding. De concentraties BZV zijn relatief lager bij droog weer, wat juist veroorzaakt kan worden door een toename van afbraakprocessen.

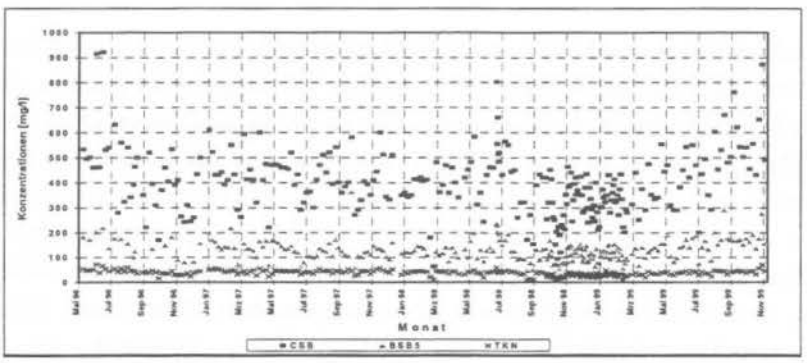
6.3.2 Seizoensanalyse

Bij de zuivering in Apeldoorn wordt de temperatuur in de beluchtingstank voor actief slib gemeten. In principe komt deze temperatuur redelijk overeen met die van het influent. Bij het uitzetten van de gemeten temperatuur tegen de tijd wordt een sinusachtig verband waargenomen, waarbij de piektemperatuur in de zomer zo'n tien graden verschilt met de daltemperatuur in de winter (zie figuur 6.2). Splitsing van de dataset in metingen gedaan in zomer en winter, laat zien dat de concentraties CZV en BZV in de zomer iets hoger zijn. De verhouding CZV/BZV is in de zomermaanden ook iets hoger dan in de winter. Dit betekent een grotere biologische activiteit, die wellicht verklaard kan worden door de hogere temperaturen.



Figuur 6.2: Het verloop van de temperatuur van het afvalwater in de beluchtingstank voor actief slib.

Uitzetten van de gemeten concentraties in het influent tegen de tijd, zoals in figuur 6.3, laat inderdaad concentratieschommelingen zien, maar schommelingen zoals die in de temperatuur plaatsvinden zijn niet terug te vinden. De spreiding van de gemeten concentraties is zo groot dat de aanwezige variaties niet in verband kunnen worden gebracht met de verschillende seizoenen.



Figuur 6.3: Concentratieverloop in het influent van Apeldoorn voor CZV, BZV en N

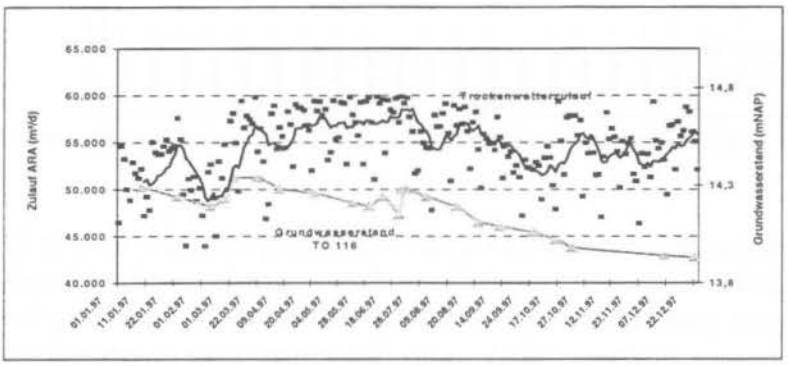
Uit de influentanalyse blijkt net als in voorgaande cases dat de omzettingsprocessen en de in-/exfiltratie in het stelsel nader te onderzoeken zijn. Er zijn geen metingen beschikbaar om iets te kunnen zeggen over sedimentatie- en mengingsprocessen.

6.4 Vervolgonderzoek

6.4.1 In-/Exfiltratie van water

Een zeer uitgebreid overzicht voor alle deelgebieden van het stelsel in Apeldoorn is beschikbaar, met afvalwaterbelastingen (in i.e.) en afvalwaterhoeveelheden per dag (Reuvers, 2000). De gemiddelde droogweerafvoer die bij de zuivering wordt gemeten, bedraagt 60.000 m^3/dag. Het industrieaandeel van de totale hoeveelheid afvalwater ligt iets boven de 30%. Een waterbalans is opgesteld aan de hand van het drink- en koelwaterverbruik. Het aandeel vreemd water blijkt ongeveer 40% van het totale influent te bedragen. Een berekening van het verdunningseffect door de vergelijking van stikstofconcentraties (hier berekend met een dagelijkse afvalwaterproductie van 140 liter per inwoner), geeft zelfs een aandeel vreemd water van 52%.

Waarschijnlijk komt vreemd water in het rioolstelsel terecht door de infiltratie van grondwater. Ook bij Apeldoorn is rekening gehouden met de relatie tussen het seizoen en de grootte van het DWA-debiet bij de zuivering. In figuur 6.4 is voor 1997 zowel de droogweerafvoer bij de zuivering in Apeldoorn als de grondwaterstand uitgezet. Dat een lage grondwaterstand een lage afvoer tot gevolg heeft is slechts gedeeltelijk in de grafiek terug te vinden.



Figuur 6.4: Droogweerafvoer naar de zuivering bij Apeldoorn en de grondwaterstanden voor 1997.

Het oudste stuk stelsel in Apeldoorn is uit 1934 en bevindt zich in het noorden van Apeldoorn West. Grote delen hiervan zijn inmiddels vervangen. Het huidige stelsel in Apeldoorn West dateert uit de 50-er jaren. Het stelsel in Apeldoorn Oost bestaat sinds 1960. Het rioolstelsel bestaat voor het overgrote deel uit ei-vormige buizen met lengte van 1 meter. De buizen zijn indertijd aaneengesloten met specie, maar men kan er vanuit gaan dat dit materiaal inmiddels is weggespoeld of uiteengebarsten. De infiltratie van grondwater vindt dan ook plaats via lekkende verbindingen, wat ook bevestigd wordt door de gemeente Apeldoorn. Bij een gemiddelde grondwaterinfiltratie van 24.000 m^3/dag, betekent dat een infiltratiesnelheid van 47 liter per dag per meter voeg. Hierbij is als uitgangspunt

genomen dat alle leidingen volledig onder de grondwaterstand liggen en dat er zich iedere meter een lekke verbinding bevindt.

De instroom van vreemd water heeft een groot verdunningseffect op het afvalwater dat bij de zuivering aankomt. In dit geval waren bij de influentgegevens ook concentraties nitriet en nitraat voor handen. Daarom zijn de influentmetingen vergeleken met de concentraties in het aangeleverde drinkwater. Een verband tussen de grondwaterinfiltratie en het gehalte nitraat en nitriet kon echter niet worden aangetoond. Bovendien wordt bij veel zuiveringen het geconcentreerde slib dat de zuivering verlaat, teruggevoerd naar het begin van de zuivering en gemengd met het influent. Een hoger nitriet- of nitraatgehalte kan dus ook hierdoor worden veroorzaakt.

6.4.2 Omzettingsprocessen

Aerobe situatie

Inventarisatie van de voor omzettingsprocessen relevante en beschikbare gegevens voor Apeldoorn leveren de volgende resultaten op:

Gemiddeld verval en lengte: Het gemiddeld verval bedraagt 3,65 ‰. Van de buizen heeft 90% een verval dat kleiner is dan 5 ‰ en 5% van de buizen heeft een verval kleiner dan 0,05 ‰. Het stelsel heeft een totale buislengte van 543.811 meter.

Buizen: Het stelsel bestaat uit 13.414 buizen. Het merendeel hiervan is rond, met een gemiddelde diameter van 389 mm. Simulaties in Hydroworks laten een gemiddelde waterstand bij DWA zien van 0,05 m. Andere parameters die volgen uit deze simulaties zijn weergegeven in tabel 6.2. De snelheid bij DWA is niet bekend.

Tabel 6.2: Resultaten van simulaties in Hydroworks voor Apeldoorn

Waterstand bij DWA	Contactvlak water/buis	Totaal wateroppervlak	Volume DWA
0.05 m	154.460 m^2	133.140 m^2	11.835m^3

Pompen en gemalen: Het afvalwater wordt bij de zuivering door vier pompen met een maximale capaciteit van 12.000 m^3/h naar de zuivering gepompt. De pompovercapaciteit bedraagt dan ongeveer 6.000 m^3/h. Bij neerslag kunnen nog eens drie extra pompen worden ingeschakeld om het afvalwater in een voorraadbekken te pompen. In tabel 6.3 zijn de verschillende pompcapaciteiten weergegeven. Het stelsel heeft een ledigingstijd van iets meer dan 8 uur.

Tabel 6.3: Pompcapaciteiten in het stelsel van Apeldoorn

	Capaciteit (m^3/h)
Pompen naar zuivering	12.000
Pompen naar voorraadbekken	27.000
Totaal	39.000

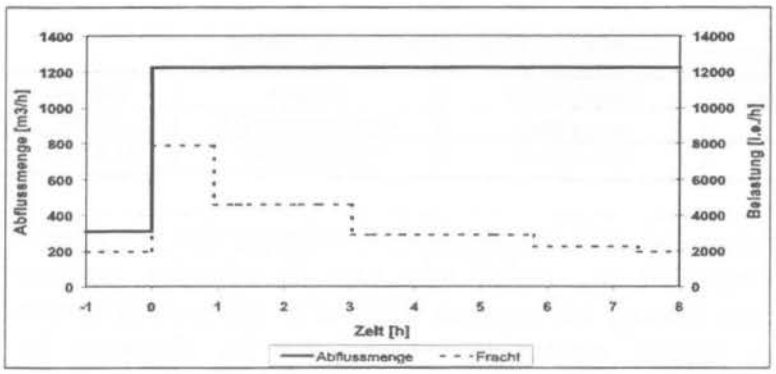
De biofilmactiviteit is berekend bij een CZV belasting van 116 g/inw*d voor 270.000 i.e. Bij de AWZI van Apeldoorn wordt bij droog weer een vuilvracht gemeten van 24.811 kg CZV per dag. Met een mogelijk biofilmoppervlak van

154.460 m^2, bedraagt de biofilmactiviteit 42 $g_{CZV} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. Dit is een erg hoge waarde in vergelijking met de normale waarde van 10 $g_{CZV} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. Natuurlijk blijft de vergelijking van de CZV vracht in vers afvalwater en in het influent lastig. De precieze samenstelling van het vers afvalwater is niet bekend en het doen van kwantitatieve uitspraken over de biologische activiteit is daarom niet mogelijk.

Anaerobe situatie

Omliggende dorpen lozen via persleidingen hun afvalwater op het verzamelriool in Apeldoorn. De totale lengte van de persleidingen bedraagt ca. 39 km en de gemiddelde diameter 432 mm. Het totale volume van de persleidingen is ongeveer 5.200 m^3. De droogweerafvoer die door persleidingen naar de zuivering wordt gepompt, heeft een grootte van ongeveer 600 m^3/h. Het aandeel afvalwater dat bij DWA door een persleiding stroomt, bedraagt dan ongeveer 20%. Bij droog weer is de verblijftijd van het afvalwater in de persleiding Emst-Vassen-AWZI ongeveer 13 uur en voor de persleiding Veldhuizen-Loenen-Beekbergen-Osseveld/Woudhuis-AWZI ongeveer 27 uur. Bij neerslag kunnen deze tijden worden teruggebracht tot 3,5 respectievelijk 7,5 uur (Reuvers, 2000).

In figuur 6.5 is globaal het verloop te zien van een prop die aanwezig is in de persleiding uit Beekbergen. Uitgangspunt bij de berekening was dat bij het begin van een regenbui, de pomp direct op volle capaciteit werkt (in de werkelijkheid gebeurt dit stapsgewijs). De grafiek laat een sterke stijging in vuilvracht zien aan het begin van de bui en een daling van de vracht gedurende het verloop van de bui. Door de vereenvoudigingen die bij het maken van de grafiek gedaan zijn, kan dit niet gezien worden als een kwantitatieve weergave van de gebeurtenissen. Verdere uitspraken over de omzettingen die specifiek binnen persleidingen plaatshebben kunnen niet gedaan worden omdat er te weinig gegevens beschikbaar zijn.



Figuur 6.5: Persleiding vanuit Beekbergen

6.5 Slotanalyse

In Apeldoorn lozen ongeveer 150.000 inwoners en twee industriegebieden hun afvalwater op het rioolstelsel. Daarbij watert nog een aanzienlijk aantal persleidingen uit omliggende gebieden af op het verzamelriool van Apeldoorn West. Dit verzamelriool heeft een capaciteit van 40.000 m^3/h en transporteert het water onder vrij verval naar de zuivering.

De concentraties die in het influent van Apeldoorn gemeten worden, zijn lager dan het door het CBS vastgestelde landelijk gemiddelde. De gemiddelde verhoudingswaarden wijzen op de afbraak van biologisch materiaal. Deze verhoudingsgetallen laten een grotere biologische activiteit zien in de zomer, die verklaard kan worden door de hogere temperaturen. De spreiding van de gemeten concentraties is echter zo groot dat de aanwezige variaties uiteindelijk niet in verband kunnen worden gebracht met seizoensinvloeden. Voor Apeldoorn zijn (net als in Haarlem en Zaandam) de in-/exfiltratie processen en omzettingen van biologisch materiaal binnen het riool nader onderzocht. Het was niet mogelijk uitspraken te doen over sedimentatie- of mengingsprocessen, omdat de juiste metingen ontbraken.

Een beschrijving van de oorzaak en samenhang van de infiltratie van vreemd water is relatief gedetailleerd mogelijk. Hierbij kan een duidelijke relatie tussen de riooleigenschappen (in het bijzonder de toestand van het kanaal en de waterdichtheid) en het aandeel vreemd water worden vastgesteld. Waarschijnlijk infiltreert ongeveer 24.000 m^3 grondwater per dag door ondichte verbindingen in het stelsel van Apeldoorn West. Aangenomen wordt dat er ook een verband bestaat tussen de grondwaterstand en de infiltratiehoeveelheid. Het aandeel vreemd water beïnvloedt duidelijk de kwantitatieve opbouw van het afvalwater in het influent.

De gebrekkige of soms zelfs ontbrekende metingen maken de beoordeling van de biologische activiteit in het riool lastig. Vastgesteld kan worden dàt er sprake is van biologische afbraak. Aan de hand van simulaties zijn ook bij deze case schattingen gedaan van de biologische activiteit. In het stelsel van Apeldoorn bevindt zich een groot aantal persleidingen. Bij neerslag kan daardoor een vuilprop bij de zuivering worden waargenomen. Wat betreft anaerobe processen kunnen geen kwantitatieve uitspraken worden gedaan.

Hoofdstuk 7: Vergelijking van de cases

7.1 Inleiding

Drie casestudies zijn uitgevoerd naar de rioolstelsels in Haarlem Zuidoost, Zaandam-Oost en Apeldoorn. Het influent is geanalyseerd door de concentraties CZV, BZV, N, P en TSS en de verhoudingen tussen CZV/BZV en BZV/N te onderzoeken. Ook Stelselparameters als het verval, het buisvolume en het aantal persleidingen zijn geïnventariseerd en o.a. het mogelijk biofilm- en waterspiegeloppervlak zijn berekend. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze casestudies onderling vergeleken, door te zoeken naar overeenkomsten en verschillen in de samenstelling van het influent en de kenmerken van de rioolstelsels. Bij de case Zaandam dient te worden opgemerkt dat het influent het DWA debiet van drie randgemeenten bevat, maar dat deze randgemeenten niet zijn meegenomen in de stelselanalyse. Verder wordt een overzicht gegeven van alle beperkingen, onzekerheden en onnauwkeurigheden die binnen het onderzoek een rol hebben gespeeld. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een toekomstvisie, waarin de noodzaak voor aanvullend onderzoek wordt besproken.

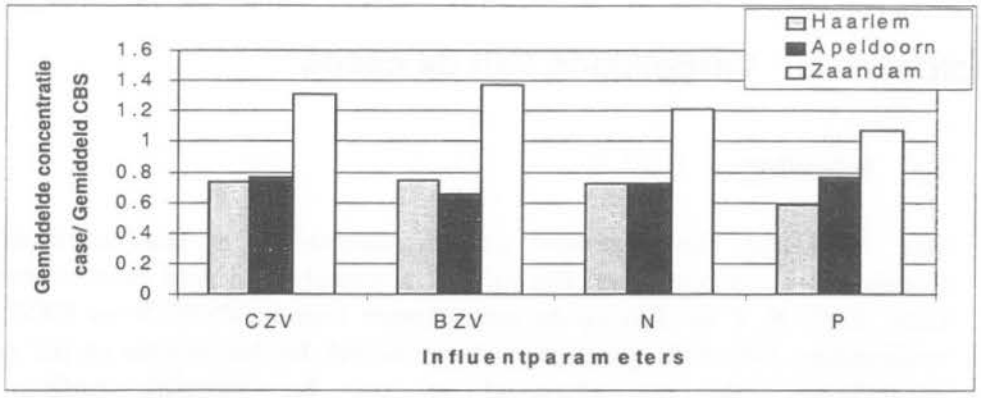
7.2 Vergelijking van het influent

In tabel 7.1 is voor iedere case het droogweerdebiet, de vracht CZV per dag, de concentratie CZV in het afvalwater en het totale buisvolume van het rioolstelsel weergegeven. Het DWA debiet dat bij de zuivering van Zaandam en Haarlem aankomt is vergelijkbaar in grootte. Het stelsel in Haarlem is echter wat betreft buisvolume, bijna vier keer zo groot als dat in Zaandam. Het stelsel in Apeldoorn heeft het grootste buisvolume en de grootste dagelijkse vuilvracht. De dagelijkse vuilvracht is het kleinst in Haarlem. Het verschil met Zaandam wordt veroorzaakt doordat de stofconcentraties in het afvalwater van Haarlem veel lager zijn.

Tabel 7.1: Kentallen van drie stelsels

	Haarlem	Apeldoorn	Zaandam
DWA debiet bij zuivering (m^3/dag)	16.949	60.000	15.094
CZV-vracht bij DWA (kg/dag)	6.946	27.960	9.781
CZV-concentratie bij DWA (mg/l)	377	395	674
Buisvolume van rioolstelsel (m^3)	75.493	366.136	20.409

Figuur 7.1 laat zien hoe de gemeten stofconcentraties zich verhouden tot het landelijk gemiddelde. De gemeten concentraties in Haarlem en Apeldoorn blijken redelijk overeen te komen. Opvallend is dat de gemeten concentraties in Haarlem en Apeldoorn 20-30% lager liggen dan gemiddeld, terwijl de concentraties in het afvalwater van Zaandam juist ongeveer 20% boven het landelijk gemiddelde liggen.



Figuur 7.1:Verhouding tussen de gemiddeld gemeten stofconcentraties in influent en de gemiddelde waarde zoals bepaald door het CBS.

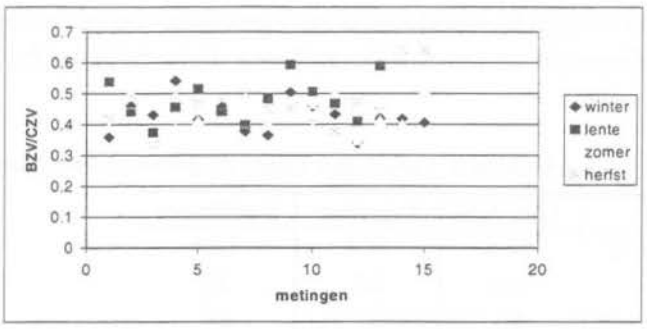
In tabel 7.2 zijn de gemeten stofconcentraties en verhoudingen CZV/BZV en BZV/N voor de drie stelsels weergegeven. De overeenkomst in stofconcentraties bij Haarlem en Apeldoorn is opnieuw te zien. De gemeten concentraties in Zaandam liggen voor alle stoffen ver boven de landelijk gemiddelde waarde.

Tabel 7.2: Gemiddelden van concentraties (mg/l) en verhoudingen van drie stelsels

	Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
CZV	377	674	395
BZV	148	273	131
N-Kjeldahl	35	58	35
P	5	8	6
CZV/BZV	2.6	2.4	3
BZV/N	4.3	4.7	3.7

De verhoudingsgetallen in Apeldoorn verschillen significant (meer dan 10%) van de CZV/BZV en BZV/N verhoudingen in Haarlem en Zaandam. Bij alle stelsels is de gemiddelde waarde voor de verhouding CZV/BZV hoger dan die in vers afvalwater. Het water bij de zuivering van Apeldoorn heeft echter een lagere biologische afbreekbaarheid dan het afvalwater van de andere twee stelsels. Dit wijst op hogere omzettingen van biologisch afbreekbaar materiaal. Dit wordt bevestigd door een BZV/N waarde die veel lager is dan in vers afvalwater. De verhouding BZV/N ligt in Apeldoorn dicht bij het landelijk gemiddelde, in tegenstelling tot de waarden in Haarlem en Zaandam.

In geen van de drie casestudies blijkt het mogelijk seizoensinvloeden aan te tonen. Stofconcentraties worden vooral beïnvloed door de afvoergrootte: de hoogste concentraties worden in alle gevallen gemeten in het droogste seizoen, wat niet in altijd ook het warmste seizoen is. Lage concentraties worden gemeten in het seizoen waarin de meeste neerslag valt. Een relatie met de temperatuur kan daardoor niet worden vastgesteld. De spreiding in verhoudingsgetallen is in alle seizoenen groot, zoals te zien is in figuur 7.2. Bovendien is het moeilijk eenduidige resultaten te vinden: In Apeldoorn en Zaandam wordt een hogere BZV/N verhouding gemeten in de zomer terwijl de biologische afbreekbaarheid van het afvalwater nauwelijks verandert.



Figuur 7.2 (zie ook figuur 5.13):Verhouding BZV/CZV in Zaandam-Oost voor vier seizoenen (1997)

7.3 Vergelijking stelselparameters

Uit de vergelijking van de influentanalyses blijkt dat stofconcentraties in het afvalwater van Haarlem en Apeldoorn redelijk overeenkomen. De eerder uitgevoerde stelselanalyses zijn daarom ook vergeleken. Het stelsel in Apeldoorn is op alle gebieden groter dan dat in Haarlem Zuidoost. Veel van de voor Apeldoorn gekwantificeerde parameters blijken zelfs een veelvoud te zijn van diezelfde parameters in Haarlem. Om vergelijking van de stelselparameters mogelijk te maken worden de volgende verhoudingsgetallen geïntroduceerd

$$\alpha = \frac{Q_{DWA}}{L_{buis}} \qquad [m^2/dag] \qquad (7.1)$$

$$\beta = \frac{Q_{DWA}}{Q_{pomp}} \qquad [-] \qquad (7.2)$$

waarin:
Q_{DWA} = DWA-debiet (m^3/dag)
L_{buis} = totale buislengte van het stelsel (m)
Q_{pomp} = pompcapaciteit van het gemaal (m^3/h)

In tabel 7.3 zijn stelselparameters weergegeven waarvan de waarden voor Haarlem en Apeldoorn het meest overeenkomen.

Tabel 7.3: Stelselparameters voor drie stelsels. Grootste overeenkomst tussen Haarlem en Apeldoorn

		Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
Influent:	α (m^2/dag)	0,11	0,13	0,11
	β	5,1	6,2	5,0
Stelsel - parameters:	Aandeel lekwater (%)	36	21	40
	DWA waterhoogte	0,06	0,14	0,05

Er zijn ook verschillen tussen de twee stelsels te ontdekken. In tabel 7.4 staan stelselparameters waarvan de waarden in Haarlem en Apeldoorn juist erg verschillen.

N.B: Het aandeel van persleidingen in Apeldoorn is veel groter dan bij beide andere stelsels, maar alle persleidingen in en om Apeldoorn lozen uiteindelijk op het vrij verval stelsel dat is onderzocht.

Tabel 7.4: Stelselparameters voor drie stelsels. Verschillen tussen Haarlem en Apeldoorn

	Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
Aandeel industrieel DWA (%)	20,6	14,8	12,5
Gemiddeld verval (‰)	2,6	2,4	3,7
Aandeel persleidingen (%)	5,1	32	20
Ledigingstijd (h)	15,4	10	8,1

In het influent van Haarlem en Zaandam blijken juist de verhoudingsgetallen CZV/BZV en BZV/N veel overeenkomsten te vertonen. In tabel 7.5 is daarom opnieuw een aantal stelselparameters weergegeven, waarbij dit maal de nadruk ligt op de overeenkomsten tussen de stelsels in Haarlem en Zaandam.

Tabel 7.5:Stelselparameters voor drie stelsels. Grootste overeenkomst tussen Haarlem en Zaandam

	Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
DWA-debiet (m^3/d)	15.232	15.094	60.000
Aantal inwoners	52.900	55.213	150.000
Gemiddeld verval (‰)	2,7	2,4	3,7
Buislengte (m)	136.487	115.059	543.811
Biofilmactiviteit (g/m^2*d)	4,5	7	28
Zuurstofoverdracht (m/h)	0,034	0,04	-

Tabel 7.6 laat de parameters zien met de meest opvallende verschillen tussen beide stelsels. In Zaandam wordt een met Haarlem vergelijkbare hoeveelheid influent bij DWA naar de zuivering getransporteerd, afkomstig van ongeveer dezelfde hoeveelheid inwoners, door een korter stelsel met een veel kleiner volume. De gemiddelde waterstand bij DWA is daarom ook hoger in Zaandam, wat weer van invloed is op het oppervlak van de waterspiegel en de mogelijke biofilm. De verschillen in stofconcentraties worden veroorzaakt door onbekende industriële lozingen in Zaandam en door het hoge aandeel lekwater in Haarlem.

Tabel 7.6: Stelselparameters voor drie stelsels. Verschillen tussen Haarlem en Zaandam

	Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
Totaal volume (m^3)	75.492	20.409	366.136
Aandeel lekwater (%)	36	21	40
Bergingsrendement* (%)	39	78	10
Aandeel persleidingen (%)	5	32	20
Gemiddelde verblijftijd (h)	4.6	11	-
Gemiddelde DWA waterstand (m)	0,06	0,14	0,05
Totaal volume DWA (m^3)	2.185	3.038	11.835
Aandeel ei-vormige buis (%)	59	9	14

**: Bergingsrendement = Totale onderdrempel berging/Totaal buisvolume*

De samenstelling van het afvalwater in Apeldoorn heeft een lagere biologische afbreekbaarheid en BZV/N waarde dan beide andere stelsels. Het stelsel in Apeldoorn valt op door de volgende kenmerken:

- Grootte van het stelsel (grootte van het debiet, inwonersaantal, buislengte, pompcapaciteit, totaal waterspiegeloppervlak, totaal raakvlak water/buis)
- Groot verval
- Laag aandeel industriële DWA
- Hoge biofilmactiviteit

Een laatste belangrijke parameter is de verhouding tussen het volume van de droogweerafvoer en het waterspiegeloppervlak. Deze parameter is van invloed op de reaeratie in het rioolstelsel en daarmee op de omzettingsprocessen. De volgende verhoudingsgetallen worden geïntroduceerd

$$\chi = \frac{\sum V_{DWA}}{\sum A_{waterspiegel}} \tag{7.3}$$

$$\delta_{buis} = \frac{V_{DWA}}{A_{waterspiegel}} \tag{7.4}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta \tag{7.5}$$

Tabel 7.7: Relatie tussen volume DWA en het waterspiegeloppervlak voor drie stelsels

	Haarlem	Zaandam	Apeldoorn
χ	0,07	0,12	0,09
ε	0,037	0,051	-

De waarden in Haarlem zijn lager dan in Zaandam, wat wijst op een relatief groter wateroppervlak dan DWA volume zodat meer uitwisseling van zuurstof kan plaatsvinden (al eerder te zien aan de lagere waterstand bij DWA). In bijlage 11 zijn de berekende waarden voor δ_{buis} uitgezet in een histogram voor de stelsels in Haarlem en Zaandam. Hieruit wordt afgelezen dat in Zaandam juist meer buizen met een lagere δ_{buis} aanwezig zijn, waardoor de reaeratie daar mogelijk groter is. Zaandam heeft echter ook een aantal extreme waarden waardoor χ en ε hoog uitvallen. Het trekken van algemene conclusies is niet mogelijk in dit geval, omdat de resultaten weinig uiteenlopen en niet eenduidig zijn. Het feit dat de spreiding van de verhoudingswaarden nuttige informatie oplevert is echter wel van belang.

Conclusies

Parameters die volgens de voorgaande stelselvergelijking van invloed kunnen zijn op stofconcentraties in het influent zijn:

- de verhouding tussen DWA debiet en de totale buislengte
- de verhouding tussen DWA debiet en pompcapaciteit van het gemaal
- de hoogte van de gemiddelde waterstand bij DWA
- de verhouding tussen volume en waterspiegeloppervlak en het aandeel vreemd water dat het stelsel infiltreert.

De stofconcentraties werden al in het protocol (hoofdstuk 3) gekoppeld aan eventuele in-/exfiltratie processen.

Voor de verhoudingen tussen CZV/BZV en BZV/N zijn juist stelselparameters als het verval en de buislengte van invloed. Uit de eerder behandelde theorie bleek al dat de reaeratie wordt verhoogd door turbulentie effecten binnen het riool. De turbulentie is groter bij buizen met een hoog energieverhang. De zuurstofopname en daarmee de afbraak van organisch materiaal neemt op deze manier toe. Ook een hoge biofilmactiviteit wijst op een hogere afbraak (getuige de resultaten Apeldoorn).

Bij het beoordelen van de casevergelijking moet rekening worden gehouden met de beperkingen van de metingen die tijdens dit onderzoek beschikbaar waren. Ook bestaan onzekerheden m.b.t. enkele van de gekozen uitgangspunten. Tenslotte treden onnauwkeurigheden op bij het uitvoeren van berekeningen.

7.4 Beperkingen, onzekerheden en onnauwkeurigheden

7.4.1 Beperkingen

In de eerste hoofdstukken van dit rapport is in kaart gebracht welke gegevens nodig zijn om processen en hun invloeden op de samenstelling van het influent te kunnen beoordelen. Inmiddels is aan de hand van drie caseanalyses bekend welke kennis en gegevens op dit moment beschikbaar zijn. De beperkingen in de beschikbare metingen zijn geïnventariseerd

- De metingen zijn met een onregelmatig tijdsinterval gedaan.
- Er zijn weinig metingen van de concentratie zwevende stof beschikbaar.
- De temperatuur wordt niet gemeten.
- Er wordt slechts één maal per dag gemeten.
- Er zijn weinig neerslagmetingen beschikbaar. Als de neerslag wordt gemeten, gaat het slechts om de hoeveelheid die per dag is gevallen. Er is geen informatie over het tijdstip, de duur en de intensiteit van buien.
- De influentmetingen bij Zaandam Oost zijn inclusief het debiet van drie persleidingen van omliggende gebieden. Deze gebieden vallen echter niet onder de stelselomschrijving (model en rapporten) en meer informatie dan de drie afzonderlijke debieten was niet beschikbaar.
- De beschikbare gegevens bevatten geen kwantitatieve en kwalitatieve informatie over het grondwater (jaarlijks verloop, plaatselijke gegevens) en wat betreft persleidingen zijn bijna alleen debietgegevens bekend.
- Gegevens met betrekking tot de staat waarin het riool verkeert zijn beperkt.
- Er zijn geen metingen beschikbaar van de afvalwatersamenstelling aan het eind van persleidingen, waardoor het niet mogelijk is first flush of propstromingsverschijnselen aan te tonen.

7.4.2 Onzekerheden

De verschillende influentanalyses zijn gebaseerd op een aantal uitgangspunten. Deze uitgangspunten kunnen van grote invloed zijn op de resultaten van de

influent- en stelselanalyse. In sommige gevallen bestaat onzekerheid over de gekozen uitgangspunten, waarbij het vooral gaat om een aantal van de gekozen vergelijkingswaarden:

- Als vergelijkingswaarde voor stofconcentraties in het influent zijn gemiddelde landelijke concentraties zoals bepaald door het CBS aangehouden. De infiltratie van vreemd water echter, is een in Nederland veel voorkomend probleem, waardoor de gemiddelde landelijke waarden wel eens aan de lage kant kunnen zijn. De afwijking lijkt daardoor wellicht groter dan in werkelijkheid.
- Bij de vergelijking van verhoudingsgetallen in de DWA wordt 'vers' afvalwater gebruikt. Hoewel deze waarden redelijk betrouwbaar zijn, blijven het theoretische waarden en kan niet gezegd worden hoe het vers afvalwater bij een specifiek stelsel er in werkelijkheid uitziet.
- Bij de berekening van de droogweerafvoer en het aandeel lekwater is uitgegaan van een vast zuurstofbindend vermogen en productie N-Kjeldahl per inwoner per dag. Alle berekeningen zijn verder gebaseerd op een afvoer van 120 liter per inwoner per dag. Uit literatuuronderzoek blijkt dat voor alle kentallen dikwijls ook andere waarden worden gehanteerd. Dit kan een behoorlijke invloed hebben op het debiet dat het stelsel volgens berekeningen instroomt, zoals te zien is in tabel 7.8.

Tabel 7.8: Gevonden range voor verschillende uitgangswaarden en de maximale doorwerkende fout die daarbij hoort.

Parameter	Uitgangswaarde	Range	range afwijking
Zuurstofbindend vermogen	136 g/inw*dag	136-175	0%-22%
Produktie N-Kj	12 g/inw*dag	7-12	52%-0%
Afvalwaterproductie	120 l/inw*dag	120-140	0%-14%

- Waterschappen en ingenieursbureaus gebruiken nogal eens verschillende waarden voor het aantal inwonerequivalenten dat per gebied op een zuivering loost. Het is moeilijk in te schatten welke van de twee waarden in zo'n geval het meest accuraat is. Bovendien kan door het uitdrukken van de vervuiling in inwonerequivalenten, alleen de ingaande concentratie CZV en N worden weergegeven.

7.4.3 Onnauwkeurigheden

Tot slot is een overzicht gemaakt van de onnauwkeurigheden die zich in de uitgevoerde berekeningen bevinden. Deze zijn grotendeels te herleiden naar de simulaties in Hydroworks en de berekeningen die daarop volgen. Gedeeltelijk wordt dit veroorzaakt doordat gerekend is met een model, dat altijd een vereenvoudiging is van de werkelijkheid.

- Voor de waterstand bij DWA wordt de maximale gemiddelde waterhoogte aangehouden. Het dynamische karakter van de DWA wordt bij de berekening van stelselparameters dus niet meegenomen. Daarom is een continue droogweerafvoer gesimuleerd. Er zijn dus geen pieken of dalen in hoeveelheid of samenstelling waarneembaar, in tegenstelling tot de werkelijkheid.

- Hydroworks houdt vast aan een minimale buiswaterstand van 0,001meter en wordt bij kleinere waarden instabiel. Een toelichting is opgenomen in bijlage 11.
- Om parameters als het biofilm- en wateroppervlak te kunnen berekenen is een aantal vereenvoudigingen gedaan. Zo is voor ei-vormige profielen een vervangende straal berekend (zie hiervoor bijlage 6). Deze vervangende straal geeft de situatie bij DWA goed weer tenzij de waterstand, berekend in de simulatie, hoger is dan de vervangende buisdiameter. Aan de hand van de opgestelde formules is het dan niet mogelijk voor deze buizen een biofilm- of waterspiegeloppervlak en DWA volume te berekenen en is de waarde '0' aangehouden. Zo wordt bij 2,8% van de buizen een nulwaarde gevonden. Invullen van per buis gemiddelde waarden voor het biofilm- of waterspiegeloppervlak en het DWA volume bij buizen met te hoge waterstanden, levert eindresultaten op die 2,9% hoger zijn dan de eerder gevonden waarden.
- In Zaandam blijkt 15% van de totale hoeveelheid buizen een waterstand te hebben groter dan de hoogte van de buis. Eventuele fouten in de simulatie zijn gecontroleerd, maar waarschijnlijk ligt de oorzaak in de grote hoeveelheid verloren berging die het stelsel in werkelijkheid bevat. Bij de berekening van het biofilm- en waterspiegeloppervlak en het volume DWA is ook voor deze buizen een nulwaarde aangehouden. Het is niet duidelijk wat de gevolgen hiervan zijn voor de omzettingsprocessen in het stelsel. Om een indicatie te krijgen van de onnauwkeurigheid van de berekening zijn het totale biofilmoppervlak, waterspiegeloppervlak en DWA volume berekend voor twee alternatieve berekeningswijzen:
  - Voor dezelfde simulatie zijn de pijpen met een waterstand groter dan de buishoogte gemodelleerd als pijpen met een gemiddelde vulling. Het totaal biofilmoppervlak, waterspiegeloppervlak en DWA volume neemt hierdoor toe.
  - Bij dezelfde simulatie worden de kritische pijpen als volledig gevuld beschouwd. Dit betekent dat het waterspiegeloppervlak in deze buizen nul is. Het totaal biofilmoppervlak en DWA volume zijn meer dan 2 respectievelijk 3 keer zo groot geworden. De resultaten zijn opgenomen in tabel 7.9.

Tabel 7.9: Mogelijke waarden voor stelselparameters in Zaandam

Uitgangspunt	Totaal biofilm-oppervlak (m^2)	Totaal waterspiegel-oppervlak (m^2)	Totaal DWA Volume (m^3)
Nulwaarde	33.073	26.217	3.038
Gemiddeld gevulde buizen	38.714	30.688	3.556
Geheel gevulde buizen	73.597	26.217	11.343

- Het computermodel voor het stelsel in Zaandam werd aangeleverd in MOUSE en is geconverteerd naar Hydroworks. Bij deze conversie kan informatie over bijvoorbeeld overstorten en pompen verloren zijn gegaan.
- Aan de hand van diffusie- en dispersievergelijkingen kan de leeftijd van afvalwater worden bepaald, waaruit de verblijftijd van afvalwater in een rioolstelsel volgt. Omdat in dit geval alleen gebruik werd gemaakt van de

hydraulische module van Hydroworks zijn routes geselecteerd, waarvan per buis stroomsnelheid en lengte is achterhaald. De totale verblijftijd is daarna handmatig berekend aan de hand van de som van alle afzonderlijke verblijftijden. Dit is een zeer arbeidsintensieve en tijdrovende bezigheid, waardoor mogelijk fouten zijn opgetreden. Bovendien kon slechts een beperkt aantal routes worden doorgerekend. Het is daarom de vraag of het gemiddelde van deze routes representatief is voor het hele stelsel.

- In werkelijkheid komen dikwijls gedeeltelijk gevulde hellende buizen voor. De manier waarop in die situaties het watervolume en het waterspiegel- en biofilmoppervlak moeten worden bepaald is gecompliceerd (zie bijlage10). Bij de uitgevoerde vervolgberekeningen is gerekend met een maximale gemiddelde waterstand zodat dit buiten beschouwing gelaten kon worden.
- Voor de berekening van de zuurstofoverdracht is gekeken naar een voor het stelsel 'gemiddelde' buis en niet naar een daadwerkelijk bestaande buis. Bovendien is in alle gevallen gerekend met het buisverval i.p.v met het energieverhang.

7.5 Toekomstvisie

Het protocol is inmiddels door twee onderzoekers getest bij het analyseren van drie cases en zover mogelijk geperfectioneerd. Het kan dan ook in de nabije toekomst worden gebruikt bij de analyse van andere stelsels. Dit hoofdstuk liet zien dat een aantal onzekerheden binnen het onderzoek een rol speelt. Het is wellicht nodig een aantal uitgangspunten en de rekenmethode kritisch te bekijken en eventueel aan te passen. Hierbij wordt gedacht aan de voor het influent gebruikte vergelijkingswaarden zoals bepaald door het CBS of de afvalwaterproductie per dag.

Bij de analyse van een beperkt aantal nieuwe cases, worden bij voorkeur cases geselecteerd met minimale verschillen zodat de hoeveelheid parameters die van invloed is, beperkt blijft. Zoals uit dit hoofdstuk blijkt, kunnen cases worden geselecteerd met een vergelijkbare verhouding tussen influentdebiet en lengte of pompcapaciteit van het stelsel, zoals de stelsels in Haarlem en Apeldoorn. Opnieuw gaat de voorkeur uit naar diepteonderzoek. Daarom is het aan te raden te investeren in het verkrijgen van aanvullende informatie over cases, bijvoorbeeld door het doen van metingen. Dit in tegenstelling tot het analyseren van een grote hoeveelheid cases. Natuurlijk is al een hoeveelheid gegevens beschikbaar over de reeds bestudeerde stelsels. De nadruk kan daarbij liggen op de verbanden gevonden binnen dit onderzoek, zoals de invloed van het verval van een stelsel op de verhoudingen tussen stofconcentraties in het influent.

Hoofdstuk 8: Conclusies en aanbevelingen

In dit afstudeeronderzoek is geprobeerd inzicht te verkrijgen in de wijze waarop en de mate waarin processen binnen de riolering van invloed zijn op de influentsamenstelling door de analyse van beschikbare gegevens. Aspecten van de riolering, die van invloed kunnen zijn op de samenstelling van het afvalwater, zijn geïnventariseerd aan de hand van opgedane kennis uit een literatuurstudie en met hulp van deskundigen. Hieruit is een lijst ontstaan met ongeveer 75 invloedsaspecten. Bij deze aspecten is onderscheid gemaakt in aspecten die als 'opgelegd' worden beschouwd en aspecten die beïnvloed worden door het ontwerp en beheer van een stelsel. Aan de hand van deze invloedsaspecten is een protocol opgesteld, om bij de gegevensanalyse verzekerd te zijn van een systematische en eenduidige aanpak. Drie casestudies zijn uitgevoerd naar de stelsels van Haarlem Zuidoost, Zaandam Oost en Apeldoorn. Hierbij is gekeken naar influentmetingen van de zuivering en stelselgegevens van de riolering. Tijdens de literatuurstudie en bij het opstellen van het protocol is geprobeerd zo duidelijk mogelijk weer te geven welke gegevens nodig zijn om processen en hun invloeden op de influentsamenstelling te kunnen beoordelen. De drie casestudies en hun onderlinge vergelijking hebben een beeld verschaft van de kennis en gegevens die op dit moment beschikbaar zijn. De conclusies en aanbevelingen die uit het onderzoek volgen zijn in dit hoofdstuk weergegeven.

8.1 Conclusies

Bij het opstellen van het protocol is een aantal hypothesen geformuleerd, met als uitgangspunt de probleem- en doelstelling. Die hypothesen worden nu getoetst aan de hand van de onderzoeksresultaten.

Hypothese 1: Binnen het riool vinden processen plaats die de samenstelling van het afvalwater significant beïnvloeden.

Uit literatuur blijkt dat in het riool omzettingsprocessen, sedimentatieprocessen en mengingsprocessen plaatsvinden die van invloed zijn op de samenstelling van het afvalwater dat bij de zuivering aankomt. Ook de in- dan wel exfiltratie van water kan de samenstelling van het influent beïnvloeden

Hypothese 2: Karakteristieke eigenschappen van een rioolstelsel zijn van invloed op deze processen.

In de literatuurstudie komt naar voren dat voor omzettingsprocessen de zuurstof-concentratie van groot belang is. Deze is afhankelijk van parameters als de waterstand en stroomsnelheid van het water die bepaald wordt door kanaaleigenschappen als de lengte en vorm van de buizen. Bij sedimentatie en erosie spelen vooral stroomkarakteristieken als de stroomsnelheid, turbulentie en schuifspanning een rol, die bepaald worden door stelseleigenschappen als het verval en de buisparameters. De aanwezigheid van bergingstanks en persleidingen

en hun manier van aansluiten is van invloed op de mate van menging tussen DWA en RWA die in een riool plaatsvindt. Voor de in-/exfiltratie van water is vooral de onderhoudstoestand van het riool van belang. Ondichte verbindingen, verzakkingen en scheuren maken het mogelijk dat grondwater het riool instroomt. Kapotte overstorten kunnen zorgen dat oppervlaktewater het riool inloopt. De processen die binnen een riool plaatsvinden worden dus zeker beïnvloed door de karakteristieke eigenschappen van het stelsel.

Hypothese 3: Door de analyse van influentmetingen en stelseleigenschappen is het mogelijk iets te zeggen over dit verondersteld verband

Met betrekking tot processen binnen het riool en de analyse van de influentsamenstelling, kan het volgende geconcludeerd worden:

- Omzettingsprocessen: Analyse van de beschikbare metingen levert een beeld op van het influent en omzettingsprocessen blijken bij beoordeling volgens het protocol significant aanwezig. Na een uitgebreide statistische analyse echter blijkt het niet mogelijk omzettingsprocessen eenduidig te relateren aan de influentgegevens.
- Sedimentatieprocessen: Het zwevende stof gehalte wordt in veel gevallen niet gemeten. Indien toch metingen beschikbaar zijn blijken de concentratieverschillen met vergelijkingswaarden niet significant. Met regressieanalyse is aan de hand van deze metingen nauwelijks een relatie aan te tonen tussen dagdebiet of neerslag en concentratie zwevende stof.
- Mengingsprocessen: Er zijn geen meetgegevens beschikbaar uit een periode waarin meerdere malen op dezelfde dag gemeten is en waarbij uitgebreide neerslaggegevens zijn geregistreerd. Het is daarom niet mogelijk uitspraken te doen over eventuele mengingsprocessen die binnen het riool plaatsvinden en de invloed hiervan op de influentsamenstelling.
- In-/exfiltratie: Infiltratie bleek bij alledrie de cases een significant proces. De mate van lekkage is redelijk te kwantificeren aan de hand van de beschikbare influentgegevens in combinatie met stelselgegevens. De infiltratie van grondwater bleek in dit onderzoek te zorgen voor een toename in het debiet en een verdunning van het afvalwater.
- Doordat in het influent zeer onregelmatig wordt gemeten, zijn uitgebreide analysetechnieken zoals een tijdreeksanalyse met de huidige meetreeksen niet mogelijk.
- De frequentie van monstername lag bij de beschikbare metingen ver onder de theoretische kritische tijdschaal van de processen. Het was dan ook niet mogelijk de kritische tijdschaal voor de significante processen aan te scherpen.

De volgende conclusies kunnen getrokken worden m.b.t. de stelselanalyse:

- Stelselparameters zijn met de verzamelde stelselgegevens redelijk te kwantificeren.
- Beschikbare gegevens over persleidingen zijn relatief beperkt, waardoor er weinig te zeggen is over het water dat in anaerobe toestand verkeert.
- De detaillering van de parameters is mogelijk met behulp van simulaties in Hydroworks en de nauwkeurigheid van de berekeningen kan zelfs verbeterd worden.

Samenvattend: Omzettings-, sedimentatie- en mengingsprocessen en de in-/exfiltratie van water die in een riool plaatsvindt, zijn van invloed op de samenstelling van het influent. Uit de literatuur blijkt dat deze processen indirect worden beïnvloed door kenmerken van een specifiek rioolstelsel als de stroomsnelheid, turbulentie en waterstand. Het blijkt met de beschikbare hoeveelheid influentgegevens echter niet mogelijk de verbanden tussen influent en processen, zoals seizoensinvloeden, te bevestigen. En hoewel het kwantificeren en detailleren van stelselparameters voor drie casestudies redelijk mogelijk is, wordt het aantonen van verbanden tussen de influentsamenstelling en stelselparameters daardoor praktisch onmogelijk.

Uit de vergelijking van de drie casestudies zijn tenslotte de volgende conclusies te trekken:

- De verhouding tussen DWA-debiet en lengte van een stelsel of pompcapaciteit van het gemaal, het aandeel water dat een stelsel infiltreert (of exfiltreert) en de DWA-waterstand lijken van invloed op de stofconcentraties in het influent.
- Het verval, de buislengte en de biofilmactiviteit blijken van invloed op de verhoudingen tussen stofconcentraties en daarmee op de omzettingsprocessen binnen het riool.

8.2 Aanbevelingen

De huidige meetwijze heeft vooral als uitgangspunt beheerdoeleinden. Hierbij wordt nauwelijks rekening gehouden met de procesvariatie, waardoor veel informatie verloren gaat. Het blijkt daardoor niet mogelijk aan de hand van de beschikbare metingen invloeden van verschillende processen op samenstelling van het influent eenduidig aan te tonen. Het probleem ligt dan ook niet alleen bij het kwantificeren van stelselparameters, of de nauwkeurigheid daarvan, maar bij het gebrek aan voldoende en de juiste influentmetingen. Zonder al te hoge kosten is het echter mogelijk de huidige meetwijze om te bouwen naar een meetwijze die ook van nut kan zijn bij optimalisatiestudies. Hierbij wordt gedacht aan:

Voor de inloop van het stelsel:

- Zo gedetailleerd mogelijk kwantificeren en kwalificeren van de industriële droogweerafvoer, door de watersamenstelling te bepalen, de hoeveelheid en de manier waarop geloosd wordt (continu of eens per dag een grote hoeveelheid).
- Niet de dagelijkse hoeveelheid neerslag meten, maar de neerslag als functie van de tijd, waardoor parameters als de intensiteit en buiduur bekend zijn.

Voor het rioolstelsel:

- Het uitbreiden en detailleren van stelselgegevens, bijvoorbeeld met betrekking tot de onderhoudstoestand, en het verhogen van de nauwkeurigheid aan berekeningen van parameters als het biofilmoppervlak en verblijftijd.
- Het inzicht in de mengingsprocessen die binnen het riool plaatsvinden vergroten door te meten aan de samenstelling van het water dat onder druk vervoerd wordt en informatie te verzamelen over de kenmerken van de persleidingen zelf.

Pas wanneer alle hydrologische informatie en stelselkenmerken beschikbaar zijn is het zinvol te gaan kijken naar de metingen aan het influent. De huidige meetwijze kan dan worden uitgebreid door:

- Het verloop van het debiet te registreren. Veel processen en parameters zijn gerelateerd aan de grootte van het debiet, maar dat komt niet naar voren uit de dagdebietmetingen die op dit moment beschikbaar zijn.
- De troebelheid en het zwevende stofgehalte te meten om sedimentatieprocessen in kaart te brengen. Troebelheidsmetingen verschaffen ondanks hun onnauwkeurigheid veel inzicht in het procesverloop. Ze zijn relatief goedkoop met een hoge frequentie uit te voeren, waardoor bijvoorbeeld een indicatie van de kritische tijdschalen wordt verkregen.
- Het verloop in primair slib productie te registreren, zeker in combinatie met het verloop in het debiet. In sommige gevallen worden deze metingen al gedaan, om bijvoorbeeld pompen aan te sturen, maar de gegevens worden vaak niet geregistreerd.

De frequentie van monstername is op dit moment gemiddeld 1 à 2 keer per week. De theoretische kritische tijdschaal om het hydraulisch gedrag van een stelsel te kunnen beschrijven ligt voor de DWA in een orde van grootte van 1000-5000 en bij neerslag worden de indicatieve waarden van 100-10.000 seconden voor vollopen en 1.000-50.000 seconden voor het leeglopen van een riool, aangehouden. Omdat het verschil tussen deze tijdschalen groot is, blijft het moeilijk de precieze tijdschaal voor toekomstige metingen aan te geven. De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Concentraties in het afvalwater kunnen om te beginnen tijdens DWA ieder uur worden gemeten en bij neerslag iedere 15 minuten.
- Verder onderzoek is nodig naar kritische tijdschalen van verschillende processen. Aan de hand van de waarnemingen bij de gekozen meetfrequentie en hun bruikbaarheid voor de analyse van processen in het stelsel, kunnen kritische tijdschalen steeds beter worden ingeschat.
- Door metingen met meer regelmaat te doen (vaste intervallen tussen metingen) worden de analysemogelijkheden uitgebreid.

Het opgestelde protocol is in de toekomst te gebruiken bij het doen van nieuwe casestudies. Hierbij gaat de voorkeur uit naar het selecteren van een klein aantal cases met minimale verschillen. Verbanden die uit de onderlinge casevergelijking naar voren kwamen kunnen daarbij nader worden onderzocht. Op het moment echter dat nieuwe metingen onderdeel worden van het onderzoek zal het nodig zijn een nieuwe onderzoeksaanpak te formuleren. Het protocol kan daarbij natuurlijk wel als uitgangspunt worden gebruikt.

Literatuurlijst:

Boeken en artikelen:

- **Almeida**, Maria do Céu de Sousa Teixeira, 1999. Pollutant transformation processes in sewers under aerobic dry weather flow conditions, PhD Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Londen, UK. .
- **Arcadis** Heidemij advies, 1999, Basisrioleringsplan Zaandam-Oost, Planperiode 1999-2005.
- **Bedford**, Tim, 1997. Technische Wiskunde 4, Collegedictaat Ctwi3730, TU Delft.
- **Berkhout**, J.M. Afstudeerrapport: Biogene zwavelzuur aantasting van beton in riolen, mei 1998. TU Delft
- **Clemens**, Francois H.L.R., 2001. Hydrodynamic models in urban drainage: application and calibration, Delft University Press.
- **Crabtree,** R.W., 1988. A classification of combined sewer sediment types and characteristics, WRc Engineering, Bericht ER 324 E
- **Davis**, J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- **Dufour**, F.C., 2000. Groundwater in the Netherlands, facts and figures. Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO.
- **Gemeente** Maastricht, Gemeentelijk rioleringsplan 1996-2000, november 1995
- **Graaf**, Prof.ir. J.H.J.M van der, 1995. Behandeling van afvalwater 1, Collegedictaat CTgz4480, TU Delft.
- **Hendriks**, Prof.dr.ir. Ch. F/Prof.dr. W.M.Jochems/m.m.v. Dr. R.F.M. Bakker, 1997. Onderzoekmethodologie, Collegedictaat Ctoz4030,
- **Henze**, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.v.R. en Matsuo, T., 1987. Activated Sludge Models, IAWPRC Scientific and Technical Report, No.1.
- **Horn**, dr. L.A. ten, mw. Drs. M. Wiethoff, 1999. Collegediktaat TB291 Interviewtechniek, TU Delft.
- **Huisman**, J.L, 2001. Transport and transformation processes in combined sewers, dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- **Jongmans**, A.G./Peek, G.J.W.C, 1996. Bodemkunde voor Civiel Ingenieurs, Collegedictaat CT, LU Wageningen.
- **Krebs,** P., Merkel en V. Kuhn, 1999. Dynamic changes in wastewater composition during rain runoff, pp. 920-927 in: Proceedings of the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage. Sydney: The Institution of engineers.
- **Leidraad** Riolering, Stichting Rioned, 1992. Onder redactie van W.A.Faber; met medewerking van A.J.H. de Beaufort, et al. Alphen aan de Rijn, Samsom H.D. Tjeenk Willink.
- **Langeveld**, Jeroen, 2000. Literatuuronderzoek, Sectie Gezondheidstechniek, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
- **Mulder**, Jan Willem, 1999. Bepaling hydraulische aanvoer bij droogweer AWZI Dokhaven; Bijlage 4
- **Nieuwenhuijzen**, ir. Arjen van, 2001. Fysisch Chemische voorzuivering van afvalwater, intern rapport van januari 2001, sectie Gezondheidstechniek, TU Delft.
- **Norsker**, N.H., Nielsen, P.H., Jacobsen, T.H., 1995. Influence of oxygen on biofilm growth and potential sulphate reduction in gravity sewer biofilm. Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No.7, pp. 159-167.
- **Reinsel**, Gregory C., 1993. Elements of Multivariate Time Series Analysis, Gregory C. Reinsel, Springer-Verlag New York, Inc
- **Ristenpart**, Erik, 1995. Feststoffe in der Mischwasserkanalisation. Vorkommen, Bewegung und Verschmutzungspotential, Schriftenreihe fur Städtentwasserung und

Gewässerschutz Hrsg. (Samenstelling Prof Dr.-Ing. F. Sieker. Universitäat Hannover, Institut fur Wasserwirtschaft, Hannover

- **Reuvers**, J. M. D., 2000. Interacties in het afvalwatersysteem van Apeldoorn, Afstudeeronderzoek, Sectie Gezondheidstechniek, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschapen, TU Delft
- **Schaum**, Christian A., 2001. Untersuchung der Prozessablaufe in der Kanalisation am Beispiel Apeldoorn., Sectie Gezondheidstechniek, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.
- **Schneider**, Klaus-Jürgen, 2001. Bautabellen für Ingenieure, 14. Auflage Werner-Verlag
- **Stein**, D.; Niederehe, W., (1992), Instandhaltung von Kanalisationen, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften Berlin
- **Stigter**, Lennard, 1999. Meetprogramma Riolering Deventer Noord - tijdreeksanalyse en gebiedsdekkende bepaling. Afstudeerrapport, TU Delft
- **STOWA**, 1998. STOWA rapport 1998-2
- **Tanaka**, N. ,1998. Aerobic/anaerobic process transition and interactions in sewers. PhD Dissertation, Environmental Engineering Laboratory, Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- **Urbaniak**, S. (1998): Belastungsschwankungen und ihre auswirkungen auf die Leistung von Abwasserreinigungsanlagen. Mitteilung no. 64, Institut für Wasserwesen, Universität der Bunderwehr München.
- **Waterkwaliteitsbeheer**, Zuivering van afvalwater 1998, Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg/Heerlen, 2000
- **Werkgroep** Riolering West-Nederland, Goed Functionerend Rioolstelsel, Hoofdrapport en deelrapporten fase 1,2 en 3, Heidemij advies, Juli 1994.
- **Wiggers**, Prof. Ir. J.B.M/ ir. J.G. Langeveld, 1998. Inzameling en transport van afvalwater I, Collegedictaat CTgz4490, TU Delft.
- **Witteveen** + Bos, Raadgevende Ingenieurs b.v., 1999, Globaal vuiluitworpreductieplan Haarlem Zuidoost, Deventer.
- **Wolff,** P., Reiff, H., 1996. Wachstum und Abtrag der Sielhaut in Mischwasserkanalen, aus Stoffaustrag bebauter Gebiete. Deutsche Forschungsgesellschaft, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.

Internet

- http://www.statsoftinc.com/textbook/sttimser.html#1general
- http://www.knmi.nl
- http://www.lrz-muenchen.de/~skript_wga/h_2_5_5.html

Lijst met afkortingen

AWZI	Afvalwaterzuiveringsinstallatie
BZV	Biologisch Zuurstofverbruik (mg/l)
CZV	Chemisch Zuurstofverbruik (mg/l)
DWA	Droogweerafvoer
i.e.	Inwonerequivalent
N-Kjeldahl	Kjeldahl stikstof (mg/l)
P	Fosfaat (mg/l)
Poc	Pompovercapaciteit
RWA	Regenwaterafvoer
TSS	Total Suspended Solids (zwevende stof gehalte (mg/l))
TZV	Totaal Zuurstofverbruik (CZV + N-Kjeldahl)

Lijst met begrippen

Aerobe omstandigheden
Toestand waarbij opgeloste zuurstof aanwezig is.

Anaerobe omstandigheden
Toestand waarbij geen onopgeloste zuurstof, nitraat of nitriet aanwezig is.

Anoxische toestand
Toestand waarbij geen opgeloste zuurstof maar wel nitraat en of nitriet aanwezig is.

Afvalwaterzuiveringsinstallatie (AWZI)
Een inrichting waar het rioolwater wordt ontdaan van een groot deel van de verontreinigingen.

Belastingsgraad
Deel van het totale buisvolume dat bij de afvoer gebruikt wordt.

Biologisch Zuurstofverbruik (BZV)
Concentratie van de opgeloste zuurstof die onder vastgelegde omstandigheden (in t dagen bij 20 graden Celsius met of zonder remming van de nitrificatie) wordt verbruikt voor biologische oxidatie van organische en /of anorganische stof in water.

Chemisch Zuurstofverbruik (CZV)
Concentratie van de verbruikte zuurstof bij de oxidatie met dichromaat onder vastgelegde omstandigheden van de stoffen die zich in een watermonster bevinden.

Droogweerafvoer (DWA)
Debiet op de AWZI dat bestaat uit huishoudelijk en industrieel afvalwater en eventueel vreemd water.

Gemengd stelsel
Riolering voor het gecombineerd afvoeren van afvalwater en regenwater.

Gescheiden stelsel
Riolering bestaande uit twee afvoersystemen voor het gescheiden afvoeren van afvalwater en regenwater.

Kjeldahl-stikstof
Massaconcentratie van de som van organisch gebonden en ammoniumstikstof.

Ledigingstijd
Het quotient van de totale bergingsinhoud en de pompovercapaciteit.

Onderdrempelberging
De statische berging van leidingen onder de laagst gelegen drempel.

Persleiding
Leiding voor het transporteren van afvalwater onder druk.

Pompovercapaciteit
Het verschil tussen de pompcapaciteit en de de droogweerafvoer.

Propstroming
Volledige menging in de dwarsdoorsnede zonder diffusie en dispersie in de stroomrichting

Regenwaterafvoer (RWA)
Debiet op de AWZI dat wordt beinvloed door regenval of het smelten van sneeuw.

Verloren berging
Berging ingenomen door water/slib wat niet onder vrij verval tot afstroming kan komen door verzakking of riolen in tegenschot.

Vermazingsgraad
Sommatie van het aantal aangesloten riolen per bovenstrooms eind riool gedeeld door het totaal aantal riolen. Alleen de aangesloten riolen die onder vrij verval kunnen afvoeren worden geteld.

Bijlagen:

Bijlage 1 -	Invloedsparameters
Bijlage 2 -	Resultaten influentanalyse 2-1 Resultaten influentanalyse Haarlem Zuidoost 2-2 Resultaten influentanalyse Zaandam Oost 2-3 Resultaten influentanalyse Apeldoorn
Bijlage 3 -	In-/Exfiltratie berekeningen
Bijlage 4 -	Stelselanalyse 4-1 Stelselanalyse Haarlem Zuidoost 4-2 Stelselanalyse Zaandam Oost 4-3 Stelselanalyse Apeldoorn
Bijlage 5 -	Berekening stelselparameters na simulatie
Bijlage 6 -	Verblijftijden 6-1 Verblijftijden Haarlem Zuidoost 6-2 Verblijftijden Zaandam-Oost
Bijlage 7 -	Schematisatie stelsel Apeldoorn
Bijlage 8 -	Auto- en kruiscorrelaties
Bijlage 9 -	Volumeberekening voor gedeeltelijk gevulde hellende buizen
Bijlage 10 -	Minimale buiswaterstanden
Bijlage 11 -	Verhouding DWA volume en waterspiegeloppervlak

Bijlage 1: Invloedsparameters

Inloop:

Droogweerafvoer:
- watervolume bij droogweerafvoer
- samenstelling huishoudelijk afvalwater
  - gemiddelde inwonerdichtheid
  - gemiddelde lozingsdichtheid
- verhouding tussen huishoudelijk en industrieel afvalwater
- tijdstip van de dag (pieken, vooral ammonium)
- specifieke omstandigheden (autowasplaats, veel poep op de stoep)

Regenwaterafvoer:
- plaatselijk klimaat
- samenstelling neerslag
- verhouding DWA/RWA (regenwater/afvalwater)
- piekneerslagintensiteit (ook kwaliteit)
- buiduur
- voorafgaande droogweerperiode
- tijdelijke berging op straat
- verliezen
- inrichting van oppervlak:
  - gebruikfunctie grond (stedelijk/landelijk, bergend / infiltrerend vermogen)
  - type verhard oppervlak, (straatsteen, dakbekleding…)
  - helling terrein
  - aanwezige vegetatie
  - boomdichtheid
  - manieren van oppervlak reinigen
- seizoen
  - Seizoensafhankelijke verschijnselen (herfst: veel nutriënten, winter: chloride door strooizout, wisselende grondwaterstand per seizoen)
  - Temperatuur (zomer: significante wijzigingen in samenstelling tijdens verblijf in riool)

Lekwater:
- hoogte van grondwaterstand
- grondwatersamenstelling
- hoge buitenwaterstanden
- kapotte kunstwerken

Rioolstelsel:

- Verval
  - gemiddelde mate van verval
  - aanwezigheid buizen met groot(er) verval (plaatselijk)
  - plaats van buizen met afwijkend verval (begin/eind vh stelsel)
  - 'dode berging'
- Persleidingen
  - aanwezigheid van persleidingen
  - toevoegen van stoffen (bijv. Nutriox)
  - verblijftijd in persleiding (lengte leiding)
  - aansluitpunt persleiding op de rest van stelsel
- Bergingstanks
  - aanwezigheid bergingstanks
  - manier van plaatsen bergingstanks (doorstroomrichting, loodrecht op stroomrichting)
  - tijdstip en manier van ledigen bergingstanks
- Lengte van het stelsel
  - gemiddelde verblijftijd in stelsel
  - langst/kortst mogelijke verblijftijd in stelsel
  - spreiding verblijftijden
- Tussenaansluitingen:
  - plaats van andere aansluitingen
  - samenstelling water andere aansluitingen
- Buizen:
  - aantal buizen
  - materiaal buizen (beton/kunststof)
  - profielvorm buizen
  - gemiddelde diameter buizen (lekken)
  - gemiddelde buishoogte van ei-vormige
- Putten
  - aantal putten
  - materiaal putten
  - detaillering putten (aanwezigheid stroomgoten)
  - aanwezigheid valputten
  - kwaliteit stelsel in brede zin (bijvoorbeeld aanwezigheid van zinken dakgoten)
- Kunstwerken
  - aantal pompen
  - aantal interne/externe overstortputten
  - ledigingstijd (combinatie berging/pomp)
  - onderdrempelberging (statische berging)
  - aan/afslagpeil van de aanwezige pompen
- Omzettingen binnen de buis
  - luchttemperatuur
  - zuurstofgehalte in atmosfeer
  - reaeratiecapaciteit
  - plaats biofilm
  - samenstelling biofilm
  - verhouding tussen volume afvalwater en oppervlak scheiding water/lucht
  - toestand in riool (anaeroob/aeroob/anoxisch)
  - wandruwheid

- Sedimentatieprocessen
  - turbulentie van de stroming
  - stroomsnelheid van het water
  - hoeveelheid neergeslagen sediment
  - eigenschappen van neergeslagen sediment
  - voorbezinking aan het eind van het riool
- Ontwerp
  - vullingsgraad
  - vermazingsgraad

Beheer:

- waterdichtheid riool
  - lekkage
  - zandinloop
  - verplaatsing
  - hoekverdraaiing
  - inhangend voegmateriaal
- stabiliteit riool
  - beschadiging
  - aantasting
  - scheuren
  - deformatie
- afstroming in riool
  - instekende inlaten
  - wortelingroei
  - aangroei
  - afzettingen
  - zand- en vuilophoping
  - obstakels
- huidige staat van het riool
- wijze van monitoren
- manier van rioolreiniging
- frequentie van rioolreiniging
- onderhoudsfrequentie (vervangen onderdelen)
- operationeel beheer
- leeftijd van het riool

Bijlage 2-1: Resultaten influentanalyse Haarlem Zuidoost

Tabel 2-1-1: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in 1999

Parameters	Gemiddelde gemeten waarde 1999
Debiet (m^3/dag)	22.658
CZV (mg/l)	377
BZV (mg/l)	148
N (mg/l)	34,6
P (mg/l)	4,6
CZV/BZV	2,59
BZV/N	4,27

Tabel 2-1-2: Gemiddelde concentraties en verhoudingen bij DWA en RWA in 1999

Parameters	Gemiddeld bij DWA	Gemiddeld bij RWA
Debiet (m3/h)	15.232	27.671
CZV (mg/l)	456	319
BZV (mg/l)	190	129
N (mg/l)	41,9	29
P (mg/l)	5,5	4,0
CZV/BZV	2,5	2,7
BZV/N	4,5	4,2

Tabel 2-1-3: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in verschillende seizoenen in 1999

Parameters	Gemiddeld in lente	Gemiddeld in zomer	Gemiddeld in herfst	Gemiddeld in winter
Debiet(m^3/h)	22.752	16.822	24.060	27.780
CZV (mg/l)	361	426	341	372
BZV (mg/l)	152	157	150	134
N (mg/l)	34,4	39	32	32,5
P (mg/l)	4,6	5,1	4,4	4,3
CZV/BZV	2,5	2,6	2,6	2,7
BZV/N	4,2	4,2	4,5	4,1

Bijlage 2-2: Resultaten influentanalyse Zaandam Oost

Tabel 2-2-1: Gemiddelde concentraties en verhoudingen tussen 1997 en 2000

Parameters	Gemiddelde gemeten waarde
Debiet (m^3/dag)	22.062
CZV (mg/l)	674
BZV (mg/l)	273
N (mg/l)	57,9
P (mg/l)	8,4
TSS (mg/l)	226
CZV/BZV	2,4
BZV/N	4,7

Tabel 2-2-2: Gemiddelde concentraties en verhoudingen bij DWA en RWA in 1997.

Parameters	Gemiddeld bij DWA	Gemiddeld bij RWA
Debiet (m^3/dag)	15.094	32.835
CZV (mg/l)	323	216
BZV(mg/l)	705	557
N (mg/l)	70,3	43,3
P (mg/l)	11	7
TSS (mg/l)	228	221
CZV/BZV	2,2	2,6
BZV/N	4,6	4,8

Tabel 2-2-3: Gemiddelde concentraties en verhoudingen bij DWA en RWA in 1998

Parameters	Gemiddeld bij DWA	Gemiddeld bij RWA
Debiet (m3/dag)	17.094	28.220
CZV (mg/l)	662	527
BZV (mg/l)	308	216
N (mg/l)	62.3	49,3
P (mg/l)	9.0	7,2
TSS (mg/l)	250	240
CZV/BZV	2.2	2.5
BZV/N	4.9	4.5

Tabel 2-2-4: Gemiddelde concentraties en verhoudingen bij DWA en RWA in 1999

Parameters	Gemiddeld bij DWA	Gemiddeld bij RWA
Debiet (m3/dag)	16.632	23.176
CZV (mg/l)	648	509
BZV (mg/l)	289	242
N (mg/l)	65,5	54,4
P (mg/l)	8,7	7,1
TSS (mg/l)	203	146
CZV/BZV	2,3	2,2
BZV/N	4,3	4,4

Tabel 2-2-5: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in verschillende seizoenen van 1997.

Parameters	Gemiddeld in lente	Gemiddeld in zomer	Gemiddeld in herfst	Gemiddeld in winter
Debiet (m^3/dag)	17.012	15.750	17.012	21.870
CZV (mg/l)	717	705	667	616
BZV (mg/l)	338	300	309	266
N (mg/l)	69,8	64,6	69	60
P (mg/l)	11,3	10,6	10,3	9
TSS (mg/l)	225	250	226	204
CZV/BZV	2,1	2,3	2,2	2,4
BZV/N	4,8	4,7	4,4	4,3

Tabel 2-2-6: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in verschillende seizoenen van 1998

Parameters	Gemiddeld in lente	Gemiddeld in zomer	Gemiddeld in herfst	Gemiddeld in winter
Debiet (m^3/dag)	21.146	19.754	19.897	18.014
CZV (mg/l)	527	531	563	684
BZV (mg/l)	527	239	249	310
N (mg/l)	54,4	55,6	58,4	60,7
P (mg/l)	7,7	7,9	8,1	9,7
TSS (mg/l)	191	190	204	242
CZV/BZV	2,1	2,1	2,3	2,2
BZV/N	5,2	4,8	4,3	5,1

Tabel 2-1-7: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in verschillende seizoenen van 1999

Parameters	Gemiddeld in lente	Gemiddeld in zomer	Gemiddeld in herfst	Gemiddeld in winter
Debiet (m^3/dag)	17.381	15.289	18.609	19.903
CZV (mg/l)	643	681	627	505
BZV (mg/l)	276	326	295	194
N (mg/l)	65	69	61,7	55,5
P (mg/l)	8,6	8,9	8,7	7,3
TSS (mg/l)	221	160	184	224
CZV/BZV	2,4	2,1	2,2	2,6
BZV/N	4,2	4,7	4,7	3,5

Bijlage 2-3: Resultaten influentanalyse Apeldoorn

Tabel 2-3-1: Gemiddelde concentraties en verhoudingen tussen 1996 en 1999.

Parameters	Gemiddelde gemeten waarde
Debiet (m^3/dag)	72.319
CZV (mg/l)	395
BZV (mg/l)	131
N (mg/l)	35
P (mg/l)	6
CZV/BZV	3,0
BZV/N	3,7

Tabel 2-3-2: Gemiddelde concentraties en verhoudingen bij DWA en RWA

Parameters	Gemiddeld bij DWA	Gemiddeld bij RWA
Debiet (m^3/dag)	53.244	89.463
CZV (mg/l)	466	361
BZV (mg/l)	148	113
N (mg/l)	45	33
P (mg/l)	7,6	5,6
CZV/BZV	3,2	3,1
BZV/N	3,42	3,29

Tabel 2-3-3: Gemiddelde concentraties en verhoudingen in zomer en winter

Parameters	Gemiddeld in winter	Gemiddeld in zomer
Debiet (m^3/dag)	78.932	71.747
CZV (mg/l)	362	424
BZV (mg/l)	116	133
N (mg/l)	35,0	39,4
P (mg/l)	5,5	7,0
CZV/BZV	3,2	3,6
BZV/N	3,3	3,4

Bijlage 3-1: In-/Exfiltratie berekening met inwonerequivalenten

Casestudie Haarlem Zuidoost

Aandeel inwoners: 52.900 i.e.
Aandeel industrieel: 5.750 i.e. +
Totale belasting: 58.650 i.e.

Zuurstofbindend vermogen: 136 g O_2/dag
Totale belasting: 7.976.400 g O_2/dag

Bij een gemiddeld theoretisch DWA dagdebiet van 9.810 m^3/dag (verdeeld over 10 uur), volgt een totale TZV van 813 mg/l.

Gemeten concentraties:	CZV		456,3	mg/l
	N-Kj	4,57*	42	mg/l +
	Totaal		645	mg/l

De gemeten concentratie is een factor 1,26 kleiner dan wat er theoretisch het stelsel instroomt. De gemeten concentraties bedragen slechts 79,3% van de theoretische.

Casestudie Zaandam-Oost

Aandeel inwoners:	55.213 i.e.
Aandeel recreatie:	174 i.e.
Aandeel industrieel:	12.536 i.e. +
Totale belasting:	67.923 i.e.

Zuurstofbindend vermogen: 136 g O_2/dag
Totale belasting: 9.237.528 g O_2/dag

Bij een gemiddeld theoretisch DWA dagdebiet van 11.890 m^3/dag (verdeeld over 10 uur), volgt een TZV van 777 mg/l.

Gemeten concentraties:	CZV		648	mg/l
	N-Kj	4,57*	65	mg/l +
	Totaal		945,05	mg/l

De gemeten concentratie is een factor 1,22 groter dan wat er theoretisch het stelsel instroomt. In tegenstelling tot bij Haarlem zijn de theoretische concentraties hier 82% van de gemeten concentraties.

Gevoeligheidsanalyse:

Haarlem: Bij een maximaal zuurstofbindend vermogen van 175 g O_2/dag, volgt een totale CZV en N-Kjeldahl concentratie van 1.046,3 mg/l. De gemeten concentraties bedragen dan 61,6% van de theoretische. De afwijking van de bovenstaande waarde bedraagt dan 22%.

Bijlage 3-2: In-/Exfiltratie berekening met Kjeldahl-N

Schattingen van debieten kunnen worden gemaakt op basis van de concentraties Kjeldahl-stikstof. Stikstof is in het afvalwater voor het grootste deel in opgeloste vorm aanwezig. De concentratie zal daarom in grote mate onafhankelijk zijn van bezinking in de riolering. N-Kjeldahl zal in de riolering ook niet of nauwelijks worden omgezet door biologische processen. Indien er vanuit wordt gegaan dat huishoudelijk afvalwater overheerst, dan mag op basis van de gemiddelde vervuilingswaarde van 12 gram N per inwoner, en op basis van een drinkwaterverbruik van 120 liter per inwoner een concentratie worden verwacht van 100 mg/l. Deze waarde wordt vergeleken met de gemiddelde concentratie aan N-Kjeldahl gemeten bij DWA.

Haarlem
Gemiddelde gemeten concentratie: 42 mg/l

Dit betekent dat het debiet moet toenemen met een factor 2,4 (100/42). Dit betekent dat het aandeel lekwater:

((2,4-1)/2,4)*100% = 58 % van het totale ingaande debiet bedraagt.

Zaandam
Gemiddelde gemeten concentratie: 65 mg/l

Het debiet neemt toe met een factor 1,54. Het percentage lekwater bedraagt dan:

((1,54-1)/1,54)*100% = 35%

Gevoeligheidsanalyse:

1. Bij een afvalwaterproductie van 140 l/inw*dag, volgt een te verwachten N-Kjeldahl concentratie van 86 mg/l. Het aandeel lekwater in Haarlem bedraagt dan 50%. De afwijking met de eerder gevonden waarde is ((58-50)/58)* 100%=14%
2. Bij een vervuilingswaarde van 7 gram N per inwoner (op basis van 120 l/inw*dag), volgt een te verwachten concentratie van 58 mg/l. Aandeel lekwater in Haarlem: 27,6%. Afwijking met eerder gevonden waarde is ((58-27,6)/58)*100%= 52%

Bijlage 4-1: Stelselanalyse Haarlem Zuidoost

Case:	**Haarlem Zuidoost** Dit stelsel bestaat uit Haarlem Zuidoost en Zuiderpolder. Beide stelsels zijn overwegend gemengd. Onderbemalingen zijn verbeterd gescheiden					
	percentage ongemengd	0.023333333				
	DWA			**RWA**		
	aantal inwoners ZO	49000		tot.opp. ZO	560	ha
	aant. Inwoners ZP	3900		tot.opp. ZP	27.1	ha
	totaal inwoners	52900		verhard ZO	330.8	ha
	DWA inwoners ZO	588	m3/h	verhard ZP	13.2	ha
	DWA industrie	202	m3/h	max debiet ZP	173	m3/h
	DWA injecties	47	m3/h	max debiet onderbem.	144	m3/h
	DWA onderbemalingen	144	m3/h	% verhard ZO	59.10	
	DWA totaal	981	m3/h	% verhard ZP	48.7	
				aantal inw/ha	90.1	
	gem.DWA debiet AWZI	15232	m3/dag			
		1523.2	m3/h verdeeld over 10 uur			
	DWA verschil (=lekwater)	542.2	m3/h			
	% lekwater	35.6	%			
				verhouding ind/inwoners	0.34	
	berging					
	berging ZO	27510	m3 (=8.3 mm)			
	berging ZP	1602	m3 (=12.1 mm)			
	tot.berging	29112	m3			
	totaal volume	75492.8	m3			
	bergingsrendement	0.39				
	Hoofdparameters			**Detaillering**		
Verval:	gemiddeld verval:	2,6	‰	gemiddelde snelheid DWA	0.07	m/s
	standaard dev.	0.0052				
	maximaal verval	17	‰			
	minimaal verval	0	‰			
Persleidingen:	aantal persleidingen:	2				
	debiet 1 (Liewegje ZP)	2.6	m3/h			
	debiet 2 (DWA naar zuivering)	47	m3/h			
	leiding 2 max debiet	173				
	totaal DWA debiet	49.6				
	lengte persleiding	-				
	verblijftijd in persleiding	-				
	% debiet persleiding	5.1				
Lengte van stelsel:	totale buislengte	136487	m	gem. Verblijftijd	4.6	uur
				max. verblijftijd	9	uur
				min. verblijftijd	0.7	uur
				stand.dev. Vt	3.0	
Buizen:	aantal buizen	3856		gem. waterstand DWA	0.06	m
	materiaal buis (B/K)	-		contactvlak water/buis	34951	m2
	% rond	41		totaal wateroppervlak	29320	m2
	% eivormig	59		totaal volume DWA	2185	m3
	(gem.) diameter rond	493.4	mm	biofilmactiviteit	4.5	g/dag*m2
	gem. hoogte eivormig	599.3	mm	zuurstofoverdracht	0.034	m/h
Kunstwerken:	aantal pompen	3 (2 vijzels)				
	pompcap.	3000	m3/h			
	cap. Vijzel 1	1200	m3/h			
	cap. Vijzel 2	1200	m3/h			
	pomp	600	m3/h			
	poc	1893	m3/h (=0.57 mm/h)			
	pomp ZP	173	m3/h			
	poc ZP	126	m3/h (=0.95 mm/h)			
	overstorten ZO	41	(hoogte = -.45 m)			
	overstorten ZP	3	(hoogte = -1.91 m)			
	ledigingstijd	15.4	h			
Waterdichtheid:	beschadiging		schaal 1-5	opm: infiltratie van water vindt plaats via een kapotte overstort. Ook drainageleidingen wateren al op het stelsel.		
	aantasting					
	verzakking					
	scheuren					
	lekkage t.p.v. verbindingen	4				
	verloren berging					
	grondwaterstand	1.2-4	m onder maaiveld			
	samenstelling GW/OW		BZV			
			CZV			
			N-Kjeldahl			
			P-totaal			
			TSS			

Bijlage 4-2: Stelselanalyse Zaandam Oost

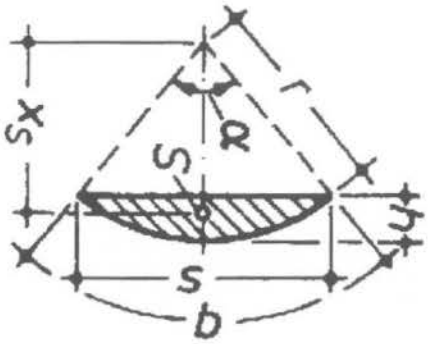
Case:	**Zaandam Oost** opm: Het geanalyseerde stelsel is dat in Zaandam-Oost. Het influent dat bij de zuivering aankomt bestaat ook gedeeltelijk uit de DWA die vanuit Den Ilp, Oostzaan en Landsmeer wordt verpompt. Er zijn geen verdere gegevens beschikbaar van deze drie stelsels.					
	Percentage ongemengd	-				
	DWA			**RWA**		
	aantal inwoners Zaandam Oost	55213		gerioleerd oppervlak	241.6	ha
	DWA inwoners	662.6	m3/h	gemengd gerioleerd	232.6	ha
	DWA industrie	176	m3/h	percentage ongemengd	3.7	%
	DWA injecties	0	m3/h			
	DWA onderbemalingen	0	m3/h	aantal inw/ha	228.5	
	DWA recreatie	1.7	m3/h	voor HW	240	
	DWA totaal	840.3	m3/h			
	DWA Den Ilp	18	m3/h	verhouding industrie/inw.	0.27	
	DWA Oostzaan	174.4	m3/h			
	DWA Landsmeer	156	m3/h			
	DWA totaal	1188.7	m3/h			
	gem.DWA debiet AWZI	15094.3	m3/dag			
		1509.4	m3/h verd. over 10 uur+E22			
	DWA verschil (=lekwater)	320.7	m3/h			
	% lekwater	21.24841828				
	berging					
	onderdrempelberging	17588	m3			
	verloren berging	1616	m3			
	totale berging	15972	m3 (=6.9 mm)			
	totaal volume stelsel	20408.7	m3			
	bergingsrendement	0.78				
	Hoofdparameters			**Detaillering**		
Verval:	gemiddeld verval:	2.4	‰	gemiddelde snelheid DWA	0.11	m/s
	standaard dev.	0.004				
	maximaal verval	68	‰			
	minimaal verval	0	‰			
Persleidingen:	aantal persleidingen:	15				
	12 persleidingen in stelsel	34.1	m3/h			
	3 persleidingen naar AWZI	1553.2	m3/h			
	lengte persleiding	-				
	verblijftijd in persleiding	-				
	% debiet persleiding	32.2				
Lengte van stelsel:	totale buislengte	115059	m	gem. Verblijftijd	10.8	uur
				max. verblijftijd	27.9	uur
				min. verblijftijd	2.2	uur
				stand.dev. Vt	10.2	
Buizen:	aantal buizen	4008		gemiddelde waterstand DWA	0.14	m
	materiaal buis (B/K)	-		contactvlak water/buis	33073	m2
	% rond	90.6		totaal wateroppervlak	26217	m2
	% eivormig	9.4		totaal volume DWA	3038	m3
	(gem.) diameter rond	410	mm			
	gem. hoogte eivormig	460	mm			
Kunstwerken:	aantal pompen	4 pompen				
	gemaal pomp 1	0.264	m3/s			
	gemaal 2	0.264	m3/s			
	gemaal 3	0.075	m3/s			
	gemaal 4	0.075	m3/s			
	totaal	2440.8	m3/h			
	poc	1600.5	m3/h op basis van DWA Zaandam			
	ledigingstijd	10.0	h			
	aantal overstorten	28				
	gemiddelde overstorthoogte	1.1075				
Waterdichtheid:	beschadiging		schaal 1-5			
	aantasting					
	verzakking	4				
	scheuren					
	lekkage t.p.v. verbindingen	4				
	verloren berging	4				
	grondwaterstand	-0.2	NAP			
	samenstelling GW/OW		BZV			
			CZV			
			N-Kjeldahl			
			P-totaal			
			TSS			

Bijlage 4-3: Stelselanalyse Apeldoorn

Case:	**Apeldoorn** Dit stelsel bestaat uit Haarlem Zuidoost en Zuiderpolder. Beide stelsels zijn overwegend gemengd. Onderbemalingen zijn verbeterd gescheiden					
	percentage ongemengd					
	DWA			**RWA**		
	aantal inwoners	150000				
				gesloten oppervlak	259.6	
	Drinkwaterverbruik	32000	m3/dag	hellend dak	110.4	
	Koelwater (industrie)	4000	m3dag	open oppervlak	380.1	
	DWA totaal	36000	m3/dag	vlak dak	157.1	
	gem.DWA debiet AWZI	60000	m3/dag			
	DWA verschil (=lekwater)	24000	m3/dag			
	% lekwater	40	%			
	berging					
	totaal volume	366136	m3			
	berging A-doorn West	22565				
	berging De Maten Zuid	3917				
	berging De Maten Noord	8980				
	berging Ermst	570				
	berging Vassen	2002				
	Hoofdparameters			**Detaillering**		
Verval:	gemiddeld verval:	3.7	‰	gemiddelde snelheid DWA		m/s
	5% onderschreidingsgrens	0.05	‰			
	95% onderschreidingsgrens	5	‰			
	minimaal verval					
Persleidingen:	aantal persleidingen:					
	lengte persleiding	38943	m			
	gemiddelde diameter PL	432	mm (tussen 84 en 700 mm)			
	volume persleidingen	5200	m3			
	DWA persleidingen	600	m3/h			
	verblijftijd bij DWA	13-27	h			
	verblijftijd bij RWA	3.5-7.5	h			
	% debiet persleiding	20				
Lengte van stelsel:	totale buislengte	543811	m	gem. Verblijftijd		uur
				max. verblijftijd		uur
				min. verblijftijd		uur
				stand.dev. Vt		
Buizen:	aantal buizen	13414		gem. waterstand DWA	0.05	m
	materiaal buis (B/K)	-		contactvlak water/buis	154460	m2
	% rond	84.2		totaal wateroppervlak	133140	m2
	% eivormig	14.2		totaal volume DWA	11835	m3
	(gem.) diameter rond	389	mm	biofilmactiviteit	28	g/dag*m2
	gem. hoogte eivormig	658	mm	zuurstofoverdracht		m/h
Kunstwerken:	aantal pompen	4				
	pompcap.	12000	m3/h			
	aantal pompen naar bergingsbekken	3	m3/h			
	capaciteit pompen	27000	m3/h			
	totale pompcapaciteit	39000	m3/h			
	pompovercapaciteit	6000	m3/h			
			m3/h			
	ledigingstijd	8.1	h			
Waterdichtheid:	beschadiging		schaal 1-5	opm: Het oudste deel van het stelsel stamt uit 1934		
	aantasting					
	verzakking					
	scheuren					
	lekkage t.p.v. verbindingen	4				
	infiltratiesnelheid per meter voeg	47	l/d*m			
	verloren berging					
	grondwaterstand	13,9-14,3	m NAP			
	samenstelling GW/OW		BZV			
			CZV			
			N-Kjeldahl			
			P-totaal			
			TSS			

Bijlage 5: Berekening stelselparameters na simulaties

De stroomsnelheid en de waterstand bij DWA zijn berekend aan de hand van simulaties in Hydroworks. Daarmee zijn het mogelijk biofilmoppervlak (raakvlak tussen water en buis), het oppervlak van de waterspiegel en het totale volume van de DWA berekend. Hiervoor zijn de volgende formules gebruikt.



Figuur 5-1: Segment van de cirkelvormige doorsnede (Schneider, 2001)

Hoek: $$\alpha = 4 * \arcsin\sqrt{\frac{h}{2*r}} \quad (5\text{-}1)$$

Contactvlak b: $$b = \frac{\pi * r * \alpha}{180} \quad (5\text{-}2)$$

Wateroppervlak s: $$s = 2 * r * \sin\frac{\alpha}{2} \approx \sqrt{b^2 - \frac{16}{3}h^2} \quad (5\text{-}3)$$

Doorstroomde dwarsdoorsnede: $$A = 0.5 * r^2 * \left(\pi * \frac{\alpha}{180} - \sin\alpha\right) \quad (5\text{-}4)$$

Totale hoeveelheid afvalwater in de buizen: $$V_{afvalwater} = \sum_{i=1}^{n} L_i * A_i \quad (5\text{-}5)$$

Contactvlak afvalwater-buis: $$A_{biofilm} = \sum_{i=1}^{n} L_i * b_i \quad (5\text{-}6)$$

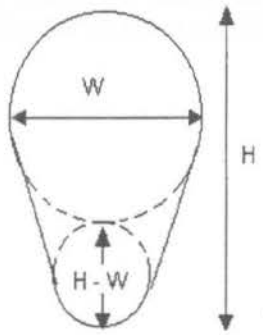
Totaal wateroppervlak: $$S_{totaal} = \sum_{i=1}^{n} L_i * s_i \quad (5\text{-}7)$$

Hierin is:

r	straal of de vervangende straal (m)
h	maximale droogweerwaterstand (m)
L	lengte van de buis (m)

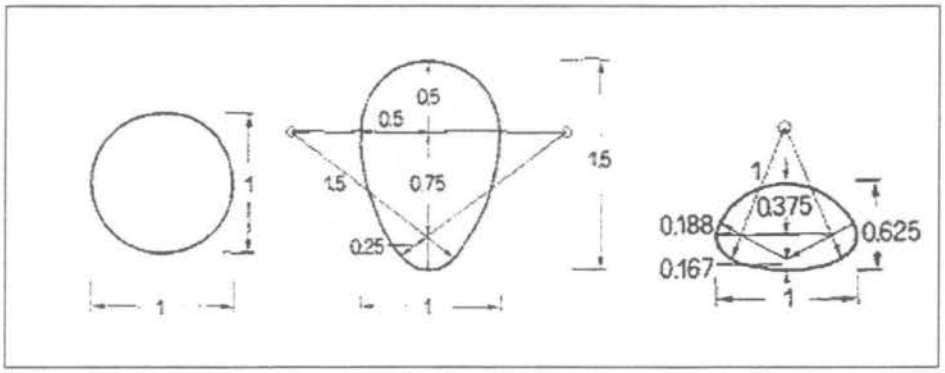
Vereenvoudigen van profielvorm

Niet alle buizen in het riool zijn rond. In het stelsel van Haarlem Zuidoost is zelfs de meerderheid van de profielen ei-vormig. Bij de berekening van het totale volume van het stelsel is voor de ei-vormige profielen rekening gehouden met de verhoudingen zoals te zien in figuur 5-2.



Figuur 5-2: Verhoudingen ei-profiel

Bij de berekeningen van het biofilm oppervlak, waterspiegeloppervlak en DWA-volume is voor het ei-profiel is een vervangende straal aangenomen van ½ (H-W) (zie figuur 5-1), wat gelijk is aan ¼ maal de breedte. Onnauwkeurigheden treden op wanneer de waterstand bij DWA hoger is dan 0,5(H-W).
Voor het ellipsvormige profiel wordt vaak de breedte genomen als vervanging voor de straal. Deze aannamen zijn gedaan omdat de hoeveelheid afvalwater bij droog weer relatief klein is. Bij de meeste stelsels is het grootste deel van de profielen cirkelvormig, waardoor de fout zeer klein blijft.



Figuur 5-3: Profielvormen

Bijlage 6-1: Verblijftijden Haarlem Zuidoost

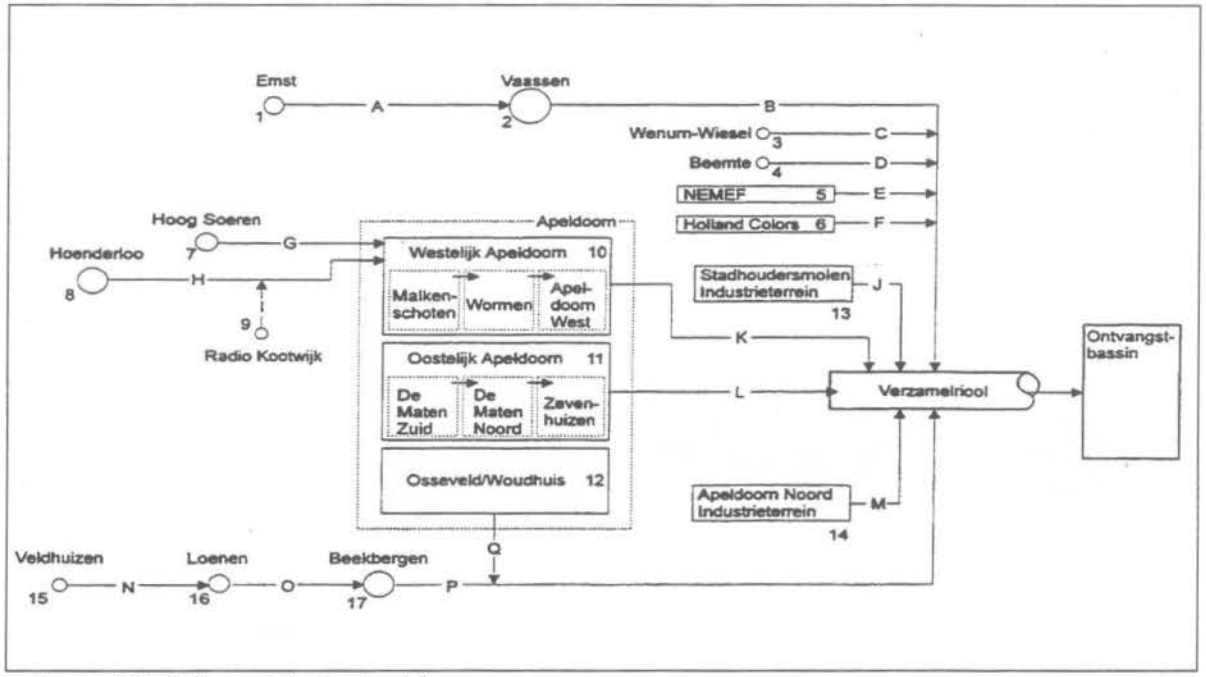
	Verblijftijd
route 1	43 min
route 2	210 min
route 3	540 min
route 4	301 min
route 5	288 min
gemiddeld	276,4 min
	4,6 h
standdev	3,0 h

Bijlage 6-2: Verblijftijden Zaandam-Oost

	Verblijftijd
route 1	695 min
route 2	131 min
route 3	298 min
route 4	443 min
route 5	1673 min
gemiddeld	647,8 min

	10,8 h
standdev	10,2 h

Bijlage 7: Schematisatie stelsel Apeldoorn



Figuur 7-1: Schema riolering Apeldoorn

Tabel 7-1: Samenstelling behorend bij schema riolering Apeldoorn

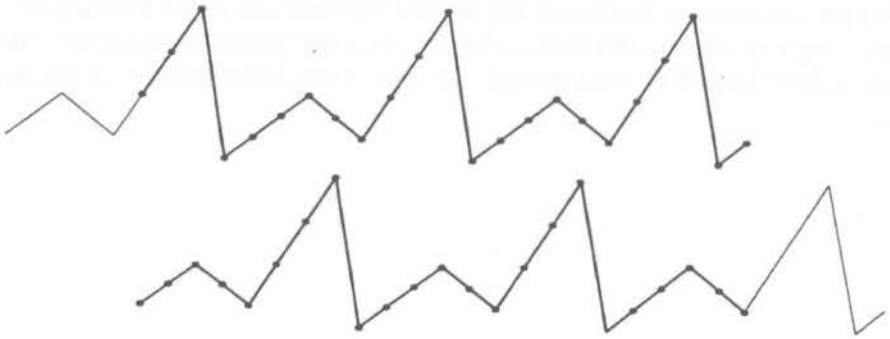
Riool			Transportleidingen			
Plaats	**NR.**	**Soort riool**	**Van**	**Naar**	**Nr.**	**Soort Leiding**
Ermst	1	GM	Ermst	Vassen	A	Druk
Vassen	2	GM	Vassen	Verzamelriool	B	Druk
Wenum-Wiesel	3	GS	Wenum-Wiesel	Leiding B	C	Druk
Beemte	4	GS	Beemte	Leiding B	D	Druk
NEMEF* (* Industrie)	5	-	NEMEF	Leiding B	E	Druk
Holland Colors*	6	-	Holland Colors	Leiding B	F	Druk
Hoog Soeren	7	GM	Hoog Soeren	Apeldoorn West	G	Druk
Hoenderloo	8	GM	Hoenderloo	Apeldoorn West	H	Druk+Vrij
Radio Kootwijk	9	GM	Radio Kootwijk	Leiding H	I	Druk
Apeldorn West	10	GM	Apeldorn West	Verzamelriool	K	Vrij
Apeldoorn Oost	11	GM	Apeldoorn Oost	Verzamelriool	L	Druk
Osseveld/Woudhuis	12	GS	Osseveld/Woudhuis	Leiding P	Q	Druk
Stadthoudermolen	13	GS	Stadthoudermolen	Verzalmelriool	J	Druk
Apeldoorn Noord	14	GS	Apeldoorn Noord	Verzamelriool	M	Druk
Verldhuizen	15	GM	Verldhuizen	Loenen	N	Druk
Loenen	16	GM	Loenen	Beekbergen	O	Druk+Vrij
Beekbergen	17	GM	Beekbergen	Verzamelriool	P	Druk

GM = Gemengd stelsel
GS = Gescheiden stelsel
Druk =Drukleiding
Vrij = Vrij verval leiding

Bijlage 8: Auto- en kruiscorrelaties

Wanneer bij de influentanalyse eventuele verbanden tussen de concentratie zwevende stof en de concentraties van andere stoffen of de relatie tussen deze concentraties onderling wordt onderzocht is het mogelijk de invloed van het tussenliggend tijdsinterval buiten beschouwing laten. De metingen zijn dan wel op onregelmatige tijden gedaan, maar alle concentraties worden wel steeds op hetzèlfde tijdstip gemeten. De volgorde van de metingen kan in dat geval worden geanalyseerd door de autocorrelaties en kruiscorrelaties te berekenen.

Soms lijkt het alsof een tijdreeks zich herhaalt. Deze herhaling is dan misschien niet exact, maar de metingen wekken de indruk dat van een periodiek of cyclisch verschijnsel sprake is. Wanneer de reeks met zichzelf wordt vergeleken op opeenvolgende punten, kan de maximale correspondentie worden bepaald en de graad van overeenkomst tussen de corresponderende metingen. Een manier waarop twee gelijke delen van een curve met elkaar vergeleken kunnen worden is door de twee segmenten uiteen te trekken en ze op elkaar te passen.



Figuur 8-1: Reeks met herhalende waarden voor Y langs een X-as die tijd of ruimte weergeeft. De reeks is met zichzelf vergeleken met tijdstap 5.

Dat vindt in principe plaats in het proces van autocorrelatie, alleen wordt dan de gehele reeks met zichzelf vergeleken op alle mogelijke posities. Hiermee wordt niet alleen de graad van gelijkheid op posities waarbij de correspondentie groot is bepaald, maar ook de mate van ongelijkheid op andere posities. Het proces van 'zelf-vergelijking' door een autocorrelatie te berekenen wordt gedefinieerd als de lineaire correlatie tussen een tijdreeks en dezelfde tijdreeks op een later tijdsinterval. De autocorrelatie van een tijdreeks, bij een 'tijdstap' L wordt gegeven door:

$$r_l = \frac{\left[(n-L)\left(\sum Y_i Y_{i+L}\right) - \sum Y_i \sum Y_{i+L}\right] / (n-L)(n-L-1)}{\left[n \sum_{i=1}^{n} Y^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2\right] / n(n-1)} \qquad (8\text{-}1)$$

Wanneer voor iedere tijdstap een autocorrelatie is berekend, kunnen deze worden geplot in een correlogram. Een kenmerkend correlogram loopt van een waarde van + 1.0 bij een tijdstap 0, naar beneden tot mogelijk negatieve waarden. Bij tijdstappen van bijna samenlopen van de waarden, zal het correlogram een piek van hoge autocorrelatie weergeven. Het correlogram onthult tijdintervallen of afstanden waarin de tijdreeks zich herhaalt

Ook het bepalen van de kruiscorrelatie kan waardevolle informatie opleveren. Hiermee wordt de vergelijking van twee tijdreeksen bedoeld. De techniek die wordt toegepast om de reeksen langs elkaar te bewegen wijkt echter iets af van die gebruikt bij autocorrelatie. Het is namelijk mogelijk dat de twee

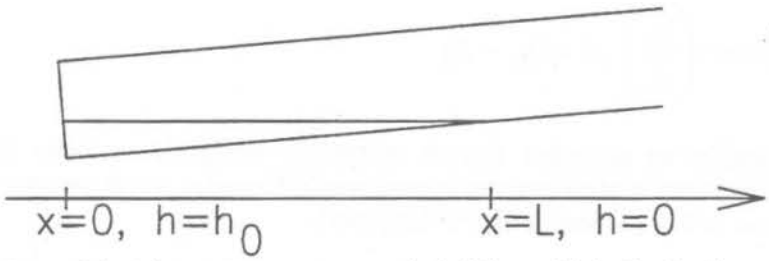
reeksen niet dezelfde lengte hebben, waardoor de berekeningen beïnvloed worden. Bovendien is het nodig bij de vergelijking van twee verschillende reeksen zowel positieve als negatieve 'lags' te berekenen. De vergelijking voor de kruiscorrelatie is hetzelfde als die voor de gewone lineaire correlatie coëfficiënt De twee reeksen worden aangeduid als Y_1 en Y_2, en n is gedefinieerd als het aantal overlapte posities tussen de twee reeksen. Het kruiscorrelogram is een plot van de overeenkomende posities versus de kruiscorrelatie

$$r_m = \frac{n * \sum Y_1 Y_2 - \sum Y_1 \sum Y_2}{\sqrt{\left[n * \sum Y_1^{\,2} - \left(\sum Y_1\right)^2\right]\left[n * \sum Y_2^{\,2} - \left(\sum Y_2\right)^2\right]}} \qquad (8\text{-}2)$$

Uit literatuuronderzoek blijkt dat het niet gebruikelijk is auto- en kruiscorrelaties te berekenen voor datasets waarbij de intervallen tussen metingen aan grote variatie onderhevig zijn. Bij metingen met een tussenstap die steeds dezelfde orde van grootte heeft, is de incidentele afwijking van bijvoorbeeld een dag, geoorloofd. Wanneer echter het 'gat' tussen de metingen in sommige gevallen één dag is, soms drie dagen en soms zelfs twee weken, kan het verschuiven van reeksen een heel scheef beeld opleveren. Bovendien is bij het zoeken naar verbanden tussen stofconcentraties en de neerslag en het debiet, maar ook bij vergelijking van stofconcentraties onderling, toch niet alleen de volgorde van de metingen van belang. Zoals in hoofdstuk 5 al werd gezegd is er juist extra informatie te vinden in de ruimte tussen de metingen.

Bijlage 9: Volumeberekening voor gedeeltelijk gevulde hellende buizen

Wanneer een hellende pijp slechts gedeeltelijk gevuld is, wordt de berekening van een aantal parameters minder duidelijk. Voor de volumeberekening van onregelmatige profielvormen en voor de berekening van het mogelijk biofilmoppervlak en het oppervlak van de waterspiegel kunnen het beste numerieke integratie technieken worden gebruikt. Voor de volumeberekening van cirkelvormige profielen echter, is een analytische methode beschikbaar. In figuur 9-1 is een situatieschets te zien:



Figuur 9-1: Schematisatie van een gedeeltelijk gevulde hellende pijp.

Het volume water in de pijp is:

$$V = \int_0^L A(x)dx \tag{9-1}$$

Hierin is h(x) de waterdiepte h als een functie van de lengte, en A(x) is het natte oppervlak als functie van de lengte. Door het invullen van deze formule en het gebruik van standaardprimitieven, volgt na een aantal algebraïsche omzettingen de volgende formule voor het volume water:

$$V = \sum_{i=1}^{i=3} V_i \tag{9-2}$$

met daarin:

$$V_1 = \frac{LR^3}{h_0}\left[\sqrt{2\frac{h_0}{R} - \left(\frac{h_0}{R}\right)^2} - \left(1 - \frac{h_0}{R}\right)\arccos\left(1 - \frac{h_0}{R}\right)\right] \tag{9-3}$$

$$V_2 = d\left[\frac{(2cL+b)\sqrt{a+bL=cL^2}}{4c} + \frac{1}{2}R^2\left(\frac{L}{h_0}\frac{1}{2}\pi\right)\right] - d\left[\frac{b\sqrt{a}}{4c} - \frac{1}{2}R^2\left(\frac{L}{h_0}\arcsin\left(\frac{h_0 - R}{R}\right)\right)\right] \tag{9-4}$$

$$V_3 = d\left[\frac{\sqrt{a+bx+cx^2}\left(a+bx+cx^2\right)}{3c} - \frac{b(2cx+b)}{8c^2}\sqrt{a+bx+cx^2}\right]\Bigg|_0^L$$
$$+d\left[+\frac{b(4ac-b^2)}{16c^2}\left(\frac{1}{\sqrt{-c}}\arcsin\left(\frac{2cx+b}{\sqrt{b^2-4ac}}\right)\right)\right]\Bigg|_0^L \qquad (9\text{-}5)$$

Hierin geldt:

$$a = h_0(2R-h_0), b = 2\frac{h_0}{L}(h_0-R), c = -\left(\frac{h_0}{L}\right)^2, d = (h_0-R)$$

Deze analytische oplossing blijkt sneller en accurater dan de numerieke integratie methode die normaliter wordt toegepast. Voor de uitgebreide afleiding van bovenstaande formules wordt verwezen naar: Clemens, F.H.L.R, 2001 (Annexe 1: The properties of circular pipes).

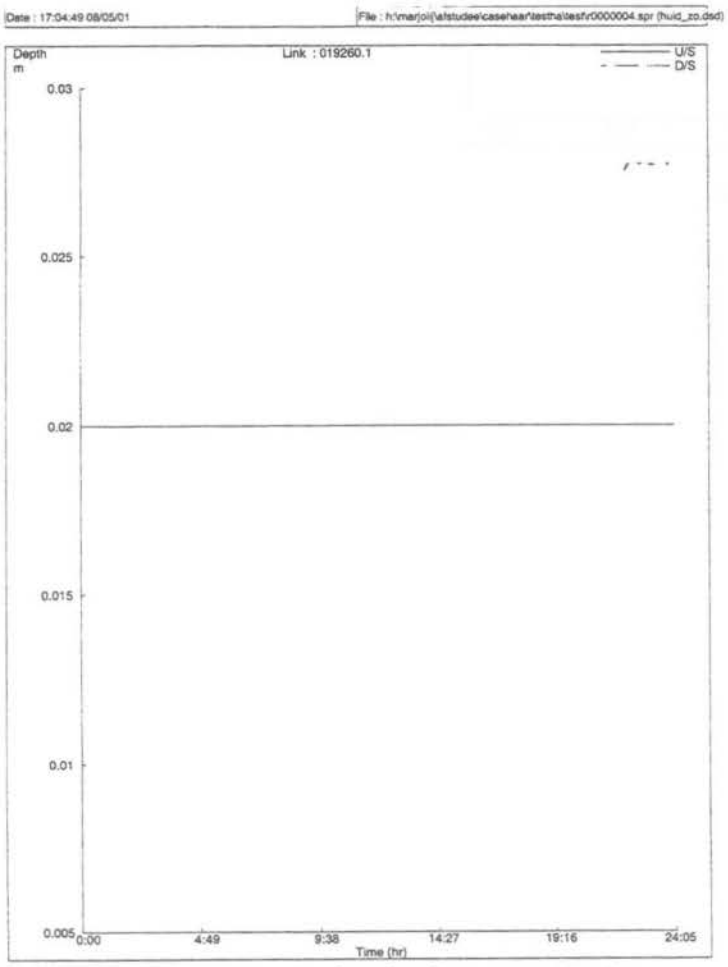
Bijlage 10: Minimale buiswaterstanden

Het programma Hydroworks werkt in de uitgangssituatie met een standaard tijdstap, minimale ruimtelijke stap en een minimale buiswaterstand. Bij een simulatie van DWA-omstandigheden kunnen buiswaterstanden voorkomen die lager zijn dan de minimale buiswaterstand. Vermoed werd echter dat de resultaten van de simulatie in zo'n geval instabiel kunnen worden. Dit uit zich in zwaar fluctuerende buiswaterstanden. Een zelfde situatie zou zich kunnen voordoen wanneer de ruimtelijke of tijdstap wordt veranderd. Om zeker te zijn van betrouwbare resultaten zijn DWA-simulaties (bij een vlakke DWA) voor het stelsel in Haarlem Zuidoost uitgevoerd met de parameter waarden weergegeven in tabel 10-1.

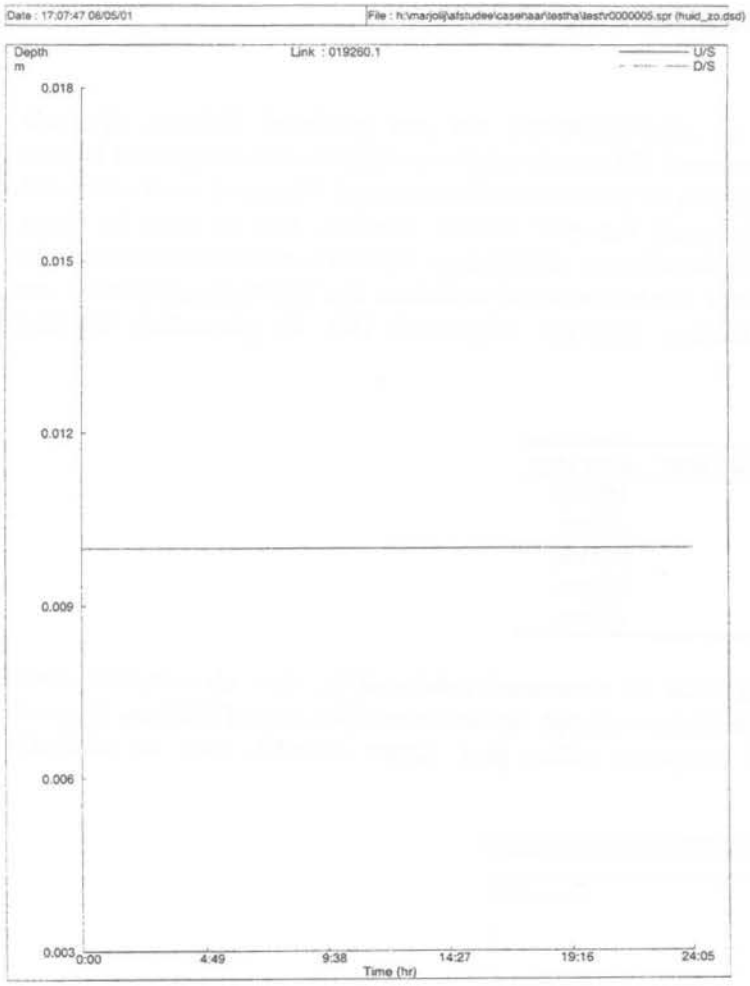
Tabel 10-1: Uitgevoerde simulaties

	min. base flow	min. space step	time step
Uitgangssituatie	0,020	0,50	60 sec
Simulatie 1	0,001	1,0	60 sec
Simulatie 2	0,001	0,5	120 sec
Simulatie 3	0,001	0,5	60 sec
Simulatie 4	0,000	0,5	60 sec

Uit deze simulaties blijkt dat in buizen waar de waterstand minimaal is, deze als constant wordt weergegeven. De resultaten blijven gelijk bij het varieren van de ruimtelijke stap of tijdstap. Er treedt dus geen instabiliteit op. Hydroworks accepteert echter geen lagere waarden voor de minimale buiswaterstand dan 0,001 meter.



Figuur 10-1: Resultaat van simulatie bij de uitgangssituatie.

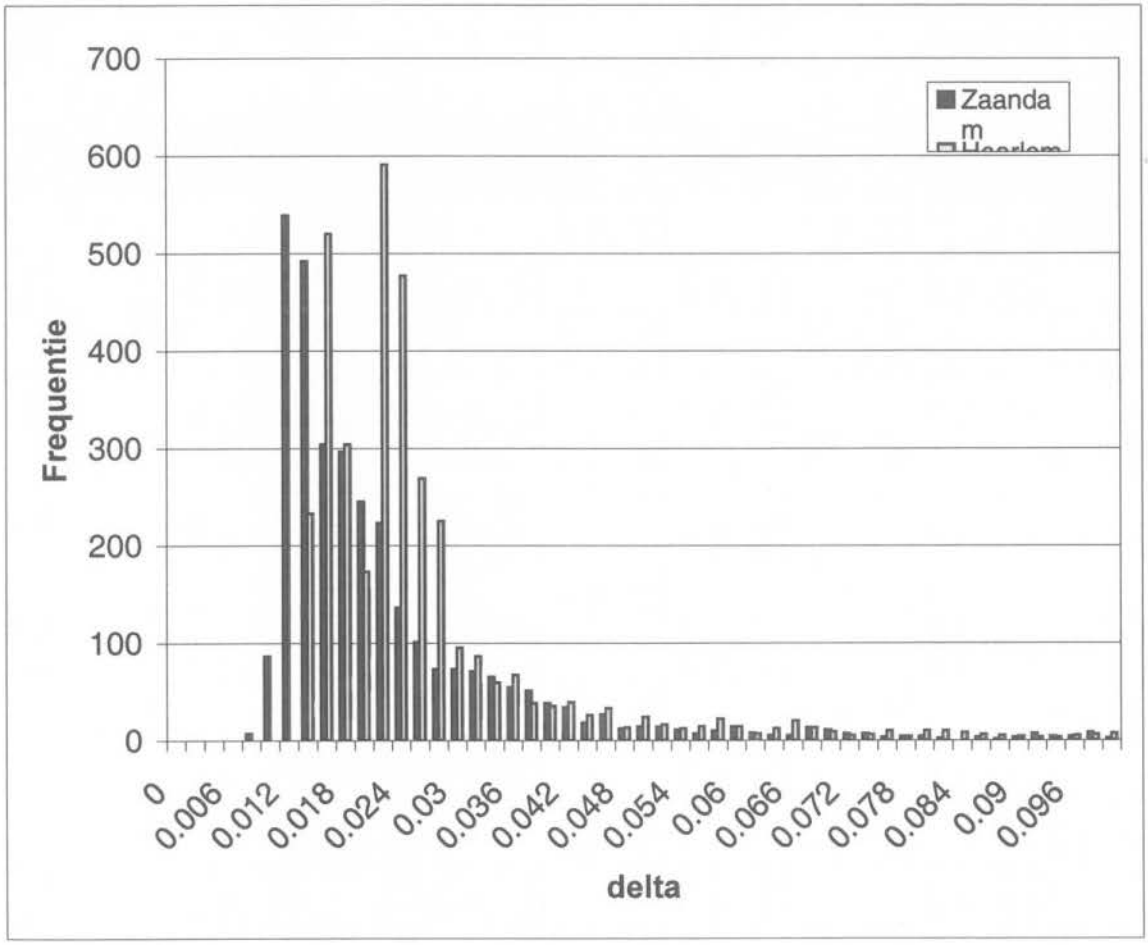


Figuur 10-2: Resultaat van simulaties 1 t/m 4.

Bijlage 11: Verhouding DWA volume en waterspiegeloppervlak

In het histogram in figuur 11-1 is de verdeling weergegeven van de waarden gevonden voor δ_{buis} voor de rioolstelsels in Haarlem en Zaandam. Hierin is:

$$\delta_{buis} = \frac{V_{DWA}}{A_{waterspiegel}} \tag{11-1}$$



Figuur 11-1: Verdeling van de waarden voor delta gevonden in Zaandam en Haarlem