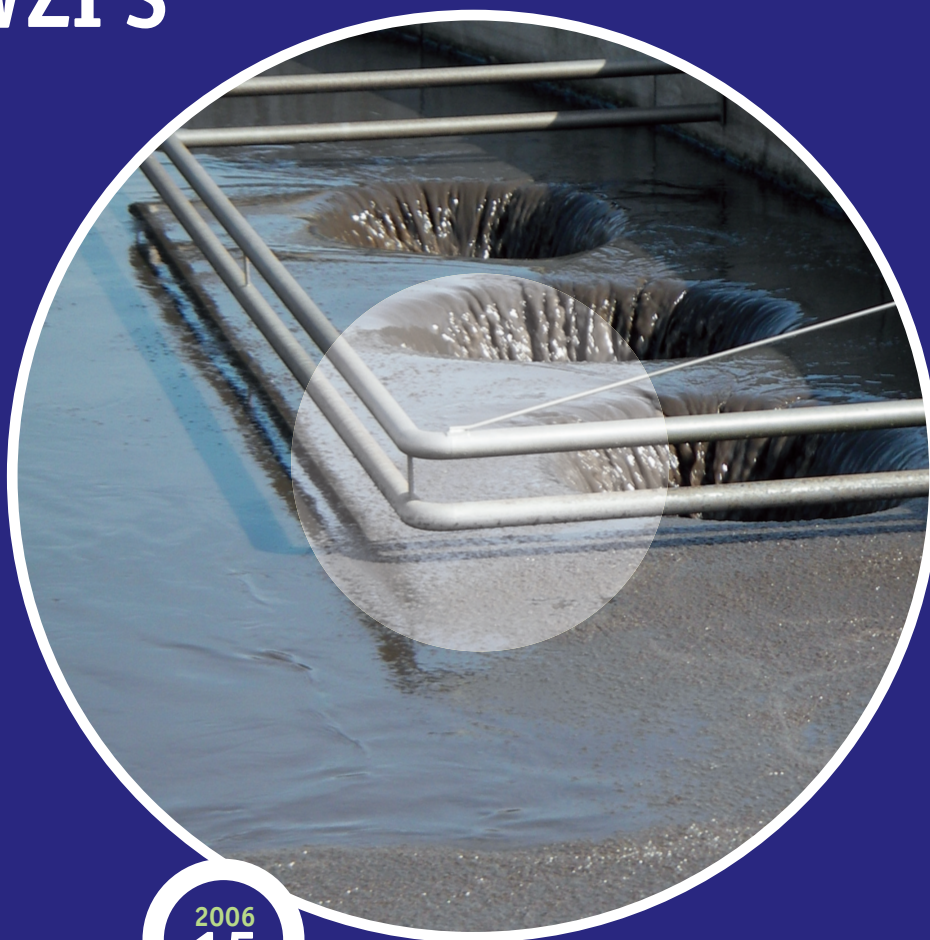


# COMMUNAAL AFVALWATER OP TEMPERATUUR HOUDEN VOOR ACTIEVER SLIB IN RWZI'S



RAPPORT

2006

15

COMMUNAAL AFVALWATER OP TEMPERATUUR HOUDEN  
VOOR ACTIEVER SLIB IN RWZI'S

UITVOERING VAN EMPIRISCH EN MODELMATIG ONDERZOEK

**RAPPORT**

2006

**15**

ISBN 90.5773.334.x



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 030 232 11 99 FAX 030 232 17 66  
Arthur van Schendelstraat 816  
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen bij:  
Hageman Fulfilment POSTBUS 1110, 3330 CC Zwijndrecht,  
TEL **078 623 05 00** FAX 078 623 05 48 EMAIL [info@hageman.nl](mailto:info@hageman.nl)  
onder vermelding van ISBN of STOWA rapportnummer en een afleveradres.

# COLOFON

UITGAVE STOWA, UTRECHT, 2006

## PROJECTUITVOERING

P.J. Tessel (Tauw)

P.P. van der Pijl (Tauw)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Hr. P. de Been (Hoogheemraadschap van Delfland)

Mw. G. T. Dalstra (Waterschap De Dommel)

Hr. W. Dijkma (Hoogheemraadschap van Rijnland)

Hr. L. van Efferen (Waterschap Zuiderzeeland)

Hr. M.C.M. van Loosdrecht (T.U. Delft)

Mw. C.A. Uijterlinde (STOWA)

Hr. G. Zoutberg (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)

FOTO OMSLAG rwzi Deventer, uitlaat van de Aeratietank (foto: tauw)

DRUK Kruyt Grafisch Advies Bureau

STOWA rapportnummer 2006-15

ISBN 90.5773.334.x

# TEN GELEIDE

De zuivering van stedelijk afvalwater in Nederland vindt vandaag de dag nagenoeg uitsluitend plaats in zuiveringsinstallaties die werken op basis van actief slib. Bij deze rwzi's heeft de afgelopen twee decennia de biologische verwijdering van stikstof en fosfor uit het afvalwater sterk in de belangstelling gestaan. Gelet op de steeds strenger wordende lozingseisen op het gebied van stikstof en fosfor, zal de genoemde belangstelling er ook de komende jaren nog volop zijn.

Met name de verwijdering van stikstof is sterk afhankelijk van de temperatuur van het actief slib. Een matige stikstofverwijdering in de winter kan worden gecompenseerd door een goede verwijdering van stikstof 's zomers. De wintersituatie blijft echter in hoge mate bepalend voor het ontwerp van een actiefslibproces en hoe hoger de temperatuur blijft des te minder hoeft er geïnvesteerd te worden in een actiefslibproces.

Gelet op het grote belang om met name 's winters het actief slib op temperatuur te houden, heeft STOWA besloten om onderzoek te laten uitvoeren naar processen en ontwikkelingen die van invloed zijn op de temperatuur van het actief slib in een rwzi. Hierbij is zowel aandacht besteed aan het afvalwater tijdens het transport door rioolstelsels als tijdens het zuiveringsproces in een rwzi.

STOWA verwacht dat op basis van het uitgevoerde onderzoek energieprocessen bij afvalwaterzuivering meer aandacht zullen gaan krijgen. Tevens wordt verwacht dat bij het ontwerp van actiefslibprocessen de keuze van de minimumtemperatuur en van het jaarlijkse temperatuurverloop van het actief slib, beter onderbouwd zal worden gemaakt. Met de resultaten van de studie kunnen maatregelen ter beperking van de afkoeling van het actief slib beter afgewogen worden op kosteneffectiviteit.

Utrecht, oktober 2006

De directeur van de STOWA

Ir. J.M.J. Leenen

# SAMENVATTING

## 1 AANLEIDING

In moderne rwzi's speelt de temperatuur van het actief slib een belangrijke rol. Dit geldt met name voor het vergaand verwijderen van stikstofverbindingen uit afvalwater.

Bij het doorrekenen van zuiveringsprocessen dient een minimumtemperatuur van het actief slib gekozen te worden en tevens het jaarlijkse verloop van de temperatuur in het actief slib. Een verkeerde temperatuurkeuze kan enerzijds leiden tot onnodig hoge investeringen maar kan anderzijds leiden tot het niet voldoen aan de vereiste effluentkwaliteit.

In Nederland bestaat er geen breedgedragen methodiek voor het bepalen van de eerdergenoemde minimumtemperatuur en het jaarlijkse temperatuurverloop in het actief slib. Dit was voor STOWA een reden om aandacht aan dit onderwerp te besteden.

Een hoge temperatuur in het actief slib is algemeen gesproken gunstig voor het zuiveringsproces. Het afkoppelen van regenwater ('s winters smeltwater) van het rioolstelsel is in dit kader een gunstige ontwikkeling. Het onttrekken van warmte aan gemeentelijke rioolstelsels, ten behoeve van verwarmingsprojecten, heeft in dit kader een negatieve invloed. Tijdens het onderzoek is aandacht besteed aan dit soort zaken en tevens aan maatregelen waarmee het actief slib, met name gedurende de winter, op temperatuur gehouden kan worden.

De kosten van maatregelen, waarmee het actief slib op temperatuur gehouden kan worden, staan tegenover besparingen door kleinere tanks voor het actief slib. Bij het onderzoek zijn voor een aantal maatregelen de kosten en baten globaal tegen elkaar afgewogen.

## 2 EMPIRISCH ONDERZOEK

Door de meeste waterschappen in Nederland wordt de temperatuur van het actief slib in rwzi's periodiek gemeten. Tijdens het onderzoek zijn temperatuurgegevens bij een aantal waterschappen opgevraagd. De gegevens van 48 rwzi's zijn bij het onderzoek gebruikt.

De temperatuur in het actief slib van een rwzi ( $T_{\text{rwzi}}$ ) is gecombineerd met de temperatuur van de buitenlucht, zoals gemeten door een nabijgelegen meetstation van het KNMI ( $T_{\text{knmi}}$ ). Hierbij is de volgende mathematische relatie gebruikt:  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$ .

Op basis van de maangemiddelde temperaturen blijkt deze relatie goed tot zeer goed te voldoen. De constante  $a$  levert hierbij informatie over de temperatuurgevoeligheid van een rwzi ( $^{\circ}\text{C}$  verandering van  $T_{\text{rwzi}}$  per  $^{\circ}\text{C}$  verandering van  $T_{\text{knmi}}$ ). De constante  $b$  geeft hierbij informatie over  $T_{\text{rwzi}}$  bij  $T_{\text{knmi}} = 0^{\circ}\text{C}$ .

De relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  kan voldoende nauwkeurig bepaald worden op basis van een beperkt aantal meetjaren. Bij een ombouw van een rwzi, waarbij bijvoorbeeld veel diepere AT's worden gerealiseerd, moeten de constanten  $a$  en  $b$  zonodig worden aangepast. Is de mathematische relatie eenmaal bekend, dan kan op basis van  $T_{\text{knmi}}$  over bijvoorbeeld de afgelopen 20 jaar, statistisch betrouwbare informatie worden verkregen over  $T_{\text{rwzi}}$ . Deze methodiek kan gevolgd worden ten behoeve van het meer betrouwbaar bepalen van een minimumtemperatuur in het actief slib en van het jaarlijkse verloop van de temperatuur in het actief slib.

### 3 MODELMATIG ONDERZOEK

Er is een eenvoudig mathematisch model opgezet voor het kwantificeren van de afkoeling van afvalwater in rioolbuizen. Dit betreft zowel de afkoeling in gemeentelijke rioolstelsels als de afkoeling in persleidingen van waterschappen.

De opwarming en afkoeling van afvalwater in rwzi's is gekwantificeerd via een achttal energieprocessen die hierbij een rol spelen. Voor deze kwantificering zijn gegevens nodig over een referentie-rwzi, gegevens over fysische constanten en relevante meteorologische gegevens.

Het combineren van een bepaalde lozingstemperatuur van het afvalwater met de afkoeling in rioolstelsels en met het netto energie-effect in een rwzi, levert de temperatuur van het actief slib in een rwzi.

### 4 DOORREKENEN VAN REFERENTIESITUATIE EN VARIANTEN

Via het uitgewerkte mathematische model zijn een referentiesituatie en een achttal varianten doorgerekend. De varianten betreffen wijzigingen in het betrokken rioolstelsel, wijzigingen bij de rwzi en wijzigingen in de lozingstemperatuur van het afvalwater.

Als laatste is aandacht besteed aan de kosteneffectiviteit van temperatuurverhogende maatregelen. Dit heeft geleid tot een vrij duidelijk beeld van maatregelen die wel en die niet aantrekkelijk kunnen zijn.

### 5 CONCLUSIES UIT HET EMPIRISCH ONDERZOEK

- Bij meer dan 80% van de beschouwde rwzi's voldoet de mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  goed en zeer goed of is er zelfs sprake van een uitmuntende relatie (regressiecoëfficiënt  $R^2 \geq 0,85$ , op basis van maandgemiddelde temperaturen).
- Bij meer dan 80% van de beschouwde rwzi's is er sprake van een normale, beperkte of zelfs zeer beperkte gevoeligheid van de temperatuur van het actief slib voor de temperatuur van de buitenlucht (constante  $a < 0,8$  °C verandering in actief slib per °C verandering van de buitenlucht).
- Bij meer dan 70 % van de beschouwde rwzi's ligt, bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C, de temperatuur van het actief slib tussen 6 en 10 °C (deze temperatuur komt overeen met de waarde van de constante b).
- De constanten a en b uit de gebruikte mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  zijn onderling gekoppeld. In de praktijk kan als vuistregel worden gebruikt:  $14 a + b = 17$ .
- De constanten a en b hangen samen met de capaciteit van een rwzi. Naarmate de capaciteit van een rwzi stijgt neemt de waarde van de constante a (= temperatuurgevoeligheid) af en die van de constante b ( $= T_{\text{rwzi}}$  bij  $T_{\text{knmi}} = 0$  °C) toe. Naar verwachting hangt dit samen met het compacter worden van een rioolstelsel, naarmate de dichtheid van de bebouwing binnen een rioleringsgebied toeneemt (meer inwoners per hectare).
- De kwaliteit van de gebruikte mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  neemt af ( $R^2$  wordt lager) als de tijd, waarover gemiddelden van de temperaturen wordt bepaald,

wordt verkort. Dit resultaat heeft te maken met het traag reageren van de temperatuur van actief slib in een rwzi op soms snelle veranderingen in de temperatuur van de buitenlucht.

- Bij een gemiddelde temperatuur van de buitenlucht gedurende langere tijd van 0 °C, wordt door de afvoer van neerslagwater naar een rwzi de temperatuur van het actief slib in een rwzi met 1 tot 2 °C verlaagd.

## 6 CONCLUSIES UIT HET MODELMATIG ONDERZOEK

- Via een uitgewerkt mathematisch model voor de combinatie van rioolstelsel en rwzi, kan de empirische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  goed benaderd worden.
- Belangrijke grootheden die de waarden van de constanten a en b bepalen, zijn de temperatuur van het geloosde afvalwater, de getotaliseerde lengte van het rioolstelsel en de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodemmaterialen waarmee het rioolstelsel is afgedekt.
- Beschouwd vanuit een energetisch oogpunt kan een rioolstelsel worden opgevat als een grote warmtewisselaar waarin het rioolwater relatief sterk wordt afgekoeld.
- Voor een rwzi kunnen een achttal verschillende energieprocessen worden onderscheiden die het actief slib opwarmen of afkoelen. Het netto effect van deze energieprocessen is relatief gering.
- Door een combinatie van het afkoppelen van neerslagwater vanaf het rioolstelsel, het bouwen van diepere actiefslibtanks met een kleiner oppervlak en het afdekken en thermisch isoleren van actiefslibtanks zijn lage temperaturen, op een effectieve wijze te bestrijden.
- Door het afdekken en thermisch isoleren van de actiefslibtanks van een rwzi kan de temperatuur van het actief slib met circa 2 °C stijgen. De kosten voor deze afdekking en isolatie kunnen ruimschoots worden gecompenseerd door een kleiner benodigd volume van de actiefslibtanks van de rwzi.
- Door het beperken van de invloed van de wind op het oppervlak van de actiefslibtanks kan de temperatuur van het actief slib met 1 tot 1,5 °C stijgen. De kosten voor het plaatsen van een dichte vegetatie of van een windscherm kunnen ruimschoots worden gecompenseerd door een kleiner benodigd volume van de actiefslibtanks van de rwzi.
- Het structureel verhogen van de temperatuur in de actiefslibtanks heeft aanvullende kostenvoordelen door een lagere productie van slib ten gevolge van een verdergaande slibmineralisatie, door een verbeterde verwijdering van stikstof uit het afvalwater en door de mogelijkheid om eventuele investeringen ter verbetering van het actiefslibproces uit te stellen.

## 7 AANBEVELINGEN BIJ HET ONTWERP VAN EEN ACTIEFSLIBPROCES

- Bepaal op basis van beschikbare meetgegevens een passende mathematische relatie tussen de maandgemiddelde temperatuur  $T_{\text{rwzi}}$  van het actief slib en de maandgemiddelde temperatuur  $T_{\text{knmi}}$  van de buitenlucht, zoals gemeten door een nabijgelegen meetstation van het KNMI.

- Gebruik hierbij bij voorkeur de mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$ . Indien deze relatie onvoldoende past bij de meetgegevens van een rwzi, kan eventueel een meergraads polynoom worden toegepast.
- Pas de gevonden mathematische relatie eventueel aan indien in het ontwerp van een rwzi maatregelen worden opgenomen die effect hebben op de temperatuur van het actief slib (bijvoorbeeld het afdekken van actiefslibtanks).
- Bereken met de resulterende mathematische relatie en met meetgegevens van het KNMI over de afgelopen 20 jaar, maandgemiddelde temperaturen van het actief slib.
- Bereken met de verkregen temperaturen van het actief slib en met behulp van een adequaat rekenmodel voor het actiefslibproces, de kwaliteit van het effluent van de betrokken rwzi gedurende de afgelopen 20 jaar.
- Bepaal via een iteratief proces de omvang van de actiefslibtanks zodanig dat gedurende het overgrote deel van de beschouwde jaren de kwaliteit van het effluent voldoet aan de eisen als genoemd in de WVO-vergunning voor de rwzi (het percentage overschrijding dient nader overeen te worden gekomen met de vergunningverlener).

## 8. OVERIGE AANBEVELINGEN

- Het verdient aanbeveling nader te studeren op de mogelijkheid om via koude-/warmte-opslag zeer lage wintertemperaturen in het actief slib van rwzi's met ondiepe tanks te bestrijden. De gedachte hierbij is om 's zomers energie aan het effluent te onttrekken, deze energie op te slaan in de bodem en 's winters de opgeslagen energie te gebruiken voor opwarming van het actief slib.
- Het beperken van de invloed van wind op het afkoelen van open actiefslibtanks is een kosteneffectieve maatregel. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen hoe effectief het aanplanten van bomen of andere vegetatie rondom een rwzi of actiefslibtanks is ter reductie van de genoemde windinvloed. Bij dit onderzoek zou ook het ontwerp van een effectief windscherm betrokken kunnen worden.
- De afkoeling van afvalwater in rioolstelsels wordt nagenoeg geheel bepaald door de warmtegeleiding door de bodemmateriële tussen rioolbuis en maaiveld. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen of door ingrepen in de bodem rondom de rioolbuizen (aanbrengen van ander materiaal of drooglegging) de warmtegeleiding van de bodem kosteneffectief beperkt kan worden.
- De temperatuur van het geloosde afvalwater uit woningen bepaalt in belangrijke mate de temperatuur van het actief slib in een rwzi. Nader onderzoek zou meer licht moeten werpen op deze lozingstemperatuur.
- Het onttrekken van warmte aan gemeentelijke rioolstelsels voor verwarmingsdoeleinden krijgt steeds meer aandacht. Het verdient aanbeveling bij deze projecten de invloed van deze onttrekkingen op de temperatuur van het actief slib in de betrokken rwzi, integraal mee te nemen.



# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n zes miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030-2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COMMUNAAL AFVALWATER OP TEMPERATUUR HOUDEN VOOR ACTIEVER SLIB IN RWZI'S

## INHOUD

|      |                                                                      |    |
|------|----------------------------------------------------------------------|----|
|      | TEN GELEIDE                                                          |    |
|      | SAMENVATTING                                                         |    |
|      | STOWA IN HET KORT                                                    |    |
| 1    | INLEIDING                                                            | 1  |
| 2    | DOEL VAN HET ONDERZOEK                                               | 3  |
| 3    | AANPAK VAN HET ONDERZOEK                                             | 4  |
| 4    | EMPIRISCH ONDERZOEK RWZI'S                                           | 5  |
| 4.1  | Keuze van de gebruikte mathematische relatie                         | 5  |
| 4.2  | Keuze van meetstations KNMI                                          | 6  |
| 4.3  | In beschouwing genomen rwzi's                                        | 7  |
| 4.4  | Kwaliteit van de berekende mathematische relaties                    | 8  |
| 4.5  | Gevoeligheid rwzi's voor temperatuur buitenlucht (constante a)       | 9  |
| 4.6  | Temperatuur in actief slib bij 0 °C buitenlucht (constante b)        | 9  |
| 4.7  | Temperatuur in actief slib hoogzomer                                 | 10 |
| 4.8  | Relatie tussen de constanten a en b                                  | 11 |
| 4.9  | Relatie tussen constante a en capaciteit rwzi                        | 12 |
| 4.10 | Relatie tussen constante b en capaciteit rwzi                        | 12 |
| 4.11 | Relatie tussen de constanten a en b en het specifieke influentdebiet | 13 |
| 4.12 | Invloed van de tijdschaal van de temperatuurgemiddelden              | 13 |
| 4.13 | Invloed van neerslag op temperatuur actief slib rwzi's               | 14 |

|            |                                                                         |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b>   | <b>MODELMATIG ONDERZOEK</b>                                             | <b>16</b> |
| <b>5.1</b> | Opzet van het modelmatig onderzoek                                      | 16        |
| <b>5.2</b> | Gegevens over rioolstelsels in Nederland                                | 17        |
| <b>5.3</b> | Stationair energiemodel voor rioolstelsels                              | 18        |
| 5.3.1      | Energie uit rioolwater                                                  | 19        |
| 5.3.2      | Energie door wand rioolbuis                                             | 20        |
| 5.3.3      | Resultierend mathematisch model                                         | 21        |
| 5.3.4      | Toepassing op rioolstelsels van gemeenten                               | 22        |
| 5.3.5      | Toepassing op transportleidingen van waterschappen                      | 22        |
| 5.3.6      | Toepassing op het geheel van rioolstelsel en transportleidingen         | 23        |
| <b>5.4</b> | Energieprocessen bij rwzi's                                             | 24        |
| 5.4.1      | Opwarming door biologische processen                                    | 24        |
| 5.4.2      | Opwarming door omzetting mechanische energie                            | 24        |
| 5.4.3      | Opwarming door zonnestraling                                            | 25        |
| 5.4.4      | Geleiding naar of vanuit de bodem                                       | 25        |
| 5.4.5      | Overige energieprocessen bij een rwzi                                   | 26        |
| <b>6</b>   | <b>DOORREKENEN VAN REFERENTIESITUATIE EN VARIANTEN</b>                  | <b>27</b> |
| <b>6.1</b> | Standaardgegevens en uitgangspunten                                     | 27        |
| <b>6.2</b> | Relevante meteorologische gegevens                                      | 27        |
| <b>6.3</b> | Beschouwde referentiesituatie en varianten                              | 28        |
| <b>6.4</b> | Belangrijkste resultaten van de modelberekeningen                       | 29        |
| <b>7</b>   | <b>KOSTENEFFECTIVITEIT VAN TEMPERATUURVERHOGENDE MAATREGELEN</b>        | <b>34</b> |
| <b>7.1</b> | Kosten voor standaard actiefslibtanks                                   | 34        |
| <b>7.2</b> | Kosten van diepe actiefslibtanks                                        | 35        |
| <b>7.3</b> | Kosten van afdekken actiefslibtanks                                     | 35        |
| <b>7.4</b> | Beperking invloed wind                                                  | 36        |
| <b>7.5</b> | Isoleren van persleidingen                                              | 36        |
| <b>8</b>   | <b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>                                      | <b>37</b> |
| <b>8.1</b> | Conclusies uit het empirisch onderzoek                                  | 37        |
| <b>8.2</b> | Conclusies uit het modelmatig onderzoek                                 | 38        |
| <b>8.3</b> | Aanbevelingen bij het ontwerp van een actiefslibproces                  | 38        |
| <b>8.4</b> | Overige aanbevelingen                                                   | 39        |
| <b>9</b>   | <b>LIJST MET GEBRUIKTE SYMBOLEN</b>                                     | <b>40</b> |
| <b>10</b>  | <b>REFERENTIELIJST</b>                                                  | <b>41</b> |
|            | Bijlage(n)                                                              |           |
| 1          | Resultaten 48 rwzi's, alfabetisch gerangschikt op RWZI                  |           |
| 2          | Resultaten 48 rwzi's, gerangschikt op regressiecoëfficiënt $R^2$        |           |
| 3          | Resultaten 48 rwzi's, gerangschikt op constante a                       |           |
| 4          | Resultaten 48 rwzi's, gerangschikt op constante b                       |           |
| 5          | Resultaten 48 rwzi's, gerangschikt op temperatuur hoogzomer             |           |
| 6          | Resultaten 48 rwzi's, gerangschikt op capaciteit                        |           |
| 7          | Snelheidsbepalende weerstand tegen afkoeling van water in rioolstelsels |           |
| 8          | Warmte-geleidingscoëfficiënten van bodemmaterialen                      |           |
| 9          | Aanvullende informatie over vier energieprocessen bij een rwzi          |           |
| 10         | Detailresultaten van modelberekeningen                                  |           |

# 1

## INLEIDING

Bij de zuivering van communaal afvalwater in rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) speelt de temperatuur van het actief slib een belangrijke rol. Lage temperaturen zijn nadelig voor het zuiveringsproces. Dit geldt met name voor de verwijdering van stikstofverbindingen uit het afvalwater.

De temperatuur van het actief slib in rwzi's hangt primair samen met de temperatuur van de buitenlucht. Gedurende de winter worden de laagste temperaturen gemeten en in de zomer bereikt het actief slib een maximale temperatuur.

Bij het ontwerpen van rwzi's in Nederland wordt vaak een minimumtemperatuur in het actief slib van 8 °C aangehouden.

Naarmate bij een ontwerp van een rwzi een steeds lagere minimumtemperatuur voor het actief slib wordt aangehouden, stijgen de investeringskosten voor de rwzi onevenredig.

Naast de minimumtemperatuur van het actief slib speelt bij het ontwerpen van rwzi's ook het verloop van de temperatuur gedurende het jaar een rol. Uit vooronderzoek is gebleken dat de temperatuur van het actief slib in een rwzi, verder afgekort tot  $T_{rwzi}$ , nauw samenhangt met de temperatuur van de buitenlucht. Voor gegevens over de temperatuur van de buitenlucht kan gebruik worden gemaakt van gegevensbestanden van het KNMI. In het rapport wordt voor de temperatuur van de buitenlucht steeds de afkorting  $T_{knmi}$  gebruikt.

De gegevensbestanden van het KNMI kunnen tevens worden gebruikt om meer betrouwbare jaarprofielen voor de temperatuur van actief slib te bepalen. Via wiskundige technieken kan de gemeten temperatuur van actief slib nauwkeurig worden gekoppeld aan de temperatuur van de buitenlucht, zoals gemeten op een nabijgelegen meetstation van het KNMI.

Door vervolgens gebruik te maken van KNMI-meetreeksen over meerdere decennia, kunnen betrouwbare gegevens worden verkregen over de temperatuur van actief slib. Dit is van belang voor een verantwoord technologisch ontwerp voor een rwzi.

Bij het ontwerpen van de uitbreiding van een bestaande rwzi zijn vaak meetgegevens beschikbaar over de temperatuur van het actief slib. Bij het gebruik van deze meetgegevens moet echter de nodige reserve in acht worden genomen vanwege zaken als:

1. de beperkte lengte van de meetreeks (is gemeten gedurende een jaar met een strenge winter?);
2. de nauwkeurigheid van de temperatuurmeting (is het meetinstrument periodiek geijkt?);
3. de verwijdering van volwassen vegetatie rondom de rwzi ten behoeve van de nieuwbouw (deze vegetatie heeft een isolerend effect);
4. het bouwen van diepere tanks dan de bestaande tanks (diepere tanks hebben relatief gezien en geringer warmte-uitwisselend oppervlak met de buitenlucht);
5. het afdekken van tanks binnen het nieuwbouwproject (hierdoor staat het afvalwater in de toekomst minder warmte af);

6. het eventueel aanvoeren van extra afvalwater vanaf andere gerioleerde woonkernen (afkoeling van dit afvalwater gedurende langdurend transport);
7. het verminderen van de aanvoer van rioolvreemd water (dit water kan een bepaalde constante en afwijkende temperatuur hebben);
8. afkoppelen van regenwater vanaf het betrokken rioolstelsel (bij kwakkelwinters minder koud smeltwater in het riool);
9. het actief onttrekken van warmte aan het afvalwater door derden (bijvoorbeeld projecten met warmtepompen op basis van rioolwater).

De uitdaging is het zo goed mogelijk op peil houden van de temperatuur van het communale afvalwater tussen het moment van lozing en het moment van zuivering via het actief slib.

De afkoeling van communaal afvalwater in het rioolstelsel en in de rwzi kan in beeld worden gebracht via een energiemodel. Een dergelijk model kan antwoorden geven op vragen bij zaken als voorgaand genoemd.

# 2

## DOEL VAN HET ONDERZOEK

De doelstelling van het onderzoek kan als volgt worden omschreven:

- het opzetten van een methodiek voor het bepalen van het minimum en het jaarlijkse verloop van de temperatuur van actief slib in een rwzi. Dit in relatie tot de groei en activiteit van het actief slib;
- nagaan welke de belangrijkste factoren zijn die de afkoeling van communaal afvalwater bepalen en aangeven of en zo ja, hoe deze factoren in de waterketen door een waterschap zijn te beïnvloeden;
- het kwantificeren van de invloed van maatregelen die de afkoeling van communaal afvalwater tegengaan. Dit via een toegesneden energiemodel en voor maatregelen die betrekking hebben op gemeentelijke rioolstelsels, op transportleidingen en op rwzi's;
- nagaan van de gevoeligheid van de temperatuur van actief slib in een rwzi op de kosten van het zuiveren van communaal afvalwater.

# 3

## AANPAK VAN HET ONDERZOEK

Het totale onderzoek is onderverdeeld in de volgende deelonderzoeken:

- een empirisch onderzoek naar de relatie tussen de temperatuur van actief slib in een rwzi en de temperatuur van de buitenlucht. Dit op basis van beschikbare meetgegevens die betrekking hebben op de rwzi's in Nederland en op basis van meetgegevens van het KNMI;
- een modelmatig onderzoek naar de afkoeling van afvalwater in een gemeentelijk rioolstelsel en in transportleidingen van een waterschap. Daaraan gekoppeld een modelmatig onderzoek naar de energiebalans over een bijbehorende rwzi;
- een onderzoek naar maatregelen waarmee de afkoeling van afvalwater kan worden bestreden, waarbij kosten en baten tegen elkaar worden afgewogen.

Het rapport wordt afgesloten met een hoofdstuk waarin zijn opgenomen, de conclusies en aanbevelingen.

## 4

## EMPIRISCH ONDERZOEK RWZI'S

## 4.1 KEUZE VAN DE GEBRUIKTE MATHEMATISCHE RELATIE

De temperatuur van het actief slib in rwzi's hangt primair samen met de temperatuur van de buitenlucht. Het afgelopen decennium zijn veel waterschappen ertoe overgegaan om de temperatuur van het actief slib met een bepaalde frequentie tot zelfs volcontinu te meten. De verkregen meetresultaten kunnen worden omgerekend tot bijvoorbeeld maandgemiddelde waarden voor  $T_{\text{rwzi}}$ .

Het KNMI meet op meerdere meetstations in Nederland de temperatuur van de buitenlucht. Via uurgemiddelde meetwaarden worden etmaalgemiddelde buitenluchttemperaturen berekend. Op basis van deze gemiddelde etmaaltemperaturen kunnen maandgemiddelde waarden voor  $T_{\text{knmi}}$  worden berekend.

Indien voor een rwzi de verkregen maandgemiddelde waarde voor  $T_{\text{rwzi}}$  grafisch wordt uitgezet tegen de maandgemiddelde waarde voor  $T_{\text{knmi}}$ , ontstaat in de meeste gevallen een rechte lijn. Deze lijn kan als volgt mathematisch worden beschreven:

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

Deze relatie heeft de volgende eigenschappen:

- de relatie is eenvoudig;
- de relatie geeft direct veel inzicht;
- via de constante  $a$  kan de gevoeligheid van  $T_{\text{rwzi}}$  voor veranderingen in  $T_{\text{knmi}}$  direct worden vergeleken met die van een andere rwzi;
- de constante  $b$  geeft direct informatie over  $T_{\text{rwzi}}$  bij een temperatuur van de buitenlucht rond het vriespunt ( $T_{\text{knmi}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

De gekozen mathematische relatie kan het nadeel hebben dat het verband tussen  $T_{\text{rwzi}}$  en  $T_{\text{knmi}}$  wat minder nauwkeurig wordt beschreven dan bij het gebruik van bijvoorbeeld een meergraads polynoom. Hierbij moet echter bedacht worden dat de nauwkeurigheid van de bepaling van  $T_{\text{rwzi}}$  beperkt is. Zeker in het verleden ging het vaak om een momentopname en de meting werd laag frequent uitgevoerd. Daarnaast werden thermometers niet of slechts beperkt gecontroleerd op standaard afwijkingen.

Natuurlijk kan een individueel waterschap gebruik maken van een meergraads polynoom voor het beschrijven van de mathematische relatie tussen  $T_{\text{rwzi}}$  en  $T_{\text{knmi}}$ . Dit bijvoorbeeld op basis van online-meting van de temperatuur in het actief slib en op basis van een periodieke controle van het meetinstrument waarmee de temperatuur in het actief slib wordt gemeten.



Navolgend zal steeds gebruik worden gemaakt van de eerdergenoemde mathematische relatie:

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

De constante a wordt in dit rapport de *temperatuurgevoeligheid* van een rwzi genoemd met als eenheid: °C verandering in het actief slib per °C verandering in de temperatuur van de buitenlucht.

De constante b in de genoemde mathematische vergelijking komt overeen met de temperatuur in het actief slib bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C. De eenheid van de constante b is °C. De constante b zou gekozen kunnen worden als de *minimum ontwerptemperatuur* voor het actiefslibproces (zie de toelichting in paragraaf 4.6).

#### 4.2 KEUZE VAN MEETSTATIONS KNMI

Gevoelsmatig levert de mathematische relatie tussen een  $T_{\text{rwzi}}$  en de  $T_{\text{knmi}}$  van het meest nabijgelegen meetstation van het KNMI het beste resultaat op. Om na te gaan of dit in de praktijk ook het geval is, zijn de meetgegevens van de rwzi De Bilt gerelateerd aan de meetgegevens van de vijf hoofdmeetstations van het KNMI.

In tabel 4.1 staan de resultaten vermeld voor de vijf relaties  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$ . De maandgemiddelde meetgegevens van de rwzi De Bilt hebben hierbij betrekking op de periode januari 1999 tot en met december 2003 (n = 60 maanden). De gegevens van het KNMI zijn verwerkt tot maandgemiddelden voor dezelfde periode.

TABEL 4.1

RELATIE  $T_{\text{RWZI}} = A \times T_{\text{KNMI}} + B$  VOOR RWZI DE BILT OP BASIS VAN MAANDGEMIDDELTE TEMPERATUREN

| Meetstation<br>KNMI | Constante a<br>(°C/°C) | Constante b<br>(°C) | Regressiecoëfficiënt<br>$R^2$ |
|---------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|
| De Bilt             | 0,65                   | 7,4                 | 0,906                         |
| Eelde               | 0,64                   | 7,9                 | 0,913                         |
| Den Helder          | 0,70                   | 6,9                 | 0,941                         |
| Maastricht          | 0,61                   | 7,6                 | 0,895                         |
| Vlissingen          | 0,69                   | 6,4                 | 0,937                         |

De regressiecoëfficiënt  $R^2$  geeft aan in welke mate de onderzochte mathematische relatie voldoet. Bij  $R^2=1,00$  is er sprake van een perfecte relatie (alle meetpunten op de onderzochte lijn). Bij  $R^2 = 0,00$  voldoet de onderzochte relatie in het geheel niet.

Uit tabel 4.1 blijkt dat de onderzochte relatie tussen de meetgegevens van de rwzi De Bilt en de meetgegevens van het zeer nabijgelegen meetstation De Bilt van het KNMI goed is ( $R^2 = 0,906$ ). De mathematische relaties tussen de meetgegevens van de rwzi De Bilt en de meetgegevens van de meetstations Eelde, Den Helder en Vlissingen zijn echter nog beter ( $R^2$  groter dan 0,906).

In tabel 4.1 valt verder op dat bij gebruik van de meetgegevens van de vijf genoemde meetstations van het KNMI, er sprake is van verschillen tussen de constanten a en b. Dit heeft te maken met de systematische verschillen in de temperatuur van de buitenlucht op de vijf betrokken locaties in Nederland. In de volgende tabel 4.2 zijn deze verschillen nader gekwantificeerd. Hierbij hebben de gegevens van het KNMI betrekking op de periode 1961 t/m 2005.

TABEL 4.2

$$\text{RELATIE } T_{\text{KNMI-MEETSTATION}} = A \times T_{\text{KNMI DE BILT}} + B$$

| Meetstation van KNMI | Constante a (°C/°C) | Constante b (°C) | Regressiecoëfficiënt R <sup>2</sup> |
|----------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| Eelde                | 1,01                | - 0,83           | 0,995                               |
| Den Helder           | 0,94                | + 0,61           | 0,978                               |
| Maastricht           | 1,04                | - 0,21           | 0,993                               |
| Vlissingen           | 0,95                | + 1,19           | 0,984                               |

Uit tabel 4.2 blijkt dat er steeds sprake is van zeer hoge regressiecoëfficiënten. Dit verklaart waarom de meetgegevens van de rwzi De Bilt ook goed gerelateerd zouden kunnen worden aan de meetgegevens van verder weg gelegen meetstations van het KNMI.

Uit tabel 4.1 volgt  $b = 7,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  voor de combinatie van KNMI-meetstation De Bilt en de rwzi De Bilt. Voor bijvoorbeeld de combinatie van KNMI-meetstation Den Helder en de rwzi De Bilt geldt  $b = 6,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Het verschil van  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tussen de beide waarden van  $b$  heeft geen betekenis bij beschouwingen over het afkoelen van het water in de rwzi De Bilt. Daarbij speelt de temperatuur van de buitenlucht die ter plaatse heerst een rol.

Het KNMI beschikt in Nederland over een tiental meetstations waar de temperatuur van de buitenlucht volautomatisch wordt gemeten. De resultaten van deze metingen zijn vrij beschikbaar via het Internet en kunnen worden gebruikt onder vermelding van de bron van herkomst.

De bedoelde tien meetstations van het KNMI zijn:

- Leeuwarden;
- Eelde;
- Twente;
- De Bilt;
- Eindhoven;
- Maastricht;
- Den Helder;
- Schiphol;
- Rotterdam;
- Vlissingen.

Bij het verdere onderzoek is er voor gekozen de meetgegevens van de genoemde tien meetstations van het KNMI te gebruiken. Hierbij is steeds het meetstation geselecteerd dat hemelsbreed het dichtst bij een betrokken rwzi is gelegen.

#### 4.3 IN BESCHOUWING GENOMEN RWZI'S

In bijlage 1 zijn de rwzi's, die bij het empirische deel van het onderzoek zijn betrokken, alfabetisch gerangschikt weergegeven. In totaal zijn gegevens ontvangen en verwerkt van 48 rwzi's. Dit aantal komt overeen met circa 14 % van het totale aantal rwzi's in Nederland.

Bij het selecteren van rwzi's is de randvoorwaarde gehanteerd dat gedurende minimaal vijf jaar de temperatuur van het actief slib moest zijn gemeten, waarbij minimaal drie meetresultaten verspreid over een maand beschikbaar moesten zijn. Daarnaast moesten de gegevens elektronisch beschikbaar zijn. Op basis van deze randvoorwaarden konden de gegevens van meerdere waterschappen (en/of rwzi's) niet of slechts gedeeltelijk gebruikt worden.

In tabel 4.3 is aangegeven van welke waterschappen gegevens zijn verwerkt en hoeveel rwzi's hierbij waren betrokken.

TABEL 4.3 WATERSCHAPPEN WAARVAN GEGEVENS VAN RWZI'S ZIJN VERWERKT

| Waterschap/Hoogheemraadschap | Aantal rwzi's |
|------------------------------|---------------|
| Brabantse Delta              | 18            |
| Vallei & Eem                 | 7             |
| Veluwe                       | 7             |
| Hollands Noorderkwartier     | 4             |
| De Dommel                    | 2             |
| Waterschapsbedrijf Limburg   | 2             |
| Stichtse Rijnlanden          | 2             |
| Zuiderzeeland                | 1             |
| Noorderzijlvest              | 1             |
| Reest en Wieden              | 1             |
| Rivierenland                 | 1             |
| Zeeuwse Eilanden             | 1             |
| Zeeuws Vlaanderen            | 1             |
| <b>Totaal</b>                | <b>48</b>     |

Op een totaal van 26 waterschappen en hoogheemraadschappen zijn van 13 organisaties gegevens verwerkt. Dit aandeel is 50 % van het totaal.

In tabel 4.3 valt de positie van het Waterschap Brabantse Delta op. Bij (de rechtsvoorganger van) dit waterschap is men al in 1983 gestart met het meten van de temperatuur van het actief slib.

#### 4.4 KWALITEIT VAN DE BEREKENDE MATHEMATISCHE RELATIES

Zoals eerder is vermeld, is steeds gekozen voor de volgende mathematische relatie

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

In de bijlagen 1 t/m 6 zijn voor de beschouwde rwzi's de berekende twee constanten a en b opgenomen. Tevens is in deze bijlagen de berekende regressiecoëfficiënt  $R^2$  opgenomen. De hoogte van  $R^2$  is een maat voor de kwaliteit van de berekende mathematische relatie.

In bijlage 2 zijn de gegevens gerangschikt naar oplopende waarde van  $R^2$ . In tabel 4.4 is op basis van deze rangschikking een frequentieverdeling voor  $R^2$  weergegeven.

TABEL 4.4 FREQUENTIEVERDELING VOOR DE BEREKENDE REGRESSIECOËFFICIËNTEN  $R^2$

| Klasse voor $R^2$ | Aantal rwzi's | Kwalificatie van $R^2$ |
|-------------------|---------------|------------------------|
| < 0,80            | 3             | Matig                  |
| 0,80 - < 0,85     | 5             | Voldoende              |
| 0,85 - < 0,90     | 9             | Goed                   |
| 0,90 - < 0,95     | 19            | Zeer goed              |
| $\geq 0,95$       | 12            | Uitmuntend             |
| <b>Totaal</b>     | <b>48</b>     |                        |

Op basis van de gegevens in tabel 4.4 kan geconcludeerd worden dat de gekozen mathematische relatie in meer dan 80% van de gevallen goed, zeer goed of uitmuntend is. Uit bijlage 2 blijkt een laagste regressiecoëfficiënt van 0,78. Gelet op de omvang van de gegevensbestand is dit nog steeds relatief hoog. Om deze reden, is er voor gekozen alle 48 rwzi's bij de verdere beschouwingen te betrekken.

#### 4.5 GEVOELIGHEID RWZI'S VOOR TEMPERATUUR BUITENLUCHT (CONSTANTE A)

In bijlage 3 zijn de berekende gegevens voor de rwzi's gerangschikt naar oplopende waarde van de constante a. Hierbij is a de constante in de mathematische relatie  $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$ . In tabel 4.5 is op basis van deze rangschikking een frequentieverdeling voor de constante a weergegeven.

TABEL 4.5 FREQUENTIEVERDELING VOOR DE TEMPERATUURGEVOELIGHEID VAN RWZI'S (CONSTANTE A)

| Klasse voor a (°C/°C) | Aantal rwzi's | Kwalificatie van temperatuurgevoeligheid |
|-----------------------|---------------|------------------------------------------|
| < 0,60                | 5             | Zeër beperkt                             |
| 0,60 - < 0,70         | 23            | Beperkt                                  |
| 0,70 - < 0,80         | 11            | Normaal                                  |
| 0,80 - < 0,90         | 7             | Groot                                    |
| ≥ 0,90                | 2             | Zeër groot                               |
| <b>Totaal</b>         | <b>48</b>     |                                          |

Op basis van de gegevens in tabel 4.5 kan geconcludeerd worden dat meer dan 80% van de beschouwde rwzi's een normale, beperkte of zeer beperkte temperatuurgevoeligheid heeft ( $a < 0,80$  °C/°C).

#### 4.6 TEMPERATUUR IN ACTIEF SLIB BIJ 0 °C BUITENLUCHT (CONSTANTE B)

In bijlage 4 zijn de berekende gegevens voor de rwzi's gerangschikt naar oplopende waarde van de constante b. Hierbij is b de constante in de mathematische relatie  $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$ . De fysieke betekenis van de constante b is de temperatuur van het actief slib in een rwzi bij een temperatuur van de buitenlucht rond het vriespunt ( $T_{knmi} = 0$  °C).

In tabel 4.6 is op basis van deze rangschikking een frequentieverdeling voor de constante b weergegeven.

TABEL 4.6 FREQUENTIEVERDELING VOOR TEMPERATUUR IN ACTIEF SLIB BIJ 0 °C BUITENLUCHT (CONSTANTE B)

| Klasse voor b (°C) | Aantal rwzi's | Kwalificatie van $T_{rwzi}$ bij $T_{knmi} = 0$ °C |
|--------------------|---------------|---------------------------------------------------|
| < 4                | 1             | Zeër laag                                         |
| 4 - < 6            | 10            | Laag                                              |
| 6 - < 8            | 21            | Normaal                                           |
| 8 - < 10           | 13            | Hoog                                              |
| ≥ 10               | 3             | Zeër hoog                                         |
| <b>Totaal</b>      | <b>48</b>     |                                                   |

Op basis van de gegevens in tabel 4.6 kan geconcludeerd worden dat meer dan 70 % van de beschouwde rwzi's een maandgemiddelde temperatuur in het actief slib heeft tussen 6 en 10 °C bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C. Een minimumtemperatuur van 8 °C wordt vaak gehanteerd bij het ontwerp van rwzi's.

Bij het voorgaande kan de vraag gesteld worden: hoe vaak heeft de buitenlucht een maandgemiddelde temperatuur van 0 °C of lager? Om dit na te gaan zijn meetgegevens van het KNMI-meetstation in De Bilt nader bestudeerd.

Gedurende de 45 winters in de periode 1961 t/m 2005 waren er 12 winters met 1, 2 of zelfs 3 maanden met een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C of lager. Deze 12 winters komen overeen met 27 % van het totaal van de 45 beschouwde winters.

Gedurende de 10 winters in de meer recente periode 1996 t/m 2005 waren er 2 winters met een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C of lager. In januari 1996 bedroeg deze temperatuur -0,1 °C en in januari 1997 bedroeg deze temperatuur -1,2 °C. Deze 2 winters komen overeen met 20 % van het totaal van de 10 beschouwde winters.

Gelet op de eerdergenoemde frequenties van winters met maanden met een gemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C of lager, zou er voor gekozen kunnen worden om bij het ontwerp van een rwzi de waarde van de constante b te bepalen en deze waarde te kiezen als minimumtemperatuur in het actief slib.

#### 4.7 TEMPERATUUR IN ACTIEF SLIB HOOGZOMER

In bijlage 5 zijn de berekende gegevens voor de rwzi's gerangschikt naar oplopende temperatuur in het actief slib, bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 20 °C (deze  $T_{rwzi}$  is afgekort tot  $T_{zomer}$ ).

Een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht voor 20 °C of hoger komt niet vaak voor en er is in Nederland dan sprake van "hoogzomer".

In tabel 4.7 is op basis van de rangschikking in bijlage 5 een frequentieverdeling voor  $T_{zomer}$  weergegeven.

TABEL 4.7

FREQUENTIEVERDELING VOOR TEMPERATUUR IN ACTIEF SLIB BIJ 20 °C BUITENLUCHT ( $T_{zomer}$ )

| Klasse voor $T_{zomer}$ in °C | Aantal rwzi's | Kwalificatie van $T_{rwzi}$ bij $T_{kmi} = 20$ °C |
|-------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|
| < 20                          | 2             | Zeer laag                                         |
| 20 - < 21                     | 10            | Laag                                              |
| 21 - < 22                     | 15            | Normaal                                           |
| 22 - < 23                     | 19            | Hoog                                              |
| ≥ 23                          | 2             | Zeer hoog                                         |
| <b>Totaal</b>                 | <b>48</b>     |                                                   |

Op basis van de gegevens in tabel 4.7 kan geconcludeerd worden dat bij meer dan 90% van de beschouwde rwzi's de temperatuur in het actief slib ligt tussen 20 en 23 °C, bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 20 °C.

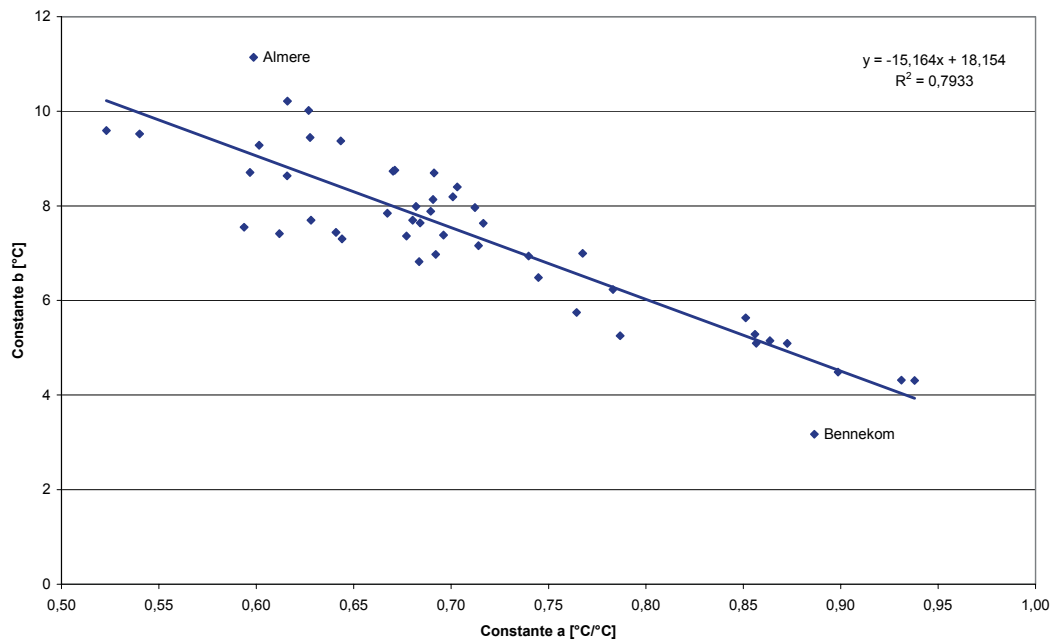
#### 4.8 RELATIE TUSSEN DE CONSTANTEN A EN B

In de voorgaande paragrafen is steeds gewerkt op basis van de relatie:

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

In grafiek 4.1 is voor elk van de beschouwde 48 rwzi's de gevonden waarde van de constante a uitgezet tegen die van b.

GRAFIEK 4.1 RELATIE TUSSEN DE CONSTANTEN A EN B VOOR 48 RWZI'S



Uit grafiek 4.1 blijkt dat de constanten a en b direct met elkaar samenhangen.

In grafiek 4.1 zijn twee duidelijk afwijkende rwzi's aangegeven:

- de rwzi-Bennekom met  $b = 3,2 \text{ °C}$  (heeft een zeer ondiepe oxidatiesloot);
- de rwzi-Almere met  $b = 11,1 \text{ °C}$  (verwerkt afvalwater uit een gescheiden rioolstelsel).

Indien de constanten a en b voor deze twee sterk afwijkende rwzi's uit grafiek 4.1 zouden worden weggelaten, gaat de weergegeven regressielijn iets vlakker lopen en kan voor de relatie tussen de constanten a en b worden geschreven:

$$b = -14,0 a + 17,3 \quad (R^2 = 0,80)$$

Invullen van deze vergelijking voor b in de algemeen gebruikte relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  leidt na afronding tot:

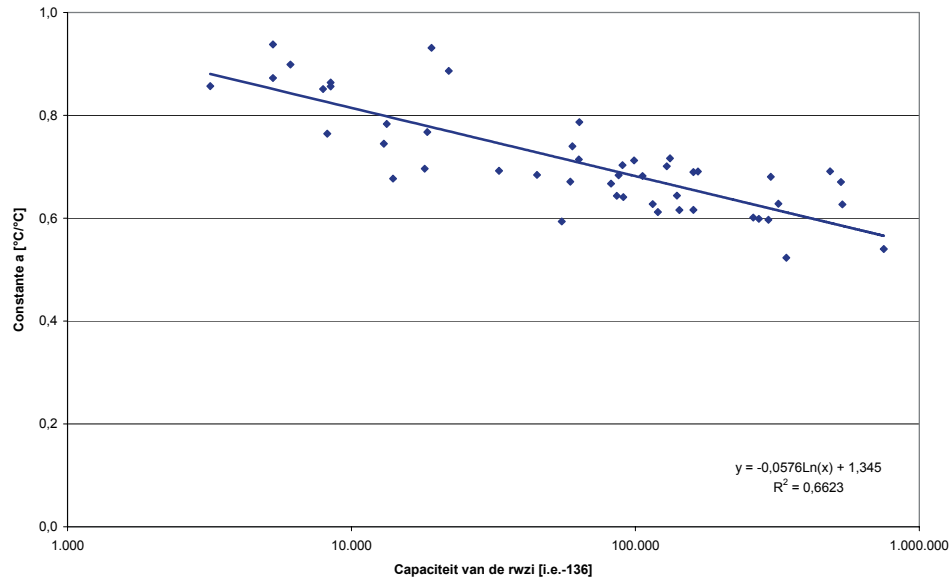
$$T_{\text{rwzi}} = a \times (T_{\text{knmi}} - 14) + 17$$

De laatste vergelijking leidt tot het resultaat dat bij  $T_{\text{knmi}} = 14 \text{ °C}$  steeds geldt  $T_{\text{rwzi}} = \text{circa } 17 \text{ °C}$ , onafhankelijk van de waarde van de constante a die bij een rwzi hoort.

#### 4.9 RELATIE TUSSEN CONSTATE A EN CAPACITEIT RWZI

In bijlage 6 zijn de gegevens over de 48 beschouwde rwzi gerangschikt naar de capaciteit van de rwzi's. In grafiek 4.2 is voor elk van de 48 betrokken rwzi's de gevonden waarde van de constante a uitgezet tegen de logaritme van de capaciteit van de rwzi.

GRAFIEK 4.2 RELATIE TUSSEN CONSTATE A EN CAPACITEIT RWZI VOOR 48 RWZI'S

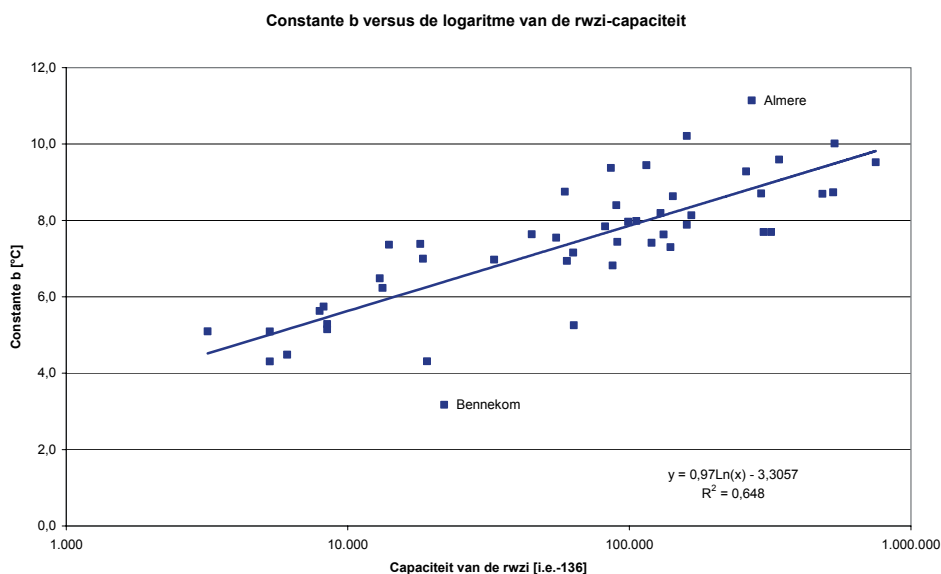


Uit grafiek 4.2 blijkt duidelijk een verband tussen de waarde van de constante a en de capaciteit van de rwzi. Naarmate de capaciteit van de rwzi stijgt, daalt de waarde van de constante a en daarmee de temperatuurgevoeligheid van de rwzi.

#### 4.10 RELATIE TUSSEN CONSTATE B EN CAPACITEIT RWZI

In grafiek 4.3 is voor elk van de 48 betrokken rwzi's de gevonden waarde van de constante b uitgezet tegen de logaritme van de capaciteit van de rwzi.

GRAFIEK 4.3 RELATIE TUSSEN CONSTATE B EN CAPACITEIT RWZI VOOR 48 RWZI'S



Uit grafiek 4.3 blijkt duidelijk een verband tussen de waarde van de constante  $b$  en de capaciteit van de rwzi. Naarmate de capaciteit van de rwzi stijgt, neemt de waarde van de constante  $b$  toe. Dit betekent dat de problematiek van lage ontwerptemperaturen voor het actiefslibproces afneemt naarmate de omvang van een rwzi toeneemt.

#### 4.11 RELATIE TUSSEN DE CONSTANTEN A EN B EN HET SPECIFIEKE INFLUENTDEBIET

Er is ook gezocht naar een relatie tussen de constanten  $a$  en  $b$  en het specifieke influentdebiet, uitgedrukt als liter/(i.e. x etmaal). Tussen dit specifieke influentdebiet en de waarde van de constanten  $a$  en  $b$  is geen enkel verband gevonden (om deze reden zijn de betrokken grafieken niet in het rapport opgenomen). Deze bevinding betekent niet dat er geen verband zou kunnen bestaan tussen de constanten  $a$  en  $b$  en bijvoorbeeld de hoeveelheden rioolvreemdwater en neerslagwater.

#### 4.12 INVLOED VAN DE TIJDSCHAAL VAN DE TEMPERATUURGEMIDDELDEN

In de voorgaande paragrafen van hoofdstuk 4 is steeds gerekend met een maandgemiddelde temperatuur van het KNMI en met een maandgemiddelde temperatuur in de rwzi. Navolgend is voor drie rwzi's ook gerekend met gemiddelden over 14 dagen en met gemiddelden over een periode van 7 dagen.

In tabel 4.8 zijn voor de rwzi Apeldoorn gegevens opgenomen over de constanten  $a$  en  $b$  en over de regressiecoëfficiënt  $R^2$  voor de relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$ . Hierbij zijn  $T_{\text{rwzi}}$  en  $T_{\text{knmi}}$  gemiddelden over perioden van één maand, twee weken en één week. De rwzi Apeldoorn is geselecteerd op basis van:

- de laagste constante  $a$  van de beschouwde rwzi's;
- één van de hoogste constanten  $b$  van de beschouwde rwzi's;
- een regressiecoëfficiënt  $R^2$  groter dan 0,90;
- de omvang van de rwzi (grootstedelijk).

TABEL 4.8

INVLOED TIJDSCHAAL OP DE MATHEMATISCHE RELATIE VOOR DE RWZI APELDOORN (JAN 1996-FEB 2003)

| Tijdschaal temperatuurgemiddelde                             | 1 maand | 2 weken | 1 week |
|--------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|
| Regressiecoëfficiënt $R^2$                                   | 0,931   | 0,889   | 0,851  |
| Constante $a$ ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ )        | 0,523   | 0,503   | 0,483  |
| Constante $b$ ( $^{\circ}\text{C}$ )                         | 9,59    | 9,76    | 9,98   |
| $T_{\text{rwzi}}$ bij $T_{\text{knmi}} = 20^{\circ}\text{C}$ | 20,1    | 19,8    | 19,6   |

In tabel 4.9 zijn voor de rwzi Bennekom gegevens opgenomen over de constanten  $a$  en  $b$  en over de regressiecoëfficiënt  $R^2$ . De rwzi Bennekom is geselecteerd op basis van:

- één van de hoogste constanten  $a$  van de beschouwde rwzi's;
- de laagste constante  $b$  van de beschouwde rwzi's;
- een correlatiecoëfficiënt  $R^2$  groter dan 0,90;
- de omvang van de rwzi (beperkt en gelegen in landelijk gebied).



TABEL 4.9

INVLOED TIJDSCHAAL OP DE MATHEMATISCHE RELATIE VOOR DE RWZI BENNEKOM (JAN 1996-FEB 2003)

| Tijdschaal temperatuurgemiddelde                             | 1 maand | 2 weken | 1 week |
|--------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|
| Regressiecoëfficiënt $R^2$                                   | 0,929   | 0,894   | 0,861  |
| Constante a ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ )          | 0,886   | 0,858   | 0,842  |
| Constante b ( $^{\circ}\text{C}$ )                           | 3,17    | 3,46    | 3,61   |
| $T_{\text{rwzi}}$ bij $T_{\text{knmi}} = 20^{\circ}\text{C}$ | 20,9    | 20,6    | 20,5   |

In tabel 4.10 zijn voor de rwzi Nieuwveer gegevens opgenomen over de constanten a en b en over de regressiecoëfficiënt  $R^2$ . De rwzi Nieuwveer is geselecteerd op basis van:

- een constante a rond het gemiddelde van deze constante voor de beschouwde rwzi's;
- een constante b niet ver van de gemiddelde waarde voor deze constante;
- een correlatiecoëfficiënt  $R^2$  groter dan 0,90;

de langste ervaring met het meten van  $T_{\text{rwzi}}$ .

TABEL 4.10

INVLOED TIJDSCHAAL OP DE MATHEMATISCHE RELATIE VOOR DE RWZI NIEUWVEER (JAN. 1996 - DEC 2005)

| Tijdschaal temperatuurgemiddelde                             | 1 maand | 2 weken | 1 week |
|--------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|
| Regressiecoëfficiënt $R^2$                                   | 0,918   | 0,861   | 0,807  |
| Constante a ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ )          | 0,691   | 0,646   | 0,618  |
| Constante b ( $^{\circ}\text{C}$ )                           | 8,70    | 9,20    | 9,51   |
| $T_{\text{rwzi}}$ bij $T_{\text{knmi}} = 20^{\circ}\text{C}$ | 22,5    | 22,1    | 21,9   |

Uit de tabellen 4.8 t/m 4.10 blijkt dat de kwaliteit van de mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  afneemt naarmate de tijdschaal voor de berekende temperatuurgemiddelden korter wordt (afnemende regressiecoëfficiënt  $R^2$ ).

Dit resultaat heeft te maken met het traag reageren van de temperatuur van actief slib in een rwzi, op veranderingen in de temperatuur van de buitenlucht, die relatief snel kunnen zijn. Bij het uitmiddelen van de temperaturen over een langere periode neemt de invloed van de genoemde traagheid af.

#### 4.13 INVLOED VAN NEERSLAG OP TEMPERATUUR ACTIEF SLIB RWZI'S

Navolgend zijn voor drie rwzi's de verschillen in de gebruikte mathematische relatie berekend voor maanden met veel en maanden met weinig neerslag. Het doel hiervan is de invloed van neerslagwater op de temperatuur van het actief slib in rwzi's te kwantificeren.

Als eerste is de rwzi Nieuwveer bij Breda geselecteerd vanwege het zeer grote bestand met frequent gemeten temperaturen in het actief slib. Het betreft de periode januari 1983 t/m februari 2005, met in totaal 265 maandgemiddelde temperaturen. Uit dit omvangrijke bestand zijn de volgende maanden geselecteerd:

- 38 maanden met een totale neerslag beneden 30 mm per maand;
- 43 maanden met een totale neerslag per maand van 100 mm of meer.

Als tweede is de rwzi Bennekom geselecteerd vanwege de eerder gesignaleerde zeer grote gevoeligheid van  $T_{\text{rwzi}}$  voor veranderingen in  $T_{\text{knmi}}$ . Uit het bestand over de periode januari 1996 tot en met oktober 2005, met in totaal 118 maandgemiddelde temperaturen, zijn de volgende maanden geselecteerd:

- 11 maanden met een totale neerslag beneden 30 mm per maand;
- 19 maanden met een totale neerslag per maand van 100 mm of meer.

Als laatste is de rwzi Almere geselecteerd vanwege het gegeven dat het influent van deze rwzi afkomstig is uit een gescheiden rioolstelsel. Op basis van dit gegeven zou geen invloed van neerslag verwacht mogen worden. Nagegaan is of dit inderdaad het geval is.

Uit het bestand over de periode januari 1995 tot en met maart 2004, met in totaal 109 maand-gemiddelde temperaturen, zijn de volgende maanden geselecteerd:

- 14 maanden met een totale neerslag beneden 30 mm per maand;
- 17 maanden met een totale neerslag per maand van 100 mm of meer.

In tabel 4.11 zijn voor de drie genoemde rwzi's de gegevens over de berekende mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  weergegeven.

TABEL 4.11

INVLOED VAN NEERSLAGWATER OP DE TEMPERATUUR VAN ACTIEF SLIB IN RWZI'S

| Omschrijving maanden hoeveelheid neerslag | Droge maanden<br>< 30 mm/maand | Alle maanden | Natte maanden<br>> 100 mm/maand |
|-------------------------------------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Rwzi Nieuwveer met gemengd rioolstelsel   |                                |              |                                 |
| a (°C/°C)                                 | 0,63                           | 0,65         | 0,71                            |
| b (°C)                                    | 9,0                            | 8,8          | 7,8                             |
| R <sup>2</sup> (-)                        | 0,91                           | 0,86         | 0,88                            |
| Aantal maanden                            | 38                             | 265          | 43                              |
| Rwzi Bennekom met gemengd rioolstelsel    |                                |              |                                 |
| a (°C/°C)                                 | 0,82                           | 0,89         | 0,98                            |
| b (°C)                                    | 4,1                            | 3,2          | 2,0                             |
| R <sup>2</sup> (-)                        | 0,92                           | 0,93         | 0,95                            |
| Aantal maanden                            | 11                             | 118          | 19                              |
| Rwzi Almere met gescheiden rioolstelsel   |                                |              |                                 |
| a (°C/°C)                                 | 0,62                           | 0,58         | 0,59                            |
| b (°C)                                    | 10,7                           | 11,5         | 11,2                            |
| R <sup>2</sup> (-)                        | 0,93                           | 0,87         | 0,89                            |
| Aantal maanden                            | 14                             | 109          | 17                              |

Op basis van de gegevens in tabel 4.11 kan het volgende worden geconcludeerd:

- door de afvoer van neerslagwater naar een rwzi wordt de temperatuur van het actief slib in een rwzi sterker afhankelijk van de temperatuur van de buitenlucht (zie de constanten a van de rwzi's Nieuwveer en Bennekom);
- door de afvoer van neerslagwater naar een rwzi wordt de temperatuur van het actief slib in een rwzi, bij  $T_{\text{knmi}} = 0$ , met 1 tot 2 °C verlaagd (zie de constanten b van de rwzi's Nieuwveer en Bennekom).
- door het (nagenoeg) ontbreken van neerslagwater in het influent van de rwzi Almere, zijn de genoemde invloeden voor deze rwzi afwezig (er is zelfs sprake van een beperkte tegengestelde trend in de verandering van de constanten a en b).

# 5

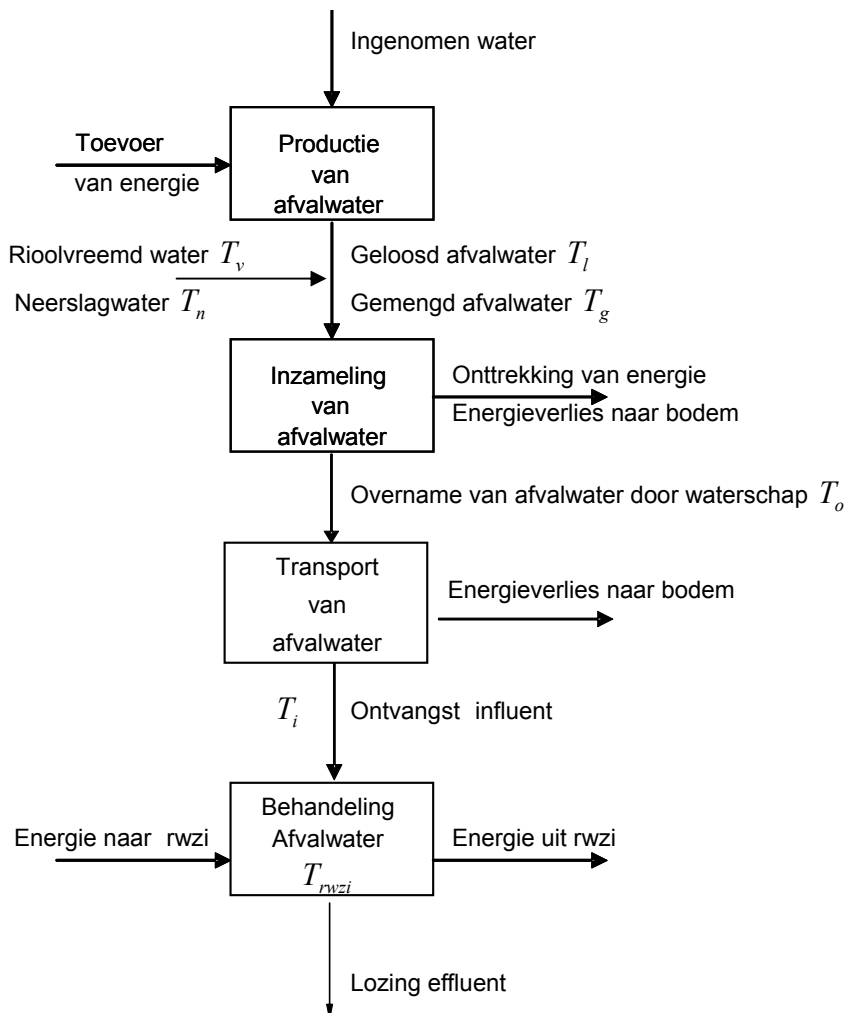
## MODELMATIG ONDERZOEK

### 5.1 OPZET VAN HET MODELMATIG ONDERZOEK

Conform de doelstelling van het onderzoek is gekozen voor het opstellen van een eenvoudig doch functioneel en toegesneden energiemodel. Via dit rekenmodel kan het effect van ingrepen worden gekwantificeerd, die tot doel hebben de afkoeling van communaal afvalwater te beperken.

In figuur 5.1 is een blokschema weergegeven met daarin aangegeven de voor het onderzoek relevante temperaturen van communaal afvalwater.

FIGUUR 5.1 BLOKSCHEMA MET BETREKKING TOT AFVALWATERTEMPERATUREN



Voor het modelmatige onderzoek is gekozen voor een rwzi met een influentbelasting van 100.000 i.e. (136 gram TZV per etmaal). Bij het modelmatige onderzoek zijn energiebalansen opgesteld voor:

- het bijbehorende gemeentelijke rioolstelsel (in figuur 5.1 het blok: Inzameling van afvalwater);
- de bijbehorende afvalwaterpersleidingen van het waterschap (in figuur 5.1 het blok: Transport van afvalwater);
- de bijbehorende rwzi van het waterschap (in figuur 5.1 het blok: Behandeling van afvalwater).

## 5.2 GEGEVENS OVER RIOOLSTELSELS IN NEDERLAND

In tabel 5.1 staan gegevens vermeld over de verschillende typen rioolstelsels in Nederland, met daarbij de totale lengte aan rioolbuizen. Deze en volgende gegevens zijn ontleend aan een publicatie van de Stichting RIONED en hebben betrekking op het jaar 2002 (ref. 1).

TABEL 5.1

GEGEVENS OVER TYPEN RIOOLSTELSEL EN LENGTE RIOOL

| Type rioolstelsel                        | km buis       |
|------------------------------------------|---------------|
| Gemengd riool                            | 46.702        |
| Gescheiden gerioleerd                    | 9.967         |
| Verbeterd gescheiden gerioleerd          | 15.962        |
| Drukriolering                            | 13.822        |
| <b>Sub-totaal voor gemeenten</b>         | <b>86.453</b> |
| Vrijverval riolering waterschappen       | 338           |
| Persleidingen van waterschappen          | 6.760         |
| <b>Totaal gemeenten en waterschappen</b> | <b>93.551</b> |

Betrokken op 16,1 miljoen inwoners in Nederland, per 1-1-2002 en op basis van een rioleringsgraad van 98,4% (ref 1), komen de voorgaande cijfers neer op gemiddeld 5,91 meter rioolbuis per aangesloten inwoner.

De afgelopen jaren hebben de waterschappen ten behoeve van het centraliseren van de zuivering van afvalwater relatief veel persleidingen aangelegd. Voor het jaar 2006 kan het voorgaande cijfer daarom naar boven worden afgerond op gemiddeld 6,0 meter rioolbuis per aangesloten inwoner. Hiervan is circa 90 % in beheer bij de gemeenten en circa 10 % in beheer bij de waterschappen.

Uit tabel 5.1 blijkt dat in Nederland verreweg het meest gemengde rioolstelsels worden toegepast (54 % van de gemeentelijke rioolstelsels). In tabel 5.2 is voor de vrijverval rioolstelsels in Nederland de verdeling weergegeven van de diameter van de toegepaste rioolbuizen.

TABEL 5.2

DIAMETERVERDELING IN VRIJVERVAL RIOOLSTELSELS OP BASIS VAN TOTALE LENGTE

| Diameter (mm)   | Gemengd (%) | Gescheiden (%) | Verbeterd gescheiden (%) |
|-----------------|-------------|----------------|--------------------------|
| 125 t/m 250     | 8           | 24             | 17                       |
| 300             | 55          | 54             | 57                       |
| 400             | 10          | 10             | 12                       |
| 500             | 10          | 5              | 7                        |
| 600             | 7           | 4              | 4                        |
| 700             | 2,5         | 1              | 1                        |
| 800             | 2,5         | 1              | 1                        |
| 900             | 2,5         | 0,5            | 0,5                      |
| 1.000           | 1           | 0,5            | 0,5                      |
| 1.250           | 1           | 0              | 0                        |
| 1.500 en groter | 0,5         | 0              | 0                        |
| <b>Totaal</b>   | <b>100</b>  | <b>100</b>     | <b>100</b>               |

Uit tabel 5.2 blijkt duidelijk dat rioolbuizen met een diameter van 300 mm verreweg het meest worden toegepast. In tabel 5.3 zijn gegevens opgenomen over de materialen waaruit de rioolbuizen bestaan.

TABEL 5.3

VERDELING MATERIAAL RIOOLBUIZEN OP BASIS VAN TOTALE LENGTE

| Materiaal     | 1950 (%)   | 1975 (%)   | 2000 (%)   |
|---------------|------------|------------|------------|
| Beton         | 91         | 83         | 71         |
| Kunststoffen  | 0          | 12         | 27         |
| Keramiek      | 5          | 1          | 2          |
| Overig        | 4          | 4          | p.m.       |
| <b>Totaal</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> |

Uit tabel 5.3 blijkt dat zich, in de afgelopen decennia, een duidelijke verschuiving heeft voorgedaan in de toegepaste materialen. Het constructiemateriaal beton domineert echter nog steeds.

### 5.3 STATIONAIR ENERGIEMODEL VOOR RIOOLSTELSELS

In het verlengde van het uitgevoerde empirische onderzoek, wordt gewerkt met maand-gemiddelde temperaturen. Gelet op deze relatief lange tijd is het bij benadering verantwoord uit te gaan van een stationaire situatie per maand, die van maand tot maand kan variëren. Voor het doel van de onderhavige studie, naar de afkoeling van communaal afvalwater, zouden rioolstelsels opgevat kunnen worden als de som van een groot aantal afzonderlijk doorstroomde rioolbuizen. Voor elk afzonderlijk buissegment geldt, onder stationaire condities, de volgende energiebalans:

Energie uit rioolwater = energie door wand rioolbuis

### 5.3.1 ENERGIE UIT RIOOLWATER

De hoeveelheid energie uit het rioolwater gedurende het verblijf in het rioolstelsel, laat zich berekenen via de volgende formule:

$$\phi = Q \times \rho \times c_p \times \Delta T_w$$

$\phi$  is de uitgewisselde hoeveelheid energie in Watt (W);

$Q$  is het debiet aan afvalwater in m<sup>3</sup>/s;

$\rho$  is de dichtheid van water = 1.000 kg/m<sup>3</sup>;

$c_p$  is de soortelijke warmte van water = 4.190 J/kg per graad Kelvin (K);

$\Delta T_w$  is het temperatuurverschil tussen het ingaande en uitgaande water in K of °C.

In paragraaf 4.9 is gebleken dat het water van neerslag invloed heeft op de temperatuur van het actief slib in een rwzi. Deze invloed beperkt zich echter tot 1 á 2 °C. Op basis van dit gegeven wordt het verantwoord geacht voor het rekenmodel uit te gaan van de gemiddelde hoeveelheid neerslagwater en dit op te tellen bij de hoeveelheid afvalwater onder DWA omstandigheden.

Het over een lange tijd (maand, jaar) gemiddelde afvalwaterdebiet, dat via een rioolstelsel wordt getransporteerd naar een rwzi met een gemeten influentbelasting van 100.000 i.e., kan worden bepaald op basis van de volgende (gemiddelde) uitgangspunten:

- 60.000 inwoners met aansluiting op rioolstelsel;
- 40.000 i.e. overig afvalwater, inclusief afvalwater van onbekende oorsprong;
- 125 liter geloosd afvalwater per inwoner per etmaal;
- 125 liter geloosd afvalwater per andere i.e. per etmaal;
- 20 % rioolvreemd water t.o.v. geloosd afvalwater (25 liter/(i.e. x etmaal));
- 50 % neerslagwater t.o.v. DWA van rwzi (75 liter/(i.e. x etmaal)).

Op basis van deze uitgangspunten kan de volgende gemiddelde waarde voor  $Q$  worden berekend:

$$Q = 100.000 \times 0,125 \times 1,2 \times 1,5 = 22.500 \text{ m}^3/\text{etmaal} \text{ (225 liter/(i.e. x etmaal))}.$$

òf

$$Q = 22.500 / (24 \times 3.600) = 0,26 \text{ m}^3/\text{s} \text{ gemiddeld}$$

### 5.3.2 ENERGIE DOOR WAND RIOOLBUIS

Bij het stationaire transport van energie vanuit het afvalwater, via de wand van de rioolbuis en de bodem naar de atmosfeer, zijn een viertal deelweerstand te onderscheiden. Hierbij is de weerstand in de bodem tussen de rioolbuis en het maaiveld snelheidsbepalend voor het totale energietransport (zie bijlage 7). Op basis van dit gegeven kan de hoeveelheid energie die door de wanden van een stuk rioolbuis van het betrokken rioolstelsel wordt getransporteerd als volgt worden berekend:

$$\phi = \lambda \times 0,85 \times \Delta L \times S_L \times (T_w - T_m)$$

- $\phi$  is de hoeveelheid getransporteerde energie (W);  
 $\lambda$  is effectieve warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem tussen riool en maaiveld (W/(m x K));  
0,85 is correctiefactor in verband met overige weerstanden tegen energietransport (zie bijlage 7);  
 $\Delta L$  is de lengte van het betrokken stuk rioolbuis (m);  
 $S_L$  is een dimensieloze constante;  
 $T_w$  is de temperatuur van het water in de rioolbuis (°C of K);  
 $T_m$  is de temperatuur van het bovenliggende maaiveld (°C of K).

De constante  $S_L$  volgt uit het toegepaste stationaire model voor de geleiding van warmte vanuit een rioolbuis, via de wand van de rioolbuis en de bovenliggende bodem, naar het maaiveld boven de rioolbuis. Het toegepaste model staat als voorbeeld beschreven in de “Wärme-atlas Verein Deutscher Ingenieure”, (ref. 2). Op basis van de daar gegeven informatie kan de constante  $S_L$  berekend worden met de volgende formule:

$$S_L = 2\pi / \ln((4H + 2D) / D)$$

Hierbij is H de afstand tussen het maaiveld en de binnenkant van de bovenzijde van de rioolbuis. Het symbool C staat voor de binnendiameter van de betrokken rioolbuis.

In tabel 5.4 zijn weergegeven de resultaten van de berekening van de constante  $S_L$ , afhankelijk van de gekozen waarden voor de diepte H en de diameter D.

TABEL 5.4

BEREKENDE WAARDEN VOOR DE DIMENSIELOZE CONSTATE  $S_L$  UIT STATIONAIR GELEIDINGSMODEL

| H (m) | D=0,2 m | D=0,3 m | D = 0,4 m | D = 0,5 m |
|-------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0,6   | 2,38    | 2,73    | 3,02      | 3,28      |
| 0,8   | 2,17    | 2,47    | 2,73      | 2,95      |
| 1,0   | 2,03    | 2,30    | 2,53      | 2,73      |
| 1,2   | 1,93    | 2,17    | 2,38      | 2,56      |

In de praktijk is een minimale gronddekking van rioolbuizen noodzakelijk om te voorkomen dat buizen bevriezen. Daarnaast zal de gronddekking veelal toenemen naarmate de diameter van de rioolbuis toeneemt. Een en ander betekent in tabel 5.4 een “praktische diagonaal” met  $S_L = 2,38$  linksboven en  $S_L = 2,56$  rechtsonder. De waarde  $S_L = 2,5$  zal in veel praktijksituaties voldoen.

### 5.3.3 RESULTEREND MATHEMATISCH MODEL

Op basis van de in het begin van dit hoofdstuk genoemde energiebalans en op basis van de deelformules voor de afkoeling van het rioolwater en voor het energietransport door de wand van de rioolbuizen naar het maaiveld, kan als eindresultaat een mathematisch model voor de afkoeling van rioolwater worden afgeleid. Deze afleiding verloopt via enkele stappen:

In een eerste stap worden de deelformules uit de paragrafen 5.3.1 en 5.3.2 aan elkaar gekoppeld. Dit levert het volgende resultaat op:

$$Q \times \rho \times c_p \times \Delta T_w = \lambda \times 0,85 \times \Delta L \times S_L \times (T_w - T_m)$$

In stap twee wordt een integratie uitgevoerd over de totale lengte van de rioolbuizen in het beschouwde rioolstelsel van de gemeente of in het transportstelsel van het waterschap. Dit levert het volgende resultaat:

$$Q \times \rho \times c_p \times \Delta T_w = \lambda \times 0,85 \times L \times S_L \times \Delta T_{\ln}$$

Hierbij staat  $\Delta T_{\ln}$  voor het zogeheten logaritmisch gemiddelde verschil tussen de temperatuur van het water in de rioolbuizen en de temperatuur van het maaiveld boven de rioolbuizen. Gegeven de relatief kleine verschillen tussen de temperatuur van het rioolwater en de temperatuur van het maaiveld, kan het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil worden vervangen door het rekenkundig gemiddelde temperatuurverschil (het verschil dat hierdoor wordt geïntroduceerd bedraagt slechts 2 à 3 %).

In stap drie worden alle weergegeven constanten samengevat in een overall-constante  $\gamma$  en wordt overgestapt op het rekenkundig gemiddelde temperatuurverschil tussen rioolwater en maaiveld. Dit levert het volgende resultaat:

$$(T_i - T_u) = \gamma \times (0,5T_i + 0,5T_u - T_m)$$

$T_i$  is de temperatuur van het ingaande rioolwater;

$T_u$  is de temperatuur van het uitgaande rioolwater;

$T_m$  is de temperatuur van het maaiveld;

$\gamma$  is een overall-constante.

In stap vier wordt het resultaat van de derde stap omgezet in de volgende praktische formule:

$$T_u = (1 - 0,5\gamma) / (1 + 0,5\gamma) \times T_i + \gamma / (1 + 0,5\gamma) \times T_m$$

Dit eindresultaat laat zien op welke wijze de temperatuur van het uitgaande rioolwater ( $T_u$ ) samenhangt met de temperatuur van het ingaande rioolwater ( $T_i$ ) en de temperatuur van het maaiveld ( $T_m$ ) boven de rioolbuizen. Op hun beurt hangen  $T_i$  en  $T_m$  af van de temperatuur van de buitenlucht, zoals gemeten door het KNMI ( $T_{knmi}$ ).

Op basis van het weergegeven eindresultaat zal de afkoeling van het water in gemeentelijke rioolstelsels en in transportstelsels van waterschappen worden berekend.



### 5.3.4 TOEPASSING OP RIOOLSTELSELS VAN GEMEENTEN

Op basis van de voorgaande gegevens en aanvullende informatie kan het volgende worden ingevuld voor het berekenen van de overall-constante  $\gamma$  in het mathematisch model:

$\lambda = 0,7 \text{ W/(m x K)}$  (effectief tussen rioolbuis en maaiveld, zie bijlage 8);

$L = 5,4 \text{ m}$  per inwoner x 60.000 inwoners;

$S_L = 2,5$  (constante uit stationair geleidingsmodel op basis  $H=0,8 \text{ m}$  en  $D=0,3 \text{ m}$ );

$Q = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  (gemiddeld voor referentie-rwzi van 100.000 i.e.);

$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$  (dichtheid water);

$c_p = 4.190 \text{ J/(kg x K)}$  (soortelijke warmte water).

De berekening van de overall-constante  $\gamma$  verloopt nu als volgt:

$$\gamma = (\lambda \times 0,85 \times L \times S_L) / (Q \times \rho \times c_p)$$

$$\gamma = 0,44$$

Met deze waarde voor  $\gamma$  kan via de laatstgenoemde formule in paragraaf 5.3.3 de afkoeling worden berekend. Dit betreft de afkoeling van het water in een gemeentelijk rioolstelsel behorende bij de referentie-rwzi van 100.000 i.e.

### 5.3.5 TOEPASSING OP TRANSPORTLEIDINGEN VAN WATERSCHAPPEN

Het energieverlies vanuit de transportleidingen van een waterschap kan worden berekend analoog aan de methode, zoals toegepast voor een gemeentelijke rioolstelsel.

Voor de persleidingen behorende bij de model-rwzi van 100.000 i.e. wordt uitgegaan van een gemiddelde diameter van 500 mm en een uitvoering in kunststof. Voor de gronddekking van de transportleidingen wordt 1,25 meter aangehouden. De overall-constante  $\gamma$  kan in dit geval berekend worden op basis van de volgende gegevens:

$\lambda = 0,7 \text{ W/(m x K)}$  (effectief tussen rioolbuis en maaiveld, zie bijlage 8);

$L = 0,6 \text{ meter}$  per inwoner x 60.000 inwoners;

$S_L = 2,5$  (constante uit stationair geleidingsmodel op basis  $H=1,25$  en  $D=0,5 \text{ m}$ );

$Q = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  (gemiddeld voor referentie-rwzi van 100.000 i.e.);

$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$  (dichtheid water);

$c_p = 4.190 \text{ J/(kg x K)}$  (soortelijke warmte water).

De berekening van de overall-constante  $\gamma$  verloopt nu als volgt:

$$\gamma = (\lambda \times 0,85 \times L \times S_L) / (Q \times \rho \times c_p)$$

$$\gamma = 0,049$$

Vergeleken met de overall-constante voor het gemeentelijk rioolstelsel behorende bij de referentie-rwzi van 100.000 i.e. ( $\gamma=0,44$ ) is deze waarde gering.

### 5.3.6 TOEPASSING OP HET GEHEEL VAN RIOOLSTELSEL EN TRANSPORTLEIDINGEN

Voor het berekenen van de totale afkoeling mogen de twee berekende waarden voor  $\gamma$  worden opgeteld tot de afgeronde waarde  $\gamma = 0,5$ .

Op basis van  $\gamma = 0,5$  kan het eindresultaat van paragraaf 5.3.3 worden herschreven tot:

$$T_u = 0,6T_i + 0,4T_m$$

In stedelijke gebieden ligt de temperatuur van de buitenlucht enkele graden Celcius boven de temperatuur zoals die worden gemeten door een meetstation van het KNMI ( $T_{knmi}$ ).

Voor globale berekeningen zou gerekend kunnen worden met:

$$T_m = T_{knmi} + 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Het combineren van de voorgaande twee vergelijkingen leidt tot:

$$T_u = 0,4T_{knmi} + 0,6T_i + 0,8$$

In Nederland worden gemengde rioolstelsels het meest toegepast (zie tabel 5.1). Op basis van de uitgangspunten zoals genoemd in paragraaf 5.3.1, kan de relatie tussen  $T_i$  en  $T_{knmi}$  worden berekend. Hierbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd voor de temperatuur  $T_l$  van geloosd afvalwater voor de temperatuur  $T_v$  van geloosd vreemd water in het rioolstelsel en voor de temperatuur  $T_n$  van neerslagwater:

$$T_l = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (constant gedurende het jaar)}$$

$$T_v = T_{knmi} + 3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_n = T_{knmi} + 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Op basis van deze drie ingangstemperaturen en op basis van de hydraulische uitgangspunten zoals genoemd in paragraaf 5.3.1 kan de gemiddelde waarde voor  $T_i$  als volgt worden berekend:

$$T_i = ((1,0 \times 20) + 0,2 \times (T_{knmi} + 3) + 0,5 \times 1,2 \times (T_{knmi} + 1)) / (1,0 \times 1,2 \times 1,5)$$

$$T_i = 0,44 T_{knmi} + 11,8$$

Combineren van deze ingaande temperatuur  $T_i$  met de eerdergenoemde vergelijking voor  $T_u$  leidt tot een nieuwe relatie tussen  $T_u$  en  $T_{knmi}$ :

$$T_u = 0,4 T_{knmi} + 0,6 + 0,8$$

$$T_u = 0,4 T_{knmi} + 0,6 \times (0,44 + 11,8) + 0,8$$

$$T_u = 0,67 T_{knmi} + 7,9$$

Op basis van dit laatstgenoemde eindresultaat zou voor de referentie-rwzi van 100.000 i.e., bij een maandgemiddelde temperatuur rond het vriespunt ( $T_{knmi} = 0$ ), een influenttemperatuur van rond  $8^\circ\text{C}$  verwacht mogen worden.

## 5.4 ENERGIEPROCESSEN BIJ RWZI'S

Voor het kwantificeren van de opwarming of afkoeling van het actief slib in een rwzi is gebruik gemaakt van vakliteratuur (ref. 3). In tabel 5.5 is een overzicht gegeven van te onderscheiden processen die van invloed (kunnen) zijn op de temperatuur van het actief slib in een rwzi. Hierbij is niet genoemd de invloed van veranderingen in het debiet en de temperatuur van het influent van een rwzi.

TABEL 5.5 ENERGIEPROCESSEN BIJ RWZI'S

| Veranderingen temperatuur actief slib door:               | Opwarming of afkoeling? |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. Biochemische omzettingen                               | Opwarming               |
| 2. Omzetting mechanische energie                          | Opwarming               |
| 3. Zonnestraling (globale straling)                       | Opwarming               |
| 4. Temperatuurverandering en verzadiging aangezogen lucht | Afkoeling               |
| 5. Verdamping van water                                   | Afkoeling               |
| 6. Atmosferische straling                                 | Afkoeling               |
| 7. Geleiding en convectie vanaf wateroppervlak            | Afkoeling/opwarming     |
| 8. Geleiding naar of vanuit de bodem                      | Afkoeling/opwarming     |

### 5.4.1 OPWARMING DOOR BIOLOGISCHE PROCESSEN

Bij de biologische afbraakprocessen in de actief slibtank komt energie vrij in de vorm van warmte. De vrijkomende energie wordt berekend op basis van een jaargemiddelde omzetting van 40 % van het CZV in het influent van de rwzi (50 % in slib en 10 % in effluent) en 80 % oxidatie van de gereduceerde stikstof in het influent (10 % in slib en 10 % in effluent). Per gram omgezette CZV komt circa 14 kJ vrij en per gram geoxideerde stikstof komt rond 18 kJ vrij.

Per i.e. à 136 gram TZV/etmaal in het influent wordt uitgegaan van 95 gram CZV/etmaal en 9 gram KjN/etmaal. Op basis van het voorgaande komt hieruit de volgende hoeveelheid energie vrij:

$$\Delta CZV : 95 \times 0,4 \times 14 = 532 \text{ kJ/etmaal}$$

$$\Delta KjN : 9,0 \times 0,8 \times 16 = 115 \text{ kJ/etmaal}$$

In de referentie-rwzi met een gemiddelde belasting van 100.000 i.e. komt op basis van het voorgaande het volgende gemiddelde energievermogen vrij:

$$((532 + 115) \times 100.000) / (24 \times 3.600) = 749 \text{ kJ/s} = 749 \text{ kW}$$

Gedurende de zomermaanden wordt extra slib gemineraliseerd. Gedurende de wintermaanden is het omgekeerde het geval. Er is als volgt gerekend:

- in januari :  $0,9 \times 750 = 675 \text{ kW}$
- gemiddeld :  $1,0 \times 750 = 750 \text{ kW}$
- in augustus :  $1,1 \times 750 = 825 \text{ kW}$

### 5.4.2 OPWARMING DOOR OMZETTING MECHANISCHE ENERGIE

Om de biologische processen te handhaven is het noodzakelijk dat het actief slib wordt belucht. Uitgaande van bellenbeluchting wordt een deel van de betrokken mechanische energie aan het actief slib overgedragen. De warmteproductie wordt in het model berekend door uit te gaan van 50 % van het geleverde vermogen voor de beluchtingscompressoren.

Bij een rwzi met een influentbelasting van 100.000 i.e. behoort een geïnstalleerd compressor-vermogen van circa 200 kW. Verder is aangenomen dat de compressoren gemiddeld circa 60 % belast zijn.

In moderne rwzi's kunnen in het actief slib mixers en/of voortstuwers werkzaam zijn. Vaak zijn de elektromotoren voor deze apparatuur in het actief slib geplaatst en in dat geval komt de ingebrachte mechanische energie voor 100 % ten goede aan de opwarming van het actief slib. Voor de referentie-rwzi van 100.000 i.e. wordt uitgegaan van een geïnstalleerd elektrisch vermogen van 30 kW voor mixers en/of voortstuwers en een gemiddeld geleverd vermogen van 80 % van het geïnstalleerd vermogen.

Op basis van de voorgaande gegevens en uitgangspunten kan berekend worden hoeveel elektrische energie wordt omgezet in warmte die ten goede komt aan het actief slib:

|                             |   |                               |              |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--------------|
| • beluchtingscompressoren   | : | $200 \times 0,6 \times 0,5 =$ | 60 kW        |
| • mixers en/of voortstuwers | : | $30 \times 0,8 \times 1,0 =$  | <u>24 kW</u> |
| • totaal (jaargemiddeld)    | : |                               | 84 kW        |

#### 5.4.3 OPWARMING DOOR ZONNESTRALING

Straling is het verschijnsel waarbij zonder tussenkomst van materie energie wordt overgedragen door elektromagnetische golven. De door het aardoppervlak ontvangen straling bestaat uit twee componenten: de directe straling, die rechtstreeks van de zon wordt ontvangen en de diffuse straling, die wordt ontvangen uit alle andere richtingen bijvoorbeeld door uitstraling van de omgeving en reflectie door bewolking. De som van de directe en van de diffuse straling wordt de globale straling genoemd. Deze globale straling wordt door het KNMI rechtstreeks gemeten met een zogeheten Pyranometer (ref. 7).

Degemiddeldejaarlijksehoeveelheidglobalestraling,zoalsgemeten doorhetKNMI-meetstation in De Bilt, bedraagt afgerond  $340.000 \text{ J/cm}^2$ . Deze hoeveelheid energie kan worden omgerekend naar een gemiddeld ingestraald vermogen van  $108 \text{ W/m}^2 ((340.000 \times 10.000) / (365 \times 24 \times 3.600) = 107,8)$ . De hoeveelheid globale straling bereikt in Nederland in juni gemiddeld een maximum. In december wordt een minimum bereikt. Dit minimum maandgemiddelde bedraagt circa 10 % van het maximum maandgemiddelde.

Door het open oppervlak van de actiefslibtank ( $\text{m}^2$ ) te vermenigvuldigen met de gemeten hoeveelheid globale straling ( $\text{W/m}^2$ ) is de absolute hoeveelheid ontvangen globale straling te berekenen (W). Andere oppervlakken worden niet meegerekend omdat de betrokken tanks zijn afgedekt (voorbezinktanks) of omdat de opgewarmde bovenlaag van het water niet meer wordt gemengd met het actief slib (nabezinktanks).

#### 5.4.4 GELEIDING NAAR OF VANUIT DE BODEM

Voor het berekenen van het energietransport dat gemoeid is met deze geleiding (zie proces 8 in tabel 5.5) wordt allereerst het totale bodemoppervlak van alle betrokken tanks in beeld gebracht. Vervolgens wordt het totale oppervlak van de zijwanden berekend dat in direct contact staat met de bodem.

De bodems van de betrokken tanks liggen globaal genomen tussen 3 en 6 meter beneden maaiveld. Op deze relatief grote diepten varieert de bodemtemperatuur nog slechts beperkt ten opzichte van een jaargemiddelde bodemtemperatuur van circa 10 °C.

De bodems van de tanks liggen meestal in het grondwater. De effectieve warmtegeleiding van de bodem ter plaatse zal daardoor relatief hoog zijn (zie bijlage 8). Om deze reden is verondersteld dat de weerstand tegen energietransport geheel geconcentreerd is in de dikke bodems en wanden van de tanks. Voor verdicht gewapend beton geldt voor de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt:  $\lambda = 1,9 \text{ W/(m x K)}$  (zie ref. 5).

Het energietransport tussen de inhoud van de tanks en de grond onder de tanks kan als volgt worden berekend:

$$\phi = \lambda / d \times A_b \times (T_{rwzi} - 10)$$

- $\phi$  is de hoeveelheid getransporteerde energie (W)
- $\lambda$  is de warmtegeleidingscoëfficiënt van verdicht en gewapend beton (1,9 W/(m x K))
- $d$  is de gemiddelde bodemdikte van de tank (m)
- $A_b$  is het totale bodemoppervlak van de tanks (m<sup>2</sup>)
- $T_{rwzi}$  is de temperatuur van het water in de rwzi (K of °C)
- 10 is de constant veronderstelde temperatuur onder de tanks (°C)

Het energietransport door de zijwanden van de tanks die contact hebben met de bodem kan op identieke wijze worden berekend.

Hierbij wordt echter voor de temperatuur van de bodem die in direct contact staat met de zijwanden van de tanks, het gemiddelde genomen van de temperatuur van het maaiveld ( $T_m$ ) en de aangehouden temperatuur onder de bodem van de tanks (10 °C). Op basis van het voorgaande kan voor het energietransport door de zijwanden van de tanks worden geschreven:

$$\phi = \lambda / d \times A_w \times (T_{rwzi} - (T_m + 10) / 2)$$

$A_w$  is hierbij het totale oppervlak van de zijwanden van de tanks dat in direct contact staat met de bodem.

#### 5.4.5 OVERIGE ENERGIEPROCESSEN BIJ EEN RWZI

De overige energieprocessen 4 t/m 7, als genoemd in tabel 5.5, kunnen worden beschreven met relatief complexe mathematische formules. Deze formules bevatten naast gegevens over de referentie-rwzi, meerdere fysische constanten en in deze formules moeten meteorologische gegevens worden opgenomen.

Voor het kwantificeren van deze energieprocessen bij de model-rwzi is gebruik gemaakt van de eerdergenoemde vakliteratuur (ref. 3). Voor inhoudelijke details wordt verwezen naar bijlage 9.

# 6

## DOORREKENEN VAN REFERENTIESITUATIE EN VARIANTEN

### 6.1 STANDAARDGEGEVENS EN UITGANGSPUNTEN

Voor het doorrekenen van de referentie-rwzi van 100.000 i.e. zijn meerdere uitgangspunten gekozen en zijn andere gegevens verzameld. In tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de standaardgegevens en uitgangspunten die in hoofdstuk 5 reeds zijn behandeld. Voor de omschrijving van de diverse symbolen wordt verwezen naar de lijst met gebruikte symbolen (hoofdstuk 9).

TABEL 6.1

OVERZICHT MET STANDAARDGEGEVENS EN UITGANGSPUNTEN VOOR DE REFERENTIE-RWZI

|                                      | Getalswaarde                     | Eenheid                         |
|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| $Q_i$                                | 0,125                            | m <sup>3</sup> /(i.e. x etmaal) |
| $Q_v / Q_i$                          | 0,2                              | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| $Q_{dwa} = Q_i + Q_v$                | 1,2x0,125                        | m <sup>3</sup> /(i.e. x etmaal) |
| $Q_n / Q_{dwa}$                      | 0,5                              | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| $Q_t$                                | 1,5x1,2x0,125                    | m <sup>3</sup> /(i.e. x etmaal) |
| $T_{knni}$                           | zie tabel 6.2                    | °C                              |
| $T_l$                                | 20                               | °C                              |
| $T_m$                                | $T_k + 2$                        | °C                              |
| $T_n$                                | $T_k + 1$                        | °C                              |
| $T_v$                                | $T_k + 3$                        | °C                              |
| globale straling                     | zie tabel 6.2                    | J/cm <sup>2</sup>               |
| $\lambda$ (tussen riool en maaiveld) | 0,7                              | W/(m x K)                       |
| $L$ (gemeente)                       | $0,6 \times 0,9 \times 6 = 3,24$ | m/persoon                       |
| $L$ (waterschap)                     | $0,6 \times 0,1 \times 6 = 0,36$ | m/persoon                       |
| relatief vochtgehalte                | zie tabel 6.2                    | %                               |
| $S_L$                                | 2,5                              | -                               |
| windsnelheid                         | zie tabel 6.2                    | m/s                             |
| personen/totale lozing               | 0,6                              | i.e./i.e.                       |

### 6.2 RELEVANTE METEOROLOGISCHE GEGEVENS

In tabel 6.2 zijn meteorologische gegevens opgenomen die noodzakelijk zijn bij het kwantificeren van de eerdergenoemde energieprocessen.

TABEL 6.2 GEMIDDELDE METEOROLOGISCHE GEGEVENS 1996 T/M 2005 IN DE BILT

| Maand            | $T_{\text{knmi}}$<br>(°C) | Relatief vochtgehalte<br>(%) | Windsnelheid<br>(m/s) | Globale straling<br>(J/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Januari          | 3,1                       | 87,6                         | 4,2                   | 7.355                                    |
| Februari         | 4,3                       | 84,2                         | 4,3                   | 12.476                                   |
| Maart            | 6,5                       | 82,3                         | 3,7                   | 22.251                                   |
| April            | 9,5                       | 75,4                         | 3,5                   | 38.480                                   |
| Mei              | 13,3                      | 76,0                         | 3,3                   | 50.743                                   |
| Juni             | 16,0                      | 75,6                         | 3,2                   | 53.187                                   |
| Juli             | 17,4                      | 79,5                         | 3,0                   | 49.576                                   |
| Augustus         | 18,1                      | 79,9                         | 2,7                   | 46.744                                   |
| September        | 14,8                      | 84,1                         | 2,9                   | 30.508                                   |
| Oktober          | 10,8                      | 86,5                         | 3,6                   | 16.362                                   |
| November         | 6,7                       | 90,6                         | 3,5                   | 8.170                                    |
| December         | 3,7                       | 89,3                         | 3,9                   | 5.345                                    |
| <b>Gemiddeld</b> | <b>10,35</b>              | <b>82,6</b>                  | <b>3,5</b>            | <b>28.433</b>                            |

De cijfers in tabel 6.2 zijn ontleend aan de meetgegevens van het meetstation van het KNMI in De Bilt. De cijfers over de globale straling hebben betrekking op de jaren 1996 t/m 2000.

### 6.3 BESCHOUWDE REFERENTIESITUATIE EN VARIANTEN

In tabel 6.3 is aangegeven welke varianten naast de referentiesituatie zijn doorgerekend voor de referentie-rwzi met een influentbelasting van 100.000 i.e.

TABEL 6.3 DOORGEREKENDE VARIANTEN VOOR MODEL-RWZI

| Variant                                                               | Wijzigingen ten opzichte van tabel 6.1                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0. Referentie (constante lozingstemperatuur)                          | Geen ( $T_l = 20$ °C)                                                                                                           |
| 1. Bodem met grotere geleiding van warmte                             | $\lambda$ van 0,7 naar 1,4 W/(m x K)                                                                                            |
| 2. Meer uitgestrekt rioolstelsel                                      | $L$ van 3,6 naar 18 meter per aangesloten inwoner                                                                               |
| 3. Compleet gescheiden rioolstelsel                                   | $Q_v = 0$ en $Q_n = 0$                                                                                                          |
| 4. Diepere tanks voor actief slib                                     | Van 4 naar 6 meter waterdiepte                                                                                                  |
| 5. Afgedekte tanks voor actief slib                                   | Vervallen van zon-instraling, verdampen van water, atmosferische uitstraling en geleiding en convectie vanaf het wateroppervlak |
| 6. Gereduceerde invloed van wind                                      | Windsnelheid van 100 % naar 20 %                                                                                                |
| 7. Lozingstemperatuur licht afhankelijk van temperatuur buitenlucht   | $T_l = 0,2 \times T_{\text{knmi}} + 18$ °C                                                                                      |
| 8. Lozingstemperatuur sterker afhankelijk van temperatuur buitenlucht | $T_l = 0,4 \times T_{\text{knmi}} + 16$ °C                                                                                      |

Via de in hoofdstuk 5 behandelde berekeningsmethoden zijn de referentiesituatie en de weergegeven acht varianten doorgerekend. De detailresultaten van de modelberekeningen zijn opgenomen in bijlage 10, de bladen 0 t/m 8.

#### 6.4 BELANGRIJKSTE RESULTATEN VAN DE MODELBEREKENINGEN

In hoofdstuk 4, waarin het uitgevoerde empirische onderzoek is beschreven, zijn voor elk van de 48 beschouwde rwzi's de constanten a (= temperatuurgevoeligheid) en b (= temperatuur in actief slib bij  $T_{\text{knmi}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bepaald van de temperatuur-relatie:

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

Naast andere parameters zijn bij de uitgevoerde modelberekeningen ook deze constanten a en b bepaald (zie de grafieken in bijlage 10). In tabel 6.4 zijn voor de doorgerekende referentiesituatie en de acht varianten de constanten a en b weergegeven.

TABEL 6.4

CONSTANTEN A EN B VOOR DE REFERENTIE-RWZI VAN 100.000 I.E.

| Doorgerekende systeemvariant                                                  | a ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ) | b ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| 0. Standaard (conform tabel 6.1)                                              | 0,67                                      | 7,8                      |
| 1. $\lambda$ van 0,7 naar $1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 0,76                                      | 6,3                      |
| 2. $L$ van 3,6 naar 18 m/inwoner                                              | 0,91                                      | 3,4                      |
| 3. $Q_v = 0$ en $Q_n = 0$                                                     | 0,61                                      | 9,1                      |
| 4. Waterdiepte van 4 naar 6 meter                                             | 0,64                                      | 8,3                      |
| 5. Afgedekte tanks actief slib                                                | 0,57                                      | 9,8                      |
| 6. Windsnelheid van 100 % naar 20 %                                           | 0,62                                      | 9,1                      |
| 7. $T_l = 0,2 \times T_{\text{knmi}} + 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$           | 0,74                                      | 7,2                      |
| 8. $T_l = 0,4 \times T_{\text{knmi}} + 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$           | 0,80                                      | 6,5                      |

Uit tabel 6.4 blijkt dat bij de varianten 1 en 2, door een groter warmteverlies uit het betrokken rioolstelsel, de constante a (= temperatuurgevoeligheid) stijgt en de constante b (= temperatuur in actief slib bij  $T_{\text{knmi}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) daalt.

Bij variant 1 is verondersteld dat ten opzichte van de referentiesituatie de warmtegeleiding van de bodem is verdubbeld. Dit kan het geval zijn indien een rioolstelsel (deels) in het grondwater is gelegen.

Bij variant 2 is verondersteld dat ten opzichte van de referentiesituatie het aantal meter rioolbuis per inwoner is vervijfvoudigd. In grootstedelijke gebieden met veel hoogbouw is het aantal meter rioolbuis per inwoner relatief beperkt. Een grote centrale rwzi kan echter ook gelegen zijn in een (relatief) landelijk gebied waarbij het afvalwater via lange transportleidingen vanuit meerdere woonkernen wordt aangevoerd. In dat geval is het aantal meter rioolbuis per inwoner relatief groot.

Bij variant 3 in tabel 6.4 blijkt verder dat een gescheiden rioolstelsel zonder rioolvreemd water een zeer positief temperatuureffect heeft op de aan dit rioolstelsel gekoppelde referentie-rwzi. De berekende waarden liggen in de buurt van die van de rwzi-Almere die gekoppeld is aan een gescheiden rioolstelsel (rwzi-Almere:  $a = 0,60 \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$  en  $b = 11,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Een gescheiden rioolstelsel (of afgekoppeld neerslagwater) heeft verder als voordeel een lagere maximale hydraulische belasting van de rwzi waardoor bijvoorbeeld kan worden volstaan met kleinere of minder nabezinktanks.

Bij variant 4 in tabel 6.4 is gekozen voor extra diepe tanks voor het actief slib. Door verdieping van 4 naar 6 meter stijgt de constante b met ongeveer  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Het afdekken van de tanks voor het actief slib heeft een grotere thermische invloed. Bij variant 5 in tabel 6.4 stijgt de constante b met  $2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ten opzichte van de referentiesituatie.



Bij variant 6 in tabel 6.4 is verondersteld dat de invloed van de wind met 80 % kan worden gereduceerd. Hierbij kan gedacht worden aan het aanleggen van een dichte vegetatie rondom de rwzi (of AT) of aan het plaatsen van een windscherm rondom de AT.

Door te rekenen met slechts 20 % van de volle gemiddelde windsnelheid, zoals weergegeven in tabel 6.2, stijgt de constante b met 1,3 °C ten opzichte van de referentiesituatie.

Bij de varianten 7 en 8 in tabel 6.4 is verondersteld dat de gemiddelde temperatuur waarmee het afvalwater wordt geloosd niet constant is gedurende het hele jaar (in de referentiesituatie is een constante temperatuur van 20 °C aangehouden).

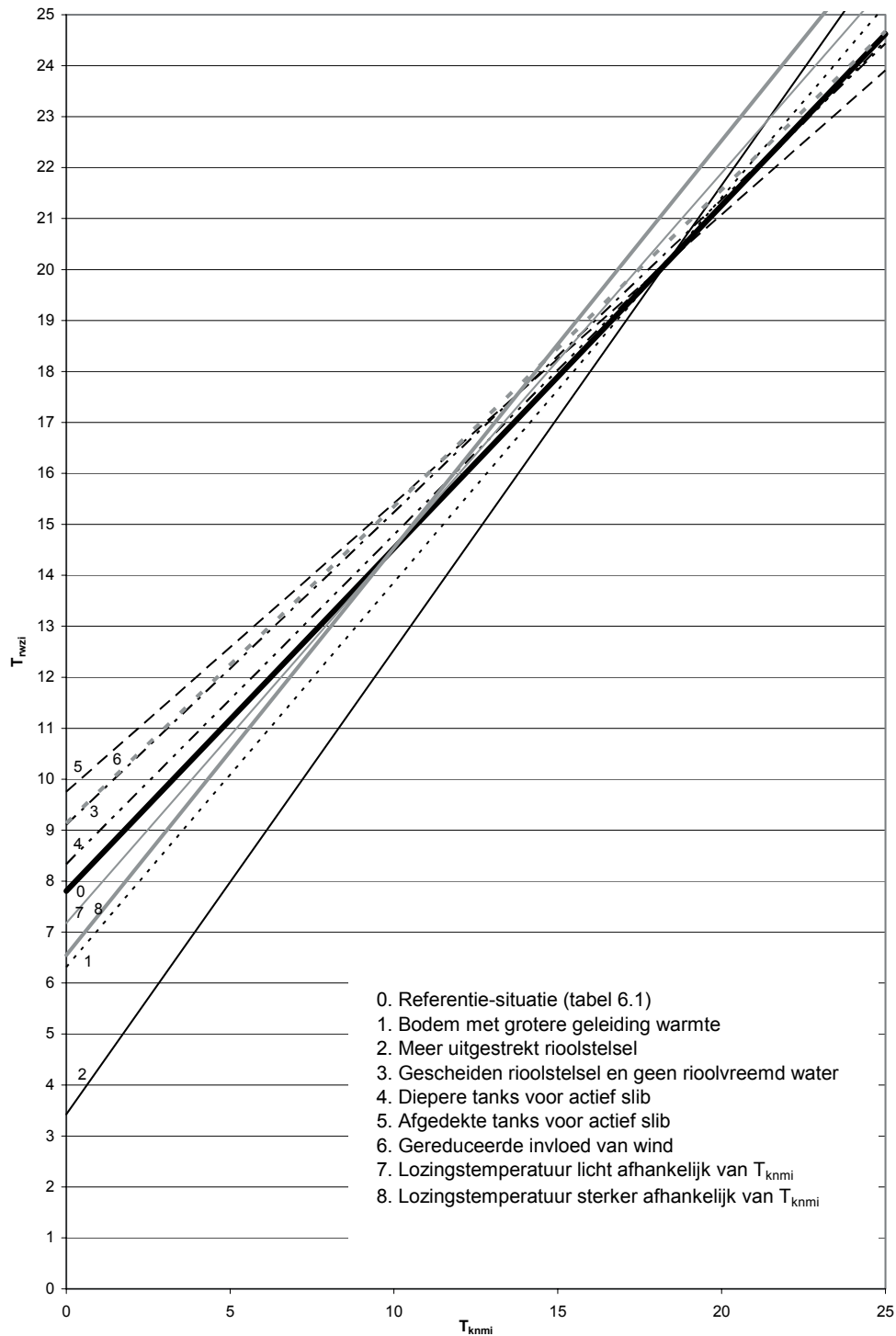
Bij variant 7 is verondersteld een minimum lozingstemperatuur van 18 °C (bij  $T_{\text{knmi}} = 0$  °C) en een maximum lozingstemperatuur van 22 °C (bij  $T_{\text{knmi}} = 20$  °C). Bij variant 8 is uitgegaan van minimaal 16 °C en maximaal 24 °C.

Zoals te verwachten is daalt de constante b naarmate de minimum lozingstemperatuur daalt: bij de referentiesituatie is berekend  $b = 7,8$  °C, bij variant 7 is berekend  $b = 7,2$  °C en bij variant 8 is berekend  $b = 6,5$  °C.

In grafiek 6.1 is de informatie uit tabel 6.4 grafisch weergegeven in de bekende vorm

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b.$$

GRAFIEK 6.1

 $T_{RWZI}$  VERSUS  $T_{KNMI}$  VOOR DE REFERENTIESITUATIE EN DE VARIANTEN

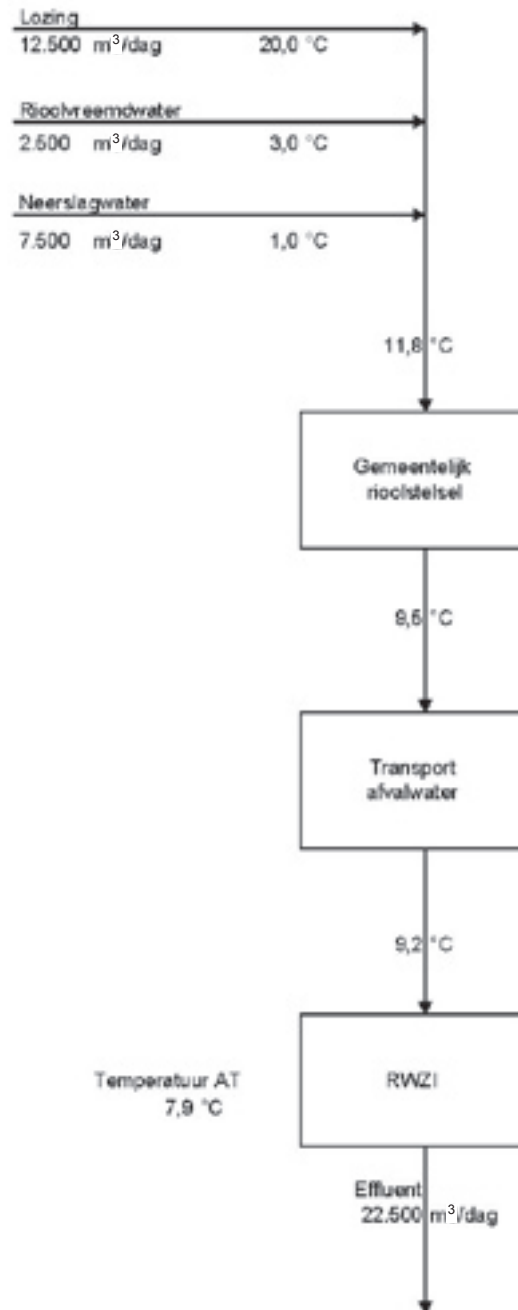
In bijlage 10 is veel detailinformatie weergegeven over de afvalwatertemperatuur op diverse plaatsen in het gebruikte blokschema. Ter verduidelijking en als hulp bij het interpreteren van de detailinformatie zijn navolgend twee schema's weergegeven.

Het betreft figuur 6.1 voor de referentiesituatie met een gemiddelde maandtemperatuur van de buitenlucht van 0 °C en figuur 6.2 voor de referentiesituatie met een gemiddelde maandtemperatuur van de buitenlucht van 20 °C.

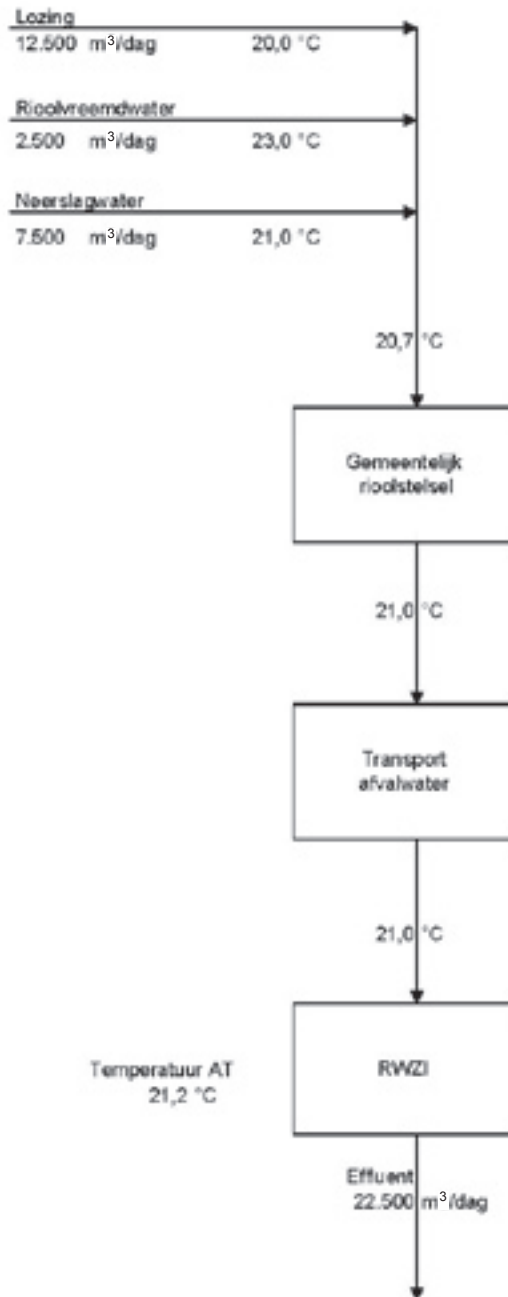
Uit figuur 6.1 blijkt dat het afvalwater tussen het lozingspunt in het rioolstelsel en de AT's van de rwzi 's winters relatief sterk kan afkoelen.

Uit figuur 6.2 blijkt dat het afvalwater tussen het lozingspunt in het rioolstelsel en de AT's van de rwzi 's zomers min of meer constant blijft.

FIGUUR 6.1

AFVALWATERTEMPERATUREN REFERENTIESITUATIE BIJ  $T_{KNMI} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

FIGUUR 6.2

AFVALWATERTEMPERATUREN REFERENTIESITUATIE BIJ  $T_{\text{KWT}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

# 7

## KOSTENEFFECTIVITEIT VAN TEMPERATUURVERHOGENDE MAATREGELEN

### 7.1 KOSTEN VOOR STANDAARD ACTIEFSLIBTANKS

Door ingrepen in een rioolstelsel en door ingrepen in een rwzi kan de minimale ontwerptemperatuur voor het actiefslibproces worden gewijzigd. De kosten die samenhangen met deze ingrepen zouden moeten worden gecompenseerd door een kleiner volume van de actiefslib-tanks (AT's).

Navolgend is het volume van de AT's berekend met een uitgebreid HSA-rekenmodel waarbij de temperatuur van het actiefslib is bepaald via de relatie:

$$T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$$

De minimale ontwerptemperatuur is gebaseerd op een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C (zie paragraaf 4.6). In dat geval is de minimale ontwerptemperatuur gelijk aan de constante b.

In tabel 7.1 voor de referentie-rwzi van 100.000 i.e. is het berekende volume van de AT's weergegeven in relatie tot een gekozen minimale ontwerptemperatuur. Bij de berekening van deze volumina is daarbij uitgegaan van een slibgehalte van 4,0 kg/m<sup>3</sup>. In tabel 7.1 zijn verder investeringskosten weergegeven op basis van een eenheidsprijs van 400 Euro per m<sup>3</sup> AT-volume voor tanks met een waterdiepte van 4,0 meter. Deze eenheidsprijs betreft de totale investeringskosten voor een waterschap, inclusief kostenposten als: algemene aannemerskosten, winst en risico van de aannemer, onvoorzien, bijkomende kosten, inrichtingskosten, advieskosten en BTW.

Voor de referentie-rwzi onder de standaardcondities (als vermeld in tabel 6.1) is gekozen voor een minimale ontwerptemperatuur van circa 8 °C (zie tabel 6.4). Voor deze referentie-rwzi van 100.000 i.e. wordt de totale investering geraamd op 30 miljoen Euro (100.000 i.e. x 300 Euro per i.e.). In tabel 7.1 is tevens aangegeven hoeveel meer of minder geïnvesteerd moet worden t.o.v. de referentie-rwzi onder standaardcondities. Dit verschil in investering is uitgedrukt als percentage van de totale investering van 30 miljoen Euro voor de gehele rwzi.

TABEL 7.1

AT-INVESTERING VERSUS MINIMALE ONTWERPTEMPERATUUR

| Minimale ontwerptemperatuur (°C) | Volume AT (m <sup>3</sup> ) | Investering AT (Euro) | Extra investering (%) t.o.v. totaal van 30 miljoen Euro |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| 6                                | 17.100                      | 6,8 miljoen           | + 4,0                                                   |
| 8                                | 14.000                      | 5,6 miljoen           | 0,0 (referentie-rwzi)                                   |
| 10                               | 11.200                      | 4,5 miljoen           | - 3,7                                                   |
| 12                               | 8.800                       | 3,5 miljoen           | - 7,0                                                   |
| 14                               | 6.700                       | 2,7 miljoen           | - 9,7                                                   |

## 7.2 KOSTEN VAN DIEPE ACTIEFSLIBTANKS

In hoofdstuk 6 is naar voren gekomen dat door het bouwen van diepere tanks, met een minder groot oppervlak, met name in de winter de afkoeling van het actief slib (beperkt) kan worden bestreden. Voor de referentie-rwzi onder standaard-omstandigheden is uitgegaan van 4 meter diepe tanks. In variant 4 in hoofdstuk 6 is gerekend met 6 meter diepe tanks.

Het bouwen van diepe tanks is per volume-eenheid duurder dan het bouwen van ondiepe tanks vanwege met name bemalingskosten tijdens de bouw van de tanks. Afhankelijk van de diepte en de doorlatendheid van de bodem kan het voorkomen dat tijdelijk zelfs een damwand moet worden aangebracht. Rekening houdend met het laatstgenoemde zou de eenheidsprijs van het AT-volume met 10 % kunnen stijgen.

De referentie-rwzi heeft onder standaard omstandigheden een AT-volume van 14.000 m<sup>3</sup>. De extra investeringskosten voor 6 meter diepe tanks zou op basis van het voorgaande bedragen:

$$14.000 \times 400 \times 0,10 = 560.000 \text{ Euro}$$

Via deze extra investering zou de minimum ontwerptemperatuur voor de AT met ongeveer 0,5 °C kunnen stijgen (zie tabel 6.4). Op basis van de informatie in tabel 7.1 is af te leiden dat door een verhoging van de minimum ontwerptemperatuur van 8,0 naar 8,5 °C de AT ongeveer 700 m<sup>3</sup> kleiner kan worden gebouwd. Hiermee zou een besparing zijn gemoeid van:

$$700 \times 400 \times 1,10 = 310.000 \text{ Euro}$$

Uit de voorgaande globale berekeningen blijkt dat de extra kosten voor het bouwen van diepere tanks niet kunnen worden terugverdiend door de besparingen ten gevolge van een wat hogere minimum ontwerptemperatuur.

## 7.3 KOSTEN VAN AFDEKKEN ACTIEFSLIBTANKS

In hoofdstuk 6 is naar voren gekomen dat door het afdekken en isoleren van de AT's de afkoeling van het actief slib relatief fors kan worden bestreden. Op basis van de informatie in tabel 6.4 zou de minimum ontwerptemperatuur met 2 °C kunnen stijgen van circa 8 °C onder standaardcondities tot rond 10 °C bij volledige afdekking inclusief thermische isolatie.

De standaard AT met een volume van 14.000 m<sup>3</sup> en een waterdiepte van 4 meter heeft een oppervlak van 3.500 m<sup>2</sup>. De eenheidsprijs voor het afdekken en isoleren van tanks bedraagt circa 140 Euro per m<sup>2</sup> (ref. 8). De extra investering voor het afdekken en isoleren van de AT's bedraagt op basis van deze gegevens:

$$3.500 \times 140 = 490.000 \text{ Euro}$$

Door deze extra investering zou het AT-volume kunnen worden teruggebracht van 14.000 m<sup>3</sup> naar 11.400 m<sup>3</sup> (zie tabel 7.1). Met dit 2.600 m<sup>3</sup> kleinere AT-volume is een minder-investering gemoeid van:

$$2.600 \times 400 = 1.040.000 \text{ Euro}$$

Uit de voorgaande globale berekeningen blijkt dat het afdekken en isoleren van de AT's rendabel is. Het afdekken van een AT, met als gevolg een structureel hogere temperatuur van het actief slib, heeft verder als voordelen:

- een lagere slibproductie door de verdergaande slibmineralisatie ten gevolge van de jaargemiddeld hogere temperatuur in de AT;
- een verbeterde verwijdering van stikstof uit het afvalwater;
- de mogelijkheid om noodzakelijke investeringen ter verbetering van het actiefslibproces uit te stellen;
- verbetering van het visuele beeld (dampvorming).

#### 7.4 BEPERKING INVLOED WIND

In bijlage 10, blad 6 is gerekend met 80 % reductie van de invloed van de wind op het oppervlak van de AT. Deze ingreep levert een verhoging op van de minimale ontwerptemperatuur van 1,3 °C (zie ook tabel 6.4). Gelet op de relatief geringe investering die met een dergelijke ingreep gemoeid is en gelet op de relatief grote besparing van het AT-volume (ten gevolge van 1,3 °C temperatuurstijging), zal een investering in het beperken van de windinvloed steeds rendabel zijn.

#### 7.5 ISOLEREN VAN PERSLEIDINGEN

Uit bijlage 10, met de detailresultaten van de uitgevoerde modelberekeningen, blijkt dat de grootste afkoeling van rioolwater plaatsvindt in de gemeentelijke rioolstelsels. Als er al iets gedaan zou kunnen en/of moeten worden om dit warmteverlies te bestrijden, zou dit binnen de gemeentelijke rioolstelsels moeten plaatsvinden.

De afkoeling in persleidingen van waterschappen bedraagt bij de doorgerekende referentiesituatie gemiddeld slechts 0,3 °C (zie bijlage 10, blad 0). Zelfs bij variant 2, met een 3 x langer rioolstelsel dan gemiddeld in Nederland, bedraagt de afkoeling in de transportleidingen van de waterschappen in de winter nog steeds slechts 0,4 °C (zie bijlage 10, blad 2, maand januari 6,8 - 6,4 = 0,4 °C).

Gelet op deze beperkte afkoeling en gelet op de hoge kosten voor thermisch geïsoleerde transportleidingen zullen extra investeringen op dit gebied nooit terugverdiend kunnen worden. Om deze reden is dit onderdeel financieel verder niet uitgewerkt.

## 8

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## 8.1 CONCLUSIES UIT HET EMPIRISCH ONDERZOEK

Op basis van de inhoud van hoofdstuk 4 kunnen de volgende conclusies worden getrokken (in volgorde van de paragrafen):

1. Bij meer dan 80% van de beschouwde rwzi's voldoet de mathematische relatie  $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$  goed en zeer goed of is er zelfs sprake van een uitstekende relatie (regressiecoëfficiënt  $R^2 \geq 0,85$ , op basis van maandgemiddelde temperaturen).
2. Bij meer dan 80% van de beschouwde rwzi's is er sprake van een normale, beperkte of zelfs zeer beperkte gevoeligheid van de temperatuur van het actief slib voor de temperatuur van de buitenlucht (constante  $a < 0,8$  °C verandering in actief slib per °C verandering van de buitenlucht).
3. Bij meer dan 70 % van de beschouwde rwzi's ligt, bij een maandgemiddelde temperatuur van de buitenlucht van 0 °C, de temperatuur van het actief slib tussen 6 en 10 °C (deze temperatuur komt overeen met de waarde van de constante b).
4. De constanten a en b uit de gebruikte mathematische relatie  $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$  zijn onderling gekoppeld. In de praktijk kan als vuistregel worden gebruikt:  $14 a + b = 17$ .
5. De constanten a en b hangen samen met de capaciteit van een rwzi. Naarmate de capaciteit van een rwzi stijgt neemt de waarde van de constante a (= temperatuurgevoeligheid) af en die van de constante b ( $=T_{rwzi}$  bij  $T_{knmi} = 0$  °C) toe. Naar verwachting hangt dit samen met het compacter worden van een rioolstelsel, naarmate de dichtheid van de bebouwing binnen een rioleringsgebied toeneemt (meer inwoners per hectare).
6. De kwaliteit van de gebruikte mathematische relatie  $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$  neemt af ( $R^2$  wordt lager) als de tijd, waarover gemiddelden van de temperaturen wordt bepaald, wordt verkort. Dit resultaat heeft te maken met het traag reageren van de temperatuur van actief slib in een rwzi op soms snelle veranderingen in de temperatuur van de buitenlucht.
7. Bij een gemiddelde temperatuur van de buitenlucht gedurende langere tijd van 0 °C, wordt door de afvoer van neerslagwater naar een rwzi de temperatuur van het actief slib in een rwzi met 1 tot 2 °C verlaagd.



## 8.2 CONCLUSIES UIT HET MODELMATIG ONDERZOEK

Op basis van de inhoud van de hoofdstukken 5, 6 en 7 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Via een uitgewerkt mathematisch model voor de combinatie van rioolstelsel en rwzi, kan de empirische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$  goed benaderd worden.
2. Belangrijke grootheden die de waarden van de constanten  $a$  en  $b$  bepalen, zijn de temperatuur van het geloosde afvalwater, de getotaliseerde lengte van het rioolstelsel en de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodemmateriële waarmee het rioolstelsel is afgedekt.
3. Beschouwd vanuit een energetisch oogpunt kan een rioolstelsel worden opgevat als een grote warmtewisselaar waarin het rioolwater relatief sterk wordt afgekoeld.
4. Voor een rwzi kunnen een achttal verschillende energieprocessen worden onderscheiden die het actief slib opwarmen of afkoelen. Het netto effect van deze energieprocessen is relatief gering.
5. Door een combinatie van het afkoppelen van neerslagwater vanaf het rioolstelsel, het bouwen van diepere actiefslibtanks met een kleiner oppervlak en het afdekken en thermisch isoleren van actiefslibtanks zijn lage temperaturen, op een effectieve wijze te bestrijden.
6. Door het afdekken en thermisch isoleren van de actiefslibtanks van een rwzi kan de temperatuur van het actief slib met circa 2 °C stijgen. De kosten voor deze afdekking en isolatie kunnen ruimschoots worden gecompenseerd door een kleiner benodigd volume van de actiefslibtanks van de rwzi.
7. Door het beperken van de invloed van de wind op het oppervlak van de actiefslibtanks kan de temperatuur van het actief slib met 1 tot 1,5 °C stijgen. De kosten voor het plaatsen van een dichte vegetatie of van een windscherm kunnen ruimschoots worden gecompenseerd door een kleiner benodigd volume van de actiefslibtanks van de rwzi.
8. Het structureel verhogen van de temperatuur in de actiefslibtanks heeft aanvullende kostenvoordelen door een lagere productie van slib ten gevolge van een verdergaande slibmineralisatie, door een verbeterde verwijdering van stikstof uit het afvalwater en door de mogelijkheid om eventuele investeringen ter verbetering van het actiefslibproces uit te stellen.

## 8.3 AANBEVELINGEN BIJ HET ONTWERP VAN EEN ACTIEFSLIBPROCES

Op basis van het uitgevoerde onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan voor een werkwijze bij het ontwerp van het actiefslibproces van een bestaande RWZI:

1. Bepaal op basis van beschikbare meetgegevens een passende mathematische relatie tussen de maandgemiddelde temperatuur  $T_{\text{rwzi}}$  van het actief slib en de maandgemiddelde temperatuur  $T_{\text{knmi}}$  van de buitenlucht, zoals gemeten door een nabijgelegen meetstation van het KNMI.
2. Gebruik hierbij bij voorkeur de mathematische relatie  $T_{\text{rwzi}} = a \times T_{\text{knmi}} + b$ . Indien deze relatie onvoldoende past bij de meetgegevens van een rwzi, kan eventueel een meergraads polynoom worden toegepast.

3. Pas de gevonden mathematische relatie eventueel aan indien in het ontwerp van een rwzi maatregelen worden opgenomen die effect hebben op de temperatuur van het actief slib (bijvoorbeeld het afdekken van actiefslibtanks).
4. Bereken met de resulterende mathematische relatie en met meetgegevens van het KNMI over de afgelopen 20 jaar, maandgemiddelde temperaturen van het actief slib.
5. Bereken met de verkregen temperaturen van het actief slib en met behulp van een adequaat rekenmodel voor het actiefslibproces, de kwaliteit van het effluent van de betrokken rwzi gedurende de afgelopen 20 jaar.
6. Bepaal via een iteratief proces de omvang van de actiefslibtanks zodanig dat gedurende het overgrote deel van de beschouwde jaren de kwaliteit van het effluent voldoet aan de eisen als genoemd in de WVO-vergunning voor de rwzi (het percentage overschrijding dient nader overeen te worden gekomen met de vergunningverlener).

#### 8.4 OVERIGE AANBEVELINGEN

Op basis van het uitgevoerde onderzoek en op basis van overige praktijkervaringen worden tot slot de volgende overige aanbevelingen gedaan:

1. Ondiepe tanks koelen 's winters relatief sterk af. Het afdekken van het actief slib kan kostbaar zijn. Het verdient aanbeveling nader te studeren op de mogelijkheid om via koude/warmte-opslag zeer lage wintertemperaturen in het actief slib van deze rwzi's te bestrijden. De gedachte hierbij is om 's zomers energie aan het effluent te onttrekken, deze energie op te slaan in de bodem en 's winters de opgeslagen energie te gebruiken voor opwarming van het actief slib.
2. Het beperken van de invloed van wind op het afkoelen van open actiefslibtanks is een kosten-effectieve maatregel. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen hoe effectief het aanplanten van bomen of andere vegetatie rondom een rwzi of actiefslibtanks is ter reductie van de genoemde windinvloed. Bij dit onderzoek zou ook het ontwerp van een effectief windscherm betrokken kunnen worden.
3. De afkoeling van afvalwater in rioolstelsels wordt nagenoeg geheel bepaald door de warmtegeleiding door de bodemmateriële tussen rioolbuis en maaiveld. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen of door ingrepen in de bodem rondom de rioolbuizen (aanbrengen van ander materiaal of drooglegging) de warmtegeleiding van de bodem kosteneffectief beperkt kan worden.
4. De temperatuur van het geloosde afvalwater uit woningen bepaalt in belangrijke mate de temperatuur van het actief slib in een rwzi. Nader onderzoek zou meer licht moeten werpen op deze lozingstemperatuur.
5. Het onttrekken van warmte aan gemeentelijke rioolstelsels voor verwarmingsdoeleinden krijgt steeds meer aandacht. Het verdient aanbeveling bij deze projecten de invloed van deze onttrekkingen op de temperatuur van het actief slib in de betrokken rwzi, integraal mee te nemen.

# 9

## LIJST MET GEBRUIKTE SYMBOLEN

### 1 TEMPERATUREN

|            |                                                 |
|------------|-------------------------------------------------|
| $T_e$      | effluent                                        |
| $T_g$      | gemengd                                         |
| $T_i$      | ingaaand of influent                            |
| $T_{knmi}$ | buitenlucht, gemeten door het KNMI              |
| $T_l$      | lozing                                          |
| $T_m$      | maaiveld                                        |
| $T_n$      | neerslagwater                                   |
| $T_o$      | op overnamepunt (tussen gemeente en waterschap) |
| $T_{rwzi}$ | rwzi (actief slib in rwzi)                      |
| $T_u$      | uitgaand                                        |
| $T_w$      | water of rioolwater                             |

### 2 VOLUMESTROMEN (DEBIETEN)

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| $Q_{dwa}$ | droog weer aanvoer ( $Q_l + Q_v$ )    |
| $Q_i$     | totale influent ( $Q_l + Q_v + Q_n$ ) |
| $Q_l$     | lozing van afvalwater                 |
| $Q_n$     | neerslagwater in rioolstelsel         |
| $Q_v$     | vreemd water in rioolstelsel          |

### 3 UIT HET GRIEKSE ALFABET

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| $\Delta$  | delta = verschil                          |
| $\phi$    | fi = energetisch vermogen                 |
| $\gamma$  | gamma = overall-constante in energiemodel |
| $\lambda$ | labda = warmtegeleidingscoëfficiënt       |
| $\pi$     | pi = constante 3,14                       |
| $\rho$    | rho = dichtheid                           |

### 4 OVERIGE SYMBOLEN

|       |                                                                             |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $a$   | constante a uit de mathematische relatie $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$ |
| $b$   | constante b uit de mathematische relatie $T_{rwzi} = a \times T_{knmi} + b$ |
| $D$   | diameter (van rioolbuis)                                                    |
| $h$   | Hoogteverschil tussen rioolbuis en maaiveld                                 |
| $\ln$ | natuurlijke logaritme                                                       |
| $L$   | getotaliseerde lengte van rioolbuizen                                       |
| $S_L$ | constante uit stationair model voor afkoeling rioolbuizen                   |

# 10

## REFERENTIELIJST

1. Riool in cijfers, uitgave Stichting RIONED, 2002-2003, blz 6 + 7 en 10 + 11
2. Wärme-atlas Verein Deutscher Ingenieure 6. erw. Aufl. 1991  
Seite Ea9, Anordnung 4, Rohr in Erdboden
3. Jacek Makinia, Scott A. Wells and Piotr Zima;  
Temperature Modeling in Activated Sludge Systems: A Case Study;  
Water Environment Research, Volume 77 Number 5; September/October 2005
4. PolyTechnisch Zakboek PBNA, 45<sup>e</sup> druk, 1993, blz E1/17
5. PolyTechnisch Zakboek PBNA, 49<sup>e</sup> druk, 2002, blz. A4/47 en blz E1/101
6. Wärme-atlas Verein Deutscher Ingenieure 6. erw. Aufl. 1991  
Seite Dea 2, Dea 5, Dea 6, Dea 12
7. KNMI Klimaatatlas van Nederland  
Tijdvak 1971-2000, blz 77
8. DACE-prijzenboekje,  
22<sup>e</sup> editie, mei 2002, blz 108



## BIJLAGE 1

# RESULTATEN 48 RWZI'S, ALFABETISCH

## GERANGSCHIKT OP RWZI

| RWZI<br>[-]     | KNMI<br>[-] | a<br>[°C/°C] | b<br>[°C] | r2<br>[-] | T(zomer)*<br>[°C] | Ontwerp-<br>capaciteit **<br>[i.e.-136] | Hoeveelheid<br>afvalwater **<br>[l/(i.e.x etmaal)] | Periode<br>[-]                | Meetperiode<br>[maanden] |
|-----------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Almere          | Schiphol    | 0,59862      | 11,14111  | 0,8968    | 23,1              | 272.183                                 | 116,8                                              | januari 1995 - maart 2004     | 109                      |
| Alphen          | Eindhoven   | 0,87258      | 5,09235   | 0,9727    | 22,5              | 5.290                                   | 108,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Amersfoort      | De Bilt     | 0,59681      | 8,70564   | 0,8781    | 20,6              | 294.000                                 | 179,4                                              | november 1999 - februari 2004 | 52                       |
| Apeldoorn       | De Bilt     | 0,52305      | 9,59146   | 0,9311    | 20,1              | 340.000                                 | 231,1                                              | januari 1996 - februari 2003  | 86                       |
| Baarle Nassau   | Eindhoven   | 0,76749      | 6,99665   | 0,9415    | 22,3              | 18.500                                  | 183,9                                              | juni 1995 - december 2005     | 127                      |
| Bath            | Vilssingen  | 0,62686      | 10,01512  | 0,8383    | 22,6              | 536.000                                 | 243,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 118                      |
| Bennekom        | De Bilt     | 0,88649      | 3,17058   | 0,9293    | 20,9              | 22.000                                  | 213,5                                              | januari 1996 - november 2005  | 118                      |
| Brummen         | Twente      | 0,68410      | 7,63746   | 0,9068    | 21,3              | 45.000                                  | 144,9                                              | januari 1996 - oktober 2001   | 70                       |
| Chaam           | Eindhoven   | 0,85601      | 5,28423   | 0,9603    | 22,4              | 8.450                                   | 197,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| De Bilt         | De Bilt     | 0,64086      | 7,43803   | 0,9180    | 20,3              | 90.662                                  | 220,7                                              | januari 1999 - december 2003  | 60                       |
| Den Helder      | Den Helder  | 0,70088      | 8,19338   | 0,8826    | 22,2              | 129.000                                 | 224,9                                              | januari 1995 - maart 2003     | 99                       |
| Dinteloord      | Rotterdam   | 0,86371      | 5,14942   | 0,9553    | 22,4              | 8.450                                   | 298,0                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Dongemond       | Rotterdam   | 0,61584      | 8,63468   | 0,8542    | 21,0              | 142.900                                 | 230,9                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Echten          | Eelde       | 0,71655      | 7,63223   | 0,9286    | 22,0              | 132.350                                 | 193,8                                              | januari 2000 - juni 2004      | 54                       |
| Ede             | De Bilt     | 0,68029      | 7,69635   | 0,9401    | 21,3              | 300.000                                 | 180,4                                              | november 1999 - oktober 2001  | 24                       |
| Eelde           | Eelde       | 0,68206      | 7,98581   | 0,8103    | 21,6              | 105.882                                 | 243,8                                              | juni 2001 - juli 2004         | 37                       |
| Eindhoven       | Eindhoven   | 0,54008      | 9,52113   | 0,8168    | 20,3              | 750.000                                 | 225,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Elburg          | De Bilt     | 0,61597      | 10,21379  | 0,9146    | 22,5              | 160.000                                 | 216,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Epe             | Twente      | 0,59372      | 7,54908   | 0,9123    | 19,4              | 55.000                                  | 189,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 122                      |
| Geldermalsen    | De Bilt     | 0,69207      | 6,97342   | 0,8890    | 20,8              | 33.100                                  | 328,4                                              | januari 1996 - februari 2005  | 108                      |
| Halsteren       | Rotterdam   | 0,67709      | 7,36303   | 0,9148    | 20,9              | 14.000                                  | 220,3                                              | januari 1997 - december 2005  | 108                      |
| Harderwijk      | De Bilt     | 0,60142      | 9,28048   | 0,8979    | 21,3              | 260.000                                 | 194,8                                              | januari 1996 - maart 2003     | 87                       |
| Hattum          | Twente      | 0,70316      | 8,39966   | 0,9419    | 22,5              | 90.000                                  | 221,4                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Heerlen         | Maastricht  | 0,68354      | 6,82151   | 0,7892    | 20,5              | 87.300                                  | 220,6                                              | januari 1997 - december 2003  | 79                       |
| Hoensbroek      | Maastricht  | 0,62810      | 7,69426   | 0,7831    | 20,3              | 318.900                                 | 334,1                                              | januari 1996 - december 2003  | 75                       |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven   | 0,71410      | 7,15804   | 0,9054    | 21,4              | 63.200                                  | 187,4                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam   | 0,85118      | 5,63168   | 0,9579    | 22,7              | 7.940                                   | 282,8                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam   | 0,85665      | 5,09535   | 0,9536    | 22,2              | 3.180                                   | 343,2                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Nieuwveer       | Rotterdam   | 0,69129      | 8,69506   | 0,9180    | 22,5              | 485.000                                 | 214,8                                              | januari 1996 - december 2005  | 118                      |
| Nijkerk         | De Bilt     | 0,67109      | 8,75217   | 0,8269    | 22,2              | 59.000                                  | 172,9                                              | november 1999 - november 2005 | 73                       |
| Ossendrecht     | Vilssingen  | 0,74483      | 6,48439   | 0,9557    | 21,4              | 13.000                                  | 199,3                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Putte           | Vilssingen  | 0,76444      | 5,74528   | 0,9646    | 21,0              | 8.210                                   | 229,0                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Renkum          | De Bilt     | 0,68951      | 7,88464   | 0,9310    | 21,7              | 160.000                                 | 187,8                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Riel            | Eindhoven   | 0,93788      | 4,30678   | 0,9727    | 23,1              | 5.290                                   | 179,3                                              | augustus 1995 - december 2005 | 125                      |
| Rijen           | Eindhoven   | 0,66726      | 7,84257   | 0,9127    | 21,2              | 82.000                                  | 175,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven   | 0,71220      | 7,96550   | 0,8855    | 22,2              | 99.000                                  | 257,3                                              | januari 2000 - december 2005  | 72                       |
| Stolpen         | Den Helder  | 0,78679      | 5,25548   | 0,9397    | 21,0              | 63.500                                  | 186,9                                              | januari 1995 - april 2000     | 64                       |
| Terneuzen       | Vilssingen  | 0,61190      | 7,41205   | 0,7999    | 19,7              | 120.000                                 | 139,0                                              | januari 1995 - december 1997  | 32                       |
| Terwolde        | Twente      | 0,62760      | 9,44544   | 0,8495    | 22,0              | 115.000                                 | 198,6                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Utrecht         | De Bilt     | 0,67020      | 8,73456   | 0,9599    | 22,1              | 529.412                                 | 161,8                                              | januari 2002 - december 2003  | 24                       |
| Veenendaal      | De Bilt     | 0,69070      | 8,13512   | 0,9464    | 21,9              | 166.000                                 | 221,6                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Waalwijk        | Eindhoven   | 0,64342      | 9,37314   | 0,8706    | 22,2              | 86.000                                  | 205,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 129                      |
| Walcheren       | Vilssingen  | 0,64399      | 7,30166   | 0,8993    | 20,2              | 140.000                                 | 224,5                                              | januari 1999 - december 2003  | 59                       |
| Waspik          | Rotterdam   | 0,93116      | 4,31479   | 0,9646    | 22,9              | 19.120                                  | 199,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Wieringen       | Den Helder  | 0,78313      | 6,23012   | 0,9518    | 21,9              | 13.300                                  | 182,4                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Wieringermeer   | Den Helder  | 0,69612      | 7,38243   | 0,9316    | 21,3              | 18.100                                  | 153,3                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Willemstad      | Rotterdam   | 0,89866      | 4,48508   | 0,9586    | 22,5              | 6.090                                   | 230,5                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Woudenberg      | De Bilt     | 0,73982      | 6,93938   | 0,9240    | 21,7              | 60.000                                  | 265,2                                              | november 1999 - december 2005 | 74                       |
| Aantal          |             | 48           |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Laagste         |             | 0,52305      | 3,17058   | 0,7831    | 19,4              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na laagste  |             | 0,54008      | 4,30678   | 0,7892    | 19,7              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Gemiddelde      |             |              |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na hoogste  |             | 0,93116      | 10,21379  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Hoogste         |             | 0,93788      | 11,14111  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

\*\* Data ontleent aan bench-mark 2002

## BIJLAGE 2

# RESULTATEN 48 RWZI'S, GERANGSCHIKT OP REGRESSIECOËFFICIËNT R<sup>2</sup>

| RWZI<br>[-]     | KNMI<br>[-] | a<br>[°C/°C] | b<br>[°C] | r2<br>[-] | T(zomer)*<br>[°C] | Ontwerp-<br>capaciteit **<br>[i.e.-136] | Hoeveelheid<br>afvalwater **<br>[l/(i.e.x etmaal)] | Periode<br>[-]                | Meetperiode<br>[maanden] |
|-----------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Hoensbroek      | Maastricht  | 0,62810      | 7,69426   | 0,7831    | 20,3              | 318.900                                 | 334,1                                              | januari 1996 - december 2003  | 75                       |
| Heerlen         | Maastricht  | 0,68354      | 6,82151   | 0,7892    | 20,5              | 87.300                                  | 220,6                                              | januari 1997 - december 2003  | 79                       |
| Terneuzen       | Vilssingen  | 0,61190      | 7,41205   | 0,7999    | 19,7              | 120.000                                 | 139,0                                              | januari 1995 - december 1997  | 32                       |
| Eelde           | Eelde       | 0,68206      | 7,98581   | 0,8103    | 21,6              | 105.882                                 | 243,8                                              | juni 2001 - juli 2004         | 37                       |
| Eindhoven       | Eindhoven   | 0,54008      | 9,52113   | 0,8168    | 20,3              | 750.000                                 | 225,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Nijkerk         | De Bilt     | 0,67109      | 8,75217   | 0,8269    | 22,2              | 59.000                                  | 172,9                                              | november 1999 - november 2005 | 73                       |
| Bath            | Vilssingen  | 0,62686      | 10,01512  | 0,8383    | 22,6              | 536.000                                 | 243,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 118                      |
| Terwolde        | Twente      | 0,62760      | 9,44544   | 0,8495    | 22,0              | 115.000                                 | 198,6                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Dongemond       | Rotterdam   | 0,61584      | 8,63468   | 0,8542    | 21,0              | 142.900                                 | 230,9                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Waalwijk        | Eindhoven   | 0,64342      | 9,37314   | 0,8706    | 22,2              | 86.000                                  | 205,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 129                      |
| Amersfoort      | De Bilt     | 0,59681      | 8,70564   | 0,8781    | 20,6              | 294.000                                 | 179,4                                              | november 1999 - februari 2004 | 52                       |
| Den Helder      | Den Helder  | 0,70088      | 8,19338   | 0,8826    | 22,2              | 129.000                                 | 224,9                                              | januari 1995 - maart 2003     | 99                       |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven   | 0,71220      | 7,96550   | 0,8855    | 22,2              | 99.000                                  | 257,3                                              | januari 2000 - december 2005  | 72                       |
| Geldermalsen    | De Bilt     | 0,69207      | 6,97342   | 0,8890    | 20,8              | 33.100                                  | 328,4                                              | januari 1996 - februari 2005  | 108                      |
| Almere          | Schiphol    | 0,59862      | 11,14111  | 0,8968    | 23,1              | 272.183                                 | 116,8                                              | januari 1995 - maart 2004     | 109                      |
| Harderwijk      | De Bilt     | 0,60142      | 9,28048   | 0,8979    | 21,3              | 260.000                                 | 194,8                                              | januari 1996 - maart 2003     | 87                       |
| Walcheren       | Vilssingen  | 0,64399      | 7,30166   | 0,8993    | 20,2              | 140.000                                 | 224,5                                              | januari 1999 - december 2003  | 59                       |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven   | 0,71410      | 7,15804   | 0,9054    | 21,4              | 63.200                                  | 187,4                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Brummen         | Twente      | 0,68410      | 7,63746   | 0,9068    | 21,3              | 45.000                                  | 144,9                                              | januari 1996 - oktober 2001   | 70                       |
| Epe             | Twente      | 0,59372      | 7,54908   | 0,9123    | 19,4              | 55.000                                  | 189,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 122                      |
| Rijen           | Eindhoven   | 0,66726      | 7,84257   | 0,9127    | 21,2              | 82.000                                  | 175,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Elburg          | De Bilt     | 0,61597      | 10,21379  | 0,9146    | 22,5              | 160.000                                 | 216,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Halsteren       | Rotterdam   | 0,67709      | 7,36303   | 0,9148    | 20,9              | 14.000                                  | 220,3                                              | januari 1997 - december 2005  | 108                      |
| Nieuwveer       | Rotterdam   | 0,69129      | 8,69506   | 0,9180    | 22,5              | 485.000                                 | 214,8                                              | januari 1996 - december 2005  | 118                      |
| De Bilt         | De Bilt     | 0,64086      | 7,43803   | 0,9180    | 20,3              | 90.662                                  | 220,7                                              | januari 1999 - december 2003  | 60                       |
| Woudenberg      | De Bilt     | 0,73982      | 6,93938   | 0,9240    | 21,7              | 60.000                                  | 265,2                                              | november 1999 - december 2005 | 74                       |
| Echten          | Eelde       | 0,71655      | 7,63223   | 0,9286    | 22,0              | 132.350                                 | 193,8                                              | januari 2000 - juni 2004      | 54                       |
| Bennekom        | De Bilt     | 0,88649      | 3,17058   | 0,9293    | 20,9              | 22.000                                  | 213,5                                              | januari 1996 - november 2005  | 118                      |
| Renkum          | De Bilt     | 0,68951      | 7,88464   | 0,9310    | 21,7              | 160.000                                 | 187,8                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Apeldoorn       | De Bilt     | 0,52305      | 9,59146   | 0,9311    | 20,1              | 340.000                                 | 231,1                                              | januari 1996 - februari 2003  | 86                       |
| Wieringermeer   | Den Helder  | 0,69612      | 7,38243   | 0,9316    | 21,3              | 18.100                                  | 153,3                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Stolpen         | Den Helder  | 0,78679      | 5,25548   | 0,9397    | 21,0              | 63.500                                  | 186,9                                              | januari 1995 - april 2000     | 64                       |
| Ede             | De Bilt     | 0,68029      | 7,69635   | 0,9401    | 21,3              | 300.000                                 | 180,4                                              | november 1999 - oktober 2001  | 24                       |
| Baarle Nassau   | Eindhoven   | 0,76749      | 6,99665   | 0,9415    | 22,3              | 18.500                                  | 183,9                                              | juni 1995 - december 2005     | 127                      |
| Hattum          | Twente      | 0,70316      | 8,39966   | 0,9419    | 22,5              | 90.000                                  | 221,4                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Veenendaal      | De Bilt     | 0,69070      | 8,13512   | 0,9464    | 21,9              | 166.000                                 | 221,6                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Wieringen       | Den Helder  | 0,78313      | 6,23012   | 0,9518    | 21,9              | 13.300                                  | 182,4                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam   | 0,85665      | 5,09535   | 0,9536    | 22,2              | 3.180                                   | 343,2                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Dinteloord      | Rotterdam   | 0,86371      | 5,14942   | 0,9553    | 22,4              | 8.450                                   | 298,0                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Ossendrecht     | Vilssingen  | 0,74483      | 6,48439   | 0,9557    | 21,4              | 13.000                                  | 199,3                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam   | 0,85118      | 5,63168   | 0,9579    | 22,7              | 7.940                                   | 282,8                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Willemstad      | Rotterdam   | 0,89866      | 4,48508   | 0,9586    | 22,5              | 6.090                                   | 230,5                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Utrecht         | De Bilt     | 0,67020      | 8,73456   | 0,9599    | 22,1              | 529.412                                 | 161,8                                              | januari 2002 - december 2003  | 24                       |
| Chaar           | Eindhoven   | 0,85601      | 5,28423   | 0,9603    | 22,4              | 8.450                                   | 197,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Putte           | Vilssingen  | 0,76444      | 5,74528   | 0,9646    | 21,0              | 8.210                                   | 229,0                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Waspik          | Rotterdam   | 0,93116      | 4,31479   | 0,9646    | 22,9              | 19.120                                  | 199,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Alphen          | Eindhoven   | 0,87258      | 5,09235   | 0,9727    | 22,5              | 5.290                                   | 108,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Riel            | Eindhoven   | 0,93788      | 4,30678   | 0,9727    | 23,1              | 5.290                                   | 179,3                                              | augustus 1995 - december 2005 | 125                      |
| Aantal          |             | 48           |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Laagste         |             | 0,52305      | 3,17058   | 0,7831    | 19,4              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na laagste  |             | 0,54008      | 4,30678   | 0,7892    | 19,7              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Gemiddelde      |             |              |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na hoogste  |             | 0,93116      | 10,21379  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Hoogste         |             | 0,93788      | 11,14111  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

\*\* Data ontleent aan bench-mark 2002

## BIJLAGE 3

# RESULTATEN 48 RWZI'S, GERANGSCHIKT OP CONSTATE A

| RWZI<br>[-]     | KNMI<br>[-] | a<br>[°C/°C] | b<br>[°C] | r2<br>[-] | T(zomer)*<br>[°C] | Ontwerp-<br>capaciteit **<br>[i.e.-136] | Hoeveelheid<br>afvalwater **<br>[l/(i.e.x etmaal)] | Periode<br>[-]                | Meetperiode<br>[maanden] |
|-----------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Apeldoorn       | De Bilt     | 0,52305      | 9,59146   | 0,9311    | 20,1              | 340.000                                 | 231,1                                              | januari 1996 - februari 2003  | 86                       |
| Eindhoven       | Eindhoven   | 0,54008      | 9,52113   | 0,8168    | 20,3              | 750.000                                 | 225,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Epe             | Twente      | 0,59372      | 7,54908   | 0,9123    | 19,4              | 55.000                                  | 189,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 122                      |
| Amersfoort      | De Bilt     | 0,59681      | 8,70564   | 0,8781    | 20,6              | 294.000                                 | 179,4                                              | november 1999 - februari 2004 | 52                       |
| Almere          | Schiphol    | 0,59862      | 11,14111  | 0,8968    | 23,1              | 272.183                                 | 116,8                                              | januari 1995 - maart 2004     | 109                      |
| Harderwijk      | De Bilt     | 0,60142      | 9,28048   | 0,8979    | 21,3              | 260.000                                 | 194,8                                              | januari 1996 - maart 2003     | 87                       |
| Terneuzen       | Vilssingen  | 0,61190      | 7,41205   | 0,7999    | 19,7              | 120.000                                 | 139,0                                              | januari 1995 - december 1997  | 32                       |
| Dongenmond      | Rotterdam   | 0,61584      | 8,63468   | 0,8542    | 21,0              | 142.900                                 | 230,9                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Elburg          | De Bilt     | 0,61597      | 10,21379  | 0,9146    | 22,5              | 160.000                                 | 216,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Bath            | Vilssingen  | 0,62686      | 10,01512  | 0,8383    | 22,6              | 536.000                                 | 243,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 118                      |
| Terwolde        | Twente      | 0,62760      | 9,44544   | 0,8495    | 22,0              | 115.000                                 | 198,6                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Hoensbroek      | Maastricht  | 0,62810      | 7,69426   | 0,7831    | 20,3              | 318.900                                 | 334,1                                              | januari 1996 - december 2003  | 75                       |
| De Bilt         | De Bilt     | 0,64086      | 7,43803   | 0,9180    | 20,3              | 90.662                                  | 220,7                                              | januari 1999 - december 2003  | 60                       |
| Waalwijk        | Eindhoven   | 0,64342      | 9,37314   | 0,8706    | 22,2              | 86.000                                  | 205,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 129                      |
| Walcheren       | Vilssingen  | 0,64399      | 7,30166   | 0,8993    | 20,2              | 140.000                                 | 224,5                                              | januari 1999 - december 2003  | 59                       |
| Rijen           | Eindhoven   | 0,66726      | 7,84257   | 0,9127    | 21,2              | 82.000                                  | 175,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Utrecht         | De Bilt     | 0,67020      | 8,73456   | 0,9599    | 22,1              | 529.412                                 | 161,8                                              | januari 2002 - december 2003  | 24                       |
| Nijkerk         | De Bilt     | 0,67109      | 8,75217   | 0,8269    | 22,2              | 59.000                                  | 172,9                                              | november 1999 - november 2005 | 73                       |
| Halsteren       | Rotterdam   | 0,67709      | 7,36303   | 0,9148    | 20,9              | 14.000                                  | 220,3                                              | januari 1997 - december 2005  | 108                      |
| Ede             | De Bilt     | 0,68029      | 7,69635   | 0,9401    | 21,3              | 300.000                                 | 180,4                                              | november 1999 - oktober 2001  | 24                       |
| Eelde           | Eelde       | 0,68206      | 7,98581   | 0,8103    | 21,6              | 105.882                                 | 243,8                                              | juni 2001 - juli 2004         | 37                       |
| Heerlen         | Maastricht  | 0,68354      | 6,82151   | 0,7892    | 20,5              | 87.300                                  | 220,6                                              | januari 1997 - december 2003  | 79                       |
| Brummen         | Twente      | 0,68410      | 7,63746   | 0,9068    | 21,3              | 45.000                                  | 144,9                                              | januari 1996 - oktober 2001   | 70                       |
| Renkum          | De Bilt     | 0,68951      | 7,88464   | 0,9310    | 21,7              | 160.000                                 | 187,8                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Veenendaal      | De Bilt     | 0,69070      | 8,13512   | 0,9464    | 21,9              | 166.000                                 | 221,6                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Nieuwveer       | Rotterdam   | 0,69129      | 8,69506   | 0,9180    | 22,5              | 485.000                                 | 214,8                                              | januari 1996 - december 2005  | 118                      |
| Geldermalsen    | De Bilt     | 0,69207      | 6,97342   | 0,8890    | 20,8              | 33.100                                  | 328,4                                              | januari 1996 - februari 2005  | 108                      |
| Wieringermeer   | Den Helder  | 0,69612      | 7,38243   | 0,9316    | 21,3              | 18.100                                  | 153,3                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Den Helder      | Den Helder  | 0,70088      | 8,19338   | 0,8826    | 22,2              | 129.000                                 | 224,9                                              | januari 1995 - maart 2003     | 99                       |
| Hattum          | Twente      | 0,70316      | 8,39966   | 0,9419    | 22,5              | 90.000                                  | 221,4                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven   | 0,71220      | 7,96550   | 0,8855    | 22,2              | 99.000                                  | 257,3                                              | januari 2000 - december 2005  | 72                       |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven   | 0,71410      | 7,15804   | 0,9054    | 21,4              | 63.200                                  | 187,4                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Echten          | Eelde       | 0,71655      | 7,63223   | 0,9286    | 22,0              | 132.350                                 | 193,8                                              | januari 2000 - juni 2004      | 54                       |
| Woudenberg      | De Bilt     | 0,73982      | 6,93938   | 0,9240    | 21,7              | 60.000                                  | 265,2                                              | november 1999 - december 2005 | 74                       |
| Ossendrecht     | Vilssingen  | 0,74483      | 6,48439   | 0,9557    | 21,4              | 13.000                                  | 199,3                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Putte           | Vilssingen  | 0,76444      | 5,74528   | 0,9646    | 21,0              | 8.210                                   | 229,0                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Baarle Nassau   | Eindhoven   | 0,76749      | 6,99665   | 0,9415    | 22,3              | 18.500                                  | 183,9                                              | juni 1995 - december 2005     | 127                      |
| Wieringen       | Den Helder  | 0,78313      | 6,23012   | 0,9518    | 21,9              | 13.300                                  | 182,4                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Stolpen         | Den Helder  | 0,78679      | 5,25548   | 0,9397    | 21,0              | 63.500                                  | 186,9                                              | januari 1995 - april 2000     | 64                       |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam   | 0,85118      | 5,63168   | 0,9579    | 22,7              | 7.940                                   | 282,8                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Chaaam          | Eindhoven   | 0,85601      | 5,28423   | 0,9603    | 22,4              | 8.450                                   | 197,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam   | 0,85665      | 5,09535   | 0,9536    | 22,2              | 3.180                                   | 343,2                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Dinteloord      | Rotterdam   | 0,86371      | 5,14942   | 0,9553    | 22,4              | 8.450                                   | 298,0                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Alphen          | Eindhoven   | 0,87258      | 5,09235   | 0,9727    | 22,5              | 5.290                                   | 108,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Bennekom        | De Bilt     | 0,88649      | 3,17058   | 0,9293    | 20,9              | 22.000                                  | 213,5                                              | januari 1996 - november 2005  | 118                      |
| Willemstad      | Rotterdam   | 0,89866      | 4,48508   | 0,9586    | 22,5              | 6.090                                   | 230,5                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Waspik          | Rotterdam   | 0,93116      | 4,31479   | 0,9646    | 22,9              | 19.120                                  | 199,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Riel            | Eindhoven   | 0,93788      | 4,30678   | 0,9727    | 23,1              | 5.290                                   | 179,3                                              | augustus 1995 - december 2005 | 125                      |
| Aantal          |             | 48           |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Laagste         |             | 0,52305      | 3,17058   | 0,7831    | 19,4              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na laagste  |             | 0,54008      | 4,30678   | 0,7892    | 19,7              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Gemiddelde      |             |              |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na hoogste  |             | 0,93116      | 10,21379  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Hoogste         |             | 0,93788      | 11,14111  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

\*\* Data ontleent aan bench-mark 2002



## BIJLAGE 4

# RESULTATEN 48 RWZI'S, GERANGSCHIKT OP CONSTATE B

| RWZI<br>[-]     | KNMI<br>[-] | a<br>[°C/°C] | b<br>[°C] | r2<br>[-] | T(zomer)*<br>[°C] | Ontwerp-<br>capaciteit **<br>[i.e.-136] | Hoeveelheid<br>afvalwater **<br>[l/(i.e.x etmaal)] | Periode<br>[-]                | Meetperiode<br>[maanden] |
|-----------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Bennekom        | De Bilt     | 0,88649      | 3,17058   | 0,9293    | 20,9              | 22.000                                  | 213,5                                              | januari 1996 - november 2005  | 118                      |
| Riel            | Eindhoven   | 0,93788      | 4,30678   | 0,9727    | 23,1              | 5.290                                   | 179,3                                              | augustus 1995 - december 2005 | 125                      |
| Waspik          | Rotterdam   | 0,93116      | 4,31479   | 0,9646    | 22,9              | 19.120                                  | 199,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Willemstad      | Rotterdam   | 0,89866      | 4,48508   | 0,9586    | 22,5              | 6.090                                   | 230,5                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Alphen          | Eindhoven   | 0,87258      | 5,09235   | 0,9727    | 22,5              | 5.290                                   | 108,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam   | 0,85665      | 5,09535   | 0,9536    | 22,2              | 3.180                                   | 343,2                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Dinteloord      | Rotterdam   | 0,86371      | 5,14942   | 0,9553    | 22,4              | 8.450                                   | 298,0                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Stolpen         | Den Helder  | 0,78679      | 5,25548   | 0,9397    | 21,0              | 63.500                                  | 186,9                                              | januari 1995 - april 2000     | 64                       |
| Chaaam          | Eindhoven   | 0,85601      | 5,28423   | 0,9603    | 22,4              | 8.450                                   | 197,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam   | 0,85118      | 5,63168   | 0,9579    | 22,7              | 7.940                                   | 282,8                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Putte           | Vilssingen  | 0,76444      | 5,74528   | 0,9646    | 21,0              | 8.210                                   | 229,0                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Wieringen       | Den Helder  | 0,78313      | 6,23012   | 0,9518    | 21,9              | 13.300                                  | 182,4                                              | januari 1995 - december 2005  | 108                      |
| Ossendrecht     | Vilssingen  | 0,74483      | 6,48439   | 0,9557    | 21,4              | 13.000                                  | 199,3                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Heerlen         | Maastricht  | 0,68354      | 6,82151   | 0,7892    | 20,5              | 87.300                                  | 220,6                                              | januari 1997 - december 2003  | 79                       |
| Woudenberg      | De Bilt     | 0,73982      | 6,93938   | 0,9240    | 21,7              | 60.000                                  | 265,2                                              | november 1999 - december 2005 | 74                       |
| Geldermalsen    | De Bilt     | 0,69207      | 6,97342   | 0,8890    | 20,8              | 33.100                                  | 328,4                                              | januari 1996 - februari 2005  | 108                      |
| Baarle Nassau   | Eindhoven   | 0,76749      | 6,99665   | 0,9415    | 22,3              | 18.500                                  | 183,9                                              | juni 1995 - december 2005     | 127                      |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven   | 0,71410      | 7,15804   | 0,9054    | 21,4              | 63.200                                  | 187,4                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Walcheren       | Vilssingen  | 0,64399      | 7,30166   | 0,8993    | 20,2              | 140.000                                 | 224,5                                              | januari 1999 - december 2003  | 59                       |
| Halsteren       | Rotterdam   | 0,67709      | 7,36303   | 0,9148    | 20,9              | 14.000                                  | 220,3                                              | januari 1997 - december 2005  | 108                      |
| Wieringermeer   | Den Helder  | 0,69612      | 7,38243   | 0,9316    | 21,3              | 18.100                                  | 153,3                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Terneuzen       | Vilssingen  | 0,61190      | 7,41205   | 0,7999    | 19,7              | 120.000                                 | 139,0                                              | januari 1995 - december 1997  | 32                       |
| De Bilt         | De Bilt     | 0,64086      | 7,43803   | 0,9180    | 20,3              | 90.662                                  | 220,7                                              | januari 1999 - december 2003  | 60                       |
| Epe             | Twente      | 0,59372      | 7,54908   | 0,9123    | 19,4              | 55.000                                  | 189,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 122                      |
| Echten          | Eelde       | 0,71655      | 7,63223   | 0,9286    | 22,0              | 132.350                                 | 193,8                                              | januari 2000 - juni 2004      | 54                       |
| Brummen         | Twente      | 0,68410      | 7,63746   | 0,9068    | 21,3              | 45.000                                  | 144,9                                              | januari 1996 - oktober 2001   | 70                       |
| Hoensbroek      | Maastricht  | 0,62810      | 7,69426   | 0,7831    | 20,3              | 318.900                                 | 334,1                                              | januari 1996 - december 2003  | 75                       |
| Ede             | De Bilt     | 0,68029      | 7,69635   | 0,9401    | 21,3              | 300.000                                 | 180,4                                              | november 1999 - oktober 2001  | 24                       |
| Rijen           | Eindhoven   | 0,66726      | 7,84257   | 0,9127    | 21,2              | 82.000                                  | 175,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Renkum          | De Bilt     | 0,68951      | 7,88464   | 0,9310    | 21,7              | 160.000                                 | 187,8                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven   | 0,71220      | 7,96550   | 0,8855    | 22,2              | 99.000                                  | 257,3                                              | januari 2000 - december 2005  | 72                       |
| Eelde           | Eelde       | 0,68206      | 7,98581   | 0,8103    | 21,6              | 105.882                                 | 243,8                                              | juni 2001 - juli 2004         | 37                       |
| Veenendaal      | De Bilt     | 0,69070      | 8,13512   | 0,9464    | 21,9              | 166.000                                 | 221,6                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Den Helder      | Den Helder  | 0,70088      | 8,19338   | 0,8826    | 22,2              | 129.000                                 | 224,9                                              | januari 1995 - maart 2003     | 99                       |
| Hattum          | Twente      | 0,70316      | 8,39966   | 0,9419    | 22,5              | 90.000                                  | 221,4                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Dongemond       | Rotterdam   | 0,61584      | 8,63468   | 0,8542    | 21,0              | 142.900                                 | 230,9                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Nieuwveer       | Rotterdam   | 0,69129      | 8,69506   | 0,9180    | 22,5              | 485.000                                 | 214,8                                              | januari 1996 - december 2005  | 118                      |
| Amersfoort      | De Bilt     | 0,59681      | 8,70564   | 0,8781    | 20,6              | 294.000                                 | 179,4                                              | november 1999 - februari 2004 | 52                       |
| Utrecht         | De Bilt     | 0,67020      | 8,73456   | 0,9599    | 22,1              | 529.412                                 | 161,8                                              | januari 2002 - december 2003  | 24                       |
| Nijkerk         | De Bilt     | 0,67109      | 8,75217   | 0,8269    | 22,2              | 59.000                                  | 172,9                                              | november 1999 - november 2005 | 73                       |
| Harderwijk      | De Bilt     | 0,60142      | 9,28048   | 0,8979    | 21,3              | 260.000                                 | 194,8                                              | januari 1996 - maart 2003     | 87                       |
| Waalwijk        | Eindhoven   | 0,64342      | 9,37314   | 0,8706    | 22,2              | 86.000                                  | 205,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 129                      |
| Terwolde        | Twente      | 0,62760      | 9,44544   | 0,8495    | 22,0              | 115.000                                 | 198,6                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Eindhoven       | Eindhoven   | 0,54008      | 9,52113   | 0,8168    | 20,3              | 750.000                                 | 225,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Apeldoorn       | De Bilt     | 0,52305      | 9,59146   | 0,9311    | 20,1              | 340.000                                 | 231,1                                              | januari 1996 - februari 2003  | 86                       |
| Bath            | Vilssingen  | 0,62686      | 10,01512  | 0,8383    | 22,6              | 536.000                                 | 243,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 118                      |
| Elburg          | De Bilt     | 0,61597      | 10,21379  | 0,9146    | 22,5              | 160.000                                 | 216,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Almere          | Schiphol    | 0,59862      | 11,14111  | 0,8968    | 23,1              | 272.183                                 | 116,8                                              | januari 1995 - maart 2004     | 109                      |
| Aantal          |             | 48           |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Laagste         |             | 0,52305      | 3,17058   | 0,7831    | 19,4              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na laagste  |             | 0,54008      | 4,30678   | 0,7892    | 19,7              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Gemiddelde      |             |              |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na hoogste  |             | 0,93116      | 10,21379  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Hoogste         |             | 0,93788      | 11,14111  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

\*\* Data ontleent aan bench-mark 2002

## BIJLAGE 5

# RESULTATEN 48 RWZI'S, GERANGSCHIKT OP TEMPERATUUR HOOGZOMER

| RWZI<br>[-]     | KNMI<br>[-] | a<br>[°C/°C] | b<br>[°C] | r2<br>[-] | T(zomer)*<br>[°C] | Ontwerp-<br>capaciteit **<br>[i.e.-136] | Hoeveelheid<br>afvalwater **<br>[l/(i.e.x etmaal)] | Periode<br>[-]                | Meetperiode<br>[maanden] |
|-----------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Epe             | Twente      | 0,59372      | 7,54908   | 0,9123    | 19,4              | 55.000                                  | 189,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 122                      |
| Terneuzen       | Vilssingen  | 0,61190      | 7,41205   | 0,7999    | 19,7              | 120.000                                 | 139,0                                              | januari 1995 - december 1997  | 32                       |
| Apeldoorn       | De Bilt     | 0,52305      | 9,59146   | 0,9311    | 20,1              | 340.000                                 | 231,1                                              | januari 1996 - februari 2003  | 86                       |
| Walcheren       | Vilssingen  | 0,64399      | 7,30166   | 0,8993    | 20,2              | 140.000                                 | 224,5                                              | januari 1999 - december 2003  | 59                       |
| De Bilt         | De Bilt     | 0,64086      | 7,43803   | 0,9180    | 20,3              | 90.662                                  | 220,7                                              | januari 1999 - december 2003  | 60                       |
| Hoensbroek      | Maastricht  | 0,62810      | 7,69426   | 0,7831    | 20,3              | 318.900                                 | 334,1                                              | januari 1996 - december 2003  | 75                       |
| Eindhoven       | Eindhoven   | 0,54008      | 9,52113   | 0,8168    | 20,3              | 750.000                                 | 225,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Heerlen         | Maastricht  | 0,68354      | 6,82151   | 0,7892    | 20,5              | 87.300                                  | 220,6                                              | januari 1997 - december 2003  | 79                       |
| Amersfoort      | De Bilt     | 0,59681      | 8,70564   | 0,8781    | 20,6              | 294.000                                 | 179,4                                              | november 1999 - februari 2004 | 52                       |
| Geldermalsen    | De Bilt     | 0,69207      | 6,97342   | 0,8890    | 20,8              | 33.100                                  | 328,4                                              | januari 1996 - februari 2005  | 108                      |
| Bennekom        | De Bilt     | 0,88649      | 3,17058   | 0,9293    | 20,9              | 22.000                                  | 213,5                                              | januari 1996 - november 2005  | 118                      |
| Halsteren       | Rotterdam   | 0,67709      | 7,36303   | 0,9148    | 20,9              | 14.000                                  | 220,3                                              | januari 1997 - december 2005  | 108                      |
| Dongemond       | Rotterdam   | 0,61584      | 8,63468   | 0,8542    | 21,0              | 142.900                                 | 230,9                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Stolpen         | Den Helder  | 0,78679      | 5,25548   | 0,9397    | 21,0              | 63.500                                  | 186,9                                              | januari 1995 - april 2000     | 64                       |
| Putte           | Vilssingen  | 0,76444      | 5,74528   | 0,9646    | 21,0              | 8.210                                   | 229,0                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Rijen           | Eindhoven   | 0,66726      | 7,84257   | 0,9127    | 21,2              | 82.000                                  | 175,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Ede             | De Bilt     | 0,68029      | 7,69635   | 0,9401    | 21,3              | 300.000                                 | 180,4                                              | november 1999 - oktober 2001  | 24                       |
| Wieringermeer   | Den Helder  | 0,69612      | 7,38243   | 0,9316    | 21,3              | 18.100                                  | 153,3                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Harderwijk      | De Bilt     | 0,60142      | 9,28048   | 0,8979    | 21,3              | 260.000                                 | 194,8                                              | januari 1996 - maart 2003     | 87                       |
| Brummen         | Twente      | 0,68410      | 7,63746   | 0,9068    | 21,3              | 45.000                                  | 144,9                                              | januari 1996 - oktober 2001   | 70                       |
| Ossendrecht     | Vilssingen  | 0,74483      | 6,48439   | 0,9557    | 21,4              | 13.000                                  | 199,3                                              | februari 1997 - december 2005 | 107                      |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven   | 0,71410      | 7,15804   | 0,9054    | 21,4              | 63.200                                  | 187,4                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Eelde           | Eelde       | 0,68206      | 7,98581   | 0,8103    | 21,6              | 105.882                                 | 243,8                                              | juni 2001 - juli 2004         | 37                       |
| Renkum          | De Bilt     | 0,68951      | 7,88464   | 0,9310    | 21,7              | 160.000                                 | 187,8                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Woudenberg      | De Bilt     | 0,73982      | 6,93938   | 0,9240    | 21,7              | 60.000                                  | 265,2                                              | november 1999 - december 2005 | 74                       |
| Wieringen       | Den Helder  | 0,78313      | 6,23012   | 0,9518    | 21,9              | 13.300                                  | 182,4                                              | januari 1995 - december 2003  | 108                      |
| Veenendaal      | De Bilt     | 0,69070      | 8,13512   | 0,9464    | 21,9              | 166.000                                 | 221,6                                              | november 1999 - november 2005 | 71                       |
| Echten          | Eelde       | 0,71655      | 7,63223   | 0,9286    | 22,0              | 132.350                                 | 193,8                                              | januari 2000 - juni 2004      | 54                       |
| Terwolde        | Twente      | 0,62760      | 9,44544   | 0,8495    | 22,0              | 115.000                                 | 198,6                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Utrecht         | De Bilt     | 0,67020      | 8,73456   | 0,9599    | 22,1              | 529.412                                 | 161,8                                              | januari 2002 - december 2003  | 24                       |
| Nijkerk         | De Bilt     | 0,67109      | 8,75217   | 0,8269    | 22,2              | 59.000                                  | 172,9                                              | november 1999 - november 2005 | 73                       |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven   | 0,71220      | 7,96550   | 0,8855    | 22,2              | 99.000                                  | 257,3                                              | januari 2000 - december 2005  | 72                       |
| Den Helder      | Den Helder  | 0,70088      | 8,19338   | 0,8826    | 22,2              | 129.000                                 | 224,9                                              | januari 1995 - maart 2003     | 99                       |
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam   | 0,85665      | 5,09535   | 0,9536    | 22,2              | 3.180                                   | 343,2                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Waalwijk        | Eindhoven   | 0,64342      | 9,37314   | 0,8706    | 22,2              | 86.000                                  | 205,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 129                      |
| Baarle Nassau   | Eindhoven   | 0,76749      | 6,99665   | 0,9415    | 22,3              | 18.500                                  | 183,9                                              | juni 1995 - december 2005     | 127                      |
| Chaaam          | Eindhoven   | 0,85601      | 5,28423   | 0,9603    | 22,4              | 8.450                                   | 197,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Dinteloord      | Rotterdam   | 0,86371      | 5,14942   | 0,9553    | 22,4              | 8.450                                   | 298,0                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Willemstad      | Rotterdam   | 0,89866      | 4,48508   | 0,9586    | 22,5              | 6.090                                   | 230,5                                              | december 1995 - december 2005 | 121                      |
| Hattum          | Twente      | 0,70316      | 8,39966   | 0,9419    | 22,5              | 90.000                                  | 221,4                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Nieuwveer       | Rotterdam   | 0,69129      | 8,69506   | 0,9180    | 22,5              | 485.000                                 | 214,8                                              | januari 1996 - december 2005  | 118                      |
| Elburg          | De Bilt     | 0,61597      | 10,21379  | 0,9146    | 22,5              | 160.000                                 | 216,0                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Alphen          | Eindhoven   | 0,87258      | 5,09235   | 0,9727    | 22,5              | 5.290                                   | 108,7                                              | juli 1995 - december 2005     | 126                      |
| Bath            | Vilssingen  | 0,62686      | 10,01512  | 0,8383    | 22,6              | 536.000                                 | 243,6                                              | januari 1995 - december 2005  | 118                      |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam   | 0,85118      | 5,63168   | 0,9579    | 22,7              | 7.940                                   | 282,8                                              | januari 1995 - december 2005  | 132                      |
| Waspik          | Rotterdam   | 0,93116      | 4,31479   | 0,9646    | 22,9              | 19.120                                  | 199,9                                              | januari 1996 - december 2005  | 120                      |
| Riel            | Eindhoven   | 0,93788      | 4,30678   | 0,9727    | 23,1              | 5.290                                   | 179,3                                              | augustus 1995 - december 2005 | 125                      |
| Almere          | Schiphol    | 0,59862      | 11,14111  | 0,8968    | 23,1              | 272.183                                 | 116,8                                              | januari 1995 - maart 2004     | 109                      |
| Aantal          |             | 48           |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Laagste         |             | 0,52305      | 3,17058   | 0,7831    | 19,4              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na laagste  |             | 0,54008      | 4,30678   | 0,7892    | 19,7              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Gemiddelde      |             |              |           |           |                   |                                         |                                                    |                               |                          |
| Een na hoogste  |             | 0,93116      | 10,21379  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |
| Hoogste         |             | 0,93788      | 11,14111  | 0,9727    | 23,1              |                                         |                                                    |                               |                          |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

\*\* Data ontleent aan bench-mark 2002

## BIJLAGE 6

# RESULTATEN 48 RWZI'S, GERANGSCHIKT OP CAPACITEIT

| RWZI            | KNMI       | a           | b        | r2     | T(zomer)* | Ontwerp-<br>capaciteit | Hoeveelheid<br>afvalwater | Periode                       | Meetperiode |
|-----------------|------------|-------------|----------|--------|-----------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|
| Nieuw Vossemeer | Rotterdam  | 0,85665     | 5,09535  | 0,9536 | 22,2      | 3.180                  | 343,2                     | december 1995 - december 2005 | 121         |
| Alphen          | Eindhoven  | 0,87258     | 5,09235  | 0,9727 | 22,5      | 5.290                  | 108,7                     | juli 1995 - december 2005     | 126         |
| Riel            | Eindhoven  | 0,93788     | 4,30678  | 0,9727 | 23,1      | 5.290                  | 179,3                     | augustus 1995 - december 2005 | 125         |
| Willemstad      | Rotterdam  | 0,89866     | 4,48508  | 0,9586 | 22,5      | 6.090                  | 230,5                     | december 1995 - december 2005 | 121         |
| Lage Zwaluwe    | Rotterdam  | 0,85118     | 5,63168  | 0,9579 | 22,7      | 7.940                  | 282,8                     | januari 1995 - december 2005  | 132         |
| Putte           | Vilssingen | 0,76444     | 5,74528  | 0,9646 | 21,0      | 8.210                  | 229,0                     | februari 1997 - december 2005 | 107         |
| Chaa            | Eindhoven  | 0,85601     | 5,28423  | 0,9603 | 22,4      | 8.450                  | 197,7                     | juli 1995 - december 2005     | 126         |
| Dinteloord      | Rotterdam  | 0,86371     | 5,14942  | 0,9553 | 22,4      | 8.450                  | 298,0                     | december 1995 - december 2005 | 121         |
| Ossendrecht     | Vilssingen | 0,74483     | 6,48439  | 0,9557 | 21,4      | 13.000                 | 199,3                     | februari 1997 - december 2005 | 107         |
| Wieringen       | Den Helder | 0,78313     | 6,23012  | 0,9518 | 21,9      | 13.300                 | 182,4                     | januari 1995 - december 2003  | 108         |
| Halsteren       | Rotterdam  | 0,67709     | 7,36303  | 0,9148 | 20,9      | 14.000                 | 220,3                     | januari 1997 - december 2005  | 108         |
| Wieringermeer   | Den Helder | 0,69612     | 7,38243  | 0,9316 | 21,3      | 18.100                 | 153,3                     | januari 1995 - december 2003  | 108         |
| Baarle Nassau   | Eindhoven  | 0,76749     | 6,99665  | 0,9415 | 22,3      | 18.500                 | 183,9                     | juni 1995 - december 2005     | 127         |
| Waspik          | Rotterdam  | 0,93116     | 4,31479  | 0,9646 | 22,9      | 19.120                 | 199,9                     | januari 1996 - december 2005  | 120         |
| Bennekom        | De Bilt    | 0,88649     | 3,17058  | 0,9293 | 20,9      | 22.000                 | 213,5                     | januari 1996 - november 2005  | 118         |
| Geldermalsen    | De Bilt    | 0,69207     | 6,97342  | 0,8890 | 20,8      | 33.100                 | 328,4                     | januari 1996 - februari 2005  | 108         |
| Brummen         | Twente     | 0,68410     | 7,63746  | 0,9068 | 21,3      | 45.000                 | 144,9                     | januari 1996 - oktober 2001   | 70          |
| Epe             | Twente     | 0,59372     | 7,54908  | 0,9123 | 19,4      | 55.000                 | 189,9                     | januari 1996 - december 2005  | 122         |
| Nijkerk         | De Bilt    | 0,67109     | 8,75217  | 0,8269 | 22,2      | 59.000                 | 172,9                     | november 1999 - november 2005 | 73          |
| Woudenberg      | De Bilt    | 0,73982     | 6,93938  | 0,9240 | 21,7      | 60.000                 | 265,2                     | november 1999 - december 2005 | 74          |
| Kaatsheuvel     | Eindhoven  | 0,71410     | 7,15804  | 0,9054 | 21,4      | 63.200                 | 187,4                     | juli 1995 - december 2005     | 126         |
| Stolpen         | Den Helder | 0,78679     | 5,25548  | 0,9397 | 21,0      | 63.500                 | 186,9                     | januari 1995 - april 2000     | 64          |
| Rijen           | Eindhoven  | 0,66726     | 7,84257  | 0,9127 | 21,2      | 82.000                 | 175,6                     | januari 1995 - december 2005  | 132         |
| Waalwijk        | Eindhoven  | 0,64342     | 9,37314  | 0,8706 | 22,2      | 86.000                 | 205,6                     | januari 1995 - december 2005  | 129         |
| Heerlen         | Maastricht | 0,68354     | 6,82151  | 0,7892 | 20,5      | 87.300                 | 220,6                     | januari 1997 - december 2003  | 79          |
| Hattum          | Twente     | 0,70316     | 8,39966  | 0,9419 | 22,5      | 90.000                 | 221,4                     | januari 1996 - december 2005  | 120         |
| De Bilt         | De Bilt    | 0,64086     | 7,43803  | 0,9180 | 20,3      | 90.662                 | 220,7                     | januari 1999 - december 2003  | 60          |
| Sint Oedenrode  | Eindhoven  | 0,71220     | 7,96550  | 0,8855 | 22,2      | 99.000                 | 257,3                     | januari 2000 - december 2005  | 72          |
| Eelde           | Eelde      | 0,68206     | 7,98581  | 0,8103 | 21,6      | 105.882                | 243,8                     | juni 2001 - juli 2004         | 37          |
| Terwolde        | Twente     | 0,62760     | 9,44544  | 0,8495 | 22,0      | 115.000                | 198,6                     | januari 1996 - december 2005  | 120         |
| Terneuzen       | Vilssingen | 0,61190     | 7,41205  | 0,7999 | 19,7      | 120.000                | 139,0                     | januari 1995 - december 1997  | 32          |
| Den Helder      | Den Helder | 0,70088     | 8,19338  | 0,8826 | 22,2      | 129.000                | 224,9                     | januari 1995 - maart 2003     | 99          |
| Echten          | Eelde      | 0,71655     | 7,63223  | 0,9286 | 22,0      | 132.350                | 193,8                     | januari 2000 - juni 2004      | 54          |
| Walcheren       | Vilssingen | 0,64399     | 7,30166  | 0,8993 | 20,2      | 140.000                | 224,5                     | januari 1999 - december 2003  | 59          |
| Dongemond       | Rotterdam  | 0,61584     | 8,63468  | 0,8542 | 21,0      | 142.900                | 230,9                     | januari 1995 - december 2005  | 132         |
| Elburg          | De Bilt    | 0,61597     | 10,21379 | 0,9146 | 22,5      | 160.000                | 216,0                     | januari 1996 - december 2005  | 120         |
| Renkum          | De Bilt    | 0,68951     | 7,88464  | 0,9310 | 21,7      | 160.000                | 187,8                     | november 1999 - november 2005 | 71          |
| Veenendaal      | De Bilt    | 0,69070     | 8,13512  | 0,9464 | 21,9      | 166.000                | 221,6                     | november 1999 - november 2005 | 71          |
| Harderwijk      | De Bilt    | 0,60142     | 9,28048  | 0,8979 | 21,3      | 260.000                | 194,8                     | januari 1996 - maart 2003     | 87          |
| Almere          | Schiphol   | 0,59862     | 11,14111 | 0,8968 | 23,1      | 272.183                | 116,8                     | januari 1995 - maart 2004     | 109         |
| Amersfoort      | De Bilt    | 0,59681     | 8,70564  | 0,8781 | 20,6      | 294.000                | 179,4                     | november 1999 - februari 2004 | 52          |
| Ede             | De Bilt    | 0,68029     | 7,69635  | 0,9401 | 21,3      | 300.000                | 180,4                     | november 1999 - oktober 2001  | 24          |
| Hoensbroek      | Maastricht | 0,62810     | 7,69426  | 0,7831 | 20,3      | 318.900                | 334,1                     | januari 1996 - december 2003  | 75          |
| Apeldoorn       | De Bilt    | 0,52305     | 9,59146  | 0,9311 | 20,1      | 340.000                | 231,1                     | januari 1996 - februari 2003  | 86          |
| Nieuwveer       | Rotterdam  | 0,69129     | 8,69506  | 0,9180 | 22,5      | 485.000                | 214,8                     | januari 1996 - december 2005  | 118         |
| Utrecht         | De Bilt    | 0,67020     | 8,73456  | 0,9599 | 22,1      | 529.412                | 161,8                     | januari 2002 - december 2003  | 24          |
| Bath            | Vilssingen | 0,62686     | 10,01512 | 0,8383 | 22,6      | 536.000                | 243,6                     | januari 1995 - december 2005  | 118         |
| Eindhoven       | Eindhoven  | 0,54008     | 9,52113  | 0,8168 | 20,3      | 750.000                | 225,0                     | januari 1996 - december 2005  | 120         |
| [ - ]           | [ - ]      | [ °C / °C ] | [ °C ]   | [ - ]  | [ °C ]    | [ i.e. -136 ]          | [ l / (i.e. x etmaal) ]   | [ - ]                         | [ maanden ] |
| Aantal          |            | 47          |          |        |           |                        |                           |                               |             |
| Laagste         |            | 0,52305     | 3,17058  | 0,7831 | 19,4      |                        |                           |                               |             |
| Een na laagste  |            | 0,54008     | 4,30678  | 0,7892 | 19,7      |                        |                           |                               |             |
| Gemiddelde      |            |             |          |        |           |                        |                           |                               |             |
| Een na hoogste  |            | 0,93116     | 10,21379 | 0,9727 | 23,1      |                        |                           |                               |             |
| Hoogste         |            | 0,93788     | 11,14111 | 0,9727 | 23,1      |                        |                           |                               |             |

\*T(zomer) = T(rwzi) bij T(knmi) = 20°C

## BIJLAGE 7

# SNELHEIDSBEPALENDE WEERSTAND TEGEN AFKOELING VAN WATER IN RIOOLSTELSELS

## SNELHEIDSBEPALENDE WEERSTAND TEGEN AFKOELING VAN WATER IN EEN RIOOLSTELSEL

Bij het transport van warmte vanuit het rioolwater, via de wand van de rioolbuizen en de bodem naar de atmosfeer, kunnen een viertal in serie geschakelde weerstanden worden onderscheiden. De totale weerstand is gelijk aan de som van deze deelweerstanden. Navolgend wordt elk van deze deelweerstanden globaal gekwantificeerd.

- Warmtetransport vanuit de bulk van het rioolwater naar de binnenzijde van de rioolbuis*  
 Voor water in een buis bedraagt de warmte-overdrachtscoëfficiënt  $\alpha$  minimaal  $350 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$  (ref. 4).  
 De specifieke warmteweerstand  $1/\alpha$  bedraagt derhalve maximaal  $2,9 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \times \text{K})/\text{W}$ .
- Warmtetransport door de wand van de rioolbuis*  
 Representatief is een rioolbuis bestaande uit verdicht ongewapend beton met een inwendige diameter van 300 mm en een wanddikte van 50 mm =  $0,50 \times 10^{-3} \text{ m}$ .  
 Verdicht ongewapend beton heeft een warmte-geleidingscoëfficiënt  $\lambda$  van  $1,75 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$  (ref. 5). De specifieke weerstand is gelijk aan de wanddikte gedeeld door  $\lambda$  ofwel  $50 \times 10^{-3} / 1,75 = 29 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \times \text{K})/\text{W}$ .
- Warmtetransport door de bodem*  
 Voor de eerder genoemde rioolbuis met een inwendige diameter van 300 mm geldt een minimale gronddekking van 0,70 m. De warmte-geleidingscoëfficiënt van de bodem tussen de rioolbuis en het maaiveld bedraagt maximaal  $1,4 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ .  
 De specifieke warmteweerstand bedraagt op basis van deze cijfers minimaal  $0,7/1,4 = 0,5 = 500 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \times \text{K})/\text{W}$ .
- Warmtetransport vanaf het maaiveld naar de lucht*  
 De warmte-overdrachtscoëfficiënt  $\alpha$  hangt hier samen met de lokale windsnelheid  $v$ .  
 Bij  $v \leq 5 \text{ m/s}$  geldt:  $\alpha = 5,6 + 4,0 v$  (ref. 5).  
 Binnen stedelijke gebieden is de lokale windsnelheid steeds lager dan de windsnelheid die wordt gemeten door een meetstation van het KNMI. Bij het meetstation in De Bilt bedraagt de jaargemiddelde windsnelheid 3,5 m/s (gemiddeld voor 1996 t/m 2005).  
 Bij deze windsnelheid geldt op basis van het voorgaande:  $\alpha = 5,6 + (4,0 \times 3,5) = 19,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ .  
 De specifieke weerstand  $1/\alpha$  bedraagt in dat geval  $51 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \times \text{K})/\text{W}$ .

Bij het optellen van de voorgaande vier warmteweerstanden komt men tot het volgende totaal:

- Weerstand 1 (rioolwater)  $\leq 3 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$
- Weerstand 2 (rioolbuis)  $29 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$
- Weerstand 3 (bodem)  $\geq 500 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$
- Weerstand 4 (lucht)  $\underline{51 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}}$
- Totale warmteweerstand  $\geq 580 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$

Uit het overzicht blijkt dat de warmteweerstand in de bodem sterk domineert in het totaal van de warmteweerstanden. Alleen bij windstil weer kan weerstand 4 oplopen tot  $1.000/5,6 \times 10^{-3} = 180 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$  en daarmee tot maximaal 35 % van de warmte-weerstand in de bodem.

Op basis van het voorgaande is het verantwoord om uitsluitend te rekenen met de weerstand in de bodem met daarbij een correctie ter compensatie voor de overige weerstanden.

Deze correctie op de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt voor het materiaal tussen de rioolbuis en het bovengelegen maaiveld bedraagt gemiddeld rond 15 %.

De correctiefactor voor  $\lambda$  bedraagt dan 0,85.

## BIJLAGE 8

# WARMTE-GELEIDINGSCOËFFICIËNTEN VAN BODEMMATERIALEN

## WARMTE-GELEIDINGSCOËFFICIËNTEN VAN BODEMMATERIALEN

Het transport van warmte door bodemmateriaal vindt plaats door:

- Warmtegeleiding door de vaste stof
- Warmtegeleiding door water in de poriën
- Warmtegeleiding door lucht in de poriën
- Diffusie van waterdamp in de poriën

De som van al deze invloeden wordt samengevat in een schijnbare of effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  (zie ref. 6).

De invloed van de genoemde processen kan toegelicht worden via gegevens over bijvoorbeeld zand (zie ref. 6). Voor absoluut droog kwartszand, met een bulkdichtheid van  $1.500 \text{ kg/m}^3$  geldt  $\lambda = 0,30 \text{ W/(m x K)}$ . Voor volledig met water verzadigd kwartszand, met een bulkdichtheid van  $1.900$ , geldt  $3,0 \text{ W/(m x K)}$ . De toename van  $\lambda$  met een factor 10 wordt veroorzaakt door het water in de poriën (circa 30 vol. % vocht) en door een verlaging van de porositeit (van rond 40 vol % tot circa 30 vol. %).

Gemeentelijke rioolstelsels zijn vaak gesitueerd in een zandpakket.

Afhankelijk van de verdichting van dit zandpakket, na de aanleg van het rioolstelsel, zal het zand boven het rioolstelsel een bepaalde dichtheid hebben.

Onberoerd zand in de natuurlijke omgeving heeft een dichtheid van  $1.600$  tot  $1.800 \text{ kg/m}^3$  en een gemiddeld vochtgehalte van circa 10 vol. %. Bij een jaargemiddelde bodemtemperatuur van  $10^\circ\text{C}$  geldt voor dit zand  $\lambda = 0,77 \text{ W/(m x K)}$ . ( $\lambda = 0,70 \text{ W/(m x K)}$  bij  $0^\circ\text{C}$  en  $\lambda = 0,85 \text{ W/(m x K)}$  bij  $20^\circ\text{C}$ , zie ref. 6).

Op basis van de voorgaande gegevens moet verwacht worden dat voor rioolbuizen, die (gedeeltelijk) in het grondwater liggen, een grotere waarde voor  $\lambda$  geldt. Hierbij blijft echter gelden dat de grootste hoeveelheid zand, die relevant is voor het warmtetransport naar het maaiveld, wel boven het grondwater is gesitueerd.

In bepaalde gevallen kan er sprake zijn van een lagere effectieve  $\lambda$  voor de bodem, bijvoorbeeld als de rioolbuis onder een asfaltweg ligt (voor asfalt geldt  $\lambda = 0,7 \text{ W/(m x K)}$ ).

Anderzijds kan er sprake zijn van een hogere effectieve  $\lambda$ , bijvoorbeeld 's winters bij ijsvorming in de bodem (voor ijs geldt  $\lambda = 2,2 \text{ W/(m x K)}$ ). Sneeuw op het maaiveld heeft daarentegen een isolerende werking (voor verse sneeuw geldt  $\lambda = 0,11 \text{ W/(m x K)}$ ).

De genoemde  $\lambda$ -waarden zijn ontleend aan ref. 6.

Op basis van de voorgaande informatie en gegevens zal het duidelijk zijn dat de effectieve  $\lambda$  sterk afhankelijk is van de opbouw van de bodem boven het rioolstelsel, eventuele kunstmatige lagen (asfaltweg) en winteromstandigheden (ijs in de bodem en/of sneeuw op de bodem). Vooralsnog lijkt de waarde  $\lambda = 0,7 \text{ W/(m} \times \text{K)}$  realistisch voor een grootstedelijk rioolstelsel dat boven het grondwater is gesitueerd en waarbij veel rioolbuizen zijn gelegen onder asfaltenlagen.

## BIJLAGE 9

# AANVULLENDE INFORMATIE OVER VIER ENERGIEPROCESSEN BIJ EEN RWZI

## AANVULLENDE INFORMATIE OVER VIER ENERGIEPROCESSEN BIJ EEN RWZI

Navolgend wordt informatie gegeven over de energieprocessen 4 t/m 7 als genoemd in tabel 5.5. In deze bijlage is er voor gekozen de symbolen te gebruiken die ook zijn gebruikt in het gebruikte artikel uit de vakliteratuur (ref. 3).

### 4. TEMPERATUURVERANDERING EN VERZADIGING VAN AANGEZOGEN LUCHT

De totale hoeveelheid energie die gemoeid is met de temperatuurverandering van de aangezogen lucht en met de verzadiging van de aangezogen lucht kan als volgt worden gekwantificeerd:

$$\Phi_a = \Phi_{as} + \Phi_{al}$$

$\Phi_a$  = totaal energetisch effect van aangezogen lucht (air)

$\Phi_{as}$  = energetisch effect van temperatuurverandering lucht

$\Phi_{al}$  = energetisch effect van verzadiging lucht

$$\Phi_{as} = \rho_a \times C_{p,a} \times Q_A \times (T - T_a)$$

$\Phi_{as}$  = energetisch effect van temperatuurverandering lucht

$\rho_a$  = dichtheid van lucht

$C_{p,a}$  = warmtecapaciteit van lucht bij constante druk

$Q_A$  = de hoeveelheid aangezogen lucht

$T$  = temperatuur van het actief slib

$T_a$  = temperatuur van de aangezogen lucht

$$\Phi_{al} = \frac{M_w \times Q_A \times \phi_1}{R} \times \left\{ \frac{e_w \times \left[ \frac{Rh}{100} + h_f \times \left( 1 - \frac{Rh}{100} \right) \right]}{(T + 273)} - \frac{e_a \times \frac{Rh}{100}}{(T_a + 273)} \right\}$$

$\Phi_{al}$  = energetisch effect van verzadiging lucht

$M_w$  = molecuulgewicht van water

$Q_A$  = de hoeveelheid aangezogen lucht

$\phi_1$  = verdampingswarmte van water

$R$  = universele gasconstante

$e_w$  = dampdruk van water bij temperatuur actief slib

$Rh$  = relatieve vochtigheid (in omgevingslucht)

$h_f$  = verzadigingsgraad uittredende lucht = 1 (100 %)

$T$  = temperatuur van het actief slib

$e_a$  = dampdruk van water bij temperatuur aangezogen lucht

$T_a$  = temperatuur van de aangezogen lucht



## 5. VERDAMPING VAN WATER

De verdamping van water vanaf het open oppervlak van de AT is een functie van de windsnelheid, het relatieve vochtgehalte in de omgevingslucht en het temperatuurverschil tussen het actief slib en de bovenstaande lucht. De hoeveelheid energie die gemoeid is met deze verdamping kan als volgt worden gekwantificeerd:

$$\Phi_{ev} = \left[ 1,145 \cdot 10^6 \times \left( 1 - \frac{Rh}{100} \right) + 6,86 \cdot 10^4 \times (T - T_a) \right] \times e^{0,0604 \times T_a} \times u_w \times A_s^{0,95}$$

|             |                                                    |
|-------------|----------------------------------------------------|
| $\Phi_{ev}$ | = energetisch effect van verdamping water          |
| $Rh$        | = relatieve vochtigheid in omgevingslucht          |
| $T$         | = temperatuur van het actief slib                  |
| $T_a$       | = temperatuur van de omgevingslucht                |
| $e$         | = basisconstante bij natuurlijke logaritme = 2,718 |
| $u_w$       | = windsnelheid                                     |
| $A_s$       | = open oppervlak van AT                            |

## 6. ATMOSFERISCHE STRALING

Deze netto lange golf straling wordt berekend als het verschil tussen instraling en terugstraling, gebaseerd op de wet van Stefan-Boltzman. Deze atmosferische straling kan als volgt worden gekwantificeerd:

$$\Phi_{ar} = [\epsilon_{ar} \times \sigma \times T^4 - (1 - \lambda_{ar}) \times \sigma \times T_a^4 \times \beta_{ar}] \times A_s$$

|                 |                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------------------|
| $\Phi_{ar}$     | = energetisch effect atmosferische straling (radiation) |
| $\epsilon_{ar}$ | = emissiviteit van het wateroppervlak = 0,97 (-)        |
| $\sigma$        | = constante van Stefan Boltzman                         |
| $T$             | = temperatuur van het actief slib                       |
| $\lambda_{ar}$  | = reflecteerbaarheid van het wateroppervlak = 0,03 (-)  |
| $\beta_{ar}$    | = atmosferische stralingsfactor = 0,95 (-)              |
| $A_s$           | = open oppervlak van de AT                              |

## 7. GELEIDING EN CONVECTIE VANAF HET WATEROPPERVLAK

Deze geleiding en convectie is een functie van de windsnelheid, het relatieve vochtgehalte in de omgevingslucht en het temperatuurverschil tussen het actief slib en de bovenstaande lucht. De hoeveelheid energie die gemoeid is met deze geleiding en convectie kan als volgt worden gekwantificeerd:

$$\Phi_c = \rho_a \times C_{p,a} \times h_v \times A_s \times (T - T_a).$$

|           |                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------|
| $\Phi_c$  | = energetisch effect geleiding (conductivity) en convectie |
| $\rho_a$  | = dichtheid van de omgevingslucht                          |
| $C_{p,a}$ | = warmtecapaciteit van lucht bij constante druk            |
| $h_v$     | = convectieve (damp) overdrachtscoëfficiënt                |
| $A_s$     | = open oppervlak van AT                                    |
| $T$       | = temperatuur van het actief slib                          |
| $T_a$     | = temperatuur van de omgevingslucht                        |

De genoemde overdrachtscoëfficiënt kan als volgt worden gekwantificeerd.

$$h_v = 392 \times A_s^{-0,05} \times u_w$$

$h_v$  : = convectieve (damp) overdrachtcoëfficiënt

$A_s$  : = open oppervlak van AT

$u_w$  : = windsnelheid

BIJLAGE 10

# DETAILRESULTATEN VAN MODELBEREKENINGEN

|         |                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------|
| Blad 0: | Referentiesituatie (constante lozingstemperatuur)                  |
| Blad 1: | Bodem met grotere geleiding van warmte                             |
| Blad 2: | Meer uitgestrekt rioolstelsel                                      |
| Blad 3: | Gescheiden rioolstelsel en geen rioolvreemd water                  |
| Blad 4: | Diepere tanks voor actief slib                                     |
| Blad 5: | Afgedekte tanks voor actief slib                                   |
| Blad 6: | Gereduceerde invloed van wind                                      |
| Blad 7: | Lozingstemperatuur licht afhankelijk van temperatuur buitenlucht   |
| Blad 8: | Lozingstemperatuur sterker afhankelijk van temperatuur buitenlucht |

## Bijlage 10, blad 0

### Detailresultaten van modelberekeningen

Variant 0

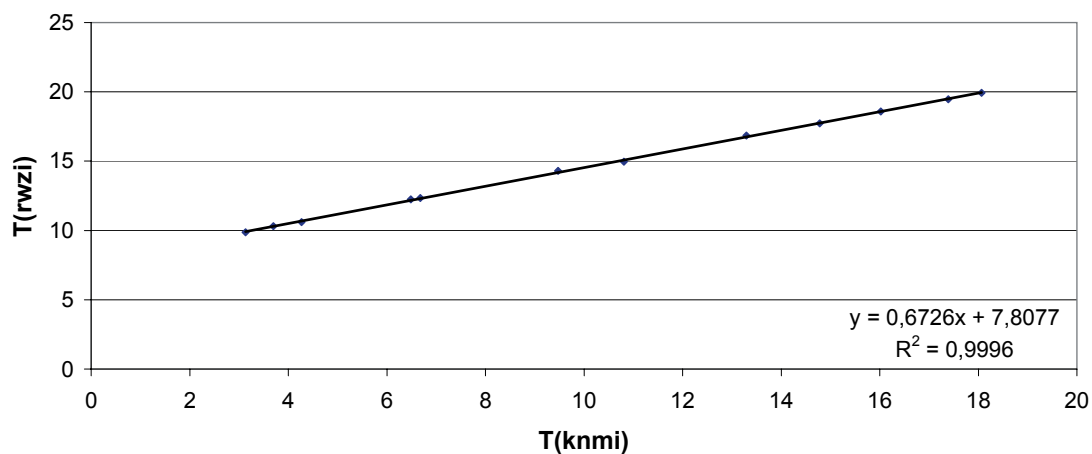
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: geen

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 20,0        | 6,1             | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 11,3          | 11,0          | 9,9       |
| Februari         | 4,3       | 20,0        | 7,3             | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 11,9          | 11,7          | 10,6      |
| Maart            | 6,5       | 20,0        | 9,5             | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 13,2          | 13,0          | 12,2      |
| April            | 9,5       | 20,0        | 12,5            | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 14,9          | 14,8          | 14,3      |
| Mei              | 13,3      | 20,0        | 16,3            | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 17,1          | 17,0          | 16,8      |
| Juni             | 16,0      | 20,0        | 19,0            | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,7          | 18,6          | 18,6      |
| Juli             | 17,4      | 20,0        | 20,4            | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,5          | 19,4          | 19,5      |
| Augustus         | 18,1      | 20,0        | 21,1            | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 19,9          | 19,8          | 19,9      |
| September        | 14,8      | 20,0        | 17,8            | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 18,0          | 17,9          | 17,7      |
| Oktober          | 10,8      | 20,0        | 13,8            | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 15,7          | 15,6          | 15,0      |
| November         | 6,7       | 20,0        | 9,7             | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 13,3          | 13,1          | 12,3      |
| December         | 3,7       | 20,0        | 6,7             | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 11,6          | 11,4          | 10,3      |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 20,0        | 3,0             | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 9,5           | 9,2           | 7,9       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,0        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,4          | 15,3          | 14,8      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 20,0        | 23,0            | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,0          | 21,0          | 21,2      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 79              | 99       | -84             | -343            | -169          | -1511          | -26        | -1279        |
| Februari         | 686             | 80              | 168      | -83             | -383            | -164          | -1455          | -69        | -1221        |
| Maart            | 709             | 81              | 300      | -84             | -369            | -159          | -1146          | -171       | -840         |
| April            | 739             | 82              | 520      | -87             | -428            | -147          | -907           | -296       | -525         |
| Mei              | 777             | 83              | 685      | -88             | -435            | -130          | -636           | -450       | -193         |
| Juni             | 804             | 84              | 718      | -89             | -427            | -116          | -438           | -557       | -20          |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -88             | -366            | -108          | -338           | -610       | 62           |
| Augustus         | 825             | 85              | 631      | -88             | -321            | -105          | -268           | -638       | 122          |
| September        | 792             | 84              | 412      | -84             | -301            | -121          | -452           | -504       | -173         |
| Oktober          | 752             | 82              | 221      | -81             | -346            | -137          | -812           | -334       | -654         |
| November         | 711             | 81              | 110      | -81             | -292            | -157          | -1060          | -176       | -865         |
| December         | 681             | 79              | 72       | -83             | -316            | -168          | -1385          | -52        | -1173        |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 78              | 95       | -89             | -322            | -183          | -1704          | 91         | -1391        |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 82              | 362      | -83             | -368            | -141          | -828           | -324       | -554         |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 86              | 675      | -88             | -314            | -94           | -168           | -712       | 229          |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 1

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 1

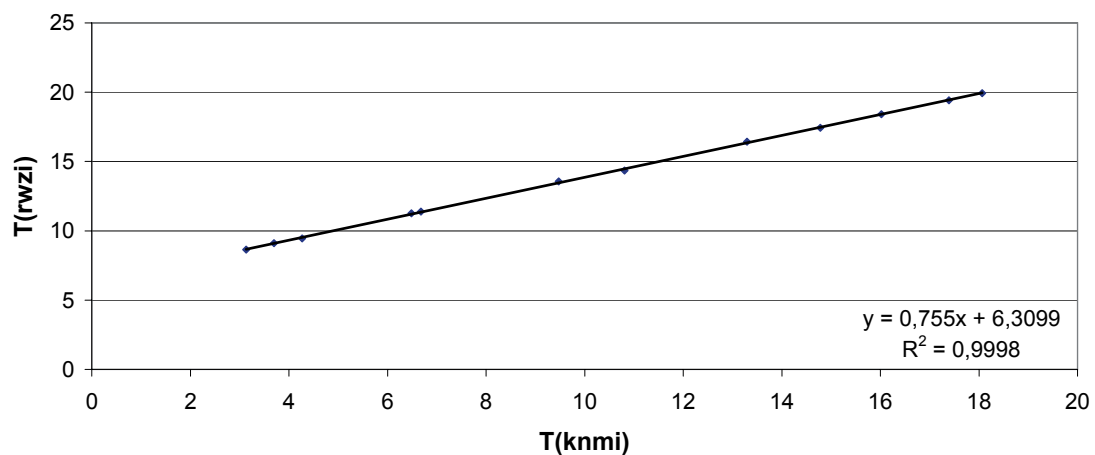
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1:  $\lambda$  van 0,7 naar 1,4  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 20,0        | 6,1             | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 9,8           | 9,4           | 8,6       |
| Februari         | 4,3       | 20,0        | 7,3             | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 10,6          | 10,2          | 9,5       |
| Maart            | 6,5       | 20,0        | 9,5             | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 12,1          | 11,7          | 11,3      |
| April            | 9,5       | 20,0        | 12,5            | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 14,1          | 13,8          | 13,6      |
| Mei              | 13,3      | 20,0        | 16,3            | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 16,7          | 16,5          | 16,4      |
| Juni             | 16,0      | 20,0        | 19,0            | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,5          | 18,4          | 18,4      |
| Juli             | 17,4      | 20,0        | 20,4            | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,5          | 19,3          | 19,4      |
| Augustus         | 18,1      | 20,0        | 21,1            | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 19,9          | 19,8          | 19,9      |
| September        | 14,8      | 20,0        | 17,8            | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 17,7          | 17,5          | 17,4      |
| Oktober          | 10,8      | 20,0        | 13,8            | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 15,0          | 14,8          | 14,3      |
| November         | 6,7       | 20,0        | 9,7             | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 12,2          | 11,9          | 11,4      |
| December         | 3,7       | 20,0        | 6,7             | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 10,2          | 9,8           | 9,1       |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 20,0        | 3,0             | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 7,7           | 7,2           | 6,4       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,0        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 14,7          | 14,4          | 14,1      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 20,0        | 23,0            | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,2          | 21,2          | 21,3      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 78              | 99       | -73             | -295            | -148          | -1235          | 58         | -840         |
| Februari         | 686             | 79              | 168      | -73             | -335            | -145          | -1195          | 8          | -806         |
| Maart            | 709             | 80              | 300      | -76             | -328            | -141          | -953           | -105       | -515         |
| April            | 739             | 81              | 520      | -81             | -394            | -134          | -771           | -246       | -286         |
| Mei              | 777             | 83              | 685      | -85             | -411            | -122          | -563           | -423       | -59          |
| Juni             | 804             | 84              | 718      | -88             | -416            | -112          | -408           | -545       | 38           |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -87             | -362            | -107          | -328           | -606       | 82           |
| Augustus         | 825             | 85              | 631      | -88             | -321            | -105          | -267           | -637       | 123          |
| September        | 792             | 84              | 412      | -81             | -286            | -116          | -408           | -484       | -87          |
| Oktober          | 752             | 82              | 221      | -76             | -313            | -126          | -693           | -293       | -446         |
| November         | 711             | 80              | 110      | -73             | -253            | -140          | -880           | -111       | -556         |
| December         | 681             | 79              | 72       | -73             | -271            | -147          | -1134          | 30         | -764         |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 77              | 95       | -74             | -276            | -158          | -1380          | 194        | -879         |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 82              | 362      | -78             | -336            | -130          | -706           | -280       | -339         |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 86              | 675      | -90             | -325            | -97           | -192           | -723       | 179          |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 2

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 2

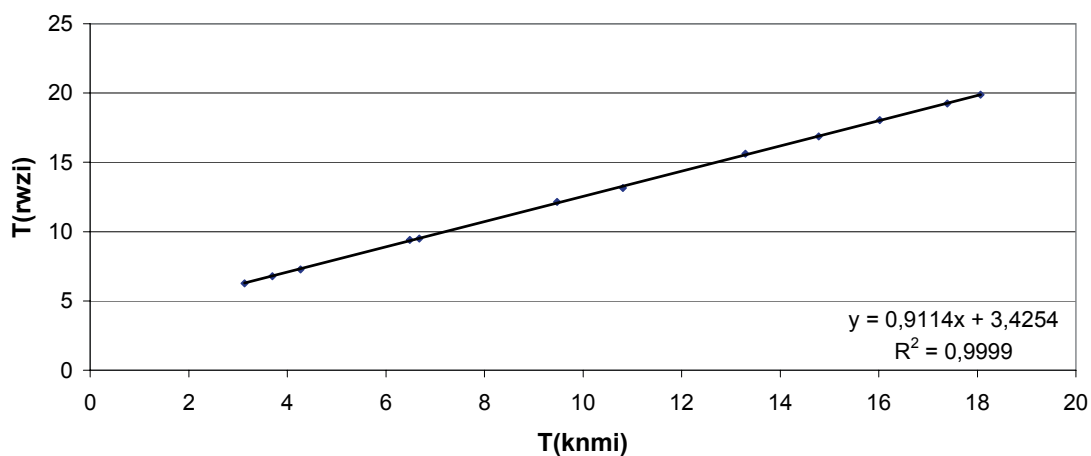
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: L van 3,6 naar 18 meter per aangesloten bewoner

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvreemd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 20,0        | 6,1              | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 6,8           | 6,3           | 6,3       |
| Februari         | 4,3       | 20,0        | 7,3              | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 7,8           | 7,3           | 7,3       |
| Maart            | 6,5       | 20,0        | 9,5              | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 9,7           | 9,3           | 9,4       |
| April            | 9,5       | 20,0        | 12,5             | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 12,4          | 12,0          | 12,2      |
| Mei              | 13,3      | 20,0        | 16,3             | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 15,8          | 15,4          | 15,6      |
| Juni             | 16,0      | 20,0        | 19,0             | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,2          | 17,9          | 18,0      |
| Juli             | 17,4      | 20,0        | 20,4             | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,4          | 19,1          | 19,3      |
| Augustus         | 18,1      | 20,0        | 21,1             | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 20,0          | 19,7          | 19,9      |
| September        | 14,8      | 20,0        | 17,8             | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 17,1          | 16,8          | 16,9      |
| Oktober          | 10,8      | 20,0        | 13,8             | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 13,6          | 13,2          | 13,2      |
| November         | 6,7       | 20,0        | 9,7              | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 9,9           | 9,5           | 9,5       |
| December         | 3,7       | 20,0        | 6,7              | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 7,3           | 6,8           | 6,8       |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 20,0        | 3,0              | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 4,0           | 3,4           | 3,5       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,0        | 13,3             | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 13,2          | 12,8          | 12,8      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 20,0        | 23,0             | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,7          | 21,5          | 21,6      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 77              | 99       | -50             | -202            | -108          | -702           | 221        | 9            |
| Februari         | 686             | 78              | 168      | -53             | -241            | -107          | -692           | 157        | -5           |
| Maart            | 709             | 79              | 300      | -60             | -248            | -108          | -579           | 24         | 117          |
| April            | 739             | 80              | 520      | -69             | -326            | -108          | -505           | -150       | 181          |
| Mei              | 777             | 83              | 685      | -78             | -365            | -107          | -418           | -368       | 208          |
| Juni             | 804             | 84              | 718      | -85             | -392            | -105          | -344           | -519       | 161          |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -86             | -352            | -104          | -302           | -595       | 133          |
| Augustus         | 825             | 85              | 631      | -87             | -318            | -104          | -260           | -634       | 138          |
| September        | 792             | 83              | 412      | -76             | -254            | -105          | -319           | -445       | 89           |
| Oktober          | 752             | 81              | 221      | -66             | -249            | -104          | -460           | -212       | -37          |
| November         | 711             | 79              | 110      | -57             | -177            | -107          | -529           | 17         | 46           |
| December         | 681             | 77              | 72       | -51             | -184            | -108          | -648           | 188        | 26           |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 75              | 95       | -43             | -186            | -110          | -758           | 392        | 108          |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 81              | 362      | -68             | -272            | -106          | -468           | -193       | 84           |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 86              | 675      | -92             | -343            | -102          | -230           | -741       | 98           |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 3

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 3

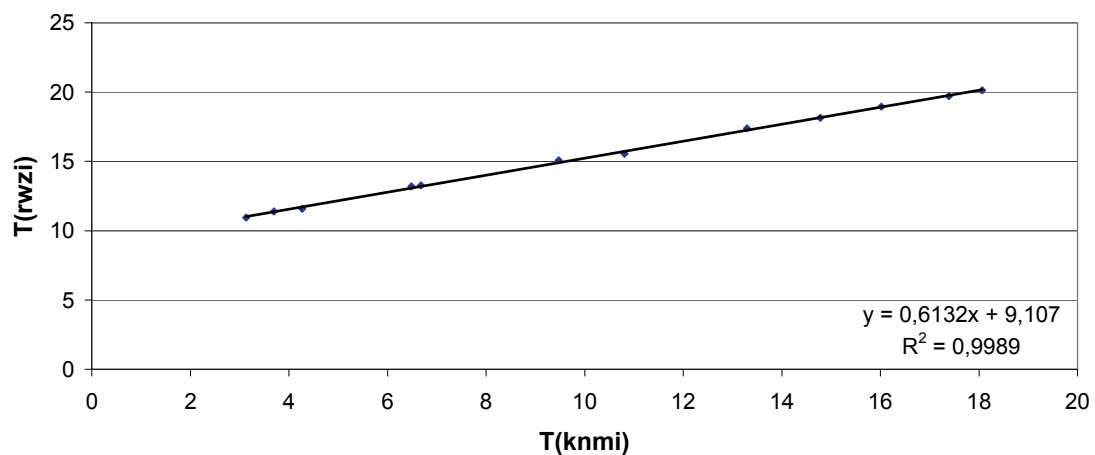
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1:  $Q_v = 0$  en  $Q_n = 0$

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 20,0        | 6,1             | 4,1           | 20,0         | 5,1           | 14,3          | 13,7          | 11,0      |
| Februari         | 4,3       | 20,0        | 7,3             | 5,3           | 20,0         | 6,3           | 14,7          | 14,2          | 11,6      |
| Maart            | 6,5       | 20,0        | 9,5             | 7,5           | 20,0         | 8,5           | 15,6          | 15,1          | 13,2      |
| April            | 9,5       | 20,0        | 12,5            | 10,5          | 20,0         | 11,5          | 16,7          | 16,3          | 15,1      |
| Mei              | 13,3      | 20,0        | 16,3            | 14,3          | 20,0         | 15,3          | 18,2          | 17,9          | 17,4      |
| Juni             | 16,0      | 20,0        | 19,0            | 17,0          | 20,0         | 18,0          | 19,2          | 19,1          | 18,9      |
| Juli             | 17,4      | 20,0        | 20,4            | 18,4          | 20,0         | 19,4          | 19,8          | 19,6          | 19,7      |
| Augustus         | 18,1      | 20,0        | 21,1            | 19,1          | 20,0         | 20,1          | 20,0          | 19,9          | 20,1      |
| September        | 14,8      | 20,0        | 17,8            | 15,8          | 20,0         | 16,8          | 18,8          | 18,6          | 18,1      |
| Oktober          | 10,8      | 20,0        | 13,8            | 11,8          | 20,0         | 12,8          | 17,2          | 16,9          | 15,5      |
| November         | 6,7       | 20,0        | 9,7             | 7,7           | 20,0         | 8,7           | 15,6          | 15,2          | 13,3      |
| December         | 3,7       | 20,0        | 6,7             | 4,7           | 20,0         | 5,7           | 14,5          | 13,9          | 11,4      |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 20,0        | 3,0             | 1,0           | 20,0         | 2,0           | 13,1          | 12,4          | 9,3       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,0        | 13,3            | 11,3          | 20,0         | 12,3          | 17,0          | 16,7          | 15,5      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 20,0        | 23,0            | 21,0          | 20,0         | 22,0          | 20,8          | 20,7          | 21,2      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 80              | 99       | -93             | -385            | -188          | -1753          | -89        | -1653        |
| Februari         | 686             | 80              | 168      | -91             | -425            | -182          | -1680          | -121       | -1565        |
| Maart            | 709             | 81              | 300      | -92             | -410            | -176          | -1338          | -211       | -1137        |
| April            | 739             | 82              | 520      | -93             | -467            | -162          | -1058          | -313       | -753         |
| Mei              | 777             | 84              | 685      | -92             | -467            | -140          | -735           | -437       | -326         |
| Juni             | 804             | 85              | 718      | -92             | -450            | -122          | -497           | -520       | -74          |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -90             | -383            | -113          | -378           | -561       | 48           |
| Augustus         | 825             | 85              | 631      | -90             | -334            | -109          | -298           | -583       | 127          |
| September        | 792             | 84              | 412      | -87             | -324            | -129          | -516           | -477       | -244         |
| Oktober          | 752             | 82              | 221      | -85             | -378            | -148          | -927           | -335       | -817         |
| November         | 711             | 81              | 110      | -89             | -330            | -174          | -1237          | -215       | -1143        |
| December         | 681             | 80              | 72       | -92             | -358            | -187          | -1613          | -113       | -1530        |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 79              | 95       | -101            | -365            | -207          | -1999          | -2         | -1857        |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 82              | 362      | -89             | -403            | -154          | -958           | -332       | -745         |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 86              | 675      | -89             | -317            | -95           | -175           | -641       | 289          |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 4

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 4

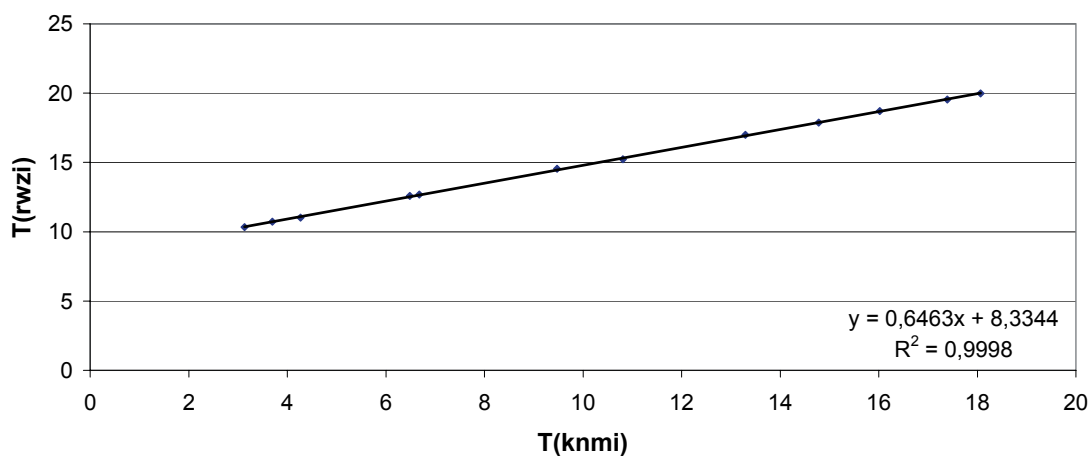
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: Diepere tanks voor actief slib

| Maand     | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|-----------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari   | 3,1       | 20,0        | 6,1             | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 11,3          | 11,0          | 10,3      |
| Februari  | 4,3       | 20,0        | 7,3             | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 11,9          | 11,7          | 11,0      |
| Maart     | 6,5       | 20,0        | 9,5             | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 13,2          | 13,0          | 12,6      |
| April     | 9,5       | 20,0        | 12,5            | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 14,9          | 14,8          | 14,5      |
| Mei       | 13,3      | 20,0        | 16,3            | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 17,1          | 17,0          | 17,0      |
| Juni      | 16,0      | 20,0        | 19,0            | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,7          | 18,6          | 18,7      |
| Juli      | 17,4      | 20,0        | 20,4            | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,5          | 19,4          | 19,6      |
| Augustus  | 18,1      | 20,0        | 21,1            | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 19,9          | 19,8          | 20,0      |
| September | 14,8      | 20,0        | 17,8            | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 18,0          | 17,9          | 17,9      |
| Oktober   | 10,8      | 20,0        | 13,8            | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 15,7          | 15,6          | 15,2      |
| November  | 6,7       | 20,0        | 9,7             | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 13,3          | 13,1          | 12,7      |
| December  | 3,7       | 20,0        | 6,7             | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 11,6          | 11,4          | 10,7      |
| 0°C KNMI  | 0,0       | 20,0        | 3,0             | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 9,5           | 9,2           | 8,4       |
| Gemiddeld | 10,3      | 20,0        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,4          | 15,3          | 15,0      |
| 20°C KNMI | 20,0      | 20,0        | 23,0            | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,0          | 21,0          | 21,2      |

| Maand     | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|-----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari   | 675             | 79              | 66       | -88             | -245            | -118          | -1097          | -58        | -786         |
| Februari  | 686             | 80              | 112      | -87             | -273            | -115          | -1057          | -95        | -749         |
| Maart     | 709             | 81              | 200      | -87             | -261            | -110          | -826           | -179       | -473         |
| April     | 739             | 82              | 346      | -89             | -299            | -101          | -649           | -284       | -255         |
| Mei       | 777             | 83              | 457      | -89             | -302            | -88           | -451           | -415       | -28          |
| Juni      | 804             | 84              | 479      | -90             | -295            | -78           | -309           | -505       | 89           |
| Juli      | 818             | 85              | 446      | -88             | -253            | -73           | -238           | -551       | 146          |
| Augustus  | 825             | 85              | 421      | -88             | -221            | -71           | -188           | -574       | 188          |
| September | 792             | 84              | 275      | -85             | -210            | -82           | -323           | -461       | -11          |
| Oktober   | 752             | 82              | 147      | -83             | -246            | -95           | -589           | -320       | -351         |
| November  | 711             | 81              | 74       | -84             | -208            | -109          | -766           | -185       | -487         |
| December  | 681             | 80              | 48       | -87             | -226            | -117          | -1003          | -80        | -706         |
| 0°C KNMI  | 644             | 78              | 63       | -94             | -230            | -128          | -1231          | 42         | -855         |
| Gemiddeld | 747             | 82              | 241      | -85             | -259            | -97           | -596           | -309       | -277         |
| 20°C KNMI | 844             | 86              | 450      | -89             | -215            | -63           | -117           | -638       | 259          |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)





## Bijlage 10, blad 5

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 5

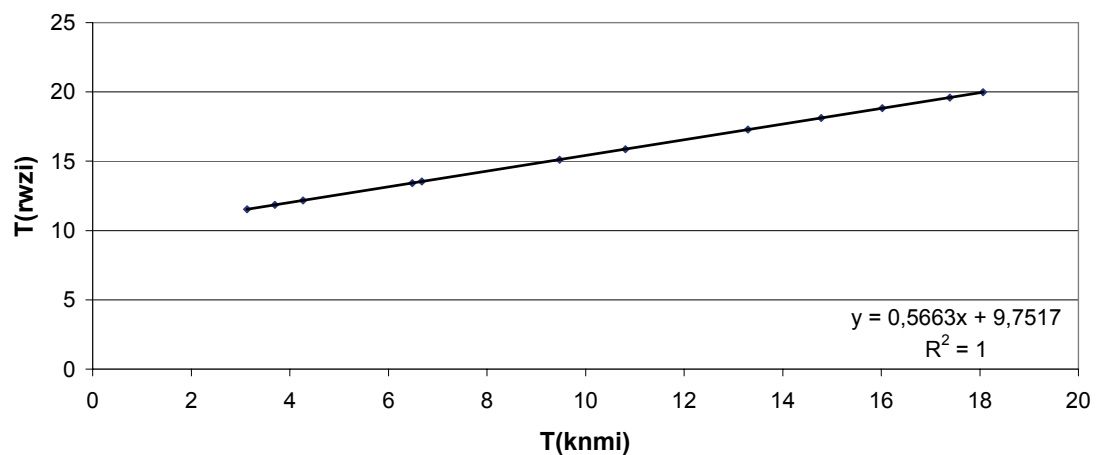
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: Afgedekte tanks voor actief slib

| Maand     | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|-----------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari   | 3,1       | 20,0        | 6,1             | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 11,3          | 11,0          | 11,5      |
| Februari  | 4,3       | 20,0        | 7,3             | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 11,9          | 11,7          | 12,2      |
| Maart     | 6,5       | 20,0        | 9,5             | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 13,2          | 13,0          | 13,4      |
| April     | 9,5       | 20,0        | 12,5            | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 14,9          | 14,8          | 15,1      |
| Mei       | 13,3      | 20,0        | 16,3            | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 17,1          | 17,0          | 17,3      |
| Juni      | 16,0      | 20,0        | 19,0            | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,7          | 18,6          | 18,8      |
| Juli      | 17,4      | 20,0        | 20,4            | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,5          | 19,4          | 19,6      |
| Augustus  | 18,1      | 20,0        | 21,1            | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 19,9          | 19,8          | 20,0      |
| September | 14,8      | 20,0        | 17,8            | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 18,0          | 17,9          | 18,1      |
| Oktober   | 10,8      | 20,0        | 13,8            | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 15,7          | 15,6          | 15,9      |
| November  | 6,7       | 20,0        | 9,7             | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 13,3          | 13,1          | 13,5      |
| December  | 3,7       | 20,0        | 6,7             | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 11,6          | 11,4          | 11,8      |
| 0°C KNMI  | 0,0       | 20,0        | 3,0             | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 9,5           | 9,2           | 9,7       |
| Gemiddeld | 10,3      | 20,0        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,4          | 15,3          | 15,6      |
| 20°C KNMI | 20,0      | 20,0        | 23,0            | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,0          | 21,0          | 21,1      |

| Maand     | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|-----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari   | 675             | 80              | 0        | -98             | 0               | 0             | 0              | -139       | 518          |
| Februari  | 686             | 80              | 0        | -97             | 0               | 0             | 0              | -177       | 493          |
| Maart     | 709             | 81              | 0        | -94             | 0               | 0             | 0              | -252       | 444          |
| April     | 739             | 82              | 0        | -94             | 0               | 0             | 0              | -352       | 375          |
| Mei       | 777             | 84              | 0        | -92             | 0               | 0             | 0              | -481       | 288          |
| Juni      | 804             | 84              | 0        | -91             | 0               | 0             | 0              | -572       | 225          |
| Juli      | 818             | 85              | 0        | -89             | 0               | 0             | 0              | -618       | 196          |
| Augustus  | 825             | 85              | 0        | -88             | 0               | 0             | 0              | -641       | 181          |
| September | 792             | 84              | 0        | -87             | 0               | 0             | 0              | -531       | 258          |
| Oktober   | 752             | 83              | 0        | -88             | 0               | 0             | 0              | -397       | 349          |
| November  | 711             | 81              | 0        | -92             | 0               | 0             | 0              | -258       | 442          |
| December  | 681             | 80              | 0        | -97             | 0               | 0             | 0              | -158       | 506          |
| 0°C KNMI  | 644             | 79              | 0        | -106            | 0               | 0             | 0              | -33        | 584          |
| Gemiddeld | 747             | 83              | 0        | -90             | 0               | 0             | 0              | -381       | 358          |
| 20°C KNMI | 844             | 86              | 0        | -88             | 0               | 0             | 0              | -706       | 136          |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 6

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 6

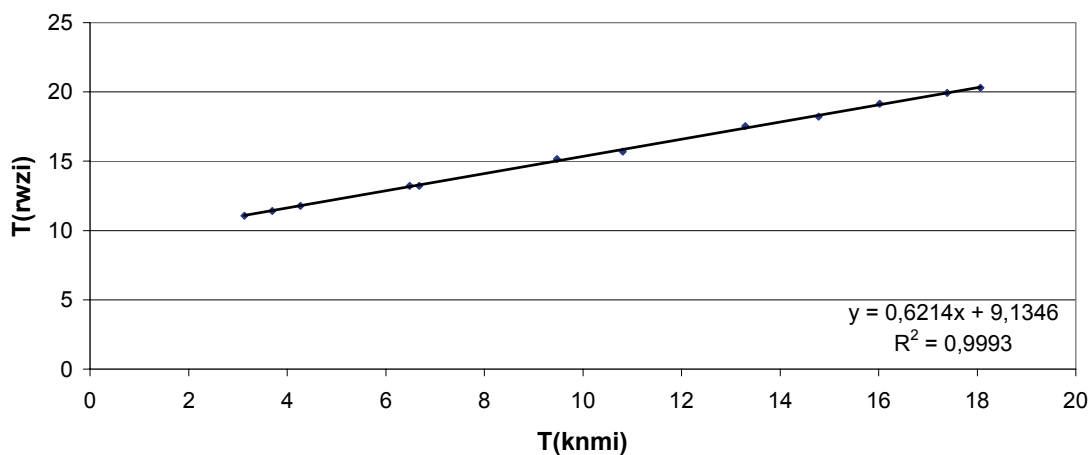
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: 20% van de windsnelheid

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvreemd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 20,0        | 6,1              | 4,1           | 13,2         | 5,1           | 11,3          | 11,0          | 11,1      |
| Februari         | 4,3       | 20,0        | 7,3              | 5,3           | 13,7         | 6,3           | 11,9          | 11,7          | 11,8      |
| Maart            | 6,5       | 20,0        | 9,5              | 7,5           | 14,7         | 8,5           | 13,2          | 13,0          | 13,2      |
| April            | 9,5       | 20,0        | 12,5             | 10,5          | 16,0         | 11,5          | 14,9          | 14,8          | 15,2      |
| Mei              | 13,3      | 20,0        | 16,3             | 14,3          | 17,7         | 15,3          | 17,1          | 17,0          | 17,5      |
| Juni             | 16,0      | 20,0        | 19,0             | 17,0          | 18,9         | 18,0          | 18,7          | 18,6          | 19,2      |
| Juli             | 17,4      | 20,0        | 20,4             | 18,4          | 19,5         | 19,4          | 19,5          | 19,4          | 19,9      |
| Augustus         | 18,1      | 20,0        | 21,1             | 19,1          | 19,8         | 20,1          | 19,9          | 19,8          | 20,3      |
| September        | 14,8      | 20,0        | 17,8             | 15,8          | 18,3         | 16,8          | 18,0          | 17,9          | 18,2      |
| Oktober          | 10,8      | 20,0        | 13,8             | 11,8          | 16,6         | 12,8          | 15,7          | 15,6          | 15,7      |
| November         | 6,7       | 20,0        | 9,7              | 7,7           | 14,7         | 8,7           | 13,3          | 13,1          | 13,2      |
| December         | 3,7       | 20,0        | 6,7              | 4,7           | 13,4         | 5,7           | 11,6          | 11,4          | 11,4      |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 20,0        | 3,0              | 1,0           | 11,8         | 2,0           | 9,5           | 9,2           | 9,2       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,0        | 13,3             | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,4          | 15,3          | 15,5      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 20,0        | 23,0             | 21,0          | 20,7         | 22,0          | 21,0          | 21,0          | 21,5      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 80              | 99       | -95             | -78             | -190          | -356           | -108       | 27           |
| Februari         | 686             | 80              | 168      | -94             | -87             | -185          | -346           | -150       | 73           |
| Maart            | 709             | 81              | 300      | -93             | -82             | -176          | -268           | -238       | 232          |
| April            | 739             | 82              | 520      | -94             | -94             | -163          | -214           | -355       | 420          |
| Mei              | 777             | 84              | 685      | -94             | -95             | -143          | -152           | -498       | 564          |
| Juni             | 804             | 85              | 718      | -94             | -93             | -126          | -107           | -595       | 592          |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -92             | -79             | -117          | -82            | -641       | 561          |
| Augustus         | 825             | 85              | 631      | -91             | -69             | -112          | -65            | -664       | 541          |
| September        | 792             | 84              | 412      | -88             | -66             | -130          | -105           | -537       | 362          |
| Oktober          | 752             | 83              | 221      | -87             | -77             | -151          | -192           | -386       | 163          |
| November         | 711             | 81              | 110      | -89             | -65             | -173          | -245           | -236       | 93           |
| December         | 681             | 80              | 72       | -93             | -72             | -188          | -323           | -128       | 30           |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 79              | 95       | -101            | -73             | -206          | -397           | 1          | 41           |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 82              | 362      | -90             | -81             | -156          | -195           | -377       | 292          |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 86              | 675      | -91             | -67             | -100          | -43            | -734       | 571          |

Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 7

### Detailresultaten van modelberekeningen

#### Variant 7

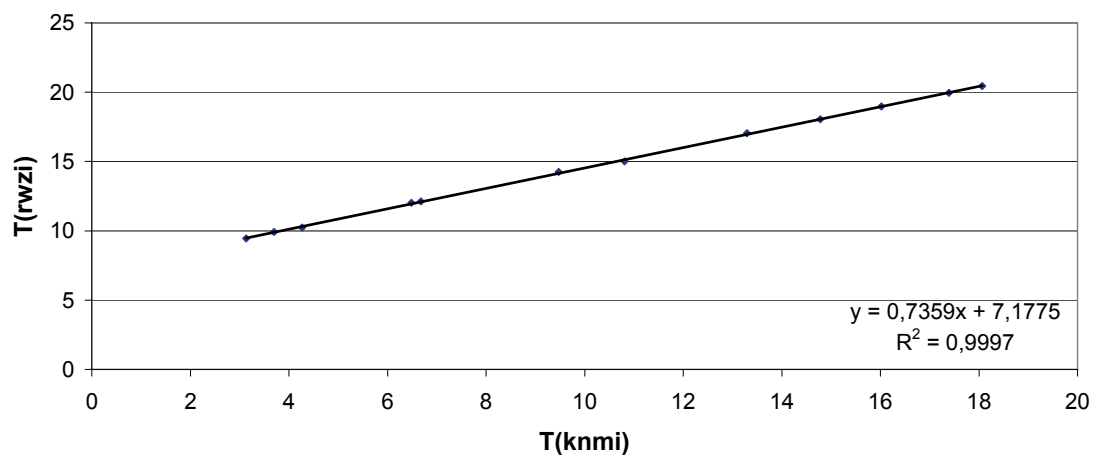
Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: Lozingstemperatuur  $T_L = 0,2 \times T_k + 18^\circ\text{C}$

| Maand     | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|-----------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari   | 3,1       | 18,6        | 6,1             | 4,1           | 12,4         | 5,1           | 10,7          | 10,5          | 9,4       |
| Februari  | 4,3       | 18,9        | 7,3             | 5,3           | 13,0         | 6,3           | 11,4          | 11,2          | 10,2      |
| Maart     | 6,5       | 19,3        | 9,5             | 7,5           | 14,3         | 8,5           | 12,9          | 12,7          | 12,0      |
| April     | 9,5       | 19,9        | 12,5            | 10,5          | 15,9         | 11,5          | 14,9          | 14,7          | 14,3      |
| Mei       | 13,3      | 20,7        | 16,3            | 14,3          | 18,1         | 15,3          | 17,4          | 17,3          | 17,0      |
| Juni      | 16,0      | 21,2        | 19,0            | 17,0          | 19,6         | 18,0          | 19,2          | 19,1          | 19,0      |
| Juli      | 17,4      | 21,5        | 20,4            | 18,4          | 20,3         | 19,4          | 20,1          | 20,0          | 19,9      |
| Augustus  | 18,1      | 21,6        | 21,1            | 19,1          | 20,7         | 20,1          | 20,6          | 20,5          | 20,4      |
| September | 14,8      | 21,0        | 17,8            | 15,8          | 18,9         | 16,8          | 18,4          | 18,3          | 18,0      |
| Oktober   | 10,8      | 20,2        | 13,8            | 11,8          | 16,7         | 12,8          | 15,8          | 15,6          | 15,0      |
| November  | 6,7       | 19,3        | 9,7             | 7,7           | 14,4         | 8,7           | 13,0          | 12,9          | 12,1      |
| December  | 3,7       | 18,7        | 6,7             | 4,7           | 12,7         | 5,7           | 11,1          | 10,9          | 9,9       |
| 0°C KNMI  | 0,0       | 18,0        | 3,0             | 1,0           | 10,7         | 2,0           | 8,6           | 8,4           | 7,3       |
| Gemiddeld | 10,3      | 20,1        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,5          | 15,3          | 14,8      |
| 20°C KNMI | 20,0      | 22,0        | 23,0            | 21,0          | 21,8         | 22,0          | 21,8          | 21,8          | 21,8      |

| Maand     | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|-----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari   | 675             | 79              | 99       | -80             | -326            | -162          | -1415          | 3          | -1127        |
| Februari  | 686             | 79              | 168      | -80             | -368            | -158          | -1373          | -45        | -1091        |
| Maart     | 709             | 80              | 300      | -82             | -360            | -155          | -1102          | -156       | -765         |
| April     | 739             | 82              | 520      | -87             | -427            | -146          | -901           | -293       | -514         |
| Mei       | 777             | 83              | 685      | -90             | -447            | -134          | -673           | -465       | -262         |
| Juni      | 804             | 85              | 718      | -92             | -452            | -123          | -502           | -583       | -145         |
| Juli      | 818             | 85              | 669      | -92             | -398            | -117          | -414           | -642       | -90          |
| Augustus  | 825             | 85              | 631      | -92             | -354            | -115          | -343           | -673       | -35          |
| September | 792             | 84              | 412      | -86             | -318            | -127          | -499           | -525       | -267         |
| Oktober   | 752             | 82              | 221      | -81             | -349            | -138          | -822           | -338       | -672         |
| November  | 711             | 80              | 110      | -80             | -283            | -153          | -1021          | -162       | -797         |
| December  | 681             | 79              | 72       | -80             | -302            | -161          | -1301          | -25        | -1037        |
| 0°C KNMI  | 644             | 78              | 95       | -83             | -303            | -173          | -1569          | 134        | -1177        |
| Gemiddeld | 747             | 82              | 362      | -83             | -369            | -142          | -832           | -326       | -561         |
| 20°C KNMI | 844             | 86              | 675      | -94             | -359            | -106          | -261           | -756       | 29           |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)



## Bijlage 10, blad 8

### Detailresultaten van modelberekeningen

Variant 8

Standaardgegevens en uitgangspunten: zie tabel 6.1

Afwijkingen van tabel 6.1: Lozingstemperatuur  $T_L = 0,4 \times T_k + 16^\circ\text{C}$

| Maand            | T<br>knmi | T<br>lozing | T<br>rioolvremd | T<br>neerslag | T<br>gemengd | T<br>maaiveld | T<br>overname | T<br>influent | T<br>rwzi |
|------------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Januari          | 3,1       | 17,3        | 6,1             | 4,1           | 11,6         | 5,1           | 10,1          | 9,9           | 9,0       |
| Februari         | 4,3       | 17,7        | 7,3             | 5,3           | 12,4         | 6,3           | 11,0          | 10,8          | 9,9       |
| Maart            | 6,5       | 18,6        | 9,5             | 7,5           | 13,9         | 8,5           | 12,6          | 12,4          | 11,8      |
| April            | 9,5       | 19,8        | 12,5            | 10,5          | 15,9         | 11,5          | 14,8          | 14,7          | 14,2      |
| Mei              | 13,3      | 21,3        | 16,3            | 14,3          | 18,4         | 15,3          | 17,7          | 17,6          | 17,3      |
| Juni             | 16,0      | 22,4        | 19,0            | 17,0          | 20,2         | 18,0          | 19,7          | 19,6          | 19,4      |
| Juli             | 17,4      | 23,0        | 20,4            | 18,4          | 21,1         | 19,4          | 20,7          | 20,6          | 20,4      |
| Augustus         | 18,1      | 23,2        | 21,1            | 19,1          | 21,6         | 20,1          | 21,2          | 21,1          | 21,0      |
| September        | 14,8      | 21,9        | 17,8            | 15,8          | 19,4         | 16,8          | 18,8          | 18,7          | 18,3      |
| Oktober          | 10,8      | 20,3        | 13,8            | 11,8          | 16,8         | 12,8          | 15,8          | 15,7          | 15,1      |
| November         | 6,7       | 18,7        | 9,7             | 7,7           | 14,0         | 8,7           | 12,8          | 12,6          | 11,9      |
| December         | 3,7       | 17,5        | 6,7             | 4,7           | 12,0         | 5,7           | 10,5          | 10,3          | 9,5       |
| <b>0°C KNMI</b>  | 0,0       | 16,0        | 3,0             | 1,0           | 9,6          | 2,0           | 7,8           | 7,6           | 6,7       |
| <b>Gemiddeld</b> | 10,3      | 20,1        | 13,3            | 11,3          | 16,4         | 12,3          | 15,5          | 15,3          | 14,8      |
| <b>20°C KNMI</b> | 20,0      | 24,0        | 23,0            | 21,0          | 22,9         | 22,0          | 22,7          | 22,6          | 22,4      |

| Maand            | 1<br>Biologisch | 2<br>Mechanisch | 3<br>Zon | 4<br>Beluchting | 5<br>Verdamping | 6<br>Straling | 7<br>Wateropp. | 8<br>Bodem | Totaal<br>kW |
|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------|--------------|
| Januari          | 675             | 79              | 99       | -76             | -310            | -154          | -1319          | 32         | -974         |
| Februari         | 686             | 79              | 168      | -77             | -353            | -152          | -1292          | -21        | -961         |
| Maart            | 709             | 80              | 300      | -80             | -350            | -151          | -1058          | -141       | -691         |
| April            | 739             | 82              | 520      | -86             | -425            | -146          | -895           | -291       | -503         |
| Mei              | 777             | 84              | 685      | -91             | -459            | -138          | -710           | -479       | -331         |
| Juni             | 804             | 85              | 718      | -96             | -476            | -130          | -567           | -609       | -271         |
| Juli             | 818             | 85              | 669      | -96             | -429            | -126          | -490           | -674       | -242         |
| Augustus         | 825             | 86              | 631      | -97             | -386            | -125          | -418           | -709       | -193         |
| September        | 792             | 84              | 412      | -89             | -334            | -133          | -546           | -546       | -360         |
| Oktober          | 752             | 82              | 221      | -81             | -352            | -139          | -832           | -341       | -689         |
| November         | 711             | 80              | 110      | -78             | -275            | -150          | -981           | -147       | -729         |
| December         | 681             | 79              | 72       | -77             | -287            | -154          | -1218          | 2          | -902         |
| <b>0°C KNMI</b>  | 644             | 77              | 95       | -77             | -284            | -162          | -1433          | 177        | -963         |
| <b>Gemiddeld</b> | 747             | 82              | 362      | -84             | -370            | -142          | -836           | -327       | -568         |
| <b>20°C KNMI</b> | 844             | 87              | 675      | -100            | -404            | -119          | -355           | -800       | -171         |

### Resultaat model T(rwzi) versus T(knmi)

