

Stichting RIONED

# **Een risicogebaseerde beoordeling van gemengde rioolstelsels**

*Het proefschrift van dr. ir. H. Korving samengevat en bediscussieerd*

© januari 2005

**Stichting RIONED, Ede**

Stichting RIONED is zich volledig bewust van haar taak een zo betrouwbaar mogelijke uitgave te verzorgen. Niettemin kunnen Stichting RIONED en de auteurs geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventueel in deze uitgave voorkomende onjuistheden.

*Auteur:* Dr. ir. H. Korving

*Tekstadvies:* Lime-C, Bunnik

*Opmaak:* Grafisch Atelier Wageningen

*Druk:* Modern, Bennekom

ISBN: 90 73645 204

# Voorwoord

De huidige manier van beoordelen van de prestaties van een rioolstelsel heeft tekortkomingen. Rioleringsbeheerders betrekken onzekerheden over de afmetingen van het rioolstelsel, over de kennis van processen en over storingen van bijvoorbeeld gemalen niet in de beoordeling. Zo ontstaat een te optimistische inschatting van de bedrijfszekerheid.

In zijn promotie onderzoek besteedde Hans Korving aandacht aan onzekerheden in de beschikbare informatie en de invloed daarvan op de beslissingen voor het rioleringsbeheer. Zijn proefschrift leidt tot de conclusie dat nauwkeurig gekwantificeerde onzekerheid nuttig is bij het nemen van beslissingen. Met risicoanalyse kunnen beheerders bijvoorbeeld afwegen of verbetering van de storingsafhandeling of extra berging het grootste effect heeft op vermindering van de vuiluitwerp.

| 3

De belangrijkste les is dat rioleringsbeheerders niet blindelings moeten vertrouwen op modelresultaten. Ze zouden meer naar buiten moeten gaan om de werking van rioolstelsels te controleren. Puthaak en storingssignalering zijn minstens zo belangrijk als rekenmodellen. Daarnaast moet riolerend Nederland nadenken over nieuwe normen waarin de invloed van onzekerheden is opgenomen.

Stichting RIONED wil belangwekkende Nederlandse promoties onder de aandacht brengen van een breder publiek van professionals en tegelijk de vakdiscussies stimuleren. Het eerste deel van de publicatie *Een risicogebaseerde beoordeling van gemengde rioolstelsels* beschrijft het onderzoek met accent op de relevantie voor de praktijk. In het tweede deel komen vijf deskundigen aan het woord die reflecteren op de toepassingsmogelijkheden van de resultaten. Tot slot antwoordt auteur Hans Korving.

Graag dank ik de auteurs voor hun bijdragen. Ik hoop dat deze publicatie stimuleert tot meer meten aan de riolering en leidt tot meer inzicht bij zowel de professionals in het veld als de ontwikkelaars van modellen.

drs. H.J. Gastkemper  
directeur Stichting RIONED  
januari 2005



# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	7
<b>1 Inleiding</b>	10
1.1 Aanleiding	10
1.2 Doel	10
1.3 Leeswijzer	11
<b>2 Besluitvorming rond rioleringsbeheer</b>	12
2.1 Tekortkomingen huidige beoordeling	12
2.2 Onzekerheid over de toekomst	13
2.3 Beslissen met onzekerheden	14
2.3.1 Voorbeeld	14
2.3.2 Reductie van onzekerheid	16
2.4 Risicogebaseerde economische optimalisatie	16
<b>3 Fouten in beheerbestanden</b>	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Onzekerheidsanalyse	22
3.2.1 Beschrijving voorbeelden	22
3.2.2 Onzekere dimensies	25
3.2.3 Monte Carlo-simulaties	25
3.2.4 Herhalingstijd overstortingsvolumes	27
3.3 Resultaten	30
<b>4 Natuurlijke variatie in neerslag</b>	32
4.1 Inleiding	32
4.1.1 Ruimtelijke spreiding	32
4.1.2 Meetfouten	33
4.2 Ruimtelijke neerslaggenerator	34
4.3 Onzekerheidsanalyse	36
4.4 Resultaten	36
<b>5 Kalibratie van hydrodynamische modellen</b>	38
5.1 Inleiding	38
5.2 Modelkalibratie	38
5.2.1 Beschrijving voorbeelden	38
5.2.2 Kalibratieprocedure	39
5.2.3 Resultaten	42

5.3	Onzekerheidsanalyse	43
5.4	Resultaten	44
<b>6</b>	<b>Gemalenbeheer</b>	<b>47</b>
6.1	Inleiding	47
6.2	Pompstoringen	47
6.2.1	Definitie pompstoringen	47
6.2.2	Faalmechanismen pompen in rioolgemalen	47
6.3	Storingsregistratie	48
6.3.1	Beschrijving voorbeelden	48
6.3.2	Typen storingen	49
6.4	Analysemethodiek pompstoringen	51
6.4.1	Stap I: Validatie storingsdata	52
6.4.2	Stap II: Analyse storingskenmerken	52
6.4.3	Stap III: Visuele analyse storingen	54
6.4.4	Stap IV: Trend in faaltempo	55
6.4.5	Stap V: Statistisch model storingsdata	56
6.4.6	Voorbeeld pompstoringsanalyse	58
6.5	Resultaten storingsanalyse	61
6.6	Invloed pompstoringen op functioneren rioolstelsel	62
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Praktische implicaties</b>	<b>66</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>69</b>
	<b>Bijlage 1: Bayesiaanse statistiek</b>	<b>72</b>
	<b>Reacties</b>	<b>77</b>
	Hans Geerse	78
	Sander Geenen	82
	Johan Jonker	85
	Harry van Luijtelaar	90
	Hans Hartong	96
	<b>Antwoord Hans Korving</b>	<b>98</b>
	<b>Summary</b>	<b>102</b>

## Samenvatting

Voor de prestaties van een rioolstelsel bestaan meestal geen metingen. Daarom beoordelen rioleringsbeheerders de prestatie vaak aan de hand van modelresultaten. Zo beoordelen ze het hydraulisch functioneren aan de hand van berekende overstortingsvolumes en berekende water-op-straatsituaties. Op basis hiervan besluiten ze of maatregelen nodig zijn. Visuele inspecties en voorspellingen van de restlevensduur van rioolbuizen bepalen of reiniging, renovatie of vervanging noodzakelijk is.

### *Te optimistische inschatting*

Deze manier van beoordelen heeft tekortkomingen, omdat rioleringsbeheerders verschillende onzekerheden niet in de beoordeling betrekken. Dit zijn onzekerheden over de opbouw van het rioolstelsel, de afmetingen van rioolbuizen en de kennis over processen. Daarnaast laten ze de natuurlijke variatie in de neerslag buiten beschouwing. Verder gaan ze ervan uit dat de onderdelen van een rioolstelsel (zoals rioolbuizen en pompen) niet kunnen falen en dat zij gebreken aan die onderdelen visueel kunnen waarnemen en beoordelen. Zo ontstaat een veel te optimistische inschatting van de bedrijfszekerheid van een rioolstelsel. Hierdoor nemen rioleringsbeheerders aanzienlijke risico's bij beslissingen over onderhouds- en verbetermaatregelen.

| 7

### *Risicoanalyse*

Het onderzoek in het proefschrift *Probabilistic Assessment of the Performance of Combined Sewer Systems* besteedt aandacht aan onzekerheden in de beschikbare informatie en de invloed daarvan op de beslissingen voor het rioleringsbeheer. Voorbeelden van onzekerheden zijn de geometrie en dimensies van het systeem, de spreiding van de neerslag in ruimte en tijd, de (economische) waardering van schade en de betrouwbaarheid van systeemonderdelen. Om deze onzekerheden bij de beoordeling van rioolstelsels te verwerken, hebben rioleringsbeheerders kennis nodig over de grootte ervan. Het proefschrift leidt tot de conclusie dat nauwkeurig gekwantificeerde onzekerheid nuttig is bij het nemen van beslissingen over het rioleringsbeheer. Met risicoanalyse kunnen beheerders bijvoorbeeld afwegen of verbetering van de storingsafhandeling of extra berging effect heeft op vermindering van de vuiluitwerp. Overigens zijn de in de cases gepresenteerde getallen locatiespecifiek en kunnen daarom voor andere rioolstelsels anders uitvallen.

### *Fouten in beheerbestanden en spreiding in neerslag*

Twee van de onderzochte onzekerheden zijn fouten in beheerbestanden van rioolstelsels (zoals ontbrekende leidingen en foutieve leidingdiameters) en natuurlijke variatie in de neerslag (zoals meetfouten en ruimtelijke verschillen in intensiteiten). Deze onzekerheden hebben veel invloed op het functioneren van de riolering in termen van

overstortingsvolumes per bui. Bij grotere herhalingstijden neemt de waargenomen variatie in berekende overstortingsvolumes toe. Onzekerheid in systeemdimensies resulteert in grotere gemiddelde jaarlijkse overstortingsvolumes dan neerslagvariatie. Daarentegen leidt variatie in de neerslag tot een grotere spreiding. Dit komt mogelijk door de beperkingen van de toegepaste neerslaggenerator, die het volume van veelvoorkomende buien met een langere duur onderschat.

#### *Invloed van kalibratie*

Ook de invloed van kalibratie op de betrouwbaarheid van modelresultaten is onderzocht. De uitkomsten van een gekalibreerd model bevatten een zo klein mogelijke afwijking van een serie veldmetingen. Met kalibratie kunt u de systematische fouten door onvolledige procesbeschrijvingen, fouten in de beheerbestanden en meetfouten opsporen en verwijderen. Dat is de grote winst van kalibratie. Maar in het algemeen zijn de gekalibreerde waarden van modelparameters verschillend voor verschillende buien. Daarom is de overdraagbaarheid van kalibratieparameters relatief klein. Dit is te verklaren omdat de neerslagafvoer, de infiltratiecapaciteit van de bodem en de (industriële) afvalwaterproductie variëren in de tijd. De variaties in berekende overstortingsvolumes voor één enkele bui zijn relatief klein. De spreiding door de verschillen tussen kalibraties onderling is veel groter. Daarnaast blijkt dat een vereenvoudigd model de overstortingshoeveelheden van hellende systemen sterk overschat. Een modellering met in serie geschakelde reservoirs benadert de realiteit meer.

#### *Analyse storingsreeksen*

Bij de beoordeling van het functioneren van een rioolstelsel veronderstellen rioleringsbeheerders ten onrechte dat elk onderdeel perfect functioneert. Zo kan een storing of het buiten bedrijf zijn van één of meer pompen in een gemaal grote invloed hebben op de jaarlijkse hoeveelheid overstortend water. De invloed van pompstoringen op het hydraulisch functioneren is bepaald uit chronologische storingsreeksen van enkele grotere gemeenten. Deze gemeenten hanteren een goede storingsmelding en een adequate storingsafhandeling. De uitgevoerde analyse houdt rekening met de aard van de storingen, het beleid voor gemaalonderhoud, de veroudering van pompen en mogelijke aanpassingen aan het rioolstelsel.

De storingskarakteristieken verschillen. Dit komt vooral door verschillen in de definitie van een pompstoring en het onderhoudsbeleid. Afhankelijk van de gemeente ligt het gemiddelde aantal storingen per pomp tussen de vier en dertien per jaar. Vergelijken met pompen in drinkwaterdistributienetten en poldergemalen treden storingen bij pompen in rioolgemalen relatief vaak op. Dit komt onder meer door de samenstelling van het afvalwater en het discontinue karakter van het pompproces. De duur van reparaties is gemiddeld twaalf uur. Verder komen storingen regelmatig in clusters



voor, omdat een pomp met een storing alleen opnieuw wordt opgestart zonder de pomp te repareren. Ook zijn er trendmatige veranderingen in de storingsfrequentie waarneembaar, door gebrekkige reparaties, vervanging, opknapbeurten of veroudering. Gemiddeld staan dwa-pompen zo'n vier procent van de tijd dat ze zouden moeten draaien in storing en rwa-pompen ongeveer twee procent. Omgerekend naar overstortingsvolumes leiden pompstoringen tot een toename van circa vijftien procent in het jaarlijkse overstortingsvolume. Dit betekent dat beter functionerende pompen een deel van de milieuvervuiling kunnen voorkomen. Slecht functionerende gemalen kunnen zelfs de effectiviteit van investeringen in civieltechnische maatregelen (zoals bergbezinkbassins) tenietdoen.

#### *Belangrijkste conclusie*

De belangrijkste les is dat rioleringsbeheerders niet blindelings moeten vertrouwen op modelresultaten. Ze zouden meer naar buiten moeten gaan om de werking van rioolstelsels te controleren. Puthaak- en storingssignalering zijn minstens zo belangrijk als rekenmodellen. Daarnaast moet riolerend Nederland nadenken over nieuwe normen waarin de invloed van onzekerheden is opgenomen.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Onderhoud of verbetering van bestaande rioolstelsels kost jaarlijks één miljard euro. De levensduur van de riolering is relatief lang: zestig tot tachtig jaar. Beslissingen over rioleringsbeheer hebben dus consequenties voor de toekomst. Rioleringsbeheerders moeten deze vaak baseren op onzekere informatie over de toestand en het functioneren van een rioolsysteem. Hierdoor kunnen onderhouds- en verbetermaatregelen grote risico's met zich meebrengen. Soms blijken investeringen achteraf onnodig of zelfs overbodig. Bijvoorbeeld de vervanging van een rioolstreng die bij opgraving nog in uitstekende staat blijkt te zijn, de bouw van een bergingstank die zo groot is dat hij nooit gevuld raakt of verhard oppervlak dat bij inventarisatie veel groter blijkt dan verondersteld.

10 |

Bij rioleringsbeheer gaat het in feite om de afweging tussen de gewenste bedrijfszekerheid en de inzet van mensen en middelen. Bedrijfszekerheid is: 'de mogelijkheid een specifieke dienst te leveren aan de gebruikers'. De diensten van een rioolstelsel zijn: de bescherming van de volksgezondheid en het voorkómen van overstromingen, waarbij de kwaliteit van het milieu is gewaarborgd. Onvolledige of onjuiste informatie kan tot foute beslissingen leiden.

In 2001 startten Stichting RIONED, HKV Lijn in water en de TU Delft een onderzoek naar de kosteneffectiviteit van maatregelen in het rioleringsbeheer. Een samenvatting van de belangrijkste resultaten vindt u in deze publicatie: *Een risicogebaseerde beoordeling van het functioneren van gemengde rioolstelsels*.

## 1.2 Doel

Het onderzoek *Probabilistic Assessment of the Performance of Combined Sewer Systems* was gericht op de ontwikkeling van een methodiek voor probabilistische beoordeling van het functioneren van gemengde rioolstelsels. In die situatie beoordelen rioleringsbeheerders hoe goed een rioolstelsel werkt, waarbij ze rekeninghouden met de aanwezige onzekerheden. Zoals gemaalstoringen, verloren berging, neerslagspreiding en fouten in hoeveelheid verhard oppervlak. Bovendien kijken zij naar de risico's die het niet goed functioneren van dit stelsel met zich meebrengt. In dit onderzoek zijn de prestaties van rioolstelsels beoordeeld op basis van berekende overstortingsvolumes. Daarbij is rekeninggehouden met onzekerheden door bij de beoordeling van het hydraulisch functioneren en de technische toestand van een rioolstelsel technieken uit de onzekerheids- en risicoanalyse toe te passen. Bovendien is bepaald in welke mate de onzekerheid doorwerkt in de investeringen.

Doel van deze publicatie is te prikkelen en kritisch te kijken naar de huidige beoordelingspraktijk van basisinspanning en waterkwaliteitsspoor. Vervolgens moet riolerend Nederland nadenken over nieuwe, realistische normen en beoordelingsmethoden, waarin de onzekerheid tot uitdrukking komt.

### 1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 behandelt de tekortkomingen van de huidige beoordelingsmethodiek. Daarnaast vindt u in dit hoofdstuk handvatten voor hoe u kunt omgaan met onzekerheden in besluitvormingsprocessen. In hoofdstuk 3 tot en met 6 komen enkele belangrijke onzekerheden aan bod: fouten in beheerbestanden (hoofdstuk 3), natuurlijke variatie in neerslag (hoofdstuk 4), kwaliteit van modelkalibraties (hoofdstuk 5) en pompstoringen (hoofdstuk 6). In hoofdstuk 7 vindt u de belangrijkste conclusies. Hoofdstuk 8 vat de gevolgen voor de rioleringspraktijk samen. Na de literatuurlijst geven enkele deskundigen hun reacties, waarop auteur Hans Korving tot slot antwoordt. In de bijlage vindt u een toelichting op de Bayesiaanse statistiek.

| 11



Figuur 1 Wateroverlast door hevige neerslag (foto: H. Dijkstra, Bureau voor Beeld)

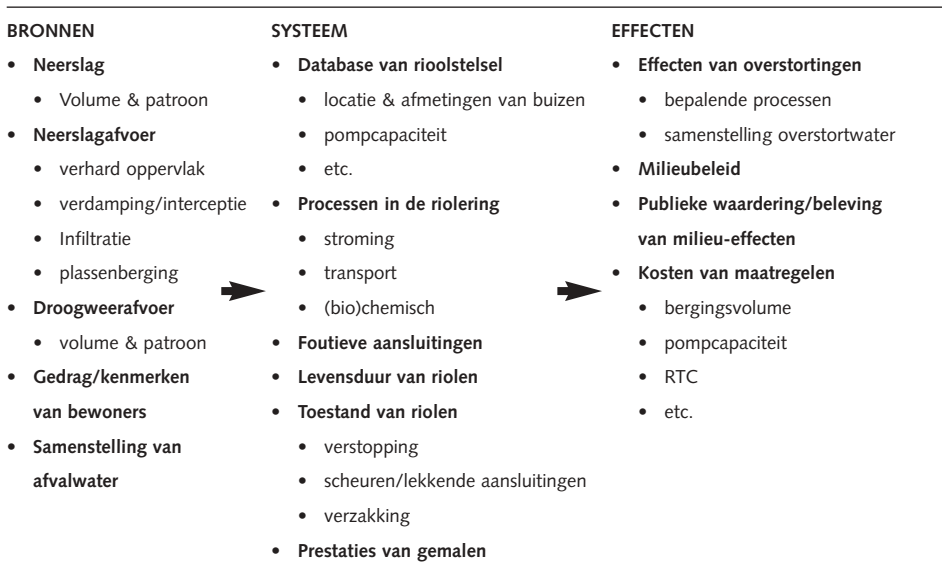
## 2 Besluitvorming rond rioleringsbeheer

De meeste rioleringsbeheerders gebruiken modellen om hun beslissingen over investeringen te onderbouwen. Ten eerste om het hydraulisch functioneren van rioolstelsels te voorspellen en de invloed van overstortingen op het ontvangende water te beoordelen. Ten tweede om de toestand van stelselonderdelen te beschrijven, met het oog op beheer. In dit rapport ligt de nadruk op de eerste toepassing van modellen: hydraulische en milieutechnische toetsing.

### 2.1 Tekortkomingen huidige beoordeling

Rioleringsbeheerders baseren hun beoordeling van de prestaties van een rioolstelsel op voorspelde prestaties en waargenomen gebreken. Zij beoordelen het hydraulisch functioneren op basis van berekende overstortingsvolumes en water-op-straatsituaties. Visuele inspecties en voorspellingen van de restlevensduur van rioolbuizen bepalen of reiniging, renovatie of vervanging noodzakelijk is.

De huidige beoordelingsmethodiek heeft tekortkomingen, omdat beheerders onzekerheden niet in de beoordeling betrekken. Als zij besluiten over ingrepen in een rioolstelsel baseren op onbetrouwbare of onjuiste informatie, neemt de kans op foute beslissingen toe.



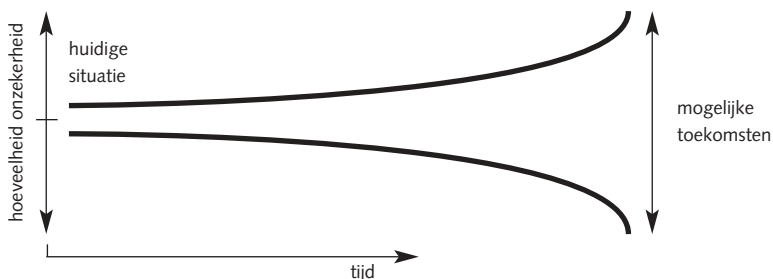
Figuur 2 Verschillende onzekerheden beïnvloeden de beoordeling van het functioneren van rioolstelsels

De verschillende onzekerheden zijn onder te verdelen volgens de drie categorieën in figuur 2: de bronnen, het systeem en de effecten. Bronnen bestaan uit omgevingsfactoren die het systeem beïnvloeden. Effecten omvatten de invloed van het systeem op zijn omgeving. Met betrekking tot de bronnen blijft de natuurlijke variatie in de neerslag buiten beschouwing. Voorbeelden van systeemonzekerheden zijn onzekerheden over de opbouw van het rioolstelsel, de afmetingen van rioolbuizen en de kennis over processen. Bovendien kan een model fouten bevatten, omdat het alleen een beschrijving van de werkelijkheid is. Ook nemen rioleringsbeheerders aan dat de onderdelen van een rioolstelsel (zoals rioolbuizen en pompen) niet kunnen falen en dat zij gebreken aan die onderdelen visueel kunnen waarnemen en beoordelen. Ten slotte kunnen aan de effectenkant de eisen die zij aan de prestaties van een rioolstelsel stellen, in de loop van de tijd wijzigen door veranderingen in de publieke waardering van gezondheidsrisico's en milieuschade én de regelgeving.

## 2.2 Onzekerheid over de toekomst

Door de relatief lange levensduur van riolen moeten rioleringsbeheerders kunnen omgaan met onzekere toekomstige situaties. Ontwikkelingen als veroudering van riolen, bevolkingsgroei, verandering van publieke waardering van omgevingskwaliteit en klimaatverandering zijn makkelijk te onder- of overschatten. Bovendien hebben plotse veranderingen in het beleid grote invloed op de prestatie-eisen voor rioolstelsels.

De mate waarin de toekomst onbekend is, neemt in de loop van de tijd toe. Aan de andere kant kan straks nieuwe informatie of technologie onzekerheden oplossen die besluitvormers nu tegenkomen. Dit alles betekent dat rioleringsbeheer gericht moet zijn op de toekomst, rekening moet houden met mogelijke onzekerheden en tussentijdse aanpassingen moet toelaten. Kortom, er is behoefte aan een robuust, maar ook flexibel systeem.



Figuur 3 De 'onzekerheidstrompet' (naar Rosenhead, 1989)

De mate waarin de toekomst onbekend is, neemt in de loop van de tijd toe.

## 2.3 Beslissen met onzekerheden

Er zal altijd onzekerheid zijn over de huidige situatie en de toekomst, zowel op korte als lange termijn. Dit betekent niet dat rioleringsbeheerders onzeker hoeven zijn over welke oplossing zij voor een probleem kiezen. Het feit dat er onzekerheid is, bepaalt eerder dat besluitvorming plaatsvindt en welke opties beschikbaar zijn. De belangrijkste vraag is hoe zij met onzekerheden moeten omgaan. Risicoanalyse biedt hiervoor goede mogelijkheden.

In de jaren vijftig van de vorige eeuw introduceerde de Deltacommissie al onzekerheden in haar analyses van overstromingen in Nederland (*Van Dantzig, 1956*). In de ruimtevaartsector begon de systematische toepassing van risicoanalyse na de brand bij de Apollo-test AS-204 op 27 januari 1967, waarbij drie astronauten omkwamen. Bij het ontwerp van bijvoorbeeld dijken en productieprocessen in fabrieken is risicoanalyse inmiddels gemeengoed. Maar het huidige rioleringsbeheer (*Stichting RIONED, 1994, 1996 en 1999*) houdt nog geen rekening met onzekerheden als ruimtelijke spreiding in neerslag en risico's van technische storingen in gemalen.

Sinds kort is er iets meer aandacht voor de rol van onzekerheden bij rioleringsbeheer (*Willems, 2001b en Harremoës, 2002*). De toegenomen reken capaciteit van computers bevordert dit, waardoor rioleringsbeheerders onzekerheidsanalyses sneller kunnen uitvoeren.

### 2.3.1 Voorbeeld

In figuur 4 ziet u een illustratief voorbeeld van het bergingontwerp van een bestaand rioolstelsel met en zonder voorafgaande veldmetingen. In dit voorbeeld heeft het rioolstelsel een berging van circa 7 mm, een pompovercapaciteit van circa 0,7 mm/h en drie overstorten. Om aan de geldende milieueisen te voldoen, moet de beheerder een randvoorziening in zijn stelsel aanbrengen. Hiervoor heeft hij drie opties (zie *Korving et al., 2001*):

- 1 Een ontwerp maken dat volstaat voor het gemiddelde jaarlijkse overstortingsvolume. Dit komt overeen met de huidige aanpak, zoals beschreven in de Leidraad Rioleringsbeheer (*Stichting RIONED, 1994, 1996 en 1999*). Hierbij houdt de rioleringsbeheerder geen rekening met onzekerheden in berekende overstortingsvolumes. In dit voorbeeld is het volume 44 mm/jaar (zie figuur 4).
- 2 Meer zekerheid inbouwen in het ontwerp én het bergingsvolume vergroten, zodat het in 95 procent van de gevallen voldoende is om voor het overstortingsvolume aan de basisinspanning te voldoen. Hierbij neemt de beheerder onzekerheden in berekende overstortingsvolumes wél in beschouwing. Dit betekent een vergroting van het randvoorzieningsvolume, omdat het verwachte overstortingsvolume 52 mm/jaar is (zie figuur 4).

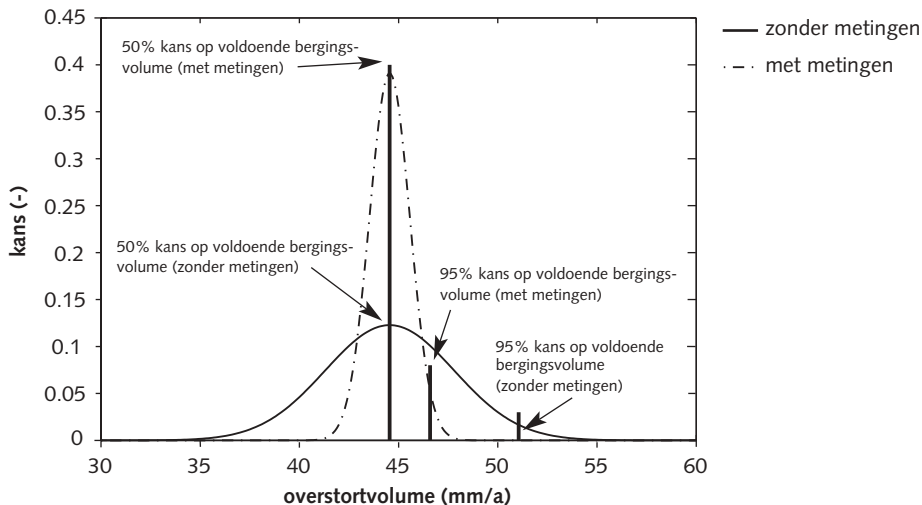
3 Vóór het ontwerp van de randvoorziening meer informatie verzamelen over de geometrie van het rioelstelsel, bijvoorbeeld buisafmetingen, bob's (binnen-onderkant-buis) en drempelhoogten. Hierdoor neemt de zekerheid over de werkelijke stelselgeometrie en het noodzakelijke extra bergingsvolume toe. In dit voorbeeld neemt het verwachte volume af tot 47 mm/jaar (zie figuur 4).

De keuze van de rioleringsbeheerder hangt af van verschillende aspecten. Zo wordt de keuze tussen optie 2 en 3 beïnvloed door:

- de kosten van het vergroten van de bergingsvoorziening;
- de consequenties van het bouwen van een te kleine of te grote voorziening;
- de kosten van extra metingen of modelberekeningen;
- een waarschijnlijke afname van de onzekerheid over het werkelijke stelselvolume door het verzamelen van nieuwe informatie;
- eventueel bekende toekomstige veranderingen in randvoorwaarden, zoals veroudering van riolen, bevolkingsgroei, verandering van publieke waardering van omgevingskwaliteit en klimaatverandering.

| 15

De keuze tussen optie 1 en 2 vereist een fundamentele verandering van denken, namelijk van de huidige beoordelingspraktijk naar een risicogebaseerde benadering van beoordeling en ontwerp.



Figuur 4 Illustratief voorbeeld van het bergingsontwerp van een bestaand rioelstelsel, met en zonder veldmetingen voorafgaand aan de besluitvorming (Korving et al., 2001) Metingen resulteren hier in een onzekerheidsreductie.

### 2.3.2 Reductie van onzekerheid

Het voorbeeld uit de vorige subparagraaf maakt duidelijk dat rioleringsbeheerders de onzekerheden over hun besluitvorming kunnen reduceren. Maar dat kost geld. Het is dus de vraag welke onzekerheidsbron de moeite waard is om te reduceren en vooral tegen welke kosten.

Met name onjuiste of sterk vereenvoudigde procesbeschrijvingen en fouten in beheerbestanden leiden tot onzekerheden in de resultaten van rekenmodellen. Zo nemen rioleringsbeheerders berging in huis- en kolkaansluitingen gewoonlijk niet mee in de berekeningen. Maar deze kan in de vlakke nederlandse stelsels tot tien procent van de totale stelselberging uitmaken (Clemens, 2001). Door meer kennis te vergaren over de belangrijke processen of veldmetingen uit te voeren, kunnen beheerders de onzekerheid verkleinen.

16 |

Maar onzekerheid kan ook juist toenemen als metingen of onderzoek laten zien dat een betrouwbaar model toch aanzienlijke onzekerheden bevat. Bovendien kunnen de variaties van een gemeten grootte veel groter zijn dan verwacht. Zo kan het afvoerende oppervlak bij een inventarisatie veel groter blijken dan tot dan toe verondersteld. Dit heeft grote gevolgen voor de berekende overstorthoeveelheden. Dus is het belangrijk om te weten in welke mate een toekomstige reductie van onzekerheden de kans op overstortingen of water op straat beïnvloedt.

### 2.4 Risicogebaseerde economische optimalisatie

Doordat rioleringsbeheerders hun beslissingen baseren op onzekere informatie over de toestand en het functioneren van het rioolstelsel, zijn investeringsrisico's onvermijdelijk. Door zogenaamde risicogebaseerde economische optimalisatie toe te passen, kunnen zij onzekerheden modelleren en meewegen. Het volgende voorbeeld licht het principe van risicogebaseerde economische optimalisatie toe.

Het voorbeeldrioolstelsel heeft een berging van 6,8 mm en een pompovercapaciteit van 0,73 mm/h. Om te voldoen aan de basisinspanning, moet de beheerder het bergingsvolume vergroten. De vraag is hoeveel. Met risicogebaseerde economische optimalisatie kan hij het optimale bergingsvolume bepalen. Dit doet hij door de totale kosten (investeringskosten én milieuschade door overstortingen) te minimaliseren. Hiervoor moet de beheerder wel de milieuschade in geld uitdrukken en de faalkans van het rioolstelsel bepalen.

Een rioolstelsel faalt als het zijn belangrijkste functies niet meer kan vervullen: het tegengaan van overstromingen (water op straat) en het beschermen van de volksgezondheid, waarbij de kwaliteit van het milieu is gewaarborgd (Korving, 2004). De



faalkans kan de beheerder schatten op basis van ervaring en intuïtie of berekenen met een probabilistisch model. Risico is: 'het product van de kans op het voorkómen van een faalgebeurtenis en haar gekapitaliseerde gevolgen'.

### *Kostenfunctie*

Voor economische optimalisatie moet de beheerder een kostenfunctie definiëren, waarin hij investeringen én schade verwerkt. Schade omvat hier alleen de negatieve gevolgen van overstortingen. Dit sluit goed aan bij de huidige rioleringspraktijk, die vooral geënt is op de basisinspanning. De basisinspanning dient hier alleen als voorbeeld. Bij andere (nieuwe) normen is de methodiek ook toepasbaar.

De kostenfunctie  $L(\tilde{v}, v)$  is gedefinieerd als de totale kosten bij een keuze voor het alternatief met bergingsvolume  $\tilde{v}$  en het werkelijke overstortingsvolume als  $v$ . Logischerwijs kiest de rioleringsbeheerder voor het alternatief met de laagste verwachte totale kosten:

$$E(L(\tilde{v}, V)) = I(\tilde{v}) + D(\tilde{v}) \quad (1)$$

waarin:

$V$  = het onzekere overstortingsvolume

$I(\tilde{v})$  = de initiële investeringskosten

$D(\tilde{v})$  = de kosten van milieuschade door overstortingen

Maar vaak is het erg lastig de kosten van milieuschade volledig in geld uit te drukken. Deze kosten vertegenwoordigen namelijk de (publieke) waardering van de omgevingskwaliteit. Dus: de bereidheid van de burgers te betalen voor instandhouding of verbetering van de omgevingskwaliteit.

Stel dat de kosten van de bergingvergroting van het voorbeeldrioolstelsel proportioneel zijn met het volume, en wel zodanig dat de kosten van een extra  $m^3$  afnemen bij toenemend volume:

$$I(\tilde{v}) = I_0 \tilde{v}^{0.75} \quad (2)$$

waarin:

$I_0$  = de marginale kosten van het bouwen van extra bergingsvolume

$\tilde{v}$  = de werkelijke hoeveelheid berging die wordt gebouwd

Als de berging te klein is, komt er rioolwater in het oppervlaktewater en faalt het systeem. Falen is hier: 'het optreden van een overstorting onafhankelijk van het over-

stortingsvolume'. De kosten van falen hangen gedeeltelijk af van het overstortingsvolume. Het vóórkomen van overstortingsvolumes kan de beheerder beschrijven met de overschrijdingskans. Overstortingsvolumes  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)$  worden beschreven met een zogenaamde Weibull-kansverdeling met parameters  $a$  en  $b$ :

$$P_f(v) = \Pr(V > v) = \exp \left\{ - \left( \frac{v}{b} \right)^a \right\} \quad (3)$$

waarin:

$P_f(v)$  = de kans op overschrijding van een zeker overstortingsvolume  $v$

Het bepalen van de verwachte kosten van milieuschade door overstortingen gebeurt als volgt: de beheerder vermenigvuldigt de verwachte kosten per overstorting met de gemiddelde overstortingsfrequentie per jaar. Vervolgens neemt hij deze op in een oneindige tijdshorizon:

$$D(\tilde{v}) = \frac{E(D_j(\tilde{v}, V))}{T_{OV}} (\alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \dots) = \frac{E(D_j(\tilde{v}, V))}{T_{OV}} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{\left( 1 + \frac{r}{100} \right)}$$

waarin:

$E(D_j(\tilde{v}, V))$  = de verwachte kosten (in euro's) door een overstorting wanneer een bergingsvolume  $\tilde{v}$  wordt gebouwd en het werkelijke overstortingsvolume  $V$  is bij een kostenfunctie  $j$ , en waarin:

$T_{OV}$  = de gemiddelde herhalingstijd van overstortingen (jaar)

$\alpha$  = de disconteringsfactor (-)

$r$  = de rentevoet (%)

Voor projecten die de overheid financiert, geldt in Nederland een rentevoet van vier procent (*Ministerie van Financiën, 1995*).

#### *Kosten van milieuschade*

Omdat de economische waardering van overstortingen en water op straat erg subjectief is, is het bepalen van de kosten voor het falen van een rioolstelsel niet eenvoudig. Bovendien kunnen de eisen voor de prestaties van een rioolstelsel in de loop van de tijd veranderen door veranderingen in de publieke waardering van gezondheidsrisico's en milieuschade, én de regelgeving. Als de beheerder schade slecht in geld kan uitdrukken, biedt de zogenaamde multicriteriabeslisanalyse een goed alternatief.

In figuur 5 ziet u drie verschillende kostenfuncties om milieuschade door overstortingen te beschrijven:

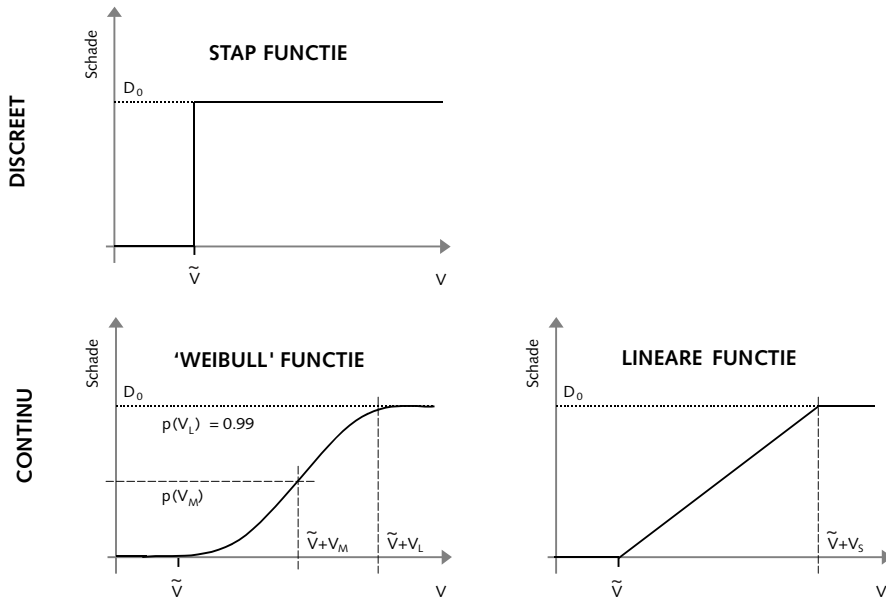
- stapfunctie;
- 'Weibull'-functie;
- lineaire functie.

Intuïtief lijkt een continue functie ('Weibull' of lineair) beter bij het proportionele karakter van de milieueffecten van overstortingen te passen. Vanwege de eenvoudige vaststelling en analytische oplossing gaat de voorkeur uit naar een lineaire kostenfunctie (zie *Korving, 2004*).

Samenvattend zijn de verwachte totale kosten gelijk aan:

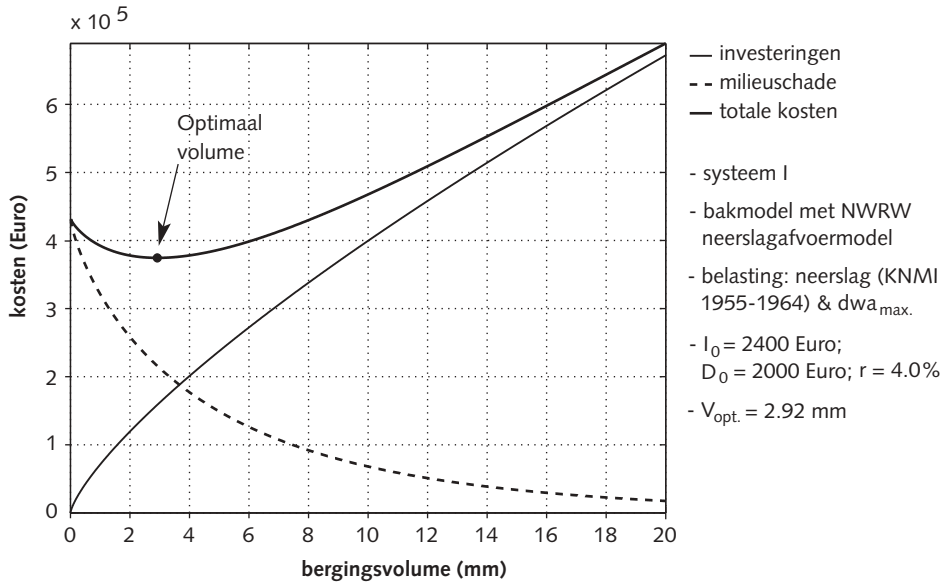
$$E(L(\tilde{v}, V)) = I(\tilde{v}) + D(\tilde{v}) = I_0 \tilde{v}^{0,75} + \frac{E(D_j(\tilde{v}, V))}{T_{OV}} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (5)$$

Het economisch optimale bergingsvolume wordt bepaald door de totale kosten te minimaliseren (zie figuur 6).



Figuur 5 Kostenfuncties voor beschrijving van milieuschade door overstortingen

Hierin is  $v$  een werkelijk optredend overstortingsvolume en  $\tilde{v}$  het te bouwen bergingsvolume. De bovenste is een discrete functie, de onderste twee zijn continue functies.



Figuur 6 Bepaling van het optimale bergingsvolume in een randvoorziening door minimalisatie van de totale kosten

# 3 Fouten in beheerbestanden

## 3.1 Inleiding

Het beheerbestand van rioolstelsels is nooit honderd procent correct. Van de meeste rioolstelsels zijn de gegevens over de constructie en geometrie vastgelegd in tekeningen, kaarten en ontwerprapporten. De nauwkeurigheid van die informatie is beperkt door (Clemens, 2001):

- verschillen tussen oorspronkelijk ontwerp en daadwerkelijke uitvoering die achteraf niet in revisies zijn doorgevoerd;
- zetting van riolen, waardoor verloren berging kan ontstaan;
- verlies van informatie, bijvoorbeeld door brand;
- gebrekkige documentatie over constructieve details.

In de praktijk kunnen rioleringsbeheerders alleen door gedetailleerd veldonderzoek betrouwbare informatie over de stelselgeometrie verzamelen.

| 21

Fouten in beheerbestanden hebben veel invloed op de resultaten van rioolmodellen (Price en Osborne, 1986; Petit et al., 1998; en Clemens, 2001). Nauwkeuriger meten of kalibratie van rioolmodellen zorgen voor een reductie van de onzekerheid in modelresultaten.

Tabel 1 Fouten in beheerbestanden van rioolstelsel (Clemens, 2001)

Rioleringsbeheerders gebruiken de gegevens als basis voor (hydrodynamische) modellen van rioolstelsels.

Categorie	Aspect	Standaarddeviatie
Geometrie rioolstelsel	Bob (boven- en benedenstrooms)	0,05 m
	Peil overstordrempel	0,01 m
	Maaiveld	0,01 m
	Leidingdiameter	0,5 %
	In- en uitslagpeil gemaal	0,01 m
Hydraulische parameters	Hydraulische ruwheid leiding	1,0 mm
	Overlaatcoëfficiënt	0,35 (-)
	Lokale verliescoëfficiënt	0,4 (-)
	Pompcapaciteit	5,0 %
Afvoerparameters	Infiltratiecapaciteit	30,0 %
	Berging op straat	30,0 %
Afvoerend oppervlak	Afvoerend oppervlak	5,0 %
Structuur rioolstelsel	Leidingprofiel (rond of eiprofiel)	-
	Niet-bestaand onderdeel	-
	Ontbrekende leiding	-

Grofweg zijn er twee soorten fouten:

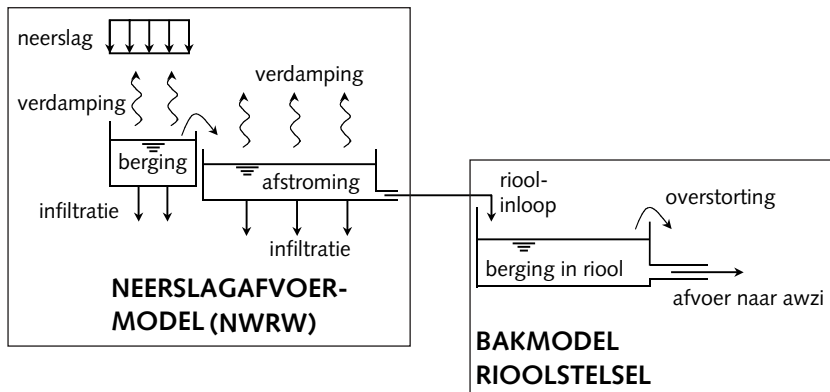
- 1 structurele fouten, zoals ontbrekende leidingen;
- 2 geometrische fouten, zoals foutieve leidingdiameters en leidingprofielen.

In tabel 1 ziet u een overzicht van mogelijke fouten in beheerbestanden. De waarden zijn gebaseerd op praktijkervaring van rioleringsbeheerders die hun best doen om de geometrie van hun stelsel goed in beeld te krijgen, binnen financieel redelijke grenzen. De spreiding is dus aan de gunstige kant. De kans is groot dat een beheerder minder goed presteert, waardoor de spreiding groter wordt.

### 3.2 Onzekerheidsanalyse

Op basis van twee voorbeelden is de invloed van afwijkingen in systeemdimensies (berging, pompcapaciteit en verhard oppervlak) op de berekende prestaties van een rioelstelsel onderzocht. Met Monte Carlo-simulatie zijn veel verschillende combinaties van systeemdimensies doorgerekend.

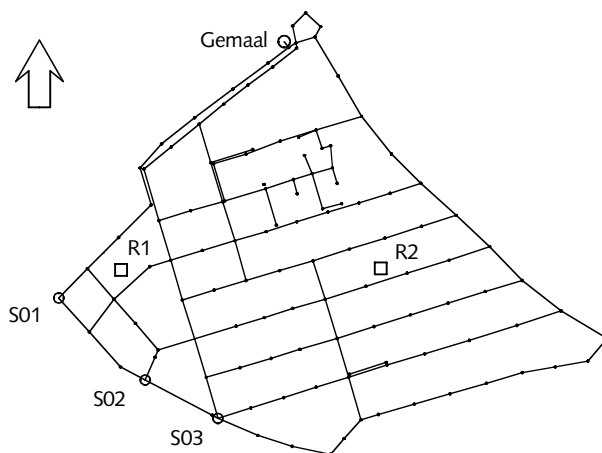
Beide rioelstelsels zijn gemodelleerd als bakmodel met een externe overstortdrempel en een pomp (figuur 7). Omdat veel berekeningen met een hydrodynamisch model in combinatie met een neerslagreeks van ten minste tien jaar zeer veel tijd vragen, is voor een bakmodel gekozen. Dit bakmodel is gecombineerd met het zogenaamde 'NWRW 4.3'-inloopmodel uit de Leidraad Riolering. Voor de berekeningen is een periode van tien jaar (1955-1964) gebruikt uit de bekende neerslagreeks van het KNMI (De Bilt, 1955-1979). De droogweerafvoer (dwa) van beide rioelstelsels is constant verondersteld.



Figuur 7 Bakmodel van rioelstelsel bestaat uit een neerslagafvoermodel op basis van het 'NWRW 4.3'-model en een bakmodel met een externe overstortdrempel en een pomp

### 3.2.1 Beschrijving voorbeelden

Systeem I is een relatief klein systeem met drie overstorten en een gemaal in een vlak gebied (zie figuur 8). Dit gemengde rioolstelsel heeft een berging van 865 m<sup>3</sup> en de pompcapaciteit is 119 m<sup>3</sup>/h. De kenmerken van systeem I zijn samengevat in tabel 2. Door een hoge grondwaterstand heeft infiltratie een groot aandeel in de dwa die sterk varieert. Het stelsel ondervindt aanzienlijke invloed van een nabijgelegen rivier. Er is een grote correlatie tussen de rivierwaterstand en de hoeveelheid dwa (Clemens, 2001), omdat de grondwaterstand direct reageert op veranderingen in de rivierwaterstand.

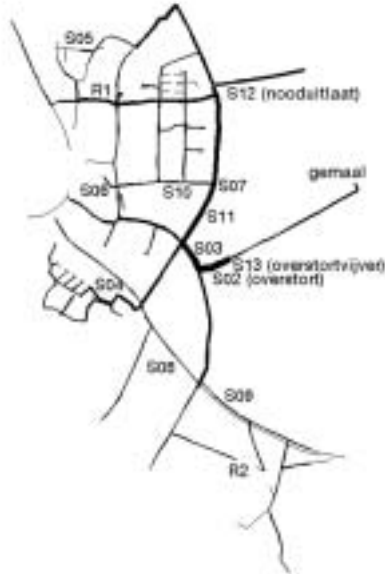


Figuur 8 Structuur systeem I (inclusief locaties van meetapparatuur bestaand uit niveaumeters (S) en neerslagmeters (R))

Tabel 2 Kenmerken systeem I

Berging	865 m <sup>3</sup> (= 6,81 mm)		
Afvoerend oppervlak	12,69 ha		
Pompcapaciteit	119,0 m <sup>3</sup> /h (= 0,94 mm/h)		
Droogweerafvoer	26,4 m <sup>3</sup> /h (= 0,21 mm/h)		
Aantal inwoners	2200		
Aantal overstorten	3		
	<b>Overstort 1</b>	<b>Overstort 2</b>	<b>Overstort 3</b>
Drempelhoogte	5,41 m+NAP	5,40 m+NAP	5,42 m+NAP
Drempelbreedte	0,90 m	0,35 m	0,60 m

Systeem II (figuur 9) bevindt zich in een licht hellend gebied en heeft een relatief kleine berging. Het is een gemengd rioelstelsel met een berging van  $900 \text{ m}^3$  en een pompcapaciteit van  $209 \text{ m}^3/\text{h}$ . Het systeem heeft twee overstorten, waarvan één functioneert als nooduitlaat. De andere overstort loost op een overstortvijver. De dwa is relatief groot door industriële lozingen en een injectie vanuit een naburig rioelstelsel. De kenmerken van systeem II zijn samengevat in tabel 3.



Figuur 9 Structuur systeem II (inclusief locaties van meetapparatuur bestaand uit niveaumeters (S) en neerslagmeters (R))

Tabel 3 Kenmerken systeem II

Berging	$900 \text{ m}^3 (= 3,85 \text{ mm})$	
Afvoerend oppervlak	23,44 ha	
Pompcapaciteit	$209 \text{ m}^3/\text{h} (= 0,89 \text{ mm}/\text{h})$	
Droogweerafvoer	$78 \text{ m}^3/\text{h} (= 0,33 \text{ mm}/\text{h})$	
Aantal inwoners	2100	
Aantal overstorten	2	
	<b>Overstort 1</b>	<b>Overstort 2</b>
Drempelhoogte	17,75 m+NAP	18,80 m+NAP
Drempelbreedte	3,60 m	1,00 m



### 3.2.2 Onzekere dimensies

De onzekere systeemdimesies omvatten berging ( $B$ ), pompcapaciteit ( $pc$ ), afvoerend oppervlak ( $A$ ) en overlaatcoëfficiënt ( $CC$ ). Zij vormen de belangrijkste foutenbronnen uit tabel 1 die invloed hebben op berekende overstortingsvolumes. Mogelijke oorzaken vindt u in tabel 4.

Verondersteld is dat de systeemdimesies statistisch onafhankelijk en normaal verdeeld zijn met een bekend gemiddelde en standaarddeviatie (zie tabel 5). Deze waarden zijn gebaseerd op de ervaringscijfers uit tabel 1.

Tabel 4 Mogelijke oorzaken van afwijkingen in systeemdimesies

<i>Systeemgrootheid</i>	Oorzaak onzekerheid
Bergingsvolume stelsel	<ul style="list-style-type: none"><li>• onzekerheid over berging in huisaansluitingen</li><li>• fouten in beheerbestand van rioolstelsel</li><li>• ontbrekende leidingen</li></ul>
Pompoevercapaciteit	<ul style="list-style-type: none"><li>• onnauwkeurige bepaling van pompcapaciteit</li><li>• onzekerheid over droogweerafvoer</li></ul>
Groote afvoerend oppervlak	<ul style="list-style-type: none"><li>• onnauwkeurigheid in inmeten van verharde oppervlakken</li><li>• afvoer vanaf onverhard oppervlak bij hevige neerslag</li></ul>

Tabel 5 Variaties in systeemdimesies voor systeem I en II

	Systeemdimesie	Gemiddelde	95%-interval
Systeem I	$B$ ( $m^3$ )	865,0	777,4 - 952,6
	$pc$ ( $m^3/h$ )	119,0	107,0 - 131,0
	$A$ (ha)	12,69	11,41 - 13,97
	$CC$ ( $m^{0.5}/s$ )	1,40	0,70 - 2,10
Systeem II	$B$ ( $m^3$ )	900,0	810,0 - 990,0
	$pc$ ( $m^3/h$ )	209,0	188,0 - 230,0
	$A$ (ha)	23,44	21,10 - 25,78
	$CC$ ( $m^{0.5}/s$ )	1,40	0,70 - 2,10

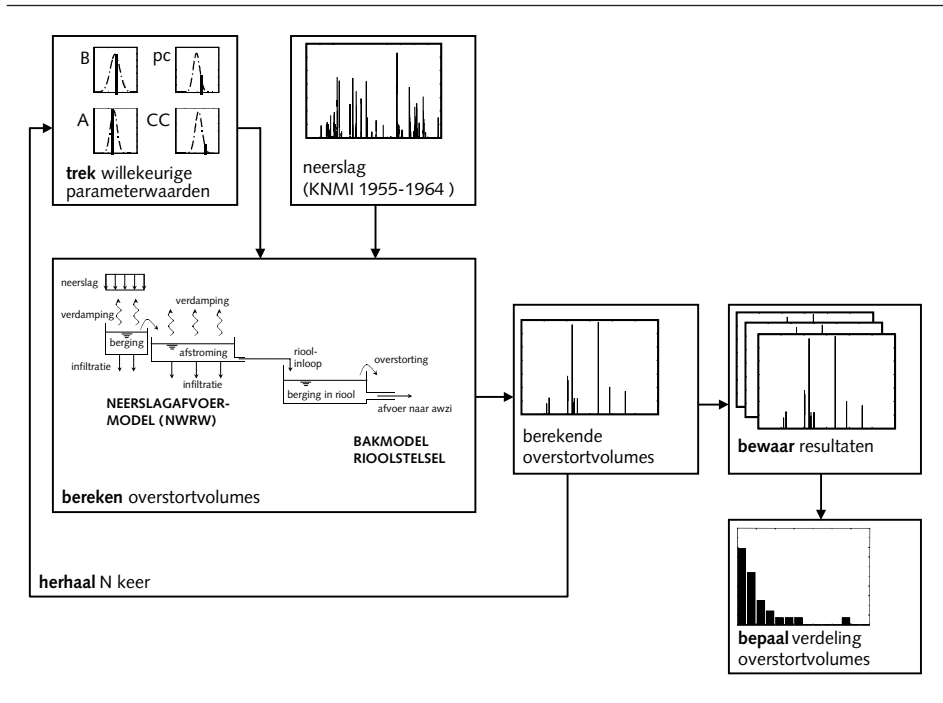
### 3.2.3 Monte Carlo-simulaties

Monte Carlo-simulatie vergt veel rekentijd, maar is een eenvoudige methode om de gevoeligheid van modeluitkomsten voor variaties in de modelinvoer te onderzoeken. Hier is de Monte Carlo-techniek gebruikt om de invloed van fouten in beheerbestanden op

overstortingsvolumes te kwantificeren. De techniek impliceert het trekken van waarden voor de invoervariabelen van het model uit a-priori kansverdelingsfuncties van die variabelen. Dit wordt heel vaak (bijvoorbeeld duizend keer) herhaald. Vervolgens worden modelberekeningen met alle getrokken waarden uitgevoerd (zie figuur 10). De a-priori kansverdelingsfuncties zijn meestal gebaseerd op beschikbare gegevens of expertkennis. Een schatting van de totale onzekerheid in de modelresultaten volgt uit een statistische analyse van de uitvoer van alle modelberekeningen.

Voor beide systemen is een Monte Carlo-simulatie van duizend modelberekeningen uitgevoerd. In elke berekening is een willekeurige waarde van systeemdimensies ( $B$ ,  $pc$ ,  $A$  en  $CC$ ) getrokken uit de kansverdelingen en ingevoerd in het model. Berekende volumes worden gesommeerd per bui, wat statistisch onafhankelijke gebeurtenissen creëert. Een bui begint op het moment dat de eerste neerslag valt die de waterstand in het riool boven het maximale dwa-niveau doet stijgen. Deze bui duurt tot het moment dat de waterstand weer onder dit niveau daalt. Bij nieuwe neerslag en stijging boven dwa-niveau begint een volgende bui.

26 |



Figuur 10 Principe Monte Carlo-simulaties

### 3.2.4 Herhalingstijd overstortingsvolumes

De herhalingstijd van berekende overstortingsvolumes is als volgt bepaald. Met zogenaamde Bayes-gewichten is eerst de verdelingsfunctie gezocht die het best past bij de berekende volumes. Hiervoor worden gewichten toegekend die beschrijven hoe goed een bepaald type verdelingsfunctie bij de data past. Hoe beter de *fit*, des te groter het gewicht. De bijlage geeft een korte toelichting op de achtergronden van Bayes-gewichten en Bayesiaanse statistiek. Als kandidaat-verdelingen zijn meegenomen exponentiële, Rayleigh-, normale, lognormale, gamma, Weibull- en Gumbel-kansverdelingen. De onderzoeksresultaten laten zien dat een zogenaamde Weibull verdeling het best in staat is de overstortingsvolumes statistisch te beschrijven (Korving, 2004). Vervolgens zijn de parameters van de Weibull-verdeling geschat met de Maximum Likelihood-methode.

De herhalingstijd van een bepaald overstortingsvolume is te berekenen uit de overschrijdingskans van dat volume en de gemiddelde herhalingstijd van overstortingen onafhankelijk van het volume (zie Korving *et al.*, 2002 en Korving, 2004). Aangenomen wordt dat overschrijdingen van een bepaald volume beschreven kunnen worden als een zogenaamd Poisson-proces (zie Buishand, 1989).

| 27

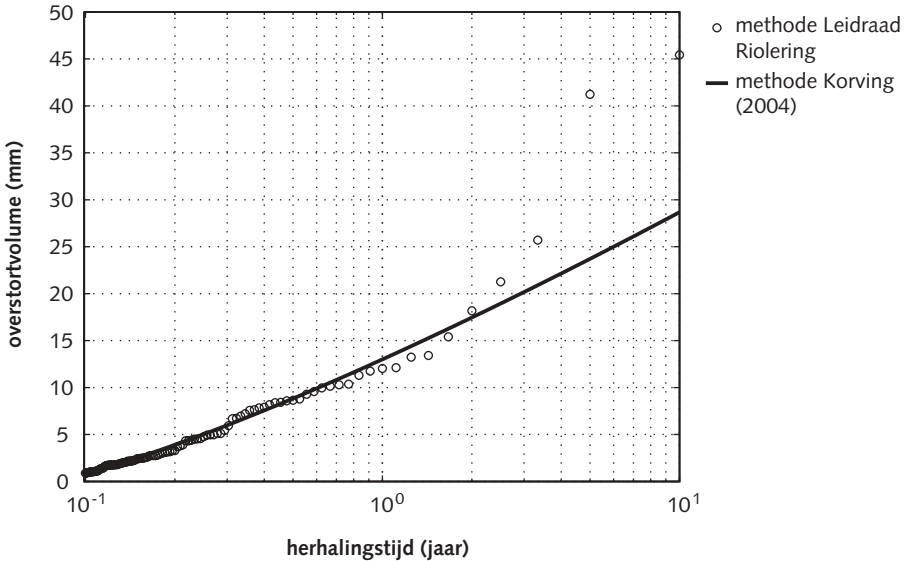
$$\frac{1}{T_{V_{OV} > v_0}} = \frac{1}{T_{OV}} * \Pr\{V_{OV} > v_0 \mid \mathbf{x}\} = \frac{1}{T_{OV}} (1 - \Pr\{V_{OV} \leq v_0 \mid \mathbf{x}\}) = \frac{1}{T_{OV}} (1 - F(v_0)) \quad (6)$$

waarin:

- $T_{V_{OV} > v_0}$  = de herhalingstijd van berekende overstortingsvolumes ( $V_{OV}$ ) groter dan  $v_0$
- $T_{OV}$  = de gemiddelde herhalingstijd van overstortingen onafhankelijk van het volume
- $\Pr\{V_{OV} > v_0 \mid \mathbf{x}\}$  = de kans op overschrijding van volume  $v_0$  gegeven de verzameling  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  van berekende overstortingsvolumes
- $F(v_0)$  = de cumulatieve kansdichtheidsfunctie van overstortingsvolumes.

De gemiddelde herhalingstijd van berekende overstortingen onafhankelijk van het volume is te berekenen volgens:

$$T_{OV} = \frac{\text{totaal aantal jaren waarin overstortformules gemeten of berekend zijn}}{\text{totaal aantal overstortingen}} \quad (7)$$



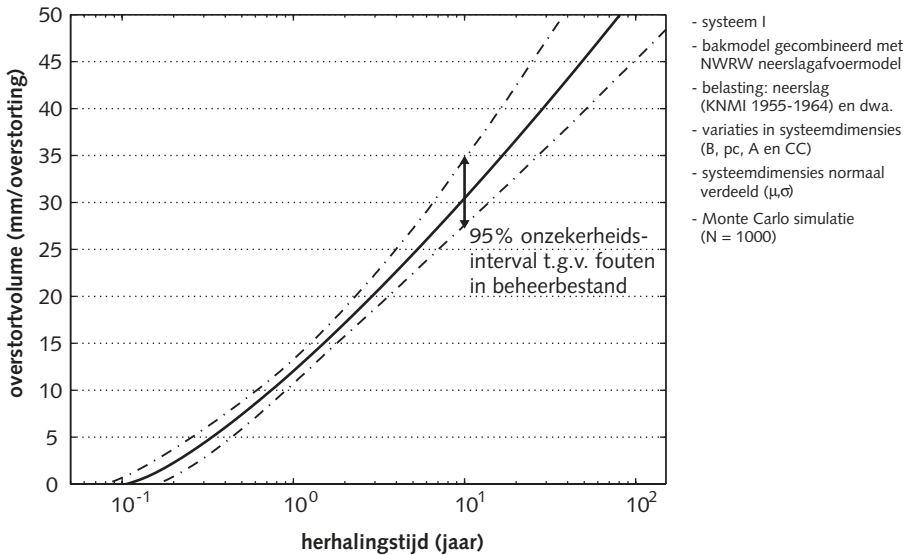
Figuur 11 Vergelijking van beschreven berekeningsmethode om herhalingstijd te bepalen met methode uit Leidraad Riolering

De beschreven methode wijkt af van de methode van de steekproefkwantielen uit de Leidraad Riolering (*Stichting RIONED, 1999*). Bij deze laatste methode worden de berekende overstortingsvolumes gesorteerd van groot naar klein. Hieruit worden de 25 hoogste waarden geselecteerd. Vervolgens wordt volgens de methode van de steekproefkwantielen aan de  $x^e$  gebeurtenis een herhalingstijd gekoppeld van één keer per  $25/x$  jaar. Bijvoorbeeld, de vijfde gebeurtenis uit de reeks met de 25 hoogste waarden heeft een herhalingstijd van één keer per vijf jaar. De 25<sup>e</sup> een herhalingstijd van één keer per jaar.

Bij grotere herhalingstijden levert de kwantielenmethode geen correcte schattingen op. Om de herhalingstijden te bepalen, gaat deze namelijk uit van de berekende volumes. Een overstortingsvolume dat één keer in een 25-jaarreeks voorkomt, hoeft vanwege de grote statistische onzekerheid niet per se een herhalingstijd van 25 jaar te hebben. De kwantielenmethode houdt alleen maar rekening met de overstortingsfrequentie en niet met de kans van vóórkomen van een bepaald overstortingsvolume. Bij herhalingstijden groter dan twee jaar leidt de methode uit de Leidraad tot een grote onderschatting van herhalingstijden (zie figuur 11). Volgens de kwantielenmethode heeft bijvoorbeeld een overstortingsvolume van 21,2 mm een herhalingstijd van 2,5 jaar, terwijl de herhalingstijd volgens de methode van Korving (2004) 3,5 jaar bedraagt.

Dit betekent dat herhalingstijden berekend met de kwantielenmethode betrouwbaar zijn tot de wortel van de lengte van de neerslagreeks. Bij gebruik van een 25-jarige reeks is de T=5-gebeurtenis dus nog betrouwbaar. Gebruikt u voor grotere herhalings-tijden toch de kwantielenmethode, dan hebt u een correctiefactor nodig. Het belang-rijkste blijft kritisch te kijken naar de rekenresultaten.

De methode uit Korving (2004) is toegepast op berekeningsresultaten van systeem I. In figuur 12 ziet u de berekende overstortingsvolumes per bui met de bijbehorende her-halingstijden. U ziet zowel het gemiddelde volume als het 95%-onzekerheidsinterval. Dit interval is gebaseerd op de 0,025- en 0,975-kwantielen van de berekende volumes. De figuur laat zien dat berekende overstortingsvolumes voor een bepaalde herhalings-tijd grote variatie vertonen. Zo is bij een herhalingstijd van 0,5 jaar het gemiddelde overstortingsvolume 6,1 mm en het 95%-onzekerheidsinterval 2,7 mm. Bij een her-halingstijd van vijf jaar zijn gemiddelde en onzekerheidsinterval toegenomen tot respectievelijk 22,0 mm en 6,2 mm.



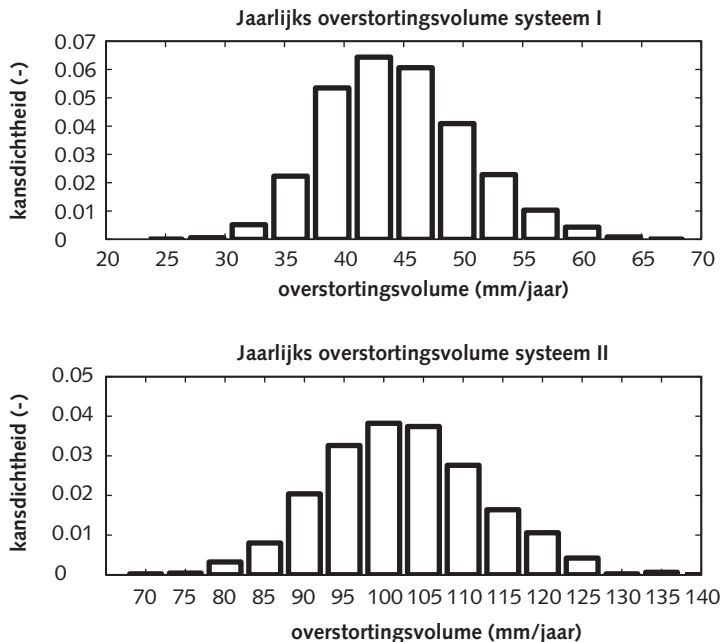
Figuur 12 Herhalingstijd van berekende overstortingsvolumes per bui voor systeem I (inclusief 95%-onzekerheidsinterval)

Overstortingsvolumes per bui zijn volgens de Weibull-functie verdeeld.

### 3.3 Resultaten

Fouten in het beheerbestand van een rioelstelsel hebben grote invloed op het functioneren van de riolering in termen van overstortingsvolumes per bui. De waargenomen spreiding in berekende overstortingsvolumes neemt toe bij grotere herhalingstijden (zie figuur 12). Vertaald naar jaarlijkse overstortingsvolumes leidt dit tot een spreiding ten opzichte van het gemiddelde van twintig procent naar boven en beneden (zie figuur 13). Dit is het 95%-interval.

Onzekerheid in het afvoerend oppervlak blijkt de grootste invloed te hebben op de spreiding in berekende volumes. Het is algemeen bekend dat het afvoerend oppervlak bij een inventarisatie veel groter kan zijn dan tot dan toe verondersteld. Dit heeft aanzienlijke gevolgen voor de berekende overstortingshoeveelheden. Zo verhoogt twintig procent meer verhard oppervlak voor systeem I het overstortingsvolume met 45 procent.



Figuur 13 Spreiding in berekend jaarlijks overstortingsvolume door fouten in beheerbestanden

Door onzekerheid in kennis over systeemdimensies variëren voor systeem I de berekende overstortingsvolumes met een bepaalde herhalingsstijd aanzienlijk. De spreiding neemt toe bij toenemende overstortingsvolumes (zie tabel 6). Dit geldt ook voor systeem II, maar hier is het gemiddelde overstortingsvolume als functie van de herhalingsstijd twee keer zo groot (zie tabel 7). Dit komt door de kleine berging in dit systeem.

**Tabel 6** Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem I op basis van een bakmodel met onzekere dimensies

Herhalingsstijd	Gemiddelde	95%-interval
0,25 jaar	3,35 mm	1,83-4,88
0,5 jaar	7,36 mm	5,88-8,78
1,0 jaar	12,00 mm	10,70-13,28
2,0 jaar	17,11 mm	15,77-18,77
5,0 jaar	24,44 mm	22,46-27,22
<b>jaargemiddelde</b>	<b>46,26 mm/a</b>	<b>35,77-59,13</b>

**Tabel 7** Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem II op basis van een bakmodel met onzekere dimensies

Herhalingsstijd	Gemiddelde	95%-interval
0,25 jaar	7,91 mm	6,95-8,89
0,5 jaar	11,53 mm	10,65-12,56
1,0 jaar	15,30 mm	14,45-16,43
2,0 jaar	19,20 mm	18,31-20,45
5,0 jaar	24,52 mm	23,42-26,10
<b>jaargemiddelde</b>	<b>104,97 mm/a</b>	<b>86,71-124,91</b>

## 4 Natuurlijke variatie in neerslag

### 4.1 Inleiding

Neerslag is de belangrijkste invoervariabele van een rioolmodel. Dit betekent dat onzekerheden over neerslaghoeveelheden veel invloed kunnen hebben op de rekenresultaten (Willems 2001b). Neerslagonzekerheid bestaat uit:

- natuurlijke variatie van de neerslag in de tijd;
- onzekerheid door vereenvoudiging van de werkelijke ruimtelijke spreiding in de neerslag tot een gebiedsgemiddelde waarde;
- onzekerheid door meetfouten.

#### 4.1.1 Ruimtelijke spreiding

32 |

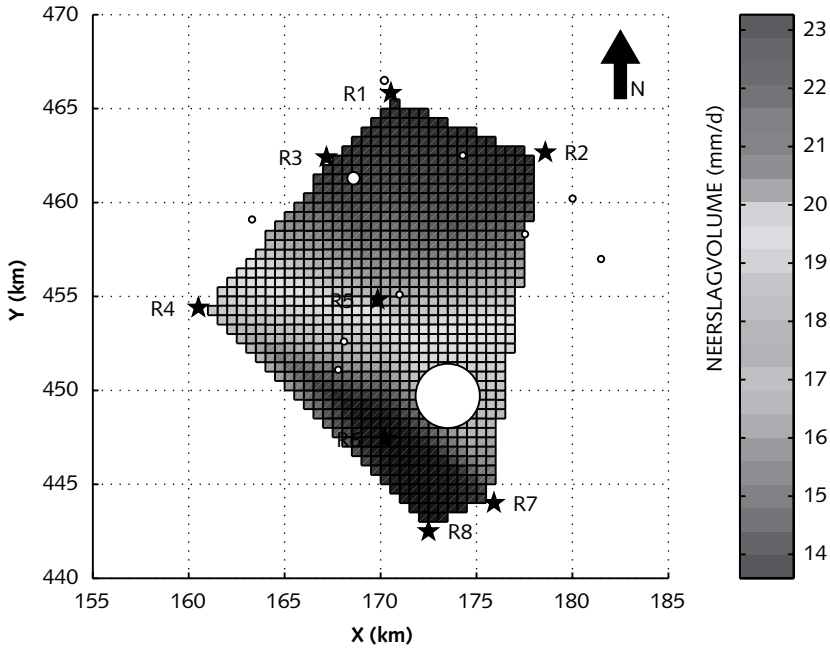
Uit de literatuur is bekend dat ruimtelijke spreiding in neerslag aanzienlijk kan zijn. Volgens Luyckx (*et al.* 1998) en Willems (2000) wordt ruimtelijke spreiding van belang voor analyses van afvalwatersystemen bij gebieden met een straal groter dan 12 à 15 km. Dit is de gemiddelde omvang van een regenbui. Verder wijst Vaes (*et al.* 2003) erop dat een neerslagstation zelden de piek van een bui registreert. Dit leidt al tot opvallende afwijkingen als de diameter van het totale gebied waarover de riolering zich uitstrekt groter is dan enkele kilometers. Om hiervoor te corrigeren, passen rioleringsbeheerders gewoonlijk ruimtelijke correctiefactoren toe.

Bacchi en Kottegoda (1995) concluderen op basis van een ruimtelijke correlatieanalyse dat de correlatie van de neerslagwaarnemingen op twee meetstations afneemt bij toenemende afstand tussen de stations. Bovendien neemt de gemiddelde bedekking van een gebied door neerslag parabolisch af als de oppervlakte van het gebied toeneemt, zolang de oppervlakte van het gebied kleiner is dan 80x80 km<sup>2</sup> (Onof en Wheeler, 1996). Dit betekent dat een piek in de neerslag relatief lokaal is.

De ruimtelijke variatie in neerslaghoeveelheden wordt in stedelijk gebied beïnvloed door het zogenaamde 'microklimaat' in de stad. Voorbeelden zijn grote temperatuurverschillen en de invloed van gebouwen op de wind (Buishand en Velds, 1980). De variaties kunnen relatief groot zijn en verschillen aanzienlijk van die in landelijk gebied.

In figuur 14 ziet u het ruimtelijke patroon van gemeten etmaalsommen rondom een rwzi in Nederland. De figuur is gebaseerd op de etmaalsommen van acht neerslagstations over de periode 1989-2003. De figuur laat zien dat de verschillen in neerslaghoeveelheden per dag aanzienlijk kunnen zijn. Bedenk hierbij wel dat meetfouten de verschillen ook kunnen veroorzaken.





Figuur 14 Ruimtelijke spreiding in de etmaalsom van één dag rondom een rwzi in Nederland  
De sterren zijn de neerslagmeters, de cirkels de kernen die naar de rwzi afvoeren.

Een onvoldoende dicht netwerk van neerslagmeters leidt tot een aanzienlijke vermindering van de betrouwbaarheid van neerslagmeting en modelresultaat. Systematische fouten zijn het gevolg van verkeerde aannamen over de ruimtelijke spreiding in de neerslag en de overheersende bewegingsrichting van buien (Vaes et al., 2003).

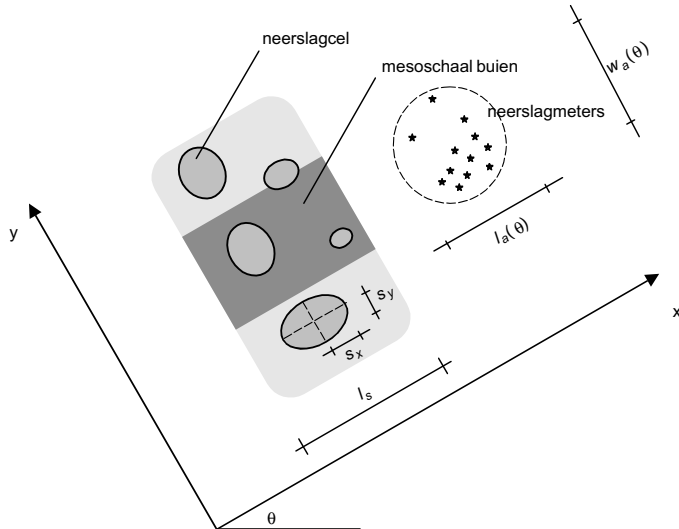
#### 4.1.2 Meetfouten

Bij meetprojecten in relatie tot de riolering worden meestal kantelbakregenmeters toegepast. In het algemeen geven deze regenmeters een onderschatting van hoge neerslagintensiteiten en een overschatting bij lage intensiteiten (Luyckx et al., 1998). Mogelijke oorzaken van meetfouten vindt u in tabel 8. Toch zijn kantelbakregenmeters voor rioleringsmeetprojecten voldoende nauwkeurig, omdat de onzekerheid over de hoeveelheid regenwater die afstroomt naar de riolering nog veel groter is dan de systematische fout van de regenmeter.

Tabel 8 Systematische fouten bij neerslagmeting met kantelbakregenermeters

Bron meetfout	Volumetrische fout	
windsnelheid	2 – 15 %	(Sevruk, 1996)
	3 – 5 %	(Luyckx et al., 1998)
bevochtiging wand	2 – 10 %	(Sevruk, 1982)
verdamping	0 – 4 %	(Sevruk, 1982)
spatten	1 – 2 %	(Sevruk, 1982)
kalibratie	10 %	(Rauch et al., 1998)
	3 – 4 %	(Luyckx et al., 1998)
verlies van sneeuw c.q. hagel (door verwarming)	30 %	(Rauch et al., 1998)
resolutiefout (per kantelbakvolume)	0,1 mm	(Luyckx et al., 1998)

34 |

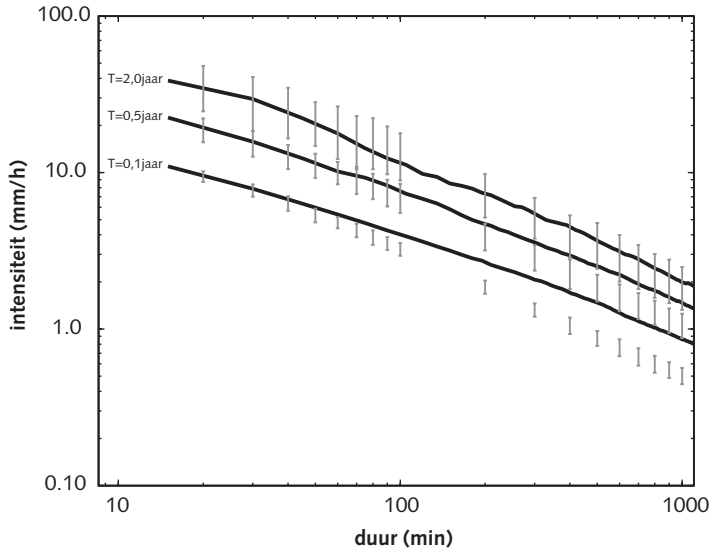


Figuur 15 Schematische weergave van de ruimtelijke structuur van de neerslag. Deze bestaat uit neerslagcellen en (mesoschaal) buien (overgenomen met toestemming uit Willems, 2001a), waarin:

- $s_x$  = de dimensie van een neerslagcel in de gemiddelde bewegingsrichting ( $\theta$ )
- $s_y$  = de dimensie van een neerslagcel loodrecht op  $\theta$
- $l_s$  = de ruimtelijke schaal van een (mesoschaal) bui
- $l_a(\theta)$  en  $w_a(\theta)$  = de afmetingen van het gebied met neerslagmeters respectievelijk in de bewegingsrichting  $\theta$  en loodrecht op  $\theta$ .

## 4.2 Ruimtelijke neerslaggenerator

De natuurlijke variatie in de neerslag kunt u modelleren met een ruimtelijke neerslaggenerator (zie figuur 15). Willems (2001a) heeft speciaal voor stedelijke gebieden een neerslaggenerator ontwikkeld. De generator is gekalibreerd op basis van neerslagmetingen uit een dicht netwerk van neerslagstations in Antwerpen. Met de generator kunt u zo lang mogelijke neerslagtijdreeksen simuleren. Bovendien is het mogelijk met de generator de invloed van anders geordende extremen dan in de De Bilt-reeks te onderzoeken.



Figuur 16 Vergelijking van IDF-curves (intensiteit-duur-frequentie) (1) De Bilt, 1955-1979 (dikke lijnen) en (2) betrouwbaarheidsintervallen gebaseerd op vijfhonderd gesimuleerde neerslagtijdreeksen (verticale intervallen).

De neerslaggenerator uit Antwerpen kunt u gebruiken voor rioolstelsels in Nederland, omdat volgens Vaes (*et al.*, 2002) het neerslagklimaat in Nederland en België grote overeenkomsten vertoont wat betreft IDF-relaties (intensiteit-duur-frequentie). Meer informatie over IDF-relaties vindt u in *Buishand en Velds, 1980* en *Vaes et al., 2002*.

In figuur 16 ziet u de IDF-curves voor de bekende neerslagreeksen uit De Bilt en vijfhonderd met de generator gesimuleerde neerslagtijdreeksen. Hieruit kunt u concluderen dat de betrouwbaarheidsintervallen van de gesimuleerde reeksen de IDF-curves voor De Bilt omsluiten. Dit betekent dat de gesimuleerde reeksen lijken op de neerslag uit De Bilt. Maar dit geldt niet voor buien die langer dan één uur duren en vaker dan vijf keer per jaar voorkomen. Dan lijkt de generator het totale buivolume enigszins te onderschatten.

### 4.3 Onzekerheidsanalyse

Op basis van de twee voorbeelden uit hoofdstuk 3 is de invloed van natuurlijke variatie in de neerslag op de berekende prestaties van een rioolstelsel onderzocht. Voor beide systemen is een Monte Carlo-simulatie van vijfhonderd modelberekeningen uitgevoerd. In elke berekening is met de neerslaggenerator een tijdreeks met een lengte van tien jaar gesimuleerd, die bestaat uit neerslagsommen per tien minuten. Deze reeksen zijn gebruikt als modelinvoer.

De resultaten zijn geanalyseerd zoals beschreven in hoofdstuk 3. Om de onzekerheid in berekende overstortingsvolumes te beschrijven, zijn zowel de gemiddelde herhalings-tijd als de 95%-onzekerheidsbanden meegenomen.

36 |

### 4.4 Resultaten

Over het algemeen is de variatie in berekende overstortingsvolumes groter door natuurlijke variatie in de neerslag dan door fouten in de beheerbestanden. Maar neerslagvariatie resulteert in kleinere gemiddelde jaarvolumes (vergelijk tabel 6 en 9, en tabel 7 en 10). Deze verschillen zijn deels te verklaren op basis van IDF-relaties. Door de relatief grote variatie in neerslagvolumes bij herhalingstijden groter dan één jaar bevatten de gesimuleerde neerslagtijdreeksen extremere buien dan de meetreeks uit De Bilt. Aan de andere kant zorgt de systematische onderschatting van buien die langer dan één uur duren en relatief vaak voorkomen voor gemiddeld genomen lagere neerslagsommen per jaar.

In tabel 9 vindt u een samenvatting van de berekeningsresultaten voor systeem I, in tabel 10 van systeem II. In beide systemen neemt de variatie in berekende overstortingsvolumes toe bij toenemende herhalingstijden. Bovendien is het 95%-onzekerheidsinterval (gebaseerd op het 0,025- en 0,975-kwantiel) relatief ruim vergeleken met de gemiddelde waarden. Dit komt deels door de extremen die al dan niet in een gesimuleerde neerslagtijdreeks terechtgekomen zijn.

**Tabel 9** Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem I op basis van een bakmodel rekeninghoudend met natuurlijke neerslagvariatie

---

<b>Herhalingstijd</b>	<b>Gemiddelde</b>	<b>95%-interval</b>
0,25 jaar	1,56 mm	0,14-3,53
0,5 jaar	5,91 mm	3,24-9,27
1,0 jaar	11,40 mm	7,00-16,55
2,0 jaar	17,70 mm	10,79-25,29
5,0 jaar	27,03 mm	15,43-41,14
<b>jaargemiddelde</b>	<b>38,17 mm/a</b>	<b>21,90-57,24</b>

---

**Tabel 10** Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem II op basis van een bakmodel rekeninghoudend met natuurlijke neerslagvariatie

---

<b>Herhalingstijd</b>	<b>Gemiddelde</b>	<b>95%-interval</b>
0,25 jaar	5,57 mm	4,00-7,38
0,5 jaar	9,87 mm	7,15-12,74
1,0 jaar	14,71 mm	10,42-19,78
2,0 jaar	19,97 mm	13,80-26,95
5,0 jaar	27,48 mm	18,53-38,03
<b>jaargemiddelde</b>	<b>69,56 mm/a</b>	<b>48,19-91,63</b>

---

# 5 Kalibratie van hydrodynamische modellen

## 5.1 Inleiding

Bij modelkalibratie past u de modelstructuur (bijvoorbeeld een bakmodel of een volledig hydrodynamisch model) en modelparameters zodanig aan, dat de modelresultaten zo goed mogelijk overeenstemmen met metingen. Maar een model bevat systematische fouten door onbekende parameterwaarden, fouten in de beheerbestanden en sterk vereenvoudigde procesbeschrijvingen (bijvoorbeeld neerslagafvoer). Metingen geven op hun beurt een incompleet beeld van het systeemgedrag en bevatten meetonnauwkeurigheden.

38 |

Kalibratie laat de discrepanties tussen model en waargenomen werkelijkheid zien. Dit maakt het mogelijk om systematische fouten te kwantificeren, te identificeren en mogelijk op te lossen. Meer informatie over kalibratie van rioolmodellen vindt u in *Clemens, 2001* en *Stichting RIONED, 2001*. In Nederland zijn nog nauwelijks modellen van rioolstelsels gekalibreerd. Gevolg is onnodige onzekerheid over berekende overstortingsvolumes en daarmee minder effectieve investeringsvoorstellen.

## 5.2 Modelkalibratie

### 5.2.1 Beschrijving voorbeelden

De beschrijving van de voorbeelden (systeem I en II) vindt u in subparagraaf 3.2.1. In beide rioolstelsels is een meetnet geïnstalleerd om gegevens te verzamelen over het functioneren van het stelsel en vervolgens een model te kunnen kalibreren. Er zijn waterstanden gemeten op verschillende locaties in de stelsels (zie figuur 8 en 9). Daarnaast staat in beide systemen op twee locaties een neerslagmeter.

Gedurende de meetperiode (3-4 maanden) zijn in beide systemen buien gemeten die voldoende betrouwbaar zijn om een model mee te kalibreren. Slechts een klein aantal hiervan leidde tot een overstorting. De voor kalibratie geselecteerde buien van systeem I en II vindt u in respectievelijk tabel 11 en 12.

Tabel 11 Overzicht geselecteerde buien systeem I

Bui	Herhalingstijd (jaar)	Neerslag (mm)	
25-08-1998	0,10 - 0,20	16,4	Overstorting en lage grondwaterstand (kleine dwa)
07-10-1998	0,05 - 0,10	14,4	Geen overstorting
24-10-1998	0,05 - 0,10	21,6	Overstorting en hoge grondwaterstand (grote dwa)

Tabel 12 Overzicht geselecteerde buien systeem II

Bui	Herhalingstijd (jaar)	Neerslag (mm)	
18-07-2001	0,10 - 0,20	13,9	Overstorting
27-08-2001	0,25 - 0,50	17,6	Overstorting
07-11-2001	0,05 - 0,10	13,1	Overstorting, bui bestaat uit twee losse periodes met neerslag en waterstand in overstortvijver juist boven overstort-drempel, waardoor terugstroming optreedt

Het toegepaste model is Hydroworks<sup>®</sup>, versie 6.0 (Wallingford Software, 2000). Dit is een hydrodynamisch model dat het rioolstelsel beschrijft als een netwerk van strengen (riolen) en knopen (zoals putten, wervelventielen en overstorten). Als neerslagafvoer-model is het 'NWRW 4.3'-model uit module C2100 van de Leidraad Riolerings (Stichting RIONED, 1999) toegepast.

### 5.2.2 Kalibratieprocedure

De hydrodynamische modellen van systeem I en II zijn gekalibreerd op basis van drie buien. Hierbij is de kalibratieprocedure gevolgd zoals beschreven in Clemens (2001) en Stichting RIONED (2001). Deze procedure bestaat uit de volgende onderdelen:

- controle op structurele fouten in het beheerbestand;
- selectie van buien en modelparameters voor de kalibratie;
- optimalisatie van de waarde van de modelparameters;
- analyse van de residuen (verschillen tussen modelresultaten en metingen).

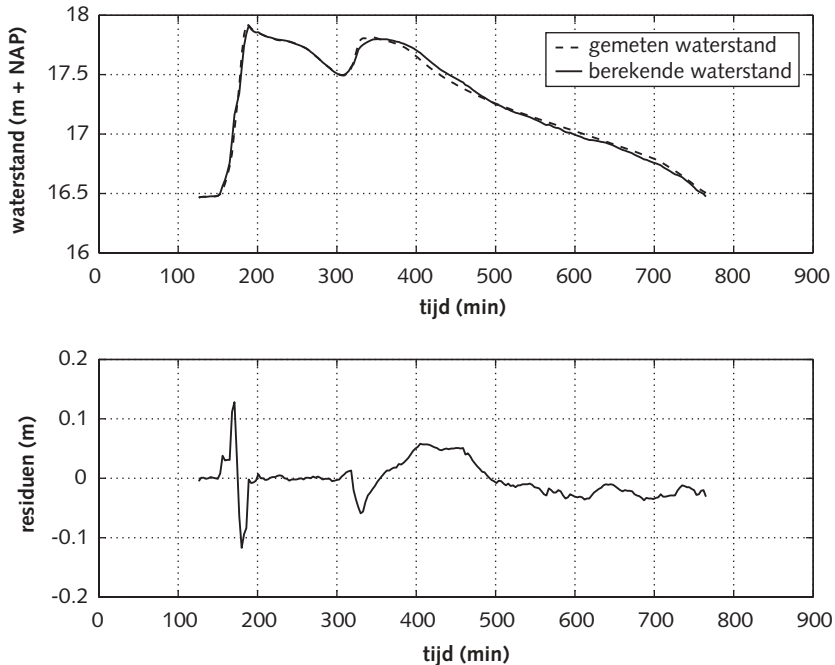
De gekalibreerde parameters bestaan uit dwa ( $N_1$ ), berging op straat ( $B^*$ ), routing coëfficiënt ( $F^*$ ), maximale infiltratiecapaciteit ( $I^*$ ) en overlaatcoëfficiënt ( $CC^*$ ). Deze vijf parameters hebben betrekking op de randen van het systeem.  $N_1$ ,  $B^*$ ,  $F^*$  en  $I^*$  spelen een rol aan de invoerkant,  $CC$  aan de uitvoerkant. Kalibratie van 'interne' modelparameters (bijvoorbeeld wandruwheid) bleek geen significante bijdrage te leveren aan een betere *fit*.

De kwaliteit van het kalibratieresultaat is beoordeeld aan de hand van de residuen (zie figuur 17 en 18) en de (relatieve) bias van de modelresultaten. De kansverdeling van de residuen (zie figuur 19) is het resultaat van een aaneenschakeling van toevallige fouten door meetonnauwkeurigheden en afrondingsfouten in het model. Als er een systematische fout in het model zit, is dat direct herkenbaar in de verdelingsfunctie.

Bias kunt u als variaties in modelresultaten waarnemen als u het model hebt gekalibreerd op gegevens die u hebt verzameld onder verschillende omstandigheden, bijvoorbeeld dwa-condities of tijdens overstorten. Maar u past het model aan de overheersende systeemkenmerken aan. Grote (relatieve) bias wijst erop dat na kalibratie nog steeds systematische fouten in het model zitten.

40 |

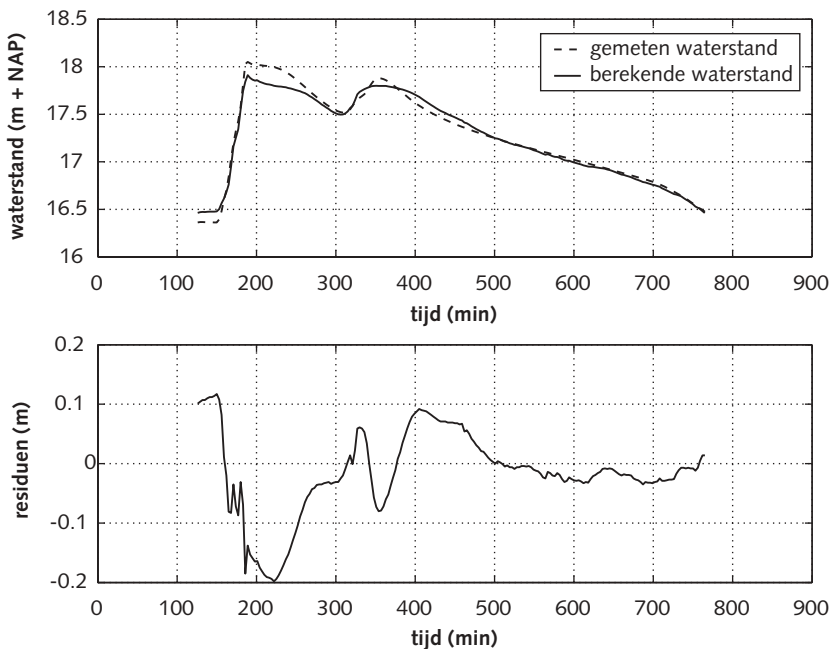
Als u tijdens de kalibratie structurele fouten uit het model verwijdert, wordt de bias kleiner en verbetert het kalibratieresultaat. Structurele fouten zijn onder meer geometrische fouten (zoals verkeerde bob's), onjuiste drempelhoogtes van overstorten of berging in huisaansluitingen en straatkolken.



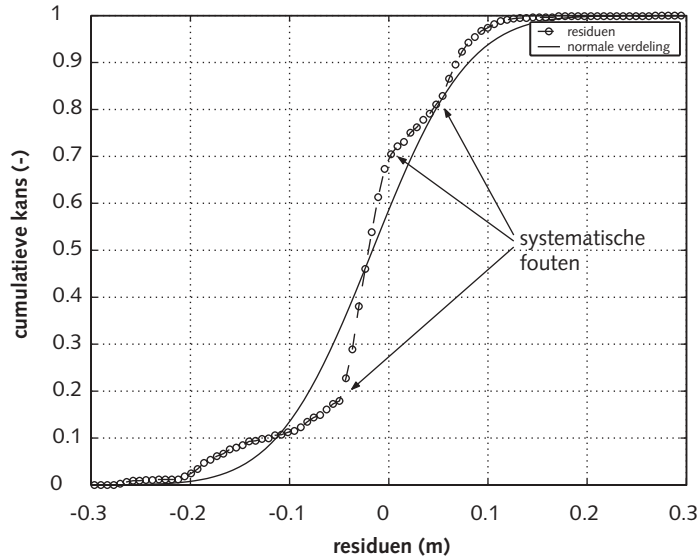
Figuur 17 Vergelijking van gemeten en berekende waterstanden in systeem II op locatie S03 (zie figuur 9) gedurende de bui van 27-08-2001, zonder structurele fouten



In figuur 17 ziet u de resultaten van een kalibratie van het model van systeem II, waarbij de structurele fouten uit het model zijn verwijderd. De belangrijkste fout betrof de hoogte van de overstortdrempel. Deze was 25 cm lager dan vermeld in het beheerbestand. Dezelfde kalibratie is uitgevoerd zonder de drempelhoogte aan te passen. De resultaten hiervan vindt u in figuur 18. Het verschil tussen gemeten en berekende waterstanden is nu veel groter. Aan de knikken in de cumulatieve kansverdeling van residuen in figuur 19 is te zien dat er nog systematische fouten in het model zitten. Kalibratie zonder verwijdering van systematische fouten leidt in dit geval tot een forse onderschatting van het jaarlijkse overstortingsvolume: 25 mm/a in plaats van 65 mm/a. Met kalibratie zijn ook minder triviale fouten dan de drempelhoogte op te sporen.



Figuur 18 Vergelijking van gemeten en berekende waterstanden in systeem II op locatie S03 (zie figuur 9) gedurende de bui van 27-08-2001, met structurele fouten



Figuur 19 Cumulatieve kansdichtheid van residuen in systeem II bij kalibratie met de bui van 27-08-2001  
Tijdens de kalibratie zijn structurele fouten niet uit het model verwijderd. De knikken in de kansverdeling van de residuen duiden op de aanwezigheid van structurele fouten.

### 5.2.3 Resultaten

De waarden van de gekalibreerde parameters in een hydrodynamisch model verschillen van bui tot bui. In tabel 13 en 14 ziet u de waarden van de kalibratieparameters voor systeem I en II. De verschillen worden veroorzaakt door processen die zich afspeelen op een langere tijdschaal dan de duur van een bui. Deze processen staan niet in het rioolmodel, maar bepalen voor een groot gedeelte de initiële toestand van elke kalibratie. Voorbeelden van dergelijke processen zijn:

- verschillende initiële condities van afvoerende oppervlakken voor beschikbare berging en maximale infiltratiecapaciteit;
- mogelijke sedimentafzettingen in het rioelstelsel;
- verhoogde infiltratie door hoge grondwaterstanden of lekkage van rioelwater naar het grondwater tijdens de zomer bij lage grondwaterstanden;
- beïnvloeding door waterstanden in de overstortvijver hoger dan de overstortdrempel en mogelijke terugstroming vanuit de overstortvijver naar het rioelstelsel;
- sterk fluctuerende industriële lozingen;
- mogelijke vertraagde afvoer vanaf (on)verharde oppervlakken.

Tabel 13 Waarden van gekalibreerde modelparameters voor systeem I

Parameter	Bui 25-08-1998		Bui 07-10-1998		Bui 24-10-1998	
	Gem.	95%-interval	Gem.	95%-interval	Gem.	95%-interval
$N_1$ (m <sup>3</sup> /h)	26,2	26,0-26,3	–	–	52,0	50,6-53,3
$B^*$ (mm)	0,49	0,47-0,51	–	–	0,45	0,42-0,48
$B_2$ (mm)	–	–	3,34	2,96-3,77	–	–
$B_7$ (mm)	–	–	0,28	0,20-0,39	–	–
$F^*$ (s)	277,0	261,2-292,9	–	–	669,6	645,8-693,4
$F_2$ (s)	–	–	742,6	604,0-913,0	–	–
$F_7$ (s)	–	–	742,6	604,0-913,0	–	–
$I^*$ (mm/h)	0,23	0,22-0,23	–	–	0,18	0,18-0,19
$I_2$ (mm/h)	–	–	0,13	0,10-0,18	–	–
$I_7$ (mm/h)	–	–	0,10	0,07-0,14	–	–
$CC^*$ (m <sup>1/2</sup> /s)	1,04	1,00-1,07	–	–	1,28	1,14-1,43

| 43

Tabel 14 Waarden van gekalibreerde modelparameters voor systeem II

Parameter	Bui 18-07-2001		Bui 27-08-2001		Bui 07-11-2001	
	Gem.	95%-interval	Gem.	95%-interval	Gem.	95%-interval
$N_1$ (m <sup>3</sup> /h)	104,4	104,3-104,5	66,4	66,3-66,5	59,9	79,4-79,7
$B^*$ (mm)	2,10	2,09-2,10	1,91	1,90-1,91	0,85	0,85-0,86
$F^*$ (s)	88,7	88,4-89,0	540,4	534,7-546,2	303,0	300,9-305,2
$I^*$ (mm/h)	0,44	0,42-0,45	0,46	0,45-0,46	0,35	0,35-0,35
$CC^*$ (m <sup>1/2</sup> /s)	0,82	0,80-0,84	0,99	0,97-1,01	0,79	0,78-0,79

### 5.3 Onzekerheidsanalyse

De invloed van resterende onzekerheid in de gekalibreerde parameters is met Monte Carlo-simulatie onderzocht. Met de gekalibreerde modellen van systeem I en II zijn simulaties uitgevoerd, waarbij respectievelijk 250 en 180 keer van alle vijf de parameters ( $N_1$ ,  $B^*$ ,  $I^*$ ,  $F^*$  en  $CC^*$ ) een waarde uit hun verdelingsfuncties is getrokken. De spreiding per parameter is normaal verdeeld met een gemiddelde en 95%-betrouwbaarheidinterval, zoals u ziet in respectievelijk tabel 13 en 14.

Door het kalibreren zijn de modelparameters gecorreleerd. Daarom is in de Monte Carlo simulaties een afhankelijke trekking uitgevoerd. Zo'n afhankelijke trekking heet 'Cholesky-decompositie'. Concreet betekent dit dat bij trekking van vijf parameters na het trekken van vier parameterwaarden de waarde van de vijfde al vastligt. De getrokken waarden zijn gesubstitueerd in het hydrodynamische model van het rioolstelsel.

De belasting van het stelsel bestaat uit neerslag en dwa. Voor de berekeningen is een periode van tien jaar (1955-1964) gebruikt uit de bekende neerslagreeks van het KNMI (*De Bilt, 1955-1979*). Deze reeks bestaat uit kwartiersommen van gemeten neerslagvolumes.

De resultaten zijn geanalyseerd zoals beschreven in hoofdstuk 3. Om de onzekerheid in berekende overstortingsvolumes te beschrijven, zijn zowel het gemiddelde als de 95%-onzekerheidsband meegenomen.

44 |

#### **5.4 Resultaten**

De resultaten laten zien dat modelkalibratie op basis van individuele buien niet tot betrouwbaardere modelvoorspellingen leidt. Maar met kalibratie kunt u systematische fouten in het beheerbestand van een rioolstelsel opsporen en verwijderen. Dat is een belangrijke winst, want deze fouten kunnen leiden tot grote afwijkingen.

In tabel 15 en 16 ziet u de resultaten voor systeem I en II. U vindt er de spreiding in berekende overstortingsvolumes per model gekalibreerd op basis van één bui. Deze spreiding is gebaseerd op berekeningen met een tienjarige neerslagreeks. De verschillen tussen de kalibraties onderling zijn aanzienlijk. Dit werpt de vraag op of een bui die gebruikt is voor een kalibratie representatief kan zijn voor een langere periode. Het gaat hierbij met name om de initiële condities van buien (zoals beschikbare berging op straat) en randvoorwaarden (zoals infiltratie door hoge grondwaterstanden).

Als u tabel 7 en tabel 16 vergelijkt, ziet u dat een bakmodel de overstorthoeveelheden voor hellende gebieden (zoals systeem II) overschat. Dat komt omdat dynamische berging niet wordt meegenomen. Dit betekent dat u voor hellende systemen het rioolstelsel beter kunt modelleren met een reeks van geschakelde bakjes dan één enkele bak. Een deel van de bakjes representeert dan de statische berging, een ander deel de dynamische berging.

**Tabel 15** Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem I op basis van reeksberekeningen met een hydrodynamisch model gekalibreerd met drie verschillende buien

	<b>Herhalings<span>­</span>tijd</b>	<b>Gemiddelde</b>	<b>95%-interval</b>
Bui 25-08-1998	0,25 jaar	3,00 mm	2,96-3,03
	0,5 jaar	6,79 mm	6,75-6,81
	1,0 jaar	11,11 mm	11,08-11,14
	2,0 jaar	15,83 mm	15,73-15,90
	3,0 jaar	18,73 mm	18,60-18,85
	5,0 jaar	22,54 mm	22,35-22,71
	<b>jaargemiddelde</b>	41,50 mm/a	41,40-41,60
Bui 07-10-1998	0,25 jaar	3,79 mm	3,28-4,27
	0,5 jaar	7,78 mm	7,39-8,21
	1,0 jaar	12,21 mm	11,95-12,59
	2,0 jaar	16,95 mm	16,58-17,51
	3,0 jaar	19,86 mm	19,28-20,66
	5,0 jaar	23,63 mm	22,75-24,80
	<b>jaargemiddelde</b>	48,40 mm/a	45,20-52,70
Bui 24-10-1998	0,25 jaar	3,76 mm	3,62-3,91
	0,5 jaar	7,74 mm	7,70-7,80
	1,0 jaar	12,20 mm	11,97-12,45
	2,0 jaar	17,03 mm	16,39-17,66
	3,0 jaar	19,99 mm	19,06-20,90
	5,0 jaar	23,86 mm	22,52-25,18
	<b>jaargemiddelde</b>	48,10 mm/a	47,90-48,30

Tabel 16 Statistiek van berekende overstortingsvolumes voor systeem II op basis van reeksberekeningen met een hydrodynamisch model gekalibreerd met drie verschillende buien

	<b>Herhalingstijd</b>	<b>Gemiddelde</b>	<b>95%-interval</b>
Bui 18-07-2001	0,25 jaar	5,63 mm	5,51-5,71
	0,5 jaar	8,98 mm	8,91-9,05
	1,0 jaar	12,46 mm	12,44-12,48
	2,0 jaar	16,03 mm	15,98-16,17
	3,0 jaar	18,16 mm	18,06-18,37
	5,0 jaar	20,88 mm	20,71-21,20
	<b>jaargemiddelde</b>	65,60 mm/a	64,70-66,40
Bui 27-08-2001	0,25 jaar	5,18 mm	5,12-5,22
	0,5 jaar	8,51 mm	8,49-8,54
	1,0 jaar	12,02 mm	12,00-12,10
	2,0 jaar	15,68 mm	15,60-15,86
	3,0 jaar	17,87 mm	17,75-18,12
	5,0 jaar	20,68 mm	20,50-21,03
	<b>jaargemiddelde</b>	60,60 mm/a	60,20-60,90
Bui 07-11-2001	0,25 jaar	6,71 mm	6,71-6,71
	0,5 jaar	10,08 mm	10,07-10,10
	1,0 jaar	13,61 mm	13,59-13,66
	2,0 jaar	17,25 mm	17,22-17,35
	3,0 jaar	19,43 mm	19,39-19,56
	5,0 jaar	22,22 mm	22,17-22,39
	<b>jaargemiddelde</b>	84,20 mm/a	84,10-84,30

## 6 Gemalenbeheer

### 6.1 Inleiding

Gemalen en persleidingen zijn kritische onderdelen in een rioolsysteem. Vaak is er per bemalingsgebied van beide maar één aanwezig. Bij de beoordeling van het hydraulisch functioneren van een rioolstelsel veronderstellen rioleringsbeheerders dat gemalen altijd beschikbaar zijn. Maar in de praktijk blijkt dat bij gemalen storingen kunnen optreden (bijvoorbeeld door verstoppingen) of voor onderhoud (deels) buiten bedrijf zijn. Bij het NWRW-onderzoek in de jaren tachtig is al onderkend dat pompstoringen kunnen leiden tot overstortingen onder dwa-omstandigheden (NWRW, 1989a en 1989b).

Een storing of het buiten bedrijf zijn van één of meer pompen in een gemaal kan grote invloed hebben op de jaarlijkse hoeveelheid overstortend water. Bijvoorbeeld als een pomp tijdens dwa in storing valt en er geen reservecapaciteit is. Dan vult eerst het gehele stelsel zich met afvalwater, totdat het waterpeil boven de overstortdrempel komt en het stelsel begint over te storten. Dit betekent dat onverdund afvalwater het oppervlaktewater instroomt. Maar voor de invloed van pompstoringen op het hydraulisch functioneren van een rioolstelsel was tot nu toe weinig aandacht.

| 47

### 6.2 Pompstoringen

#### 6.2.1 Definitie pompstoringen

Een pompstoring is: het onvermogen van een pomp om de taak uit te voeren waarvoor hij oorspronkelijk ontworpen was, namelijk afvalwater transporteren tot maximaal zijn ontwerpcapaciteit.

De configuratie van de pompen in het gemaal is sterk bepalend voor de gevolgen van een pompstoring. Als pompen elkaars functie kunnen overnemen, kan het gemaal ondanks het uitvallen van één van de pompen toch het aanbod van afvalwater blijven verwerken.

#### 6.2.2 Faalmechanismen pompen in rioolgemalen

Een pompinstallatie bestaat uit verschillende onderdelen: een elektrotechnische installatie, frequentieomvormer (of andere schakeling), elektromotor, pomp, zuigafsluiter, terugslagklep en persafsluiter. Als één hiervan in storing gaat of buiten bedrijf is, is de totale pompfunctie niet beschikbaar en faalt de pomp. Een faalmechanisme is de manier waarop een systeem (een pomp) reageert op een ongewenste gebeurtenis of bedreiging (CUR, 1997), bijvoorbeeld verstopping van de pomp door meegevoerd vuil.

De storingsfrequentie van pompen is afhankelijk van (Joosten, 2002):

- de samenstelling van het afvalwater;
- de opeenvolging van droge en natte periodes;
- het lozingsgedrag van huishoudens binnen het bemalingsgebied;
- het type rioolstelsel;
- de technische staat van de riolering (bijvoorbeeld verzakkingen met als gevolg zandinloop, infiltratie van grondwater en verloren berging);
- de reinigingsfrequentie van het rioolstelsel en het straatoppervlak;
- de stromingstoestand in het riool;
- de inrichting van de gemaalkelder (afmetingen, locatie pompen, schakelpeilen);
- luchtinsluitingen in het slakkenhuis van de pomp of in de persleiding.

### 6.3 Storingsregistratie

Voor onderzoek naar de invloed van pompstoringen op het functioneren van rioolstelsels zijn praktijkgegevens nodig. Hiervoor zijn vijf jaar storingsgegevens van twee grote gemeenten gebruikt. Beide gemeenten hanteren een goede storingssignalering en een adequate storingsafhandeling. De gegevens bestaan uit meldingen van pompstoringen, in- en uitslagen van pompen, gemeten rioolwaterstanden en neerslagvolumes. Bij beide gemeenten waren minstens over vier jaar gegevens van veel gemalen beschikbaar. Van gemeente A en B zijn respectievelijk achttien en zeven gemalen geselecteerd. Dit leidt tot een totaal van 66 pompen, zowel in natte als droge opstelling. Gemeente B heeft ook logboeken bijgeleverd, waarin een gedeelte van de storingen en bijbehorende reparaties staan beschreven.

#### 6.3.1 Beschrijving voorbeelden

Het rioolstelsel van gemeente A bestaat uit veel districten met voornamelijk gemengde riolen, die de neerslag en het afvalwater onder vrijverval afvoeren. Tussen de districten zitten dwarsverbindingen die (waar nodig) gebruikt kunnen worden om de afvoer zo optimaal mogelijk te laten verlopen. Voor de sturing hebben de gemalen 'programmable logic controllers' (PLC's) die het debiet regelen op basis van de gemeten waterstand in de pompkelder. De meeste gemalen hebben afzonderlijke pompen voor droogweerafvoer (dwa), regenwaterafvoer (rwa) en soms voor zogenaamde overstortbemaling (ob). Van overstortbemaling is sprake als een gemaal met één van de aanwezige pompen bij hevige neerslag het water direct kan lozen op het oppervlaktewater. Van de grotere gemalen kunnen de pompen in voorkeuze worden gezet. De voorkeuze kan automatisch of handmatig worden aangepast.

In het stelsel van gemeente B bevinden zich in het algemeen vrijvervalriolen. Het overgrote deel (70%) van dit stelsel is gescheiden uitgevoerd, de rest gemengd. De meeste gemalen hebben reservepompcapaciteit om de gevolgen van pompstoringen te minima-



liseren. Zo kunnen bij een gemaal met twee pompen beide pompen zowel dwa als rwa verpompen. Voor de sturing hebben de gemalen PLC's. Deze controllers regelen het debiet van de pompinstallatie op basis van de gemeten waterstand in de pompput. Bij veel gemalen met twee identieke pompen worden de pompen afwisselend in voorkeuze gezet. Dit houdt in dat elke keer dat een pomp wordt uitgeschakeld, de andere pomp de voorstaande pomp wordt en bij een nieuwe pompvraag in werking treedt. Enkele gemalen hebben ook een pomp voor overstortbemaling.

### 6.3.2 Typen storingen

De twee gemeenten registreren verschillende typen storingen. Dit komt door verschillen in het onderhoudsbeleid, de beschikbaarheid van back-upcapaciteit in een gemaal en de definitie van een pompstoring. Dit laatste is vaak niet formeel vastgelegd, maar kunt u afleiden uit de storingstypen.

| 49

#### *Gemeente A*

Gemeente A signaleert drie storingen automatisch:

- thermische storingen;
- mechanische storingen;
- elektrische storingen.

Thermische storingen zijn bij gemeente A een indicatie voor oververhitting van de pomp-motor of een te grote stroom in het elektrische gedeelte van de pompinstallatie. In beide gevallen onderbreekt het thermisch relais in de pompinstallatie de stroomvoorziening.

Van een mechanische storing is sprake als de terugslagklep in de persleiding niet (volledig) opent terwijl de pomp wel is gestart. De terugslagklep beschermt de pomp tegen terugstroming, bijvoorbeeld als de pomp stilvalt en er geen drukhoogte wordt ontwikkeld. Een mechanische storing wordt veroorzaakt door te weinig drukhoogte of debiet, bijvoorbeeld door verstopping van de aanzuigopening of lucht in de persleiding.

Elektrische storingen wijzen op onjuiste schakelingen bij het opstarten van de elektromotor van de pomp. Pompen kunnen op verschillende manieren worden ingeschakeld, bijvoorbeeld traploos met een frequentieomvormer of direct met een ster-driehoek-schakeling. Alle typen schakelingen kunnen tot een storing leiden.

### *Gemeente B*

Gemeente B kent signaleringen voor:

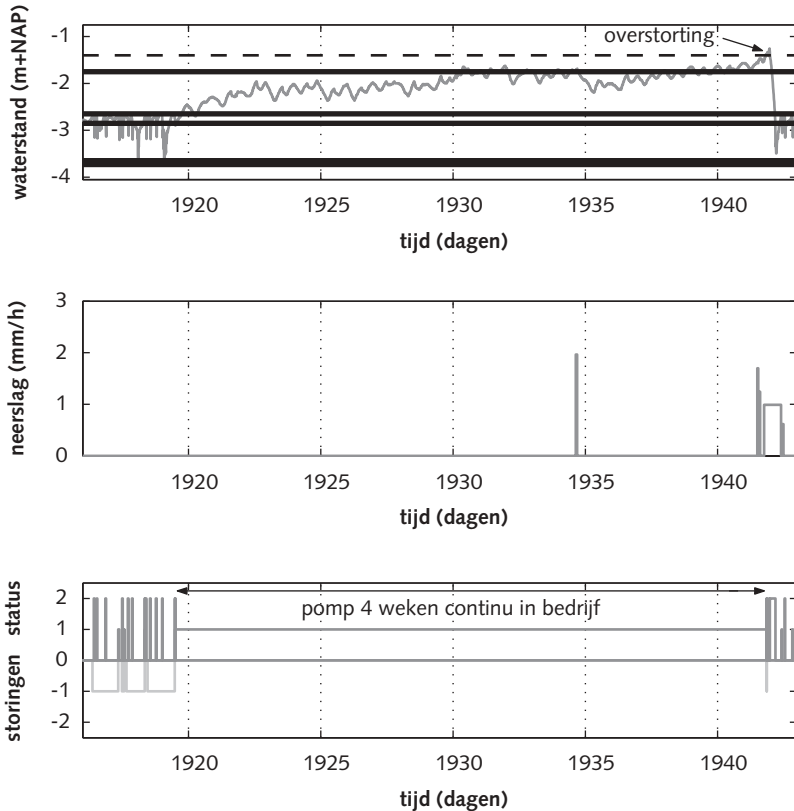
- thermische storingen;
- installatiestoringen;
- hoogwatersignaleringen.

Thermische storingen bestaan bij gemeente B uit een verzameling van verschillende storingen. Zij kunnen wijzen op een oververhitting van de pompmotor, een te grote elektrische stroom door een geleider of een onjuiste schakelactie bij het opstarten van de elektromotor van de pomp.

50 |

Installatiestoringen bestaan uit verschillende minder urgente signaleringen, zoals overschrijding van het inslagpeil zonder dat de voorkeuzepomp wordt ingeschakeld of verschillen in gemeten waterstanden tussen twee druksensoren in één pompput. Een installatiestoring valt soms samen met een pompstoring.

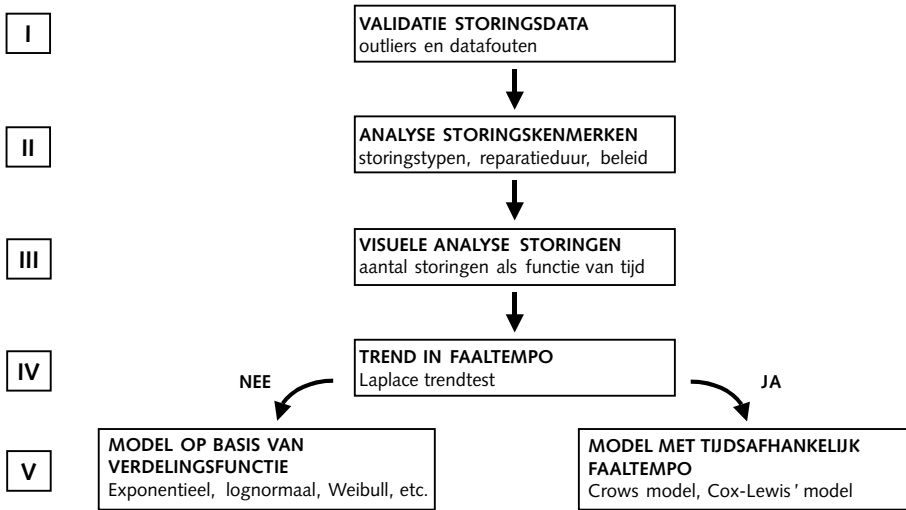
Een signalering 'hoogwater' kan het gevolg zijn van hevige neerslag of een pomp die minder debiet levert dan gewenst. Bijvoorbeeld door verstopping van de aanzuigopening van de pomp, lucht in het slakkenhuis van de pomp of afvoerleiding, of een breuk van de aandrijfas. Dit betekent dat een pomp 'in bedrijf' gemeld kan zijn omdat de motor draait, maar toch niet werkt. Signalering van een pomp die onder zijn capaciteit draait, is mogelijk door een melding op de terugslagklep, zoals bij gemeente A. Of door een controle op het rendement van een pomp. Rendement is dan het quotiënt van vermogen en debiet, of van stroomverbruik en debiet. In figuur 20 ziet u de gevolgen van verstopping van de aanzuigopening. Als een pomp lange tijd onder zijn capaciteit draait en dit wordt niet gesignaleerd, vult eerst het gehele stelsel zich met afvalwater, totdat het waterpeil boven de overstortdrempel komt en het stelsel begint over te storten. Dit betekent dat onverdund afvalwater het oppervlaktewater instroomt.



Figuur 20 Gevolgen van gedeeltelijke verstopping van een pomp op de vullingsgraad van een rioelstelsel  
 Gedurende vier weken is pomp 1 ingeschakeld, maar de getransporteerde hoeveelheid rioelwater is ver beneden ontwerpcapaciteit. Pas na de signalering 'hoogwater' wordt de verstopping verholpen.

#### 6.4 Analysemethodiek pompstoringen

Het verloop van pompstoringen in de tijd kunt u volledig beschrijven door hun tussen-tijd en duur in een (statistisch) model te vertalen. Om de pompstoringen in een rioel-gemaal te analyseren, is voor het onderzoek een methodiek gebruikt, gebaseerd op *Ascher en Hansen, 1998*. In figuur 21 ziet u de stappen van deze methodiek.



Figuur 21 Procedure voor storingsanalyse van pompen in rioolgemalen

#### 6.4.1 Stap I: Validatie storingsdata

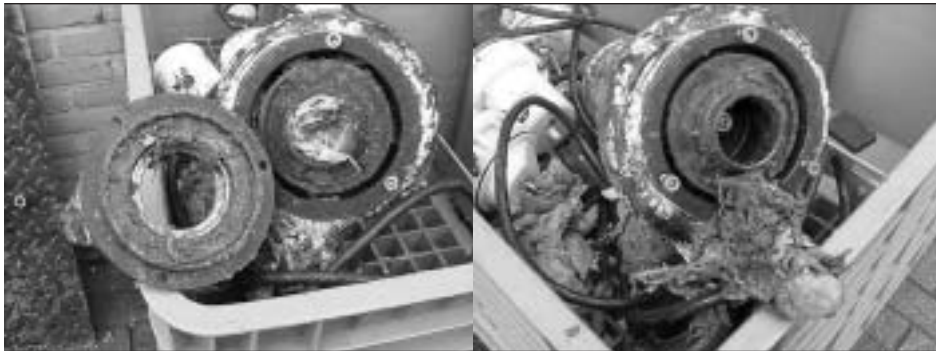
Stap I onderzoekt of in de storingsgegevens onregelmatigheden, fouten en 'outliers' zitten. Dit kunnen bijvoorbeeld fouten zijn in de registratie of storingsen met een extreem lange duur (een maand of langer). Fouten en 'outliers' moet u vóór de verdere analyse verwijderen.

#### 6.4.2 Stap II: Analyse storingskenmerken

De beschikbare registraties kunnen aanleiding geven tot foute interpretatie. Stap II is erop gericht om eenduidige data te creëren en gaat in op de volgende vragen: welke typen storingsen zijn er? Zijn die storingsen verschillend van karakter? Hoe moet u omgaan met verschillende typen storingsen? Hoe zijn de storingsafhandeling en onderhoudsplanning georganiseerd en wat is hun invloed op het storingsverloop?

#### Opeenvolgende storingsen door herstarten pomp

Pompstoringsen kunnen kort na elkaar optreden, doordat een pomp eenvoudigweg wordt herstart zonder de oorzaak van de storing op te sporen en het probleem te verhelpen. Als een pomp in zeer korte tijd (bijvoorbeeld één uur) meerdere keren opnieuw wordt gestart, moet u dit als één storing beschouwen. Dit voorkomt dubbelstellingen.



Figuur 22 Pompvervuiling leidt tot storingen (foto: GW Rotterdam)

### *Installatiestoringen en hoogwatersignaleringen*

Slechts een klein deel van de installatiestoringen bij gemeente B vertegenwoordigt een daadwerkelijke pompstoring. Maar welk deel is niet duidelijk, omdat het een gecombineerde melding is. Daarnaast vallen sommige installatiestoringen mogelijk samen met een thermische storing.

De signalering 'hoogwater' bij gemeente B kan duiden op een pompstoring (zelfs zonder melding van een thermische storing). Maar de waterstand in de pompput kan ook door hevige neerslag boven dit waarschuwingspeil stijgen. Daardoor kunt u het effect van een pompstoring tijdens neerslag niet onderscheiden van het effect van de neerslag. Als u beide bovenstaande signaleringen niet in de analyse meeneemt, onderschat u het werkelijke aantal pompstoringen.

### *Verschillen tussen storingen van dwa- en rwa-pompen*

Storingen van rwa-pompen zijn vaak het gevolg van vervuiling van de pompwaaier, doordat de neerslag plotseling vuil vanaf het straatoppervlak en vanuit het riool meevoert. Ook kan vuil zich hebben opgehoopt in de pompkelder. Het faalmechanisme van een rwa-pomp verschilt van dat van een dwa-pomp; onder dwa-omstandigheden zijn de stroomsnelheden veel kleiner en woelt vuil nauwelijks op.

Voor een dwa-pomp is de kans op falen (de betrouwbaarheid) van belang, voor een rwa-pomp de beschikbaarheid. Betrouwbaarheid is: de kans dat een component of systeem een specifieke taak kan uitvoeren onder bepaalde omstandigheden en tijdens een zekere periode. Maar de vraag naar rwa-pompen in rioolgemalen is niet continu, maar afhankelijk van het aanbod van afval- en regenwater. Het gaat dan om de beschikbaarheid van een pomp. Met andere woorden, het deel van de tijd dat een component of systeem werkelijk functioneert of in staat is te functioneren. Om de beschikbaarheid

van rwa-pompen in kaart te brengen, bepaalt u in hoeveel procent van de gevallen een pomp werkt, gegeven het feit dat er vraag naar is. De niet-beschikbaarheid bepaalt u aan de hand van het percentage dat een pomp faalt, terwijl er vraag naar is.

#### *Onderhoudsbeleid en storingsafhandeling*

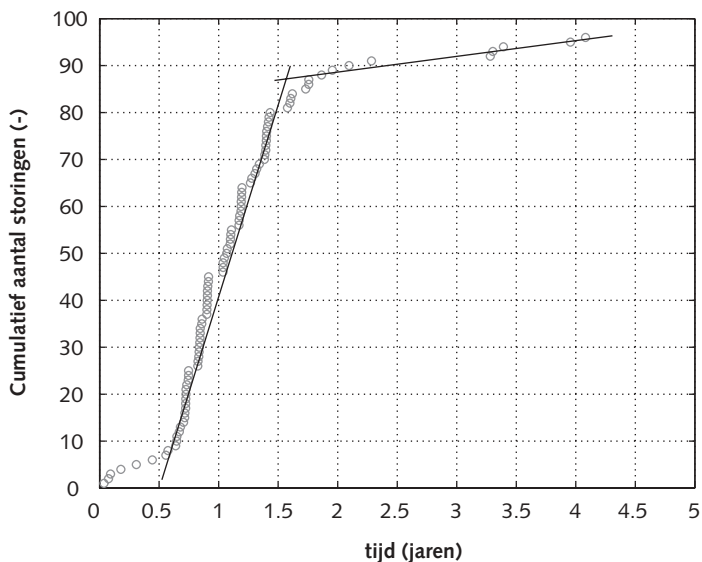
Storingsafhandeling en onderhoudsplanning hebben grote invloed op de frequentie en duur van de storingen. Zo kent de storingsafhandeling bij gemeente A drie urgentieniveaus: van direct verhelpen tot vrij inplanbaar. De actuele weersituatie, de weersverwachting, de functie van de pomp in storting en de pompconfiguratie van het gemaal bepalen de prioriteit. Een storting op een rwa-pomp zonder reserve heeft dan prioriteit 1. De reparatie-urgentie van een pomp bepaalt hoe lang het duurt voordat een storting wordt verholpen. Bij gemeente B zijn regelmatige inspecties de pijlers van het gemaalonderhoud. Dit deels pro-actieve onderhoud is medebepalend voor het wel of niet optreden van pompstoringen.

54 |

#### **6.4.3 Stap III: Visuele analyse storingen**

Visuele analyse van het storingspatroon geeft informatie over de adequaatheid van de storingsafhandeling. Daarnaast geeft het inzicht in de verschillen in functioneren tussen de pompen in verschillende gemalen. Centraal staat de vraag of het aantal storingen per tijdseenheid aanzienlijk verandert gedurende een zekere periode. Zulke trendmatige veranderingen kunnen het gevolg zijn van gebrekkige reparaties, veroudering, vervanging of opknapbeurten. In figuur 23 ziet u een voorbeeld van trends in de storingsfrequentie. Na twee jaar wordt een steeds terugkerende storting met een pomp uiteindelijk bij de bron aangepakt. Clusters in de storingen kunnen erop wijzen dat een storting steeds weer terugkeert. Mogelijke oorzaak hiervan is het alleen maar herstarten van de pomp zonder de storting echt te verhelpen.

Als in de loop van de jaren iets in het patroon van de storingen verandert, kan dit komen door aanpassingen in het gemaal, het rioolstelsel of de pompsturing. Bijvoorbeeld vervanging van één of meer pompen, aanpassing van de gemaalkelder of veranderingen in de PLC-software. De vraag is of die aanpassingen patronen in het storingsverloop kunnen verklaren. Vaak registreren rioleringsbeheerders alleen fysieke aanpassingen aan pompen en gemaalkelders in logboeken, geen aanpassingen in de sturing van gemalen.



Figuur 23 Trends in het storingsgedrag van een pomp

Na twee jaar lijkt een steeds terugkerend probleem definitief verholpen te zijn.

#### 6.4.4 Stap IV: Trend in faalt tempo

Als een systeem veroudert, moet u storingsdata in chronologische volgorde analyseren. Anders kunt u onjuiste conclusies over het faalt tempo van het systeem trekken. Veroudering blijkt bij rioolpompen regelmatig voor te komen en uit zich in trends in de storingsfrequentie, zoals in figuur 23.

Met de zogenaamde Laplace-test kunt u trends in de storingsfrequentie zichtbaar maken. Hierbij toetst u of storingsdata een constante frequentie hebben en statistisch onafhankelijk zijn. De test gebruikt een chronologisch geordende set van de tussentijden van storingen  $T_1, T_2, \dots, T_m$  en is als volgt gedefinieerd (Ansell en Phillips, 1994):

$$U_L \equiv \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right] - \frac{1}{2} t}{t \sqrt{\frac{1}{12n}}} \quad (8)$$

waarin:

$n$  = het aantal storingen

$t_i$  = het tijdstip van de  $i^e$  storing

$t$  = het eind van de waarnemingsperiode

Als  $U_L \approx 0$ , dan wordt de hypothese dat de storingen een constante frequentie hebben, niet verworpen. Als  $U_L > 1,96$ , dan is sprake van een verslechtering van de betrouwbaarheid, bij  $U_L < -1,96$  van een verbetering. Zowel verbetering als verslechtering vragen om een statistisch model met een tijdsafhankelijke storingsfrequentie.

56 |

#### 6.4.5 Stap V: Statistisch model storingsdata

Pompinstallaties in rioolgemalen zijn zogenaamde repareerbare systemen. Dit houdt in dat u het systeem bij een storing weer operationeel kunt maken door een deel te vervangen zonder het gehele systeem te vernieuwen. Hierdoor is een pomp na reparatie vaak niet zo goed als nieuw, maar zo goed als juist voorafgaand aan de storing.

Kenmerkend voor storingen is:

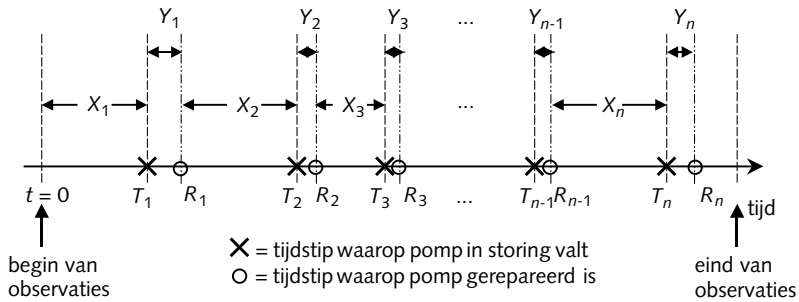
- de tijd tussen twee opeenvolgende storingen;
- de duur van het buiten bedrijf zijn na het moment van in storing vallen.

De tijd tot een volgende storing is onder meer afhankelijk van stelselkenmerken, ouderdom van pompen en sturing van pompen. Met name beleidsmatige of organisatorische aspecten bepalen de duur van het buiten bedrijf zijn, de reparatietijd. Denk aan onderhoudsbeleid, beschikbaarheid van personeel en aanwezigheid van back-up-capaciteit. Ook van invloed zijn de weersverwachting, de aard van de storing, de complexiteit van de demontage en de beschikbaarheid van reserveonderdelen.

De tijd tussen twee opeenvolgende momenten waarop een pomp in storing valt ( $T_{i-1}$  en  $T_i$ ), wordt bepaald door een samenspel van organisatorische aspecten, kenmerken van het rioolsysteem en systeembelasting. Deze tijdsduur is onder te verdelen in reparatietijd  $Y_i$  en tijd tot een volgende storing na afloop van de reparatie  $X_i$  (zie figuur 24). De tijd tot een volgende storing na een reparatie heet de tussentijd van storingen. De tijd vanaf reparatie ( $i-1$ ) tot storing  $i$  is gedefinieerd als:



$$\begin{aligned}
 X_1 &= T_1 \\
 X_2 &= T_2 - (T_1 + Y_1) \\
 &\vdots \\
 X_n &= T_n - (T_{n-1} + Y_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{9}$$



Figuur 24 Verloop van waargenomen pompstoringen in de tijd

waarin:

- $T_i$  = het moment waarop een pomp in storing valt
- $R_i$  = het moment waarop een pomp is gerepareerd
- $(T_i - T_{i-1})$  = de tijd tussen twee storingsmomenten
- $X_i$  = de tijd vanaf reparatie  $(i-1)$  tot storing  $i$
- $Y_i$  = de duur van reparatie  $i$

#### Model voor tussentijden zonder trends in de storingsfrequentie

Als er geen trends in de storingen zijn, kunt u de tussentijden beschrijven met een verdelingsfunctie. Vaak wordt de statistiek van storingen beschreven als een zogenaamd 'homogeen Poisson-proces'. Concreet betekent dit dat u veronderstelt dat de tussentijden van storingen statistisch onafhankelijk en exponentieel zijn verdeeld. Maar bij storingen van rioolpompen is dit vaak niet zo. Dan is een beschrijving met een ander type kansverdeling (bijvoorbeeld gamma, lognormaal of Weibull) mogelijk. Hierbij is belangrijk dat u een kansverdeling vindt die de waarnemingen goed kan beschrijven. Met Bayes-gewichten (zie bijlage) kunt u bepalen welk type het best bij de storingsgegevens past. Dit geldt niet alleen voor de tussentijden, maar ook voor de duur van de storingen.

#### Model voor tussentijden met trends in de storingsfrequentie

De statistische beschrijving van storingsdata met een verdelingsfunctie veronderstelt dat de gemiddelde storingsfrequentie constant is. Maar bij pompen in rioolgemalen

kan het voorkomen dat zij onderhevig zijn aan veroudering. Bovendien kunnen de prestaties van een pomp worden beïnvloed door veranderingen in hun omgeving (zoals het rioolstelsel, de pompkelder en de besturingssoftware), onvolledige reparaties of vervanging van pomponderdelen.

Als de storingsfrequentie een trend vertoont, bestaat behoefte aan modellen die processen met een niet-constant faalt tempo kunnen beschrijven, zogenaamde 'niet-homogene Poisson-processen'. Zij beschrijven de storingsfrequentie als een functie van de tijd. Veel van de modellen met een tijdsafhankelijk faalt tempo zijn ontwikkeld om verbeteringen in de betrouwbaarheid van hard- en software te kunnen modelleren. Ansell en Phillips (1994) geven een overzicht van de vele mogelijke modellen. Mogelijke beschrijvingen zijn de modellen van Crow (1974) en Cox en Lewis (1966). Het eerste model beschrijft de storingsfrequentie volgens een machtsfunctie, terwijl het tweede een log-lineaire beschrijving hanteert. Meer details over de toepassing van deze modellen vindt u in *Korving, 2004*.

58 |

#### *Model voor beschikbaarheid*

Als de vraag naar een pomp sterk varieert in de tijd, zoals bij rwa- en ob-pompen, kunt u in plaats van de betrouwbaarheid beter de beschikbaarheid ervan modelleren. Beschikbaarheid is het deel van de tijd dat een component daadwerkelijk functioneert of in staat is te functioneren. Hiervoor moet u definiëren wanneer er vraag is naar een pomp. Dit is het geval als het putniveau hoger is dan het inslagpeil van de pomp. Als die pomp vervolgens niet binnen een aantal minuten draait, treedt een storing op. Dit betekent dat er vraag is naar een pomp als deze ingeschakeld wordt of in storing valt.

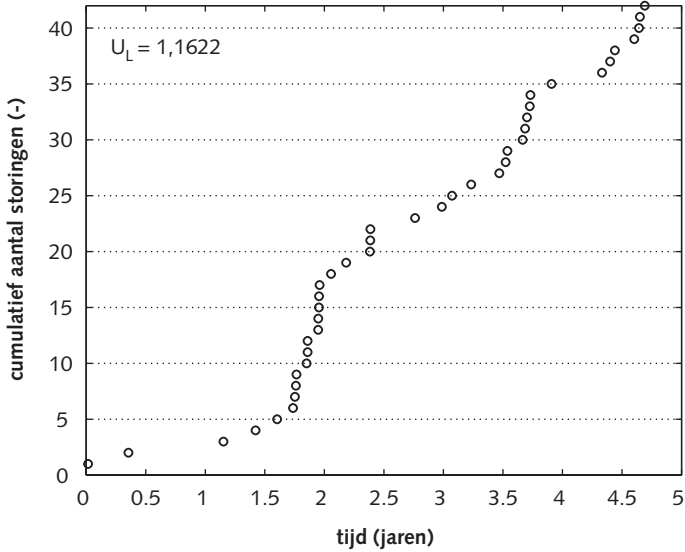
De beschikbaarheid van een pomp is gedefinieerd als:

$$1 - P(\text{storing} \mid \text{pompvraag}) = 1 - \frac{\text{aantal storingen}}{\text{aantal keer pomp in} + \text{aantal storingen}} \quad (10)$$

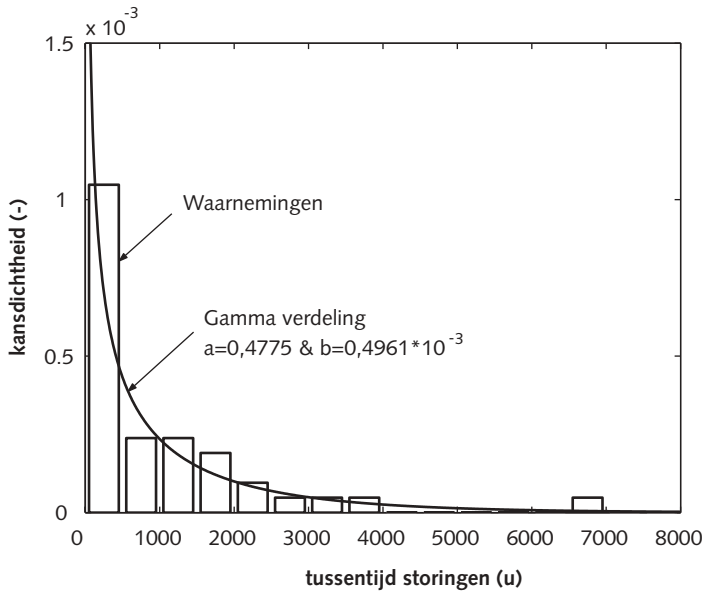
Dit geldt voor de situaties waarin een pomp werkt, gegeven dat er vraag naar is.

#### *6.4.6 Voorbeeld pompstoringsanalyse*

Deze subparagraaf licht de zojuist beschreven procedure voor analyse van pompstoringen toe met een voorbeeld. Het voorbeeldgemaal bestaat uit twee pompen: één dwa-pomp met een capaciteit van 150 m<sup>3</sup>/h en een rwa-pomp met een capaciteit van 300 m<sup>3</sup>/h. De pompen zijn nat opgesteld en hun storingsgedrag is representatief voor de situatie bij gemeente A. In figuur 25 ziet u de storingen van de dwa-pomp.



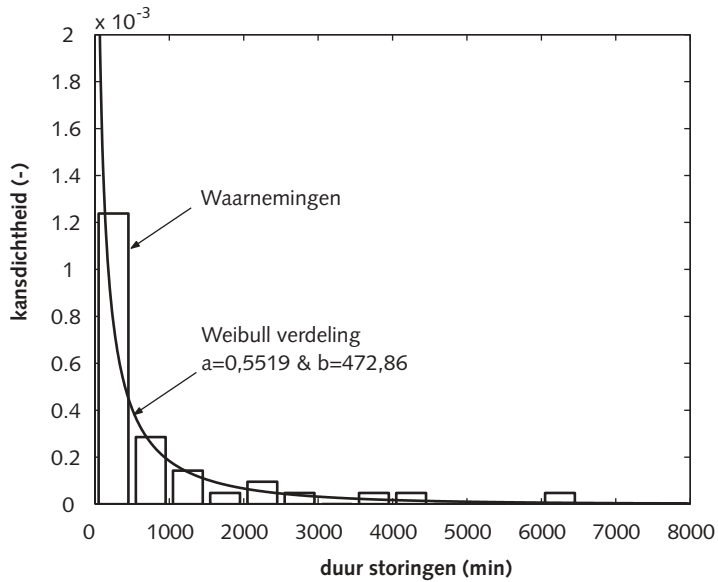
Figuur 25 Storingenverloop van de dwa-pomp in de tijd  
De storingsfrequentie vertoont geen significante trend ( $U_L < 1,96$ ).



Figuur 26 Storingstussentijden van de dwa-pomp benaderd met een gammaverdeling

De storingen van de dwa-pomp vertonen geen duidelijke trendmatige veranderingen in de frequentie ( $U_L < 1,96$ ). Daarom is bepaald wat het kansverdelingstype is van de tussentijden van de storingen op de dwa-pomp van dit gemaal. Bayes-gewichten (zie bijlage) laten zien dat een gammaverdeling de waarnemingen het best kan beschrijven. In figuur 26 ziet u een vergelijking van de waarnemingen en de geschatte gammaverdeling.

Het kansverdelingstype dat het best bij de storingsduur van een pomp past, is ook bepaald met Bayes-gewichten (zie bijlage). Bayes-gewichten laten zien dat een Weibull-verdeling het best bij de waarnemingen past. In figuur 27 ziet u een vergelijking tussen de waarnemingen en de geschatte Weibull-verdeling.



Figuur 27 Duur van storingen van de dwa-pomp benaderd met een Weibull-verdeling

Tabel 17 vat de niet-beschikbaarheid (= 1-beschikbaarheid) van de dwa-pomp samen. De gemiddelde niet-beschikbaarheid is eens per 352 keer dat er vraag is naar de pomp, maar varieert sterk. Het minimum is eens per 1520 keer en het maximum eens per 210 keer.

Tabel 17 Niet-beschikbaarheid van de dwa-pomp ten gevolge van storingen

	1998	1999	2000	2001	2002	Gemiddeld
Aantal storingen (1/jaar)	2	15	7	11	7	8,4
Aantal keer pomp in (1/jaar)	3039	3149	3121	3197	2236	2948
1/P (storing/pompvraag)	1520	210	446	291	320	352

### 6.5 Resultaten storingsanalyse

De analyse laat zien dat het aantal storingen per jaar en per pomp sterk varieert en onafhankelijk is van de pompfunctie (dwa-, rwa-, of ob-pomp). Gemeente A heeft gemiddeld dertien storingen per pomp per jaar. De gemiddelde storingsduur is tien uur. Maar afhankelijk van de reparatie-urgentie van een pomp kan de storingsduur variëren tussen één uur en enkele dagen. Gemeente B heeft gemiddeld vijf storingen per jaar. Hier is de gemiddelde duur 13,5 uur. Hoewel er geen duidelijke correlatie is tussen de storingskarakteristieken en de pompfunctie, vertonen pompen met hetzelfde vermogen enige overeenkomsten in beschikbaarheid en storingsduur.

#### *Verskil in storingskarakteristieken*

Tussen de storingskarakteristieken van de gemeenten zit verschil. Dit komt vooral door verschillen in de definitie van een pompstoring en het onderhoudsbeleid. Zo heeft gemeente A alleen een signalering voor mechanische storingen. Deze storingen wijzen op een verminderd pomp rendement en kunnen tot 85 procent van de storingen uitmaken. Gemeente B signaleert pas een verminderd rendement (bijvoorbeeld door pompvervuiling) als het waterpeil in de pompput het peil 'hoogwater' overschrijdt.

#### *Storingen in clusters*

Bij beide gemeenten komen storingen in clusters voor, waardoor zij niet onafhankelijk zijn. Dat komt omdat een pomp die in storting staat alleen opnieuw wordt opgestart en niet adequaat wordt gerepareerd. Om geclusterde storingen beter te kunnen analyseren, is meer kennis nodig over bijvoorbeeld aard van de reparatie, duur van voorafgaande droge periode, aanpassingen in besturingssoftware, warmtegevoeligheid van frequentieomvormers en aangroei of luchtinsluitingen in de persleiding. Rioleringsbeheerders leggen deze informatie vaak niet vast in logboeken, omdat de nadruk ligt op het verhelpen van storingen en niet op het leren van gebeurtenissen uit het verleden.

### *Wel of niet representatief*

De vraag is in hoeverre de situatie bij de geanalyseerde gemeenten representatief is voor de rest van Nederland. Gemeente A heeft bijvoorbeeld urgentieniveaus voor reparaties gedefinieerd. Dit betekent dat de verantwoordelijke operator bij een storingsmelding moet beoordelen hoe urgent het oplossen van de storing is. Hierdoor kan een pomp met een lage prioriteit die op vrijdag buiten kantoor tijd faalt tot maandagochtend in storing staan. Dit leidt tot een storingsduur van meer dan 48 uur. Bij gemeente B hebben de gemalen vaak dubbele pompen, zodat de pompen elkaar volledig kunnen vervangen. Bovendien is hier het gemaalonderhoud deels proactief.

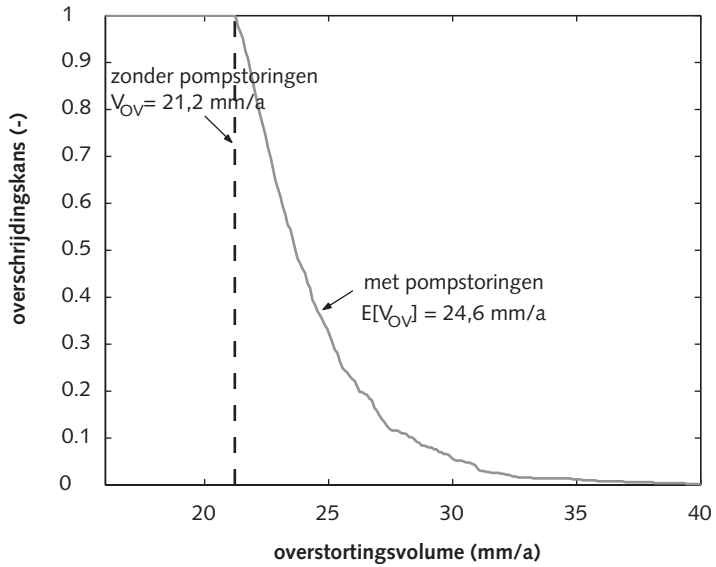
62 |

Vergeleken met pompen in drinkwaterleidingnetten en poldergemalen vallen rioolpompen relatief vaak in storing. Dit komt onder meer door de samenstelling van het afvalwater en het discontinue karakter van het pompproces. Volgens Mays (1989) is bij drinkwaterpompen de gemiddelde tussentijd van storingen 3,7 jaar. Pompen in poldergemalen staan minder dan één keer per jaar in storing (HKV, 1999). Pompen in rwzi's hebben een veel langere reparatietijd (Assezat, 1989), omdat vaak voldoende back-up-capaciteit aanwezig is. Dit maakt reparaties minder urgent.

### **6.6 Invloed pompstoringen op functioneren rioolstelsel**

Gemiddeld blijken dwa-pompen zo'n vier procent en rwa-pompen zo'n twee procent van de pomptijd in storing te staan. Deze storingen blijken grote invloed te hebben op het functioneren van een rioolstelsel. Met Monte Carlo-simulatie (500 modelberekeningen) en een bakmodel van het rioolstelsel van het voorbeeldgemaal is de invloed van pompstoringen op het functioneren gekwantificeerd. Hiervoor is 500 maal een storingsreeks gesimuleerd en aan het model toegevoegd. De karakteristieken van deze reeksen zijn gebaseerd op de storingen van het voorbeeldgemaal.

Omgerekend naar jaarlijkse overstortingsvolumes leiden de storingen tot een gemiddelde toename van circa vijftien procent in het overstortingsvolume (zie figuur 28). Dit betekent dat beter functionerende pompen een deel van de milieuvervuiling kunnen voorkomen. Slecht functionerende gemalen kunnen zelfs de effectiviteit van investeringen in civieltechnische maatregelen (bijvoorbeeld randvoorzieningen) tenietdoen.



---

Figuur 28 Invloed van pompstoringen op het functioneren van de riolering, gebaseerd op de storingskarakteristieken van het voorbeeldgemaal

## 7 Conclusies

### **Besluitvorming rond rioleringsbeheer**

Rioolstelsels werken lang niet altijd zoals verwacht. Zo kan een bergingstank zo groot zijn dat hij nooit gevuld raakt, een pomp dagenlang ongemerkt in storing staan of afvoerend oppervlak bij inventarisatie veel groter zijn dan verondersteld. Rioleringsbeheerders houden met eventuele onzekerheden over het functioneren (zoals fouten in beheerbestanden, neerslagspreiding en storingen) bij de beoordeling van stelsels meestal geen rekening. Dit leidt tot een veel te optimistische inschatting van het hydraulisch en milieutechnisch functioneren. Als zij besluiten over maatregelen voor een rioolstelsel baseren op onbetrouwbare of onjuiste informatie, neemt de kans op foute beslissingen toe.

64 |

De onderzoeksresultaten laten zien dat onderbouwing van investeringen met modelresultaten niet voldoende is. Maar de getallen in de voorbeelden gelden alleen voor de gepresenteerde cases en niet zonder meer voor andere situaties. Wel geven zij een goede indicatie voor de mate waarin onzekerheden invloed hebben op investeringsbeslissingen. Omdat onzekerheden invloed hebben op het functioneren van de riolering, is het belangrijk naar buiten te gaan en te kijken of het rioolstelsel werkt zoals het zou moeten werken.

### **Fouten in beheerbestanden**

Om modelresultaten voor bepaalde doeleinden te kunnen gebruiken, is een zekere betrouwbaarheid van de beheergegevens nodig. Onderzocht is welke invloed fouten in beheerbestanden hebben op berekende overstortingsvolumes. Fouten in beheerbestanden leiden tot een spreiding van twintig procent in de berekende overstortingsvolumes per jaar. Onzekerheid in het afvoerend oppervlak heeft de grootste invloed op die spreiding. Daarnaast is het voor betrouwbare modelresultaten essentieel dat rioleringsbeheerders de structuur en geometrie van het rioolstelsel goed kennen.

### **Natuurlijke variatie in neerslag**

Ook de invloed van natuurlijke variatie in de neerslag is onderzocht. Metingen met kantelbakregenmeters bevatten systematische fouten, maar zijn toch voldoende nauwkeurig voor gebruik bij rioleringsberekeningen. Maar vanwege de ruimtelijke spreiding in de neerslag registreert een neerslagmeter zelden de maximale intensiteit van een bui. Deze ruimtelijke spreiding is van belang bij beschouwing van rioolstelsels die zich uitstrekken over een gebied met een straal groter dan 15 km. Neerslagvariatie resulteert in nog grotere variaties dan fouten in beheerbestanden. Maar de neerslagvariatie is beschreven met een neerslaggenerator die het volume onderschat van buien die relatief vaak voorkomen en langer dan twee uur duren. Dit kan tot een overschatting van de variatie leiden.



## Modelkalibratie

Modelkalibratie op basis van losse buien leidt niet tot betrouwbaarder modelresultaten, omdat de gevonden parameterwaarden per bui verschillen. Dit komt doordat bepaalde processen niet in het model worden meegenomen. Dit geldt met name voor in- en exfiltratie van grondwater en onderdelen van de inloop, zoals infiltratie, plassenberging en verdamping.

Maar de grote winst van modelkalibratie is dat u systematische fouten kunt opsporen, waarna u deze uit het model kunt verwijderen. Denk aan foutief ingemeten bob's en drempelhoogten van de overstorten, ontbrekende leidingen, of onbekende schildmuren. Door deze fouten uit het model te halen, wordt de overeenkomst tussen modelresultaten en 'werkelijkheid' groter. Zonder kalibratie is het veel moeilijker (zo niet onmogelijk) om de afwijkingen op te sporen.

| 65

De variatie in berekende overstortingsvolumes neemt sterk af door kalibratie met één bui. Maar het is de vraag in hoeverre die bui representatief is voor het stelselgedrag over meerdere jaren. Bij gebruik van verschillende buien is de onzekerheid in berekende overstortingsvolumes door verschillen in de parameterwaarden namelijk veel groter. Processen met een langere karakteristieke tijd dan de duur van de bui waarmee gekalibreerd is, zijn bepalend voor deze variatie. De totale variatie is even groot als de onzekerheid door fouten in het beheerbestand van een rioolstelsel.

## Pompstoringen

De storingsfrequentie van rioolpompen kan zowel toe- als afnemen. Een toename is het gevolg van pompveroudering, terwijl vervanging of een opknapbeurt leidt tot een afname. Bovendien blijken storingen vaak in clusters voor te komen. Dit komt doordat de pomp alleen opnieuw wordt gestart en niet adequaat wordt gerepareerd. Vanwege deze clustering en trends in de storingsfrequentie is het van belang storingen in chronologische volgorde te analyseren. De storingsfrequentie is relatief hoog vergeleken met pompen in drinkwaternetten, poldersgemalen en rwzi's. De frequentie varieert sterk en is onafhankelijk van de pompfunctie (dwa-, rwa- of ob-pomp). De gemiddelde storingsduur is ook sterk variabel en hangt onder meer af van het beleid voor storingsafhandeling en gemalenbeheer.

Pompstoringen blijken grote invloed te hebben op het functioneren van een rioolstelsel. Dwa-pompen staan zo'n vier procent van de pomptijd in storting, rwa-pompen zo'n twee procent. Storingen verhogen de jaarlijkse overstortingshoeveelheid voor de gepresenteerde casus met circa vijftien procent. Dit betekent dat u de bedrijfszekerheid van een rioolstelsel kunt verhogen door het pomp- en gemalenonderhoud te verbeteren.

## 8 Praktische implicaties

In deze publicatie is afgetast of het mogelijk en wenselijk is een risicogebaseerde beoordelingsmethodiek voor rioolstelsels te introduceren. Inmiddels kunnen we beide vragen bevestigend beantwoorden. Maar riolerend Nederland moet nog heel wat werk verzetten voordat deze methodiek op grote schaal in de praktijk kan worden toegepast.

De publicatie is bedoeld als eerste verkenning voor een toepassing van risicoanalyse in het rioleringsbeheer. Het uitdrukkelijke doel is te prikkelen en een aanzet te geven om als rioleringsbranche kritisch te kijken naar de huidige gang van zaken. Hierbij is de bestaande normering (basisinspanning en waterkwaliteitsspoor) als uitgangspunt gehanteerd.

66 |

### Risicogebaseerde besluitvorming

Om onzekerheid bij de beoordeling van rioolstelsels mee te nemen, hebt u kennis nodig over de omvang van de onzekerheden die een rol spelen. Denk aan de geometrie en dimensies van het systeem, de spreiding van de neerslag in ruimte en tijd, de (economische) waardering van schade en de betrouwbaarheid van systeemonderdelen. Alleen nauwkeurig gekwantificeerde onzekerheid is nuttig bij het nemen van beslissingen over rioleringsbeheer.

Zo kan het lonend zijn nauwkeurig te weten hoeveel een stelsel precies overstort. Dan kunt u beter inschatten hoe groot u een bergbezinkbassin moet dimensioneren. Eén millimeter meer of minder bergingscapaciteit kan al snel enkele tonnen euro's verschil maken. Maar een betere onderbouwing van investeringsbeslissingen heeft ook een keerzijde. Het kan pijnlijk duidelijk maken dat een stelsel meer overstort dan u had verondersteld. Maar die onderkenning is wel heel belangrijk voor een goede investering.

De optimale beheerstrategie voor een rioolstelsel kunt u met risicoanalyse bepalen. Dan kunt u in de ontwerpfase al een optimale balans bepalen tussen initiële investeringen en toekomstige onderhoudskosten. Zo kunt u afwegen of verbetering van de storingsafhandeling of extra berging de vuiluitworp verder vermindert. Hiervoor moet u niet alleen de kans op falen van een systeem inschatten, maar ook de schade (financieel) door falen. Hoewel er verschillende methoden beschikbaar zijn om schade in geld te waarderen, is dit niet eenvoudig. Dat komt omdat u hierin telkens veranderende publieke waarderingen moet uitdrukken.

### Betrouwbaarheid van beheergegevens

Om modelresultaten als onderbouwing voor beleid te kunnen gebruiken, is een bepaalde mate van betrouwbaarheid van de beheergegevens noodzakelijk. Besluitvorming op basis van onzekere informatie ondergraaft namelijk de doelmatigheid van beslissin-

gen. Het zo nauwkeurig mogelijk kennen van het afvoerend oppervlak, de structuur van het rioolstelsel en de geometrie van de rioolbuizen blijkt van het grootste belang. Dit vereist regelmatige (her)inventarisatie van beheergegevens.

### **Herhalingstijd van overstortingen**

Voor de voorgestelde risicogebaseerde aanpak is een juiste bepaling van de herhalingsstijd van overstortingen zeer belangrijk. Met de kwantielenmethode uit de Leidraad Riolering overschat u de herhalingstijd van gebeurtenissen, omdat u hiervoor alleen het aantal overstortingen gebruikt. U kunt de herhalingstijd beter niet alleen op die aantallen baseren, maar ook op de kans dat overstortingsvolumes optreden. Maar het is de vraag of dit in de huidige praktijk te realiseren is. Een belangrijke eerste stap is dat riool- en waterkwaliteitsbeheerders zich bewust zijn van de beperkte betrouwbaarheid van herhalingstijden berekend met de kwantielenmethode. Dit betekent concreet dat gebeurtenissen met een herhalingstijd kleiner dan de wortel van de reekslengte betrouwbaar genoeg zijn om te gebruiken voor beoordelingsdoeleinden.

| 67

### **Modelkalibratie**

Kalibratie van rioolmodellen levert winst op, omdat u fouten die anders waarschijnlijk in het model blijven zitten, kunt opsporen en verwijderen. Daarentegen verschillen de parameterwaarden tussen de buien onderling. Hierdoor is de overdraagbaarheid van kalibratieparameters relatief klein. Met andere woorden, de parameters gebaseerd op één bui zijn niet representatief voor andere buien. Doordat de neerslagafvoer, de infiltratiecapaciteit van de bodem en de (industriële) afvalwaterproductie variëren in de tijd, zijn de begincondities van elke kalibratie verschillend. De overdraagbaarheid neemt toe als u het model kalibreert met een buienreeks. Maar dit zorgt ook voor meer bias.

Een belangrijke tekortkoming van de huidige modellen is dat zij het neerslagafvoerproces niet correct beschrijven. Alleen de afvoer voor individuele buien beschrijven ze goed, maar niet voor langere neerslagtijdreeksen. Om dit probleem op te lossen, zouden technieken als neurale netwerken kunnen worden toegepast. De structuur van een neuraal netwerk is gebaseerd op de beschikbare data en veel minder op de wel of niet bekende fysische processen. Nadeel is dat neurale netwerken veel gegevens vereisen om het model te kunnen 'trainen'. Bovendien is extrapolatie slechts beperkt mogelijk.

### **Pompstoringen en gemalenonderhoud**

Met het gericht monitoren van pompen en gemalen valt al snel winst te behalen. Hierbij is een systematische analyse essentieel. Vaak zijn er al gegevens voorhanden, maar worden ze niet gebruikt voor het ontdekken van trends. Succesvolle analyse vereist wel dat de geregistreerde gegevens het storingsproces zo volledig mogelijk beschrijven en dat u een storing eenduidig definieert.

De registratie van pompstoringen moet in elk geval bestaan uit: waterstanden in de pompput, in- en uitschakelingen van de pomp, door de pomp opgenomen vermogen en debieten in de afvoerleiding. Een belangrijke indicator voor het naar behoren functioneren van een pomp is het rendement. Dit kan het quotiënt van vermogen en debiet, of van stroomverbruik en debiet zijn. Een laag rendement wijst op een gehinderd pompproces, bijvoorbeeld door verstopping van de aanzuigopening. Beneden een zeker rendement moet u een pomp als buiten bedrijf beschouwen. Daarnaast is het zeer belangrijk dat u logboeken bijhoudt om te leren van gebeurtenissen uit het verleden. Zonder logboeken kunt u patronen in het storingsgedrag van een pomp veel moeilijker verklaren.

68 |

Storingsanalyse levert waardevolle informatie op over het juiste vervangingsmoment van een pomp, maar is ook belangrijk voor de evaluatie van de storingsafhandeling en de onderbouwing van het bijplaatsen van reservecapaciteit. Afhankelijk van de waargenomen storingsfrequentie en de pompfunctie in het systeem, kunt u na een storingsanalyse bijvoorbeeld prestatieniveaus voor de verschillende pompen in een rioolstelsel definiëren. Dit kan ook voor andere onderdelen van de riolering, zoals knijpriolen en wervelventielen. Mede op basis van de vereiste prestaties van onderdelen kunt u het dagelijks beheer van het totale stelsel evalueren.

# Literatuur

**Ansell J.I. en Phillips M.J. (1994).** *Practical Methods for Reliability Data Analysis*. Oxford, Oxford University Press.

**Assezat C. (1989).** Probabilistic reliability analysis for biological waste water treatment plants. *Water Science and Technology*. 21: 1813-1816.

**Bacchi B. en Kottegoda N.T. (1995).** Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall. *Journal of Hydrology*, 165: 311-348.

**Bayes T. (1763).** An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 53: 370-418.

| 69

**Bernardo J.M. en Smith A.F.M. (1994).** *Bayesian Theory*. John Wiley & Sons, Chichester.

**Buishand T.A. (1989).** Statistics of extremes in climatology. *Statistica Neerlandica*. 43 (1): 1-30.

**Buishand T.A. en C.A. Velds (1980).** *Neerslag en verdamping. Klimaat van Nederland I*. De Bilt, KNMI.

**Carlin B.P. en Lewis T.A. (2000).** *Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis*. Second edition. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC.

**Chbab E.H. en Van Noortwijk J.M. (2002).** *Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden*. Lelystad, RIZA en HKV Lijn in water.

**Clemens F.H.L.R. (2001).** *Hydrodynamic Models in Urban Drainage: Application and calibration*. Proefschrift. Delft, Technische Universiteit Delft.

**Cox D.R. en Lewis P.A.W. (1966).** *The Statistical Analysis of Series of Events*. London, Methuen.

**Crow L.H. (1974).** Reliability analysis for complex, repairable systems. In: *Reliability and Biometry*. Proschan F. en Serfling R.J. (red.). Philadelphia, SIAM: 379-410.

**CUR (1997).** *Kansen in de civiele techniek. Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie*. CUR-publicatie 190. Gouda, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving.

**Harremoës P. (2002).** Integrated urban drainage, status and perspectives. *Water Science and Technology*. 45 (3): 1-10.

**HKV (1999).** *Overschrijdingskansen van waterstanden in het Amsterdam-Rijnkanaal en de boezem en polders van HAGV*. Lelystad, HKV Lijn in water.

**Jeffreys H.J. (1961).** *The Theory of Probability*. Third Editon. Oxford, Clarendon Press.

**Joosten R.P.F. (2002).** Beschikbaarheid en bedrijfszekerheid van pompinstallaties in rioolgemalen. *Rioleringswetenschap*. 2 (8). 37-49.

**Kamma P.S. en Van Zijl F.P. (2002).** De weerstand in persleidingen voor afvalwater tijdens de gebruiksfase. *Rioleringswetenschap*. 2 (5).

**Korving H. (2004).** *Probabilistic Assessment of the Performance of Combined Sewer Systems*. Proefschrift. Delft, Technische Universiteit Delft.

**Korving H., Meijer M. en Ruijgh-Van der Ploeg T. (2001).** Vandaag kiezen voor morgen; analyse van onzekerheid en robuuste keuzes bij verbetering van bestaande rioolstelsels. *Rioleringswetenschap*. 1 (3): 9-36.

**Luyckx G., Willems P. en Berlamont, J. (1998).** Influence of the spatial variability of rainfall on sewer system design. In: Wheather H. en C. Kirkby (red.). *Hydrology in a Changing Environment*, Vol III: 339-349. Chichester, John Wiley & Sons.

**Mays, L.W. (1989).** *Reliability Analysis of Water Distribution Systems*. New York, American Society of Civil Engineers.

**Ministerie van Financiën (1995).** *Kabinetsstandpunt heroverweging disconteringsvoet*. Den Haag.

**NWRW (1989a).** *De vuiluitwerp van gemengde rioolstelsels. Eindrapport*. Rapport 5.2. April 1989. Den Haag, Ministerie van VROM.

**NWRW (1989b).** *Effecten van emissies op oppervlaktewater*. Hoofdrapport 9.1. Juli 1989. Den Haag, Ministerie van VROM.

**Onof C. en Wheater H.S. (1996).** Analysis of the spatial coverage of British rainfall fields. *Journal of Hydrology*. 176: 97-113.

**Petit L., Blanpain O. en Al-Hajjar J. (1998).** Etude de sensibilité d'un modèle d'écoulement à la qualité des données: application aux réseaux d'assainissement pluvial. In: *Proceedings of NOVATECH'98*: 247-254.

**Price R.K. en Osborne M.P. (1986).** Verification of sewer simulation models. In: *Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data*. UDM'86. Dubrovnik, Yugoslavia: 99-106.

**Rauch W., Thurner N. en Harremoës P. (1998).** Required accuracy of rainfall data for integrated urban drainage modeling. *Water Science and Technology*. 37 (11): 81-89.

**Sevruk B. (1982).** *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use*. Operational Hydrology Report No.21. WMO - No.589. Geneve, World Meteorological Organization.

| 71

**Stichting RIONED (2001).** *Hydrodynamische modellen in de riolering*. Het proefschrift van prof.dr.ir. F.H.L.R. Clemens samengevat en bediscussieerd. Ede, Stichting RIONED.

**Stichting RIONED (1999).** *Leidraad Riolering. Module C2100*. Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren. Juli 1999. Alphen aan de Rijn, Kluwer.

**Vaes G., Clemens F., Willems P. en Berlamont J. (2002).** Design rainfall for combined sewer system calculations. Comparison between Flanders and the Netherlands. In: *Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage*. Sept. 2002, Portland, Oregon, USA. CD-ROM editie.

**Vaes G., Willems P. en Berlamont J. (2003).** Areal rainfall correction coefficients. In: *Proceedings of 6th International Workshop on Precipitation in Urban Areas*, 4-7 december 2003, Pontresina, Zwitserland.

**Van Dantzig D. (1956).** Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica*. 24: 276-287.

**Willems P. (2001a).** A spatial rainfall generator for small spatial scales. *Journal of Hydrology*. 252: 126-144.

**Willems P. (2001b).** Probabilistische modellering van de immissie in ontvangende oppervlaktewateren. *Rioleringswetenschap*. 1 (3): 41-59.

**Willems P. (2000).** *Probabilistic Immission Modelling of Receiving Surface Waters*. Proefschrift. Leuven, Katholieke Universiteit Leuven.

# Bijlage: Bayesiaanse statistiek

## Stelling van Bayes

Bayesiaanse analyse is gebaseerd op de stelling van Bayes (1763), waarin zowel waarnemingen als persoonlijke meningen kunnen bijdragen aan de onzekerheid in een parameter. De stelling van Bayes gaat over conditionele kansen, dat wil zeggen waarschijnlijkheden van uitspraken die afhankelijk zijn van de feiten die aan deze uitspraken ten grondslag liggen. Met de stelling van Bayes kunt u de waarschijnlijkheden aanpassen op basis van nieuwe gegevens.

In algemene termen is een voorwaardelijke kans (stelling van Bayes) gedefinieerd als (zie figuur B):

72 |

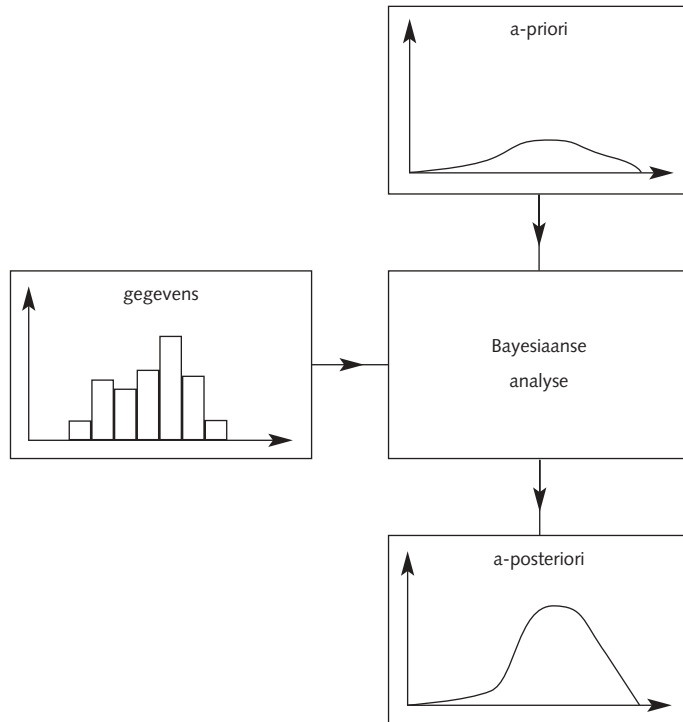
$$P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \quad (11)$$

waarin:

$A$  en  $B$  twee willekeurige gebeurtenissen zijn. De stelling laat zien hoe de kans op  $A$  ( $P(A)$ ) onder invloed van gegeven  $B$  wordt aangepast in  $P(A|B)$ .  $P(A)$  heet a-priorikans en  $P(A|B)$  a-posteriorikans.

Een voorbeeld van het gebruik van de stelling van Bayes is het combineren van metingen van rivierafvoeren met aanvullende historische informatie uit de periode daaraan voorafgaand. Bijvoorbeeld in de vorm van streepjes van maximale waterstanden op de kerkmuur. Ook hier combineert de Bayesiaanse methode een subjectieve a-priorikans (de streepjes op de kerk) met objectieve metingen (de actuele waterstandsmetingen) tot een a-posteriorikans.





Figuur B1 Principe van Bayesiaanse statistiek

Als de a-priorikansverdeling van vergelijking (11) wordt aangeduid met  $\pi(\theta)$  en de a-posteriorikansverdeling met  $\pi(\theta | \mathbf{x})$ , wordt de stelling van Bayes:

$$\pi(\theta | \mathbf{x}) = \frac{\int_{\Theta} \ell(\mathbf{x} | \theta) \pi(\theta) d\theta}{\int_{\Theta} \ell(\mathbf{x} | \theta) \pi(\theta) d\theta} = \frac{\ell(\mathbf{x} | \theta) \pi(\theta)}{\pi(\mathbf{x})} \quad (12)$$

waarin:

$\ell(\mathbf{x} | \theta)$  de 'likelihoodfunctie' van de data  $\mathbf{x}$  gegeven de parameters van de kansverdeling  $\theta$  is. De likelihoodfunctie van de data is gedefinieerd als de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van de data als functie van parametervector  $\theta$ . Om de complexe integraal van (12) op te lossen, kunnen verschillende methoden worden gebruikt, zoals asymptotische benadering, numerieke integratie of Monte Carlo-integratie (zie *Carlin and Lewis, 2000*).

### A-priorikansverdelingen

A-priorikansverdelingen kunnen zowel informatief als niet-informatief zijn. Een informatieve a-priori kansverdeling neemt alle beschikbare (subjectieve) informatie mee die bekend is vóórdat de waarnemingen beschikbaar zijn, bijvoorbeeld de streepjes op een kerkmuur. Bij een niet-informatieve kansverdeling wordt verondersteld dat a-priori niets bekend is over de kansverdeling van de waarnemingen. Dit type a-prioriverdeling is zo ‘vaag’ mogelijk en laat de ruimte aan de waarnemingen om voor zichzelf te spreken.

74 |

Twee bekende niet-informatieve kansverdelingen zijn de uniforme en de Jeffreys-verdelingen. Bij de eerste wordt verondersteld dat de verdelingsparameter  $\theta$  een uniforme verdeling heeft, dat wil zeggen  $\theta$  kan elke waarde aannemen met dezelfde kans. Aan de tweede ligt de aanname ten grondslag dat de a-posteriori kansverdeling bij benadering normaal verdeeld is, als het aantal waarnemingen naar oneindig nadert. De Jeffreys-verdeling (Jeffreys 1961) is (onder bepaalde voorwaarden) proportioneel met de wortel uit de verwachting van ‘Fischers informatiematrix’ voor een enkele waarneming:

$$J(\theta) \propto \sqrt{I(\theta)} \tag{13}$$

waarin:

$J(\theta)$  = Jeffreys’ a-prioriverdeling

$I(\theta)$  = Fishers informatiematrix voor één enkele waarneming

Meer details vindt u in *Chbab en Van Noortwijk, 2002*.

### Geconjugeerde kansverdelingen

Toepassing van de Bayesiaanse analyse vereist het oplossen van de complexe integraal in de noemer van vergelijking (12). Vaak zijn analytische oplossingen niet voorhanden en moet u numerieke benaderingen toepassen. Maar als de a-priorikansverdeling van hetzelfde type is als de likelihoodfunctie, kunt u de a-posteriorikans analytisch uitrekenen. Dit zijn zogenaamde geconjugeerde a-priorikansverdelingen. Voorbeelden zijn de geïnverteerde gammaverdeling als geconjugeerde van de exponentiële likelihoodfunctie en de Dirichlet-verdeling als geconjugeerde van de multinomiale likelihoodfunctie.

### Bayes-gewichten

Bayes-gewichten kunt u gebruiken om een keuze te maken uit een aantal kansverdelingstypen, waarmee u een verzameling data kunt beschrijven (zie *Korving, 2004* en *Chbab en Van Noortwijk, 2002*). Deze gewichten gebruikt u om te beschrijven hoe goed

een verdelingstype de gegevens beschrijft. Hoe groter het Bayes-gewicht, des te beter past een kansverdelingsfunctie bij de data. Voordeel van de Bayesiaanse aanpak is dat u verschillende kandidaatverdelingen tegelijkertijd in beschouwing kunt nemen.

Beschouw een dataset  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  en twee kandidaatverdelingstypen  $H_1$  en  $H_2$ . De twee hypothesen  $H_1$  en  $H_2$  representeren twee marginale kansdichtheden  $\pi(\mathbf{x}|H_1)$  en  $\pi(\mathbf{x}|H_2)$ . Gegeven de a-priorikansen  $p(H_1)$  en  $p(H_2) = 1-p(H_1)$  leiden de data tot a-posteriorikansen  $p(H_1|\mathbf{x})$  en  $p(H_2|\mathbf{x}) = 1-p(H_1|\mathbf{x})$ . Als u veronderstelt dat de twee hypothesen even waarschijnlijk zijn, worden de a-priorikansen  $p(H_1) = p(H_2) = 0,5$ .

De posteriorikansen berekent u met de stelling van Bayes (ook wel Bayes-gewichten genoemd):

$$p(H_k|\mathbf{x}) = \frac{\pi(\mathbf{x}|H_k)p(H_k)}{\pi(\mathbf{x}|H_1)p(H_1) + \pi(\mathbf{x}|H_2)p(H_2)} \quad k = 1,2 \quad (14)$$

De gewichten representeren de posteriorikans dat model  $H_k$  juist is gegeven de data  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ . De marginale kansdichtheid van de data  $\pi(\mathbf{x}|H_k)$  voor model  $H_k$  krijgt u door te integreren over parameter  $\theta_k$ :

$$\pi(\mathbf{x}|H_k) = \int l(\mathbf{x}|\theta_k, H_k) \pi(\theta_k, H_k) d\theta_k \quad (15)$$

waarin:

$\pi(\theta_k|H_k)$  = de a-priorikansdichtheid van  $H_k$

$l(\mathbf{x}|\theta_k, H_k)$  = de waarschijnlijkheidsfunctie van de data  $\mathbf{x}$  gegeven  $\theta_k$

De resultaten kunt u samenvatten in een zogenaamde Bayes-factor:

$$B_{12} = \frac{p(H_1|\mathbf{x})/p(H_2|\mathbf{x})}{p(H_1)/p(H_2)} \quad (16)$$

die met de stelling van Bayes reduceert tot:

$$B_{12} = \frac{\pi(\mathbf{x}|H_1)}{\pi(\mathbf{x}|H_2)} \quad (17)$$

Een uitbreiding van (14) naar  $m$  kandidaatverdelingstypen  $H_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) is relatief eenvoudig:

$$p(H_k | \mathbf{x}) = \frac{\pi(\mathbf{x} | H_k) p(H_k)}{\sum_{j=1}^m \pi(\mathbf{x} | H_j) p(H_j)} \quad k = 1, \dots, m \quad (18)$$

dit resulteert in de volgende Bayes-factoren:

$$B_{jk} = \frac{\pi(\mathbf{x} | H_j)}{\pi(\mathbf{x} | H_k)} \quad (19)$$

76 |

Door het verdelingstype met het hoogste Bayes-gewicht te kiezen, minimaliseert u de statistische onzekerheid. Als  $n$  groot is ( $n \rightarrow \infty$ ) en de 'werkelijke' kansverdeling onderdeel is van de kandidaatverdelingen, nadert de posteriorikans van dit verdelingstype naar 1. Maar in de praktijk is de hoeveelheid waarnemingen beperkt en de 'werkelijke' kansverdeling onbekend.

# Reacties

# Hans Geerse

*Ir. J.M.U. Geerse was tot voor kort werkzaam bij Waterschap Reest en Wieden als beleidsmedewerker riolering en waterketenzaken*

## **Welke zekerheden biedt Hans Korving ons?**

Fijn hoor, zo'n promotieonderzoek aan de TU Delft. Je verwacht toch dat je daar wat aan hebt! En gelukkig, hoewel het onderzoek behoorlijk wat overhoop haalt en achter veel 'vaststaande uitgangspunten' een vraagteken plaatst, zijn veel conclusies helder en bruikbaar. Ik denk ook dat veel conclusies de vermoedens van vele vakgenoten onderstrepen en kwantificeren.

78 |

In dit commentaar op het werk van Hans Korving wil ik ten eerste kort stilstaan bij bevindingen die me bijzonder opvallen of aanspreken. Ten tweede maak ik een paar opmerkingen over de doorwerking naar 'riolerend Nederland'. Ik zal niet ingaan op zaken als de aanpak, de methodes of het wetenschappelijke niveau van het werk, want daar ligt mijn competentie niet. Het feit dat Hans is gepromoveerd aan de TU Delft, zegt genoeg over de kwaliteit.

## **Opvallende en aansprekende bevindingen**

### *Besluitvorming*

Wat Hans in zijn conclusies over besluitvorming zegt, is mijns inziens de eindconclusie. Hans geeft aan dat het niet meenemen van onzekerheden over het functioneren leidt tot een veel te optimistische inschatting van het hydraulisch en milieutechnisch functioneren. Het is de vraag of de onzekerheid altijd dezelfde kant op werkt. Tenslotte is ook vaak sprake van te grote pompcapaciteiten ('we hadden even geen kleinere pomp'). Of zijn er in de zomer bij lange droge perioden vaak aanzienlijke inloopverliezen door verdamping, een lage grondwaterstand, plasvorming en infiltratie.

### *Modelkalibratie*

Enerzijds geeft Hans het belang aan van kalibratie (opsporen van systematische fouten). Anderzijds meldt hij dat de parameterwaarden per bui zodanig verschillen, dat je vraagtekens kunt zetten bij het belang van modelkalibratie voor reeksberekeningen. Hij merkt op dat de beperkingen van de gebruikte modellen (en dan natuurlijk vooral het neerslaginloopmodel) zeer groot zijn. Zijn conclusie is dat deze processen bepalend zijn voor de variatie in overstortingsvolumes. Met andere woorden: als we de procesbeschrijvingen in onze modellen niet verbeteren of uitbreiden, heeft het geen zin veel werk te steken in kalibratie als het gaat om een betere benadering van de vuiluitwerp. Dit pleit voor het oppakken van dit probleem. Misschien is het illustratief te melden dat een goede beschrijving van het verloop van de grondwaterstand een vitaal onder-

deel is bij modellering van neerslagafvoerprocessen in het landelijk waterbeheer. Als je dit verloop goed kunt beschrijven, kun je vaststellen dat je modellering in grote lijnen in orde is. De grondwaterstand is voor een landelijk systeem grotendeels bepalend voor de omzetting van neerslag naar afvoer. Voor een stedelijk systeem is dat natuurlijk minder evident. Maar iedereen die de praktijk kent, weet dat een rioolstelsel ook heel gevoelig is voor de grondwaterstand. Ook het onderzoek van Hans toont dit meermaalen aan. Misschien is het een goed idee om voor de aanpak van dit probleem toch eens te rade te gaan bij onze collega's in het landelijk waterbeheer.

### *Pompstoringen*

Toen ik in 1988 begon bij de afdeling Waterhuishouding in Rotterdam, was ik verbaasd over het uitgebreide systeem van storingsregistratie en -afhandeling. Bij het woord 'storing' dacht ik als TU-verlater onwillekeurig aan een toestand die eigenlijk niet mag bestaan. Na een paar jaar nijvere arbeid met vele collega's om het aantal storingen terug te dringen, wist ik wel beter. Het is een grote verdienste van Hans Korving dat hij een systematische analyse heeft gemaakt van het storingsgedrag en de gevolgen van storingen voor het functioneren (lees: de overstortingsvolumes). We weten allemaal dat storingen voorkomen en dat daardoor dingen misgaan. Dat is op zich nog niet het grootste probleem. Je kunt dat immers kwantificeren en er dan rekening mee houden. Maar dat gebeurt dus niet. Het is ten eerste belangrijk dat Hans aangeeft wat het effect van storingen kan zijn. En ten tweede kun je met deze wetenschap dus gericht aandacht geven aan het storingsgedrag en aan maatregelen om (de effecten van) storingen te beperken. Wat ik daarbij van groot belang vind, is de kettingreactie die storingen teweeg kunnen brengen. Ten onrechte beschouwen we rioolstelsels vaak als geïsoleerde systemen, terwijl stelsels elkaar in de praktijk op allerlei manieren beïnvloeden. Bij dergelijke cascadesystemen kan het effect van een storing veel verder reiken dan de (conservatieve) schatting van Hans. Hij keek immers naar een geïsoleerd stelsel met een eigen afvoer naar de rwzi en zonder injecties. Nog een opmerking: er zijn nogal wat rioleringsbeheerders die domweg alle rwa-pompen dubbel uitvoeren. Daarmee lijkt de schijn gewekt dat zij nauwelijks een probleem met storingen hebben. Er is immers een volledige reserve. Toch is dat niet helemaal waar. Zoals Hans ook toelicht, kan een pomp bijvoorbeeld ook teruglopen in capaciteit en kan de stroomvoorziening uitvallen (en dat gebeurt vaker dan velen denken). Zeker bij cascadesystemen kunnen de gevolgen van verminderde pompcapaciteit of elektriciteitsuitval groot zijn. In die gevallen kan sprake zijn van overstortingen die eigenlijk helemaal niet nodig zijn.

### *Betrouwbaarheid van beheergegevens*

De technici onder ons weten, denk ik, dat met name de inventarisatie van het verhard oppervlak en het bijhouden van deze informatie zorgenkindjes zijn. Het is heel belangrijk dat ook de studie van Hans weer de effecten van onderschatting van het verhard

oppervlak aangeeft. Maar de gevolgen van een herinventarisatie kunnen heel groot zijn. Tenslotte kan blijken dat een stelsel waarvan de beheerder dacht dat het keurig voldeed aan de Basisinspanning opeens veel te weinig berging heeft, vanwege onderschatting van het verhard oppervlak. Maar wat doe je daar als waterkwaliteitsbeheerder mee? Moet er dan maar weer een hoop beton de grond in?

#### *Herhalingstijd van overstortingen*

Het lijkt me van groot belang dat we de statistische methode die we in de Leidraad toepassen voor het bepalen van de herhalingstijden van overstortingen, nog eens kritisch beschouwen. Ik ben geen deskundige, maar ik denk dat Hans afdoende aantoonde dat deze methode wel erg kort door de bocht is. Bovendien leidt herbeschouwing ook tot een discussie over de normen voor de basisinspanning en het waterkwaliteitsspoor. We leiden immers vaak 'harde getallen' af uit de reeksberekeningen om te bepalen of een bepaald stelsel voldoet aan de basisinspanning of het waterkwaliteitsspoor. We weten allemaal dat dit nogal simpele methoden zijn om toch redelijk eenvoudig te kunnen bepalen of een stelsel voldoet of niet. We weten ook dat alternatieven niet direct voorhanden zijn. Het is dus zeker de vraag hoe de doorwerking moet zijn van het eventueel aanpassen van de statistische bewerkingen om de herhalingstijden van overstortingen (en de bijbehorende volumes) te bepalen. Wellicht moet je om te beginnen de normen aanpassen, zodat een nieuwe bepaling niet betekent dat alle stelsels moeten worden herberekend. Maar je moet wel ergens beginnen. Waarom niet beginnen bij het beter toepassen van de wiskunde?

80 |

#### **Hoe kunnen we reageren op de bevindingen van Hans Korving?**

Ten eerste levert het werk van Hans wetenschappelijke uitdagingen op. Wat er voor mij uitspringt, is de modellering van het neerslagafvoerproces. Daarin moeten toch verbeteringen mogelijk zijn.

Ten tweede de vraag naar de rioleringsbeheerder. Wat kan hij met de uitkomsten van het onderzoek? Hier liggen de meeste uitdagingen. Zowel voor het ontwerp als het beheer blijkt dat de introductie van een risicobenadering veel inzicht geeft in het theoretisch en praktisch functioneren van de riolering. Een beheerder die echt wil weten wat er in zijn stelsel gebeurt en zo goed mogelijk wil inschatten hoeveel water via de overstorten wordt geloosd op oppervlaktewater, kan prima aan de slag. Vragen daarbij zijn wel: waar werk je naartoe? Hoeveel tijd en geld kost dat? Wat vindt de waterkwaliteitsbeheerder van al je onderzoek? Je kunt natuurlijk veel tijd steken in storingsanalyse en in het treffen van maatregelen om het effect van storingen te beperken. Maar als je vervolgens wordt afgerekend op een standaardemissieberekening, heeft dat richting de vergunningverlener blijkbaar weinig zin.



Dat brengt me bij het derde punt. De vraag naar de positie van de waterkwaliteitsbeheerder. Ik heb de laatste jaren gemerkt dat het ondanks allerlei ‘moderne’ inzichten moeilijk is vanuit vergunningverlening zomaar dingen anders te gaan doen. Uit het werk van Hans blijkt ook dat hij primair aansluit bij de huidige normering. Hans onderzoekt een aantal onderwerpen, waarbij hij vaak als uitgangspunt neemt dat de basisinspanning moet worden bereikt. Dat is ook de huidige praktijk. Toch moeten we nu wel een paar stappen verder zien te komen. De Europese Kaderrichtlijn Water spreekt immers over een ‘goede waterkwaliteit en een goede ecologische toestand’. We hadden het zelf kunnen bedenken. Toch zal dat een omslag vergen in de manier van werken. Enerzijds moet je meer dan in het verleden integraal kijken naar een watersysteem. Wat zijn de vervuilende bronnen? Welke bronnen zijn de belangrijkste vervuilers? Welke kun je het makkelijkst aanpakken? Als je dan bij de riolering uitkomt als een belangrijke bron (of de stelsels die je beschouwt nu wel of niet aan de basisinspanning voldoen), moet je dus echt kunnen kwantificeren hoeveel de vervuiling vanuit de riolering is en welke invloed dat heeft op de waterkwaliteit. Als je dat weet, moet je vervolgens ook nog maatregelen en hun effecten kunnen bepalen.

| 81

Samengevat heeft het werk van Hans Korving veel kennis opgeleverd over het kwantificeren van de gevolgen van onzekerheden in het rioleringsbeheer. Het is aan beleidsmakers en de vakwereld om die inzichten verder in beeld te brengen en hanteerbaar te maken. De Europese Kaderrichtlijn Water lijkt me een prachtige aanleiding om deze uitdaging als waterketenpartners op te pakken.

## Sander Geenen

*Ir. A. Geenen werkt bij Gemeentewerken Rotterdam, tot voor kort als hoofd onderhoud en procesvoering bij de afdeling Waterhuishouding*

Allereerst is een compliment op zijn plaats. De publicatie is een goede uitwerking van de vraag van Stichting RIONED om het werk uit het proefschrift toegankelijker te maken. Het proefschrift behandelt complexe materie, die in deze publicatie ook voor rioleringsbeheerders begrijpelijk uiteen wordt gezet. Ik verwacht overigens niet dat dit geldt voor ‘de gemiddelde rioleringsbeheerder’, als deze al bestaat. Door de complexiteit van de materie en de gehanteerde (nog niet ingeburgerde) probabilistische benadering, blijft het lezen en begrijpen van de publicatie een opgave. Hieronder enige opmerkingen vanuit een praktische invalshoek.

82 |

### **Drie hoofddoelstellingen**

Zowel bij de doelstelling als later in de tekst gaat Korving heel snel in op het voorkomen van overstortingen en het hanteren van overstortende hoeveelheden als maat voor de beoordeling van het functioneren van gemengde rioolstelsels. Uiteraard een belangrijk item: vele verbetermaatregelen en nog meer planvorming betreffen dit onderwerp.

Ik pleit ervoor alle hoofddoelstellingen van het rioolstelsel fier overeind te houden:

- volksgezondheid;
- kwaliteit leefomgeving;
- bescherming grondwater, oppervlaktewater en bodem.

Ik vind dit nu enigszins ondergesneeuwd, omdat Korving al snel op hoofddoel nummer 3 inzoomt als dé beoordelingsmaatstaf, zonder de beperking aan te geven of het belang van een andere doelstelling dan puur de negatieve consequenties van overstortingen.

Ik denk dat een probabilistische benadering voor de beoordeling van een rioolstelsel zich juist goed leent voor andere rioleringsbeheerproblemen, zoals bepaling van restlevensduren van rioolbuizen. Als het bij een geavanceerdere benadering mogelijk blijkt de gemiddelde technische levensduur van een rioolbuis te verhogen, kan de financiële impact daarvan aanzienlijk zijn. Met IHE Delft hebben we vanuit Rotterdam hierover ook eens gesproken in de vorm van patroonherkenning van foto-inspecties van rioolbuizen. Maar vanwege de lange levensduur van riolering en het te transporteren medium blijft een robuust systeem nodig. Het volledig optimaliseren van een stelselontwerp leidt dan in mijn optiek sneller tot een ‘wat krapper’ systeem. En dat is iets waar je later héél veel spijt van kunt hebben. Denk aan klimaatwijzigingen en andere

maatschappelijke prioriteiten. Misschien flauw, maar wel realistisch: de rioleringsbeheerder betaalt het ontwerp en de eerste aanleg meestal niet uit eigen middelen en zal dus in eerste instantie geneigd zijn liever 'een onsje meer' aan te leggen.

### **Te scherpe focus op overstortingsvolumes**

Het geheel overziend heb ik het idee dat we een te scherpe focus leggen op overgestorte hoeveelheden. Terwijl de effecten van overstortingen op het oppervlaktewater - die de hogere doelstelling van reductie van overstortingen vormen - nog steeds veel minder in beeld zijn. In hoofdstuk 8 staat: 'Een betere onderbouwing van investeringsbeslissingen heeft ook een keerzijde. Het kan pijnlijk duidelijk maken dat een stelsel meer overstort dan werd verondersteld. Maar die onderkenning is van groot belang voor een goede investering.' Dit geeft de kern van beperkt gekwantificeerde besluitvorming weer. Hoezo pijnlijk? Het maatregelenprobleem (en daarmee het besluitvormingsprobleem) komt natuurlijk voort uit 'verplichtingen voor de rioleringsbeheerder' die niet altijd evenveel hout snijden.

| 83

Het belang van hoofdstuk 3 acht ik groot. Het hebben van een bestand betekent niets. Als we uitgaan van een foutloos bestand en dat onverkort hanteren, levert dit een grote bron van misverstanden en ellende: elk ingenieursbureau dat een hydraulische berekening gebaseerd op gemeentelijke databases heeft uitgevoerd, kan hierover meepraten. Het is van groot belang hieraan in de praktijk consequent en altijd (revisieverwerking!) aandacht te blijven besteden met voldoende gekwalificeerd personeel.

De publicatie richt zich uiteraard op een technisch-inhoudelijk lezerspubliek. Maar dat doet niets af aan het gegeven dat finale besluitvorming (hopelijk over de hoofdlijn) door het gemeentelijk bestuur plaatsvindt!

### **Specifieke opmerkingen**

Bij voorbeeld 2.2.1 het volgende. Voor het maken van het ontwerp zou ik een andere methodiek hebben verwacht. Volgens mij maak je op basis van eisen van gemeente en waterkwaliteitsbeheerder een goed hydraulisch ontwerp en volgen iteratief eventueel aanpassingen in de sfeer van extra berging, pompovercapaciteit of berging in randvoorzieningen.

De in tabel 3 gepresenteerde waarden riepen bij mij vragen op. Zeker in gebieden met slechte grondslag (verzakkingen), zoals delen van Rotterdam en andere plekken in West Nederland, zijn afwijkingen in actueel maaiveld en beheergegevens heel gebruikelijk. De genoemde standaarddeviaties vind ik dus erg klein, zeker voor deze gebieden. Een standaardafwijking van vijf procent in afvoerend oppervlak lijkt me een theoretisch minimum. Om het nog maar niet te hebben over de afstroomcapaciteiten

van het verharde oppervlak. Overigens ben ik ook zeer terughoudend over de vorderingen die met de huidige 'state of the art' nog kunnen worden gemaakt. De doorvertaling naar overstortingsvolumes bevat leuke, volgens mij niet nieuwe, eye-openers voor rioleringsbeheerders. Ik verwacht links en rechts in den lande een grotere spreiding aan te treffen.

De constatering 'Vaak registreren rioleringsbeheerders alleen fysieke aanpassingen aan pompen en gemaalkelders in logboeken en geen aanpassingen in de sturing van gemalen' is erg bewaarheid. Wat elektrotechnische installaties en besturingsystemen betreft, zie ik in gemeenten vaak een achterstand. Dit vindt men kennelijk ingewikkeld en spreekt minder aan vergeleken met civiele of mechanische onderwerpen.

84 |

In rendementsbeschouwingen in relatie tot pompen (van oorsprong een echt Rotterdamse benadering) geloof ik persoonlijk niet zo. De veelheid aan gegevens zoals we die in Rotterdam kennen, heeft het grote risico dat het je afleidt van de werkelijk belangrijke zaken: betrouwbare gegevens en expliciete evaluatie daarvan. Ik zie het dus ook veel meer als een kunst met beperkte informatie méér te doen. In elk geval zou dat naar mijn idee de insteek moeten zijn voor de breedte van de rioleringsbeheerders.

## Johan Jonker

*Ir. J.A. Jonker is als werktuigbouwkundige bij het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier betrokken bij het ontwikkelen van plannen en ontwerpen voor rioolwatertransportsystemen*

Mijn reactie is opgesteld vanuit de optiek van de rioolwaterzuiveraar. Ik heb daartoe specifiek mijn kennis en praktijkervaring op het gebied van inzamelen, transporteren en zuiveren ingebracht. Per hoofdstuk heb ik wat kanttekeningen toegevoegd. De boodschap van de publicatie is duidelijk. Er is nog veel winst te halen uit goed rioleringsbeheer. Maar vergeet niet dat de effecten zich niet alleen beperken tot de inzameltaak, maar zich voortplanten in de afvalwaterketen.

In relatie tot de gepleegde investeringen in de afvalwaterketen vind ik dat het accent onvoldoende op monitoring en toetsing van de werking van deze afvalwaterinfrastructuur wordt gelegd. Het motto 'meten is weten' is nog maar beperkt ingevoerd.

| 85

### **Inleiding**

Het functioneren van rioolstelsels wordt gekenmerkt door vele onzekerheden. Deze onzekerheden worden bepaald door factoren die binnen en buiten de invloedssfeer van de rioleringsbeheerder liggen. Zo zijn een goed ontwerp en onderhoud van het systeem factoren waaraan een rioleringsbeheerder wat kan doen. Externe factoren zijn moeilijker voorspelbaar, zoals neerslag en scherpere eisen voor rioolwateroverstorten. Bij nieuwbouw en vervanging moet de rioleringsbeheerder met deze factoren rekeninghouden.

Een probabilistische benadering staat of valt met goed rioleringsbeheer en de registratie en interpretatie van data van het functioneren van rioolstelsels. In de praktijk gebeurt dit niet of nauwelijks en is dit afhankelijk van beschikbare tijd, geld en de interesse van individuele beheerders (gemeenten). Het gevolg is dat bij de renovatie en aanpassing van rioolstelsels nauwelijks data en informatie beschikbaar zijn om de aanpassingsmaatregelen op juiste effecten te kunnen toetsen. Hierdoor is de kans op niet optimale investeringen of misinvesteringen groot. De praktijk leert dat regelmatig investeringen worden gedaan die onvoldoende effect hebben of achteraf niet noodzakelijk waren. Hiervan zijn de voorbeelden bekend. Dit onderbouwt de essentie van de publicatie van Hans Korving.

Er zijn twee aspecten die in het licht van de afvalwaterketen meer aandacht verdienen dan in de publicatie het geval is. Ten eerste is het inzamelen van rioolwater een gemeentelijke taak en onderdeel van de afvalwaterketen. De waterschappen verzorgen de zuiveringstaak en nemen het rioolwater af van gemeenten. Als rioolstelsels niet goed

functioneren, kan dit gevolgen hebben voor de zuiveringstaak. Voor goede uitvoering van de zuiveringstaak is het van belang dat de voorgaande schakel rioleringsbeheer ook goed wordt uitgevoerd. Ik wil hiermee aangeven dat effecten van maatregelen bij het rioleringsbeheer zich niet beperken tot alleen de inzameltaak. Ook het functioneren van de zuiveringstaak wordt daardoor beïnvloed.

Ten tweede verzorgt de afvalwaterzuiveraar in veel situaties de bemaling van rioolstelsels. Dit betekent dat het zuiveringsbedrijf het functioneren van de rioolstelsels mede beïnvloedt. Informatie-uitwisseling is in dat geval van groot belang, om inzicht te krijgen in het functioneren van stelsels en de te nemen maatregelen. In de praktijk worden afspraken gemaakt over de afnameverplichting op basis van statische modellen met kengetallen. De gemeenten en het zuiveringsschap hebben een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor het functioneren van de afvalwaterketen.

86 |

## Hoofdstuk 2 Besluitvorming rond rioleringsbeheer

Hier vormt de besluitvorming het afbakeningsaspect. Wat wordt wel en niet meegenomen in de modellering en wie beslist daarover? Hoe wordt omgegaan met onzekerheden en gevoeligheidsanalyses? Ik ben geen rioleringsexpert, maar vanuit mijn praktijkervaring ben ik tot het inzicht gekomen dat bepaalde essentiële aspecten van de modellering worden vergeten. Dit blijkt ook uit de publicatie.

De huidige situatie is dat maatregelen worden genomen op basis van theoretische modellen, die niet of nauwelijks met de praktijk worden getoetst. Dit wordt onder andere veroorzaakt door het gebrek aan rioleringsdata en druk van buitenaf, bijvoorbeeld wettelijke maatregelen die voor een bepaalde tijd moeten zijn uitgevoerd. Verder worden de modeluitkomsten niet altijd kritisch beoordeeld. Dit betekent dat de kans groot is, dat de modelanalyses leiden tot niet optimale of onjuiste maatregelen.

Parallel aan modellering zouden eigenlijk voldoende veldmetingen moeten worden uitgevoerd. Om modeluitkomsten en de werkelijkheid naast elkaar te kunnen leggen en goede analyses te kunnen uitvoeren. De praktijk is dat vaak wordt gemodelleerd op basis van kengetallen zonder toetsing met de praktijk.

Bij dit hoofdstuk wil ik de volgende kanttekeningen plaatsen:

- Bij de bronnen van onzekerheid (figuur 2) mis ik de kennis van beheerders van rioolwatersystemen. Het blijkt dat namelijk ook onvoldoende kennis en bedieningsfouten het functioneren beïnvloeden. De menselijke factor is niet onbelangrijk.
- Vermindering van de onzekerheden kan ook geld besparen. Namelijk reductie van de kans op niet-optimale of niet benodigde investeringen.
- Risicogebaseerde economische optimalisatie zou eigenlijk een onderdeel moeten

zijn van het onderzoek naar de aanpassing en bouw van rioolstelsels. Zoals Hans Korving aangeeft, is dit in de praktijk is nog niet aan de orde. Mogelijk een nog in te voeren verplichting? De vraag is hoe dit kan worden geïntroduceerd.

### **Hoofdstuk 3 Fouten in beheerbestanden**

Dit onderdeel gaat uit van bestaande rioolstelsels. De ervaringen bij bestaande rioolstelsels zijn van belang voor de realisatie van nieuwe rioolstelsels. Ik mis deze koppeling een beetje in de publicatie. Verder komen het type rioolstelsel, de gevoeligheid voor onzekerheden en de fouten in beheerbestanden niet in beeld. Dit zou een nader onderzoek waard zijn. Zo zijn gescheiden stelsels veel gevoeliger voor bepaalde onzekerheden en fouten in beheerbestanden dan gemengde stelsels.

Een praktisch voorbeeld. Bij ons in het gebied bevindt zich een wat ouder gescheiden rioolstelsel, waar het aantal verkeerde regenwataansluitingen in loop van de tijd tot disfunctioneren heeft geleid. Kostbare ingrepen zijn nodig om dit te verhelpen. Een gevoeligheidsanalyse op dit aspect is wellicht zinvol. Mogelijk kan meer berging op basis van deze ervaringen disfunctioneren voorkomen. De kengetallen voor verkeerde aansluitingen, waar voor dit type stelsel rekening mee is gehouden, zijn blijkbaar te laag ingeschat, met alle gevolgen van dien.

| 87

### **Hoofdstuk 4 Natuurlijke variatie in neerslag**

Het gebied van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier kenmerkt zich door zeer verschillende neerslagpatronen. De kustzone heeft een geheel ander gedrag dan het achterland. Ik stel mij zo voor dat bij de modellering, meer dan tot nu toe, rekening wordt gehouden met lokale effecten. Data van veldmetingen zouden eigenlijk veel meer moeten worden verzameld en benut voor de modelanalyses. Dit om tot betrouwbaardere uitkomsten te komen. In een aantal situaties proberen we in samenwerking met gemeenten deze informatie te verzamelen. Zo kunnen we het functioneren van rioolstelsels modelleren en de effecten van deze onzekere factor beoordelen.

### **Hoofdstuk 6 Gemalenbeheer**

De conclusie dat er geen uniformiteit in de registratie van pompstoringen is, is juist. De beschikbaarheid van rioolwaterpompinstallaties is afhankelijk van vele factoren. In de praktijk is gebleken dat een goed robuust ontwerp een zeer belangrijke factor is voor de storingsgevoeligheid. Verder is er een relatie tussen de capaciteit van een pompinstallatie en de storingsgevoeligheid. Het blijkt namelijk dat grote pompinstallaties veel minder storingsgevoelig zijn dan kleine. Het onderzoek van Hans kan verrijkt worden door deze correlatie toe te voegen.

Voor het functioneren van de bemaling van rioolstelsels is het van belang de beschik-

baarheid van pompcapaciteit te weten. De oorzaak van het niet beschikbaar zijn van capaciteit is divers en moeilijk achterhaalbaar. Dit omdat de definitie van de storingsen divers is en afhankelijk van de beheerder. Ik zou voor de modellering de kans op het beschikbaar zijn van pompcapaciteit in de tijd opnemen.

Dit is overigens een belangrijke parameter waarop beheerders kunnen toetsen of hun pompinstallaties naar behoren functioneren. Mij lijkt het een aanbeveling om de huidige storingsregistratie verder te analyseren en de beschikbaarheid per categorie gemaal na te gaan. Een apart onderzoek dus. Om tot deze informatie te komen, zouden van de PLC-registratiesystemen de data verwerkt moeten worden. De technische mogelijkheden zijn er.

88 |

Hans Korving geeft verder aan dat de registratie van storingskarakteristieken per beheerder verschilt. Ik voeg daaraan toe dat de storingsregistratie voor verbetering vatbaar is. In onze situatie worden pompdebieten continu geregistreerd. Hierdoor kan verminderd functioneren worden verholpen, nog voordat dit tot overstorting van rioolwater leidt. Dit reduceert de kans op het niet beschikbaar zijn van pompcapaciteit. In situaties waarin dit niet wordt gedaan, kan de opgenomen stroom van de pompen veel zeggen over functioneren. Het pomprenement is niet meetbaar en fluctueert teveel. Daarom is het minder geschikt.

Een ander punt is het slijtageaspect van rioolwaterpompen. Dit aspect mis ik in het onderzoek. Afhankelijk van het slijtagepatroon zal de capaciteit van rioolwaterpompen in de loop van de tijd afnemen. Dit kan geregistreerd worden door de afnemende capaciteit en druk. Regelmatige capaciteitsmetingen behoren tot de mogelijkheden.

In de praktijk blijkt ook dat instellingen voor de besturing belangrijk zijn en geoptimaliseerd kunnen worden om de kans op overstort van rioolwater te beperken. Hans geeft het al aan, namelijk dat het niet inkomen van de pompen soms pas bij het bereiken van het hoogwaterpeil wordt gesignaleerd. Het blijkt ook dat de schakelpeilen en de wijze van in- en uitschakelen van invloed zijn op de storingsgevoeligheid, vooral bij frequentiereguleerde pompinstallaties. Kortom, monitoring van de werking van pompinstallaties is een belangrijk onderdeel van de inzameling.

### **Conclusie**

Mijn reactie op de publicatie van Hans Korving is dat er winst is te behalen uit meer aandacht voor het rioleringsbeheer. De kosten van monitoring en tijdige registratie van de werking van rioolstelsels kunnen leiden tot optimalisering van de investeringen en het voorkomen van misinvesteringen. Op dit moment staan de kosten van monitoring van de werking waarschijnlijk niet in verhouding tot de investeringsuitgaven.



Binnen de afvalwaterketen is de zuiveringstaak afhankelijk van de resultaten van het rioleringsbeheer. Niet goed functioneren van rioolstelsels en onjuiste voorspellingen kunnen ook leiden tot niet optimaal investeren in het zuiveringsbedrijf. Er zijn praktijkvoorbeelden waarbij de modeluitkomsten van rioolstelsels hebben geleid tot onnodige investeringen voor de zuiveringstaak.

Mijn visie is dat monitoring van de werking van rioolstelsels en veldmetingen de basis moeten zijn om tot verantwoorde investeringen te komen. De kans is groot dat theoretische modellen die niet getoetst zijn tot onjuiste maatregelen en desinvesteringen leiden. Monitoring lijkt mij ook essentieel voor de voorgestelde modelleringsaanpak.

De storingsgevoeligheid van pompinstallaties en de effecten die dit heeft op het functioneren van rioolwaterstelsels, is nader onderzoek waard. Hans Korvings bevindingen zijn van belang en vragen om verder onderzoek. Mijn idee is de beschikbaarheid van pompcapaciteit in de tijd te monitoren. De factor is van belang voor het functioneren van rioolstelsels, maar de mate waarin is naar mijn mening nader onderzoek waard. Invloedsfactoren op de beschikbaarheid van pompcapaciteit zijn onder meer de pompcapaciteit en het ontwerp. Ik zie dat er nog een weg te gaan is.

# Harry van Luijtelaar

Ir. H. van Luijtelaar is senior adviseur stedelijk waterbeheer bij adviesbureau TAUW

Mede door de impulsen uit de universiteiten van Delft en Leuven maakt het rioleringsbeheer een ontwikkeling van ambacht naar wetenschap door. De vraag is of we dat in alle opzichten als een teken van vooruitgang moeten zien.

## Kennis en ervaring

De ontwikkeling van ambacht naar wetenschap gaat hand in hand met een ontwikkeling in onze samenleving, waarbij een getalsmatige onderbouwing van zaken een soort heilig uitgangspunt voor ons doen en laten is geworden. We zijn in toenemende mate bezig elkaar af te rekenen. Mensen schuiven daarbij steeds meer verantwoordelijkheden af naar modellen. Een probleem daarbij is dat onze werkelijkheden zich niet altijd laten vangen in modellen. Ter illustratie van deze ontwikkeling maak ik gebruik van de leerniveaus die professor Dreyfus heeft uitgewerkt in zijn publicatie *From Socrates to Expert Systems* (1985). In het schema geef ik een interpretatie van de leerniveaus van Dreyfus.

90 |

---

		ontwikkeling (verandering)
	praktijk (context)	praktijk (context)
model (norm)	model (norm)	model (norm)
beginner	vakman	expert
norm	functioneren	flexibiliteit/marge
basisinspanning	waterkwaliteit	klimaatontwikkeling
standaard	maatwerk	innovatie
vuistregel	interpretatie	intuïtie
model = heilig	model = hulpmiddel	model = maatje
Objectief	Subjectief	Perspectief

---

De vijftrapsbenadering van Dreyfus is omgebouwd tot een drietrapsindeling, verdeeld over de kolommen ‘beginner’, ‘vakman’ en ‘expert’.

- Een beginner heeft een heilig vertrouwen in modellen en vindt zijn houvast vooral in (objectieve) normen.
- Een vakman heeft minder vertrouwen in modellen en meer oog voor de praktijk, de context.
- Een expert heeft niet alleen oog voor de context, maar ook voor ontwikkelingen op het gebied van technologie, regelgeving en klimaat. Bij een expert speelt intuïtie een belangrijke rol. Dat is een essentiële eigenschap die lastig objectief is af te rekenen.

Een aantal elementen in het Dreyfus-schema vinden we terug in de benadering van Korving: behoefte aan robuuste en flexibele systemen, onzekere toekomst, technologische ontwikkelingen, veranderende prestatie-eisen, et cetera. Een belangrijke boodschap van Dreyfus is dat de mens niet volledig is te vervangen door een computer. Toch zijn we dat steeds harder aan het proberen.

| 91

### **Modellen en gebruikers**

Nog niet zo lang geleden werden modellen vooral gebruikt door mensen die kennis van en gevoel voor de softwaremogelijkheden hadden. Veel gebruikers bouwden hun software zelf. In toenemende mate komen er gebruikers die zich nauwelijks bewust zijn van inhoudelijke achtergronden en de grenzen van het toepassingsgebied van modellen. Resultaten van een rioleringsmodel zijn bijvoorbeeld niet geldig, zodra de waterstand in een put boven maaiveld stijgt. Niemand maakt daarom. Softwareleveranciers hebben weinig belang om grenzen helder aan te geven, zolang dat commercieel niet interessant is. Kleurige plaatjes met resultaten geven bovendien een safe gevoel van een degelijk onderbouwd resultaat. In de Dreyfus-context speelt het normgerichte gebruik van modellen zich vooral af in de kolom ‘beginner’.

### **Modellen en onzekerheden**

Korving levert een goede bijdrage in het relativeren van de waarde van modellen, door onzekerheden (objectief) zichtbaar te maken. In een gedegen analyse gebaseerd op een enorme rekeninspanning, geeft Korving in essentie aan dat de wereld buiten groter is dan in onze rioleringsmodellen is beschreven. Het is te hopen dat de vakwereld daarvan niet echt geschrokken is!

Korving kiest echter voor de weg om onzekerheden rond modellen te controleren door andere modellen te introduceren. Hij stapt daarbij redelijk luchtig heen over het feit dat in de controlerende modellen allerlei aannamen moeten worden gedaan. Via een omweg introduceert hij nieuwe onzekerheden, zoals bij het definiëren van functies

voor de kosten van milieuschade en het falen van het systeem. De aannamen gelden bovendien voor specifieke situaties en dat zal in een breder gebruik van modellen weer snel over het hoofd worden gezien. Om die effecten te onderzoeken heb je weer nieuwe modellen nodig, die.....etc.

In een ontwikkeling naar een overmacht van modellen wordt het steeds lastiger een model als een hulpmiddel of een maatje te hanteren. Dat wordt uiteindelijk een molensteen.

### **Statistiek**

Statistiek is een middel om techniek en bestuur te laten communiceren via een sleutelgat. Vaak is dat een herhalingsijd. De WB21-benadering is een mooi voorbeeld. Het watersysteem wordt gecontroleerd met een honderdjarige neerslagreeks op een noodzakelijkerwijs vereenvoudigd model. Die lengte van die reeks moet ons vooral het veilige gevoel geven. Door de vereenvoudigingen in het model kunnen we voor die veiligheid essentiële zaken gemakkelijk over het hoofd zien.

92 |

Het beeld naar het publiek is dat er een veilig criterium is gesteld. Dit betekent dat individuen her en der het slachtoffer kunnen worden van 'zogenaamde' uitzonderlijke omstandigheden. Dat noemen we overmacht. Onze rioolstelsels zijn berekend op een bui met een herhalingsijd van  $T = 2$  jaar, wij hebben daarmee aan onze plicht voldaan. Als het een keer wat harder heeft geregend en het water staat in uw woning, dan is dat dus overmacht. Een gebruikelijke, maar in mijn ogen principiële onrechtvaardige benadering. Met enig anticiperend denkvermogen en vaak eenvoudige maatregelen kan overlast worden voorkomen.

Korving richt zich hoofdzakelijk op het verbeteren van beslissingen op basis van meer inzicht in de statistische onzekerheden. Statistische onzekerheden vormen echter maar één zijde van een medaille met vier kanten. Walker et al. (2003) hebben een opsomming gegeven van vier onzekerhedenniveaus:

- Statistical uncertainty (measurement uncertainty, .....).
- Scenario uncertainty (future developments,.....).
- Recognized ignorance (climatic change,.....).
- Total ignorance (we do not even know what we don't know).

Het nemen van verantwoorde beslissingen betekent in essentie dat we alle onzekerhedenniveaus op evenwichtige wijze moeten afwegen. Voor de vakwereld is het een grote uitdaging de communicatie tussen techniek en bestuur op dat punt te verbreden!

### **Basisinspanning en optimaliseren**

We hebben de afgelopen jaren ruime ervaring opgedaan met de norm basisinspanning. Na twaalf jaar discussiëren in de polder hebben we onze norm 'eenduidig vastgesteld'.

De basisinspanning is het voorbeeld van een opvulnorm die het gebruik van modellen op beginnersniveau stimuleert. Het verbeteren van de waterkwaliteit in de praktijk speelt nauwelijks een rol en inspanningen in maatregelen zijn puur gericht op het zo zuinig mogelijk opvullen van de norm. De inzet van kennis is vooral gericht op creatieve boekhouding van kilogrammen BZV.

Het is wat ongelukkig dat Korving deze achterhaalde norm heeft gebruikt om zijn risicobenadering op toe te passen. Hij geeft aan dat er een ruime onzekerheidsmarge zit in de voorspelde vuiluitwerp uit rioolstelsels die 'voldoen' aan de basisinspanning. Naar mijn gevoel zijn de onzekerheden in de interpretatie van de norm mogelijk nog een orde groter.

De berekening van een optimale inhoud van een rioolstelsel zie ik als een interessante oefening. Hierbij moet ik toch constateren dat het begrip 'optimaal' nogal aan erosie onderhevig lijkt. Datzelfde gevoel heb ik bij de term 'kalibreren'. Dergelijke termen werken vooral suggestief richting markt.

| 93

Bij het optimaliseren van systemen 'vergeten' we vaak rekening te houden met toekomstige ontwikkelingen (scenario uncertainties). Die slimme oplossing betekent vaak dat de laatste rek uit een systeem wordt gehaald. Op basis van vakmanschap en intuïtie zou een geoptimaliseerd systeem veel meer worden gericht op flexibiliteit in functioneren en minder op gevoeligheid voor bepaalde veranderingen, zoals klimaatontwikkeling of regelgeving (recognized ignorance).

### **Resultaten onderzoek**

Korving toont aan dat het overstortingsvolume van een gemengd rioolstelsel gevoelig is voor:

- fouten in beheerbestanden;
- natuurlijke variatie in neerslag;
- functioneren hydrodynamische modellen (kalibren);
- storingen in gemalen.

Dit is eenvoudig te verklaren aan de hand van een getallenvoorbeeld. Circa drie tot vijf procent van de jaarlijkse neerslag komt tot overstorting. Een afwijking van twintig procent in het overstortingsvolume komt neer op circa 0,6 tot één procent van de jaarlijkse neerslag. Een kleine afwijking/storing in de belasting op een stelsel, de beschrijving van het stelsel of het functioneren van specifieke onderdelen wordt in het overstortingsvolume per definitie vergroot doorgegeven.

Een toename van vijftien tot twintig procent overstortingsvolume door pompstoringen is een interessant resultaat, maar komt me wat merkwaardig over. Een gemiddelde

pompstoringsduur van twee procent van de totale pompduur komt neer op circa zestig uur storing per jaar. Een gemengd rioolstelsel kan met een uitgevallen pomp ongeveer 35 uur dwa-aanvoer bergen. Mijn gevoel zegt me dat die cijfers nog een keer onder de loep moeten worden genomen. Waarschijnlijk zijn ze toe te schrijven aan bijzondere omstandigheden.

### **Kalibreren en beheerbestanden**

Kalibratie van rioleringsmodellen is een standaardonderdeel in de recente proefschriften uit Delft. De term ‘kalibreren’ vind ik te duur voor een rioleringsmodel dat op enkele essentiële punten maar een beperkt deel van de werkelijkheid beschrijft. Denk aan inloop en water op straat. Bij de term ‘kalibreren’ denk ik aan geconditioneerde experimenten op een laboratorium. Je kunt bijvoorbeeld een weegschaal kalibreren.

94 |

Een belangrijke conclusie van Korving is dat modelkalibratie op basis van individuele buien niet tot betrouwbaarder modelvoorspellingen leidt. Dat is niet vreemd, gelet op de beperkingen van een rioleringsmodel. Korving geeft aan dat kalibreren een belangrijk middel is om fouten uit beheerbestanden te halen, die je met het blote oog kennelijk niet kunt ontdekken. In mijn ogen een constatering met een erg hoog kanon- en muggehalte. Het is een mooi voorbeeld van een nieuwe ‘end of pipe’-benadering, terwijl we toch bezig zijn ons te richten op een bronaanpak?

Korving prijst een hydraulische berekening aan als een goede controle van een beheerbestand. De resultaten moeten vooral door een vakman worden beoordeeld. Dat is een essentiële stap in het in de vingers krijgen van het functioneren van een systeem, op weg naar het verzinnen van eventuele verbeteringsmaatregelen.

We moeten wel constateren dat de gemiddelde kwaliteit van een beheersysteem van een dermate amateuristisch niveau is, dat gebruikers niet worden uitgenodigd hun zaken goed op orde te brengen. Het niveau waarop de verantwoordelijkheid voor correcte informatie in veel organisaties is gelegd, staat vaak in geen enkele verhouding tot de waarde van deze informatie.

### **Conclusies**

Het onderzoek geeft een interessant getalsmatig inzicht in enkele meer of minder relevante onzekerheden in het bergend vermogen van een rioolstelsel. Het is duidelijk dat het overstortingsvolume overgevoelig is voor verstoringen die werken op de bergingscapaciteit van een rioolstelsel. We moeten ervoor waken om specifiek berekende getallen in het onderzoek niet als algemeen geldend te gaan beschouwen.

De meerwaarde van de gepresenteerde methoden voor de praktijk wordt wel overtuigend neergezet, maar nauwelijks gekwantificeerd. Denk aan het kalibreren van rioleringsmodellen voor het opsporen van fouten in beheerbestanden.

Een opvallende uitspraak is dat het kalibreren van rioleringsmodellen niet leidt tot betrouwbaarder modelvoorspellingen. Dat is niet vreemd, gelet op de beperkingen van een rioleringsmodel. Het functioneren van maatregelen kun je ook niet kalibreren, omdat ze nog gebouwd moeten worden.

Dit onderzoek geeft een voorbeeld van een risicogebaseerde economische optimalisatie van de berging in een rioolstelsel. Deze energievretende wijze van optimalisatie sluit nauw aan bij het afrekenen en eenzijdig opvullen van de basisinspanningsnorm. Deze energie kunnen we misschien beter steken in het verzinnen van maatregelen die tegen een stootje kunnen, zodat we minder afhankelijk zijn van de absolute (schijn!)nauwkeurigheid van statistisch onderbouwde antwoorden. We kunnen ons in de regelgeving beter richten op het belonen van beoogde effecten, dan op het minimaliseren van de hoogstnoodzakelijke inspanningen.

| 95

Het is belangrijk om een inschatting te maken hoe het verstandige gebruik van modellen in goede banen te leiden is. Ik ben op dat punt sceptisch, kijkend naar de toepassing van de ontwerpbuien uit de Leidraad Riolerings voor zaken waarvoor ze helemaal niet bedoeld zijn.

Modellen, normen en statistiek moeten we vooral beschouwen als een hulpmiddel en maatje om het functioneren van systemen te kunnen voorspellen, volgen en verbeteren. Mensen moeten de baas blijven en hun verantwoordelijkheden durven nemen.

Misschien is het handiger en verstandiger om in het omgaan met soorten onzekerheden wat meer flexibiliteit en ruimte te accepteren. Dat maakt veel zaken een stuk eenvoudiger en overzichtelijker.

### Literatuur

**Dreyfus H.L. en Dreyfus S.E. (1985).** *From Socrates to Expert Systems. The Limits of Calculative Rationality, Philosophy and Technology II: Information Technology and Computers in Theory and Practice*, Carl Mitcham and Alois Huning, Eds, Boston Studies in the Philosophy of Science Series.

**Walker W.E., Harremoës P., Rotmans J., van der Sluijs J. P., Van Asselt M.B.A., Janssen P., en Krayner von Krauss M.P. (2003).** Defining uncertainty - a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*. 4(1). 5-17.

# Hans Hartong

*Ir. H. Hartong is directeur van adviesbureau HKV Lijn in water*

Het was begin jaren tachtig. Het besturingssysteem voor de rioolgemalen in West-Friesland, de gemalen die afvoeren naar de rwzi Wervershoof, werd geïnstalleerd en in bedrijf gesteld. En daar verschenen ze op de monitor van de computer: overstortingen bij droog weer of bij een klein buitje. Het resultaat van defecte rioolgemalen. Niemand 'maalde' er echt om. En de overstortfrequentie was een theoretisch getal, die moest je vooral niet echt gaan tellen. Defecte pompen hoorden daar al helemaal niet bij.

96 |

Ruim twintig jaar verder kruipt nu de theorie van het ontwerp en beheer van rioolstelsels meer en meer naar de werkelijkheid. En andersom, de werkelijkheid wordt in de theorie opgenomen. Kalibratie, verificatie en toetsing van rekenresultaten aan waarnemingen en metingen zijn geen onbekende activiteiten meer. Het is dan ook niet verwonderlijk dat nu ook de eerste stap wordt gezet in het beoordelen van en het omgaan met de onzekerheden, die zowel in theorie als praktijk aanwezig zijn. Het onderzoek *Risicogebaseerde beoordeling van het functioneren van rioolstelsels* is die eerste stap.

## **Aannamen en onzekerheden**

In het onderzoek is gekozen voor een probabilistische benadering. Geen vreemde keuze. De probabilistische benadering vindt zijn oorsprong in het ontwerp van onze Nederlandse dijken en is al jaren standaardpraktijk in het ontwerp en beheer van de regionale watersystemen in ons land.

Het onderzoek zet vraagtekens bij een aantal min of meer vanzelfsprekende aannamen over het functioneren van rioolstelsels. In veel van deze aannamen zitten onzekerheden verborgen. In het bijzonder de onzekerheden die schuilen in hydraulische modelberekeningen, de kwaliteit van visuele inspecties, het bedrijfszeker functioneren van rioolgemalen en de veronderstelling van een gebiedsgelijkmatige neerslagbelasting. Het niet kennen van en het niet kunnen omgaan met deze onzekerheden leiden tot een veel te optimistische inschatting van het hydraulisch en milieutechnisch functioneren van een rioolstelsel; zowel momentaan als over de levensduur van het rioolstelsel.

Het onderzoeksrapport laat zien dat we doorgaans aan de verkeerde kant uitkomen als we nota nemen van de onzekerheden in onze aannamen. Het rioolstelsel functioneert dus minder dan we impliciet aannemen of wordt ontworpen met minder prestatievermogen dan we denken te ontwerpen.



Het leren kennen van de invloed van onzekerheden in onze aannamen over ontwerp en beheer van rioolstelsels heeft invloed op de investeringsbeslissing. Het onderzoeksrapport geeft daarvan verschillende voorbeelden. U zegt misschien: dat leidt uiteindelijk tot ontwerpen waarbij het stelsel precies functioneert volgens de ontwerpregels, dus een stelsel waarin geen enkele functionele marge meer zit. Juist niet. Het inzicht in de onzekerheden leert ons dat bestaande stelsels minder marge hebben in het functioneren als ze worden ontworpen met ontwerp-aannamen zonder daarbij de onzekerheden te kennen. We moeten juist naar stelsels die zijn ontworpen met ontwerpregels waar we de onzekerheden van hebben meegenomen in het ontwerp.

Het onderzoeksrapport toont op onmiskenbare wijze de praktische relevantie van de analyse van de effecten van onzekerheden in ontwerp- en beheeraannamen. Er zijn vier verschillende onzekerheden onderzocht, maar er zijn er nog veel meer. Aan de slag dus.

| 97

### **Probabilistische aanpak**

Een ander belang van het onderzoek ligt in de keuze van de methodische aanpak. Het onderzoek is een eerste stap in de toepassing van een probabilistische aanpak bij een rioleringsvraagstuk. Het is ook een van de eerste keren dat een dergelijke benadering wordt toegepast voor een rioleringsvraagstuk. De grote kracht van de probabilistische benadering, zoals die ook tot uiting komt bij het ontwerp en beheer van waterbouwkundige systemen in ons land, vraagt om een vervolg. Met name op het gebied van de ontwerpneerslag voor rioolstelsels en de levensduurbepaling van rioleringen liggen interessante toepassingsmogelijkheden. Deze kunnen leiden tot een beter inzicht in kostengunstig ontwerp en beheer van rioolsystemen. We hoeven deze draad alleen maar op te pakken, de basis ligt er.

# Antwoord

*Hans Korving*

Allereerst wil ik Hans Geerse, Sander Geenen, Johan Jonker, Harry van Luijtelaar en Hans Hartong bedanken voor het feit dat zij bereid waren te reageren op mijn bijdrage aan de RIONED-reeks. Zij hebben zich in het onderwerp verdiept en hun mening voor ons allen op papier gezet. Ik juich het zeer toe dat stichting RIONED in deze reeks een podium biedt voor discussie over nieuwe ontwikkelingen. Op deze manier wordt een brug geslagen tussen wetenschap en praktijk. Naar mijn mening wordt in ons vakgebied veel te weinig gediscussieerd over de kant die we met z'n allen op zouden moeten.

98 |

Wat in de reacties opvalt, is dat in het algemeen de meerwaarde van een probabilistische benadering van het beheervraagstuk in de riolering wordt onderschreven. Johan Jonker en Sander Geenen wijzen erop dat er genoeg voorbeelden zijn van investeringen die niet het gewenste effect hadden. Naar hun oordeel ligt de oorzaak dan vaak in te veel onzekerheden en fouten. Verder benadrukt Hans Geerse dat een risicobenadering een beheerder veel inzicht geeft in het functioneren van zijn stelsel. Hans Hartong geeft aan dat binnen het regionale waterbeheer al veel ervaring met risicogebaseerde beoordeling van watersystemen is opgedaan en dat wij daarmee binnen de riolering ons voordeel kunnen doen. Hij ziet aanknopingspunten voor de bepaling van een ontwerpneerslag voor rioolstelsels en de levensduurbepaling van riolering.

## **Van ambacht naar wetenschap?**

Harry van Luijtelaar zet echter vraagtekens bij de waarde van een probabilistische benadering. Hij stelt de fundamentele vraag of het wenselijk is dat het rioleringsbeheer zich ontwikkelt van ambacht naar wetenschap. Naar zijn mening verwordt een methodiek die vooral gebaseerd is op modelresultaten eerder tot een last dan een lust. Een ontwerper gaat zich mogelijk verschuilen achter zijn model. Bovendien neemt de praktijkkennis van modelgebruikers steeds meer af. Hij bepleit dat een model slechts een hulpmiddel is voor een ontwerper die verder zijn intuïtie en ervaring gebruikt om tot een goed resultaat te komen. Het belangrijkste is volgens hem hoe het verstandig gebruik van modellen in goede banen te leiden is. Ik deel zijn mening dat een vakman modelresultaten moet beoordelen, maar een probabilistische benadering leidt zeker niet tot minder behoefte aan vakmensen. Het is juist een methodische aanpak die vraagt om evenveel, zo niet méér, vakkennis dan de traditionele aanpak. Om de invloed van operationele gebreken (zoals verstopte leidingen) te toetsen, is het namelijk onverstandig om gewoon maar veel sommen te maken. Het is belangrijk om met kennis van zaken de juiste sommen uit alle mogelijke te kiezen, zodat de benodigde rekentijd binnen de perken blijft.

## **Van reactief naar proactief beheer**

Zoals eerder vermeld zijn op andere vakgebieden goede ervaringen opgedaan met de toepassing van risicoanalyse bij ontwerp en beheer van (technische) systemen. Ver van ons bed in de ruimtevaartsector, maar ook dichterbij huis in het landelijk waterbeheer en bij het beheer van de railinfrastructuur. Vaak is de achterliggende reden een gewenste overgang van reactief naar proactief beheer van de infrastructuur. Ervaringen uit het verleden bieden om verschillende redenen onvoldoende garanties voor de toekomst:

- minder resterende veiligheid in systemen door vergaande optimalisatie en gedetailleerde modellering;
- toepassing voor nieuwe oplossingen en technieken waarvan de effectiviteit nog niet bewezen is;
- steeds minder ervaring bij beheerders door 'job rotation' en uitbesteding;
- hogere eisen aan veiligheid (toenemende economische activiteiten en meer risico's) en beschikbaarheid (zeven dagen per week gedurende 24 uur).

| 99

Dit alles vraagt om het vooraf uitvoeren van een risicoanalyse om de kwetsbare onderdelen van het systeem op te sporen en uiteindelijk kostenoptimaal te kunnen bouwen en beheren. Bij ProRail, onder meer verantwoordelijk voor beheer en instandhouding van de Nederlandse railinfrastructuur, is zelfs de ervaring dat risicoanalyse gaat functioneren als een gemeenschappelijke taal van de hele organisatie. De ambachtelijke kennis van het onderhoudspersoneel komt zo bij het management terecht en abstracte onderhoudsconcepten kunnen worden vertaald naar de werkvloer. Hier gaan ambacht en wetenschap hand in hand.

## **Krappe ontwerpen**

Volgens Harry van Luijtelaar en Sander Geenen leidt een risicogebaseerde benadering tot (te) krappe ontwerpen waaruit alle veiligheid verdwenen is. Het zou alleen maar nog meer normopvulling in de hand werken dan nu bij de basisinspanning al het geval is. Naar mijn mening is het niet zo dat risicoanalyse leidt tot normopvulling en mogelijk onveiligere systemen. Een probabilistische benadering geeft rioelstelsels die zijn ontworpen met ontwerpregels, waarin onzekerheden verdisconteerd zijn. Ook Hans Hartong wees hier al op. De methode presenteert de resultaten niet als harde getallen, maar als verwachte waarden met daaromheen een bandbreedte. We kunnen dan kiezen of een rioelstelsel met bijvoorbeeld vijftig of negentig procent zekerheid moet voldoen aan de gestelde norm. Op deze manier kan bewust gekozen worden voor een meer of minder robuust stelsel. Dit vraagt van besluitvormers de vaardigheid om met onzekerheid om te gaan, maar dat lijkt me niet het grootste probleem.

## **Herkenning in de praktijk**

Uit alle reacties wordt duidelijk dat de beschreven onzekerheden en hun invloed in de praktijk worden herkend. Zo wijst Sander Geenen op de noodzaak voor consequente revisieverwerking. Johan Jonker pleit ervoor om ruimtelijke neerslagspreiding in modelberekeningen mee te nemen. Er blijkt draagvlak aanwezig om onzekerheden te verdisconteren in ontwerp en beheer. Vanuit hun achtergrond als waterkwaliteits- en zuiveringsbeheerder merken Hans Geerse en Johan Jonker terecht op dat onzekerheden over het functioneren van de riolering ook gevolgen hebben voor de rwzi en het oppervlaktewater. Dit betekent dat de inbreng van alle partners in de (afval)waterketen ertoe doet.

100 |

Daarentegen wordt ook aangegeven dat de vier onzekerheden in de publicatie niet het hele verhaal zijn. Wat volgens de schrijvers ontbreekt, zijn klimaatontwikkeling, gebrek aan kennis bij beheerders en onzekerheid bij aanleg van nieuwe stelsels. Ik ben mij ervan bewust dat nog veel meer onzekerheden van invloed zijn op de robuustheid van rioolstelsels. Het zou te ver voeren om die allemaal voor deze publicatie te behandelen. Het doel van deze publicatie is slechts het belang van risicoanalyse te onderstrepen en de vakwereld te prikkelen. Binnen het onderzoek is de invloed van onzekere ontwikkelingen op het gebied van klimaat en overheidsbeleid wel onderzocht (zie *Korving et al., 2001*).

## **Modelkalibratie**

Harry van Luijtelaar heeft kritiek op het verwijderen van fouten uit beheerbestanden met behulp van kalibratie. Hij vindt dat dit handmatig moet gebeuren op basis van de ervaring van de modelleur en dat kalibratie hiervoor niet het geëigende instrument is. Ik ben het ermee eens dat het verwijderen van fouten in eerste instantie handwerk is. Maar mijn ervaring is dat sommige fouten niet of nauwelijks op te sporen zijn zonder de resultaten van een modelkalibratie. Het wiskundige kalibratiealgoritme fungeert als gereedschap waarmee snel en eenduidig informatie over de kwaliteit van een model boven water komt. Met deze informatie wordt het opsporen en elimineren van bestandsfouten een stuk eenvoudiger. Dit betekent dat kalibratie geen sluitstuk is, zoals Harry van Luijtelaar suggereert, maar een ontzettend handig hulpmiddel.

## **Basisinspanning**

Er is enige kritiek op het feit dat het onderzoek met name gerelateerd is aan de huidige normering, de basisinspanning. Sander Geenen geeft aan dat alleen kijken naar overstortingsvolumes onvoldoende is en dat ook het houden van droge voeten en het beschermen van de volksgezondheid onze aandacht moeten blijven houden. In de ogen van Harry van Luijtelaar is de basisinspanning slechts een opvulnorm die vooral creatief boekhouden voor BZV- en CZV-emissies in de hand werkt. Ik ben het volledig eens

met de opmerking dat de basisinspanning niet de ideale norm is. Deze norm is echter als uitgangspunt van de publicatie genomen om de gevolgen van onzekerheden op het huidige beleid zo goed mogelijk in kaart te brengen. Hans Geerse geeft een richting voor de toekomst aan. Hij vindt dat we op basis van de analyse van de basisinspanning een paar stappen verder moeten denken en vooral de waterkwaliteitsbeheerder erbij moeten betrekken. De Europese Kaderrichtlijn Water vraagt erom. Dit onderschrijf ik volledig. Laten we de uitdaging maar aangaan om gezamenlijk te streven naar een norm die de functies van de riolering in haar omgeving recht doet en tegelijkertijd oog heeft voor onzekerheden.

### **Pompstoringen**

Alle reacties besteden aandacht aan het onderwerp pompstoringen. Het probleem wordt herkend en de meerderheid erkent ook de ernst van de gevolgen. Vanuit zijn praktijkervaring legt iedere schrijver zijn eigen accenten. Zo geeft Johan Jonker aan dat vooral het ontbreken van uniformiteit in storingsregistraties een groot probleem is. Sander Geenen wijst op zijn beurt op het belang van het bijhouden van logboeken.

| 101

De sleutel om de negatieve gevolgen van pompstoringen te voorkomen, lijkt te liggen in goede signalering. Alleen over de manier waarop dit zou moeten gebeuren, bestaat niet echt overeenstemming. Johan Jonker ziet als oplossing het continu registreren van verpompte debieten en stroomverbruik. De nadruk moet in zijn ogen liggen op het monitoren van de beschikbaarheid van pompen. Maar Sander Geenen ziet weinig in het verzamelen van nog meer gegevens, zoals pomprendementen. In zijn ogen leidt dit alleen maar af en moet de nadruk liggen op een goede analyse van basisgegevens.

De verschillende reacties laten zien dat pompstoringen onze aandacht verdienen. Om een stap verder te komen, is het volgens mij vooral van belang dat we op de juiste manier de juiste gegevens verzamelen die ons zo goed mogelijk inzicht geven in de werking van pompinstallaties en hun invloed op het functioneren van het afvalwatersysteem als geheel. Het onderwerp is zeker nader onderzoek waard.

### **Tot slot**

Deze publicatie laat zien dat modelresultaten niet het volledige verhaal vertellen; er zitten onzekerheden in. Daarom moeten modellen gecombineerd worden met veldmetingen om de resultaten te toetsen. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn de beschikbaarheid van onderdelen (zoals pompen, persleidingen en wervelventielen), het functioneren van de riolering en de kwaliteit van het oppervlaktewater. Kortom meer monitoren, want zonder gegevens valt er niet(s) te managen.

# Summary

This publication is a Dutch summary of the PhD thesis *Probabilistic Assessment of the Performance of Combined Sewer Systems* by Dr. H. Korving. It especially examines the possibilities of practical implementation of risk-based asset management. Finally, the results are critically reviewed by several experts in urban drainage.

## Too optimistic impression

Usually, serviceability of a sewer system is assessed on the basis of model results because of insufficiency of measurements. Serviceability is defined as “The ability of an asset to deliver a specific service to customers”. The services offered by a sewer system consist of protection of public health and prevention of flooding provided that the quality of the environment is safeguarded. Hydraulic performance is assessed on the basis of calculations (e.g. combined sewer overflows (CSOs) and flooding) that support interventions reducing environmental and economic damage. Visual inspections (e.g. closed circuit television (CCTV) data) in combination with predictions of remaining service life determine whether rehabilitation is necessary.

However, this approach has several shortcomings. Firstly, uncertainties in knowledge of system structure, system dimensions and determinative processes are ignored. Secondly, natural variability of rainfall is not considered. Thirdly, system performance is often described with imperfect models assuming that assets are not liable to failure, such as blockage of conduits due to ingress of soil or root intrusion, subsidence of conduits and technical failure of pumps. Finally, it assumes that deficiencies can be (visually) detected and quantified. All this leads to a too optimistic impression of sewer performance.

## Risk analysis

The research *Probabilistic Assessment of the Performance of Combined Sewer Systems* had the objective to provide a methodology for the assessment of serviceability of sewer systems accounting for uncertainty and risk. It determines the serviceability of a sewer system with respect to environmental impacts and is based on predicted system performance. Several uncertainties are accounted for, including database errors, rainfall variability, parameter uncertainty after calibration and failure of assets. For that purpose, several techniques from uncertainty and risk analysis have been applied to the assessment of the hydraulic performance and structural condition of sewers. For example, risk analysis enables decision-making on either improving repair and maintenance of sewage pumps or enlarging in-sewer storage capacity in order to reduce CSOs.

### **Database errors and rainfall variability**

The data set applied in a hydrodynamic model is never entirely perfect. Errors in the database of a sewer system affect calculation results of hydrodynamic models. Within a sewer database, several data types are distinguished, including geometry of sewer system, hydraulic parameters, runoff parameters, catchment area and structure of sewer system. In addition, rainfall input uncertainties are one of the most important sources of uncertainty. Uncertainties regarding rainfall consist of natural variability in the rainfall process, measurement errors and uncertainties resulting from simplification of the real spatial variability of the rainfall.

Errors in sewer databases and rainfall variability considerably affect calculated sewer performance. The former results in larger average CSO volumes, whereas the latter has the largest impact on the variation of CSO volumes. The observed variation increases with increasing return periods. However, variation due to rainfall variability partly results from the limitations of the rainfall generator, which underestimates the volume of frequent storm events with a duration longer than 2 hours.

| 103

### **Model calibration**

Model calibration may considerably influence calculation results. Calibration is the process in which model structure and parameters are adapted in such a manner that the model reproduces measured behaviour as well as possible. Calibrating a model reveals discrepancies between model and observed reality. It enables the quantification of systematic errors, which may stem from incomplete process descriptions in the model, errors in the database of the sewer system and measurement errors.

Event-based calibration of a sewer model does not result in more reliable model predictions because the calibrated parameters have low portability. However, the advantage is that database errors can be removed during calibration, which harmonises model predictions and 'reality'. Variation of calculated CSO volumes due to differences in calibrated parameter sets based on different storm events is dominant. This variation increases with increasing return periods. It is also clear that, for sloping catchments, a simplified model overestimates CSO volumes. As a result, using a series of separate reservoirs may improve predictions.

### **Failure of sewage pumps**

Sewage pumping stations and pressure mains are critical components of sewer systems, especially in flat countries like The Netherlands. Their performance is directly responsible for affecting the serviceability of a sewer system. Availability and reliability of sewage pumps have been modelled with various descriptions of the failure process using available field data.

The failure rate of a pump can increase due to ageing or decrease due to renewal or refurbishment. Furthermore, failures of sewage pumps tend to be clustered. The analysis of failures of sewage pumps should account for the chronological order of events. The number of failures is relatively large compared to pumps in drinking water, polders and wastewater treatment plants. It varies strongly and is independent of the specific function of a pump. The average duration of failures is also highly variable and depends on the repair policy. The serviceability of a sewer system is significantly affected by pump failures. Average yearly CSO volumes increase more than 15%. Therefore, improved maintenance of sewage pumps will improve sewer performance.

### **Final conclusion**

In conclusion, risk-based assessment of sewer performance will result in more effective investments with respect to sewer maintenance and rehabilitation. Risk-based assessment accounts for unavailability of assets and uncertainty of driving forces, system knowledge and impacts. Therefore, field data on the performance of sewer systems are required in order to check model results. In addition, new serviceability standards for sewer systems should account for impacts of uncertainties.