

Geoptimaliseerde sturing van rioleringssystemen; een case-study in Rotterdam

1. Sturing in het waterbeheer

De afgelopen jaren is het gebruik van geautomatiseerde meet- en regelsystemen voor het (stedelijk) waterbeheer aanmerkelijk toegenomen. Het algemene argument voor automatisering is dat hierdoor beter kan worden voldaan aan de steeds strenger wordende kwantiteits- en kwaliteitseisen, die aan het waterbeheersingssysteem worden gesteld.



FONS NELEN
TU Delft
Vakgroep Gezondheidstechniek
& Waterbeheersing



TON BEENEN
TU Delft
Vakgroep Gezondheidstechniek
& Waterbeheersing



HANS GEERSE
Gemeentewerken Rotterdam
afdeling Waterhuishouding

Door het automatisch registreren en verwerken van een groot aantal systeemvariabelen, zoals peilen, debieten, klepstanden, pompregimes enzovoort, wordt een beter totaalbeeld van de actuele toestand van het systeem verkregen, wat gebruikt kan worden ter onderbouwing van het te voeren beleid. De voordelen voor planning en onderhoud zijn evident. Door signalering (alarmering) kan in geval van bijzondere omstandigheden en storingen sneller worden ingegrepen, waardoor het risico van het optreden van ongewenste situaties kan worden verminderd. Hoewel deze en andere voordelen van meet- en regelsystemen relevant zijn voor een efficiënt waterbeheer, wordt opgemerkt dat tot op heden bij de meeste waterbeheersingssystemen de nadruk vooral ligt op automatisering van het (informatie) systeem, wat geen synoniem is voor sturing van het watersysteem. Kenmerk van sturen is dat de gewenste systeemtoestand niet constant is. Bij rioolgemalen, die functioneren op lokaal ingestelde in- en uitslagpeilen, is sprake van constante set points (gewenste waarden). Onafhankelijk van de situatie elders in het systeem, wordt bij het optreden van een bepaald peil een zeker pompdebiet ingesteld. Hierbij wordt voorbijgegaan aan het feit dat de belasting van het rioleringssysteem, het afvoer-

Samenvatting

Een belangrijk probleem bij sturing van rioleringssystemen vormt de sturingsstrategie. Deze beschrijft hoe de regelkunstwerken in het systeem moeten worden geopereerd in de tijd, om zo goed mogelijk aan de operationele doelstellingen te voldoen. Dit artikel beschrijft beknopt het operationele optimalisatieprobleem en de hiervoor ter beschikking zijnde oplossingsmethoden. De meest geschikte methode voor een systeemanalyse is het probleem te formuleren als een wiskundig optimalisatieprobleem. Er wordt een simulatiemodel gepresenteerd, genaamd LOCUS, waarin het sturingsprobleem als zodanig wordt benaderd. Vervolgens wordt ingegaan op de resultaten van een modelstudie van het rioleringssysteem van Rotterdam. Hierin wordt het systeemgedrag onder centrale, geoptimaliseerde sturing vergeleken met de huidige situatie, waarin het systeem lokaal wordt gestuurd, gebaseerd op in- en uitslagpeilen. Met geoptimaliseerde sturing blijkt een aanzienlijke reductie van overstortende hoeveelheden mogelijk te zijn.

proces en de effecten op de omgeving (in de ruimste zin van het woord), tijd- en plaatsafhankelijke grootheden zijn. Dit impliceert dat het installeren van transport- en bergingscapaciteit alleen, niet voldoende is voor een zo goed mogelijk functioneren van het afvalwatersysteem. Als gevolg van de dynamiek van het systeem is slechts door een actieve beheersing van het afvoerproces het maximale systeemrendement (= minimale 'schade' door wateroverlast en lozingen op oppervlaktewateren, tegen minimale kosten) te bereiken. De cruciale vraag hierbij is hoe en wanneer in het afvoerproces in te grijpen, ofwel welke sturingsstrategie hierbij gevolgd moet worden, om zo goed mogelijk aan de operationele doelstellingen te kunnen voldoen. Deze vraag speelde onder meer bij de Afdeling Waterhuishouding van de Dienst der Gemeentewerken Rotterdam, die voor de besturing van het rioleringssysteem de beschikking heeft over zeer geavanceerde meet- en regelapparatuur. Het systeem, dat onder normale bedrijfsomstandigheden geheel autonoom functioneert, wordt continu gevolgd door een operator, die bij hevige neerslag of in bijzondere bedrijfsomstandigheden, vanuit de centrale meld- en regelkamer kan ingrijpen in het afvoerproces. Gezien de complexiteit van het probleem zal de operator op basis van op ervaring stoelende instructies, maar vaak ook intuïtief moeten handelen (heuristische sturing). Dit kan leiden tot inconsistente beslissingen, waardoor een evaluatie en verfijning van de sturingsstrategie wordt bemoeilijkt. Een model, dat uitgaande van actuele meetgegevens en gedurende het afvoerproces (in 'real time') een theoretisch optimale strategie bepaalt, zou hier dienst kunnen doen als beslissingsondersteuningssysteem. Aan de TU Delft is de vraag onderzocht, hoe een geoptimaliseerde sturingsstrategie kan

worden afgeleid. Hiertoe is een model ontwikkeld, genaamd LOCUS (Linear Optimized Control of Urban drainage Systems), dat als basis kan dienen voor het genoemde beslissingsondersteuningssysteem. LOCUS is echter in de eerste plaats bedoeld voor het uitvoeren van systeemanalyses van een afvoersysteem onder centrale, geoptimaliseerde sturing. Uitgaande van een meerbaksbenadering van het systeem, wordt met behulp van een mathematische optimalisatie techniek (netwerk-optimalisatie) de sturingsstrategie afgeleid. De rekensnelheid en benodigde geheugencapaciteit zijn dusdanig, dat tijdreeksen van neerslaggebeurtenissen voor relatief grote systemen kunnen worden doorgerekend met een 'normale' microcomputer (AT 286/386). Door het doorrekenen van tijdreeksen is inzicht te krijgen in de statistische eigenschappen van de output variabelen (bijvoorbeeld overstortingen). Aldoende kunnen de mogelijkheden en effecten van sturing, voor verschillende systeemcapaciteiten en operationele doelstellingen, worden bepaald. In dit artikel wordt allereerst kort aandacht besteed aan de theoretische achtergronden van het sturingsprobleem. Een uitgebreidere beschrijving is te vinden in [SAMWAT, 1990]. Vervolgens wordt ingegaan op de situatie in Rotterdam en zullen de resultaten van een case-study worden besproken. Hierin is onder meer onderzocht wat de voordelen zijn van centrale, geoptimaliseerde sturing, vooral voor overstortingen, vergeleken met de huidige situatie onder lokale sturing.

2. Het sturingsprobleem

Het sturingsprobleem bestaat uit het vinden van een dusdanige strategie, waarbij zo goed mogelijk aan de operationele doelstellingen wordt voldaan, gegeven een bepaalde verstoring van het

systeem, onder de voorwaarde dat de strategie uitvoerbaar is. Elke vorm van sturing vereist 3 soorten informatie:

1. De formulering van de operationele doelen, waaraan het waterbeheersingssysteem moet voldoen. Om rationele en consistente beslissingen te kunnen nemen is het veelal nuttig om de operationele doelen van het systeem te rangschikken naar prioriteit en te definiëren hoe afwijkingen van het gewenste gedrag worden beoordeeld (de doelfunctie van het probleem).

2. Informatie over de verstoring en de actuele toestand van het systeem. Metingen (en/of modelwaarden) van een aantal fysische grootheden, zoals neerslag, peilen en debieten, zijn voor sturing onontbeerlijk.

3. Een beschrijving van het systeemgedrag. Bij het afleiden van een sturingsstrategie moet met 3 typen randvoorwaarden rekening worden gehouden:

- de statische randvoorwaarden of capaciteitsvoorwaarden (bijvoorbeeld maximale bergingscapaciteit, afvoer-capaciteit);

- de dynamische randvoorwaarden (de wetten van de hydrodynamica);

- de bedrijfstechnische randvoorwaarden (bijvoorbeeld de maximale schakelfrequentie van pompen).

In de terminologie van Operations Research, een vakgebied uit de wiskunde, kan het sturingsprobleem worden omschreven als:

minimaliseer de doelfunctie (1), onderhevig aan een set randvoorwaarden (2 en 3). Afhankelijk van de oplossingsmethode gelden andere voorwaarden voor de formulering van de doelfunctie, de systeemvergelijkingen en de randvoorwaarden van het probleem.

Grofweg kunnen voor het waterbeheer 3 methoden worden onderscheiden: heuristische sturing, sturingsscenario's en mathematische optimalisatie.

Heuristische sturing

In het geval dat de strategie heuristisch wordt bepaald, dat wil zeggen gebaseerd op ervaring, is een gedetailleerde specificatie van de doelfunctie geen absolute voorwaarde. In dit geval kan worden volstaan met het formuleren van een aantal criteria waaraan het systeemgedrag moet voldoen. Het succes van de sturing hangt af van de ervaring van de operator. Het is natuurlijk zeer goed mogelijk dat een ervaren operator de 'optimale' strategie dicht kan benaderen, echter deze ervaring zal steeds opnieuw moeten worden opgebouwd door zijn opvolger door 'trial-and-error'. Om dit probleem te ondervangen en om rationele

en consistente beslissingen te bevorderen, kan gebruik worden gemaakt van een zogenaamd beslissingsondersteunings-systeem. Algemeen zijn hiervoor verschillende modellen denkbaar, variërend van een stromingsmodel, waarmee sturingsacties kunnen worden gesimuleerd en getest, tot een (zelf-lerend) expert-systeem, dat beslissingen genereert gebaseerd op de 'ervaringen' van voorafgaande gebeurtenissen. De operator beslist deze adviezen op te volgen of niet.

Sturingsscenario's

Ook wanneer het operationele probleem wordt opgelost, met behulp van een vooraf gedefinieerd scenario is men in principe relatief vrij in de formulering van de operationele doelstellingen. Het aantal doelen dat in de afweging wordt meegenomen is echter meestal beperkt, aangezien het probleem anders niet meer kan worden overzien. Bij een sturings-scenario wordt een sturingsactie afgeleid uit een set meetwaarden met behulp van een beslissingsboom of -matrix.

Zo'n beslissingsboom is in beginsel relatief eenvoudig op te bouwen. Het grote voordeel van dit soort procedures is de doorzichtigheid van de genomen beslissingen en de mogelijkheid om bedrijfstechnische randvoorwaarden in de procedure op te nemen. Vandaar ook dat alle Nederlandse praktijkvoorbeelden van automatische sturing (bijvoorbeeld in Wervershoof, Utrecht, Olburgen), gebaseerd zijn op een vooraf gedefinieerd scenario.

Het probleem is echter om alle mogelijke combinaties van meetwaarden en de daarbij behorende 'optimale' sturingsactie in de beslissingsboom op te nemen. In de praktijk kan dit probleem slechts ondervangen worden door de resultaten van de sturing regelmatig te evalueren, het sturingsscenario desgewenst bij te stellen en de beslissingsboom eventueel te verwijderen. Voor systeemanalyses is deze oplossingsmethodiek echter minder geschikt. Immers, wil men inzicht krijgen in de potentiële mogelijkheden van sturing, dan is een flexibele methode noodzakelijk, die voor elke mogelijke belastingsituatie de unieke 'optimale' strategie bepaald. Zo worden bijvoorbeeld in een onderzoek naar de mogelijkheden van reductie van de hydraulische capaciteit van de rwzi Bath [Witter e.a., 1989], de effecten van 3 sturingsscenario's vergeleken. Ondanks een uitgebreide kalibratie en verificatie van het afvoermode (de systeembeschrijving) en een relatief nauwkeurig inzicht in de belasting van het systeem in tijd en ruimte (de neerslag), kunnen twijfels worden geuit of

door het onderzoeken van 3 scenario's het gewenste inzicht is verkregen in de potentiële mogelijkheden van sturing. Algemene conclusies hierover kunnen pas worden getrokken wanneer alle sturingsmogelijkheden, binnen de randvoorwaarden van het probleem, zijn onderzocht.

Mathematische optimalisatie

Een mogelijkheid hiertoe wordt geboden wanneer het probleem wordt geformuleerd als een mathematisch optimalisatieprobleem. Dit vereist de formulering van een doelfunctie, waarin door 'eenheidskosten' of 'wegingsfactoren', wordt aangegeven hoe een afwijking van een systeemvariabele van zijn gewenste toestand wordt geëvalueerd. De optimale toestand is gedefinieerd als die toestand waarbij de totale 'kosten' (= de gesommeerde gewogen afwijkingen) minimaal zijn. Het grote voordeel van mathematische optimalisatie is de flexibiliteit: voor elke belastings-toestand wordt een unieke 'optimale' strategie toegepast. De rationele basis van de beslissingen is duidelijk en alleen afhankelijk van de toegekende 'eenheidskosten' aan de systeemvariabelen. Bij een meerbaksbenadering, zoals toegepast in LOCUS, bestaan de systeemvergelijkingen uit de lineaire continuïteitsvergelijkingen. De vergelijkingen worden voor een bepaalde tijdshorizon, waarin de inloop bekend wordt verondersteld, uitgeschreven. Zouden de wegingsfactoren constant zijn voor alle variabelen, dan vormen de te minimaliseren doelfunctie en de systeemvergelijkingen een standaard Lineair Programmerings (LP) probleem, dat met behulp van standaard-routines opgelost kan worden. Hoewel in verschillende onderzoeken, zoals [Schilling, 1987, EAWAG, 1990], een LP-benadering van het probleem wordt toegepast, kan worden aangetoond dat het probleem niet als zodanig mag worden beschouwd [Nelen, 1991]. Betere resultaten worden verkregen wanneer de wegingsfactoren afhankelijk worden gesteld van de waarde van de bijbehorende systeemvariabele, bijvoorbeeld de vullingsgraad van het systeem [Beenen, 1991]. De wegingsfactoren zijn dus variabel in de tijd. Het resultaat is een niet-lineair optimalisatieprobleem, waar helaas geen standaardroutine voor beschikbaar is. In LOCUS wordt het optimalisatieprobleem opgelost, door elke tijdstap van de simulatie de doelfunctie te lineariseren [Nelen, 1991]. Door deze linearisatie en de speciale structuur van het probleem ontstaat de mogelijkheid gebruik te maken van krachtige netwerk-algoritmen, die als

een speciale vorm kunnen worden gezien van LP-routines. De mathematische achtergronden van de genoemde optimalisatietechnieken blijven hier verder buiten beschouwing. Hiervoor wordt verwezen naar de verschillende handboeken die beschikbaar zijn op het gebied van Operations Research [bijvoorbeeld Wagner, 1975]. De wijze waarop het systeem in LOCUS wordt geschematiseerd, wordt geïllustreerd in onderstaande case-study van het rioleringsstelsel in Rotterdam.

Zoals gezegd is LOCUS in de eerste plaats ontwikkeld voor het uitvoeren van systeemanalyses, die gericht zijn op de potentiële mogelijkheden van sturing. Het nut van een systeemanalyse in de ontwerp- of modernisatiefase van het systeem is dat men in deze fase nog flexibel is in de keuze van type regelaars en systeemcapaciteiten. Voor praktijktoepassingen zou LOCUS verder gebruikt kunnen worden bij het ontwikkelen van een beslissingsmatrix of als onderdeel van een beslissingsondersteuningssysteem. Het hier beschreven onderzoek is naast een systeemanalyse, ook een aanzet tot de laatstgenoemde toepassing.

3. De operationele doelen

Bij het formuleren van een doelfunctie spelen een aantal problemen:

- In het algemeen is het onmogelijk om alle operationele doelen te vertalen naar monetaire eenheden. De schade door bijvoorbeeld een hoeveelheid overstortend rioolwater is niet uit te drukken in gulden. Er zal daarom gebruik gemaakt moeten worden van wegingsfactoren, die de relatieve belangrijkheid van de verschillende doelen aangeven.
- Er is in veel gevallen sprake van met elkaar conflicterende doelen, waaraan niet tegelijkertijd kan worden voldaan. Minimalisatie van overstortingen, door een zo goed mogelijk gebruik van de aanwezige berging, zou bijvoorbeeld kunnen leiden tot een verhoogd risico van 'water-op-straat'.
- Iedere 'gebruiker' van het systeem stelt andere prioriteiten aan de operationele doelen.
- De relatieve belangrijkheid van de doelen kan veranderen in de tijd. Prioriteiten kunnen wijzigen en doelen worden toegevoegd door nieuwe wetten of doordat de waterbeheerder bijvoorbeeld door de publieke opinie wordt gevraagd zijn aandacht te vestigen op specifieke doelen. Een sprekend voorbeeld hiervan is de milieuproblematiek. Deze problemen geven aan dat de 'optimale' toestand van het systeem niet

eenduidig is te definiëren. Dit probleem wordt groter naarmate meer operationele taken aan het systeem worden toegekend, of naarmate het probleem verschuift naar een integraal waterbeheersingsprobleem. De term 'optimaal' heeft slechts betrekking op de minimale oplossing van de doelfunctie, die afhankelijk is van subjectief vastgestelde wegingsfactoren. Het ontbreken van een eenduidige formulering van 'optimaliteit' wil niet zeggen dat het operationele probleem onoplosbaar zou zijn. Veelal kunnen aan de belangrijkste taken van het rioleringsstelsel prioriteiten worden toegekend, zoals:

1. minimaliseer 'water-op-straat' (gedifferentieerd naar plaats);
 2. minimaliseer overstortingen op binnenwateren (gedifferentieerd naar plaats);
 3. minimaliseer overstortingen op buitenwateren (gedifferentieerd naar plaats);
 4. optimaliseer het aanvoerdebiet naar de rwzi (rekening houdend met het zuiveringsrendement);
 5. minimaliseer de energiekosten (draaiuren van pompen); enzovoort.
- Deze of een andere volgorde van operationele doelen kan men tot uitdrukking laten komen door de wegingsfactoren bij afnemende prioriteit kleiner te kiezen. De exacte waarden zijn niet van belang, zolang de relatieve verschillen maar zodanig zijn, dat het gewenste systeemgedrag wordt nagestreefd. In het waterbeheer spelen waterkwaliteitsaspecten een steeds belangrijkere rol. Bij sturing zal de waterkwaliteitsbeheersing veelal niet via directe beïnvloeding van de kwaliteitsvariabelen geschieden, maar door waterkwaliteitsaspecten mee te laten wegen in de doelen van de kwantiteitssturing. Bij het minimaliseren van de vuillast op ontvangende wateren, moet men feitelijk met twee bronnen rekening houden: de overstortingen en het effluent van de rwzi. Om nadelige effecten op de oppervlaktewaterkwaliteit te minimaliseren moeten overstortingen niet alleen zoveel mogelijk worden voorkomen, maar moet ook onderscheid gemaakt worden naar de plaats van overstortingen. Dit kan tot uitdrukking worden gebracht bij de keuze van de wegingsfactoren. Ook de afhankelijkheid tussen het zuiveringsrendement van de rwzi en het aanvoerregime kan in LOCUS door variabele wegingsfactoren worden meegenomen. Deze laatste mogelijkheid is in onderhavige studie echter niet gebruikt. Voorlopig is de studie beperkt tot minimalisatie van overstortende hoeveelheden, bij een gegeven hydraulische capaciteit van de rwzi.

4. Rotterdam

Het laatste decennium heeft de gemeente Rotterdam haar rioleringsstelsel ingrijpend gemoderniseerd. De directe aanleiding hiertoe vormde de noodzaak de lozing van ongezuiverd afvalwater op de Nieuwe Maas te beëindigen en het afvalwater te leiden naar een rwzi. Voor overstortingen op binnenwateren is hierbij het uitgangspunt gehanteerd dat de gemiddelde overstortingsfrequentie van 3 à 4 keer per jaar niet toe zou mogen nemen. Het handhaven van deze frequentie is gedeeltelijk gerealiseerd door extra berging in het stelsel aan te brengen en door zogenaamde bemalen overstorten in het systeem te introduceren, die bij extreme regenval een deel van het rioolwater naar de Nieuwe Maas verpompen. Hiermee kon tegelijkertijd de pompovercapaciteit (en dus de rwzi-capaciteit) binnen aanvaardbare grenzen (0,7 mm/uur) worden gehouden. De frequentie van bemalen overstortingen bedraagt gemiddeld 10-15 keer per jaar. Het gedeelte van het Rotterdamse rioolstelsel dat nu is gemoderniseerd, is ingedeeld in drie zogenaamde lussen: de Oost- en Westlus op de rechter Maasoever, en de Zuidlus op de linker Maasoever. Elke lus bestaat uit een aantal rioldistricten. Via vrij-verval leidingen en onderbemalingen wordt het ingezamelde rioolwater afgevoerd naar een districts-hoofdgemaal, vanwaar het door persleidingen naar de rwzi wordt getransporteerd. De West- en Zuidlus voeren af naar de rwzi Dokhaven, de Oostlus naar de rwzi Kralingseveer. De plaatselijke verschillen in aanwezige berging, variërend van 5 tot 12 mm per district en de introductie van bemalen overstorten schiepen de behoefte om voorzieningen in het systeem aan te brengen, waarmee de afvalwaterstromen op afstand kunnen worden gemanipuleerd. Hiervoor was een aanpassing van het meet- en regelsysteem van de bestaande hoofdrioolgemalen noodzakelijk. Verder zijn bij het systeemontwerp de benodigde bergings- en transportcapaciteit niet slechts op basis van de afzonderlijke districtskenmerken bepaald, maar op basis van een integrale systeemanalyse. Voor de hoofdgemalen zijn drie bedrijfstoestanden gedefinieerd: naast de DWA-afvoer wordt een RWA-min en een RWA-max situatie onderscheiden. Bij gematigde rioolinloop geldt de RWA-min situatie, waarbij alle districten naar de rwzi afvoeren met een totaal debiet gelijk aan de hydraulische capaciteit van de rwzi. Als bij hevige neerslag overstortingen op singels dreigen, wordt overgeschakeld naar het RWA-max bedrijf. Bij deze bedrijfs-

toestand komen de bemalen overstorten in werking. Enkele districten lozen nu geheel op de Nieuwe Maas, enkele districten voeren zowel af naar de Nieuwe Maas als naar de rwzi en verder zijn er districten zonder bemalen overstort die in deze situatie met extra capaciteit naar de rwzi kunnen afvoeren.

Supervisory control

De overgang naar een nieuwe bedrijfs-toestand wordt binnen een districts-hoofdgemaal autonoom geregeld door een lokale PLC. Deze procescomputer beslist op basis van het bassinpeil, welk debiet er verzet moet worden. De toerengeregelde pompen kunnen binnen hun capaciteitsgrenzen een continu variabel debiet verzetten. De meetgegevens worden met een interval van 20 seconden naar de Centrale Meld- en Regelkamer (CMRK) in het Stadstimmerhuis aan het Marconiplein verzonden, die continu wordt bemand. Naast deze informatie over de actuele systeemtoestand heeft de operator de beschikking over een korte termijn neerslagverwachting, die wordt geleverd door het KNMI. De gemalen werken in principe autonoom, zonder tussenkomst van een operator. Echter de mogelijkheid bestaat om vanuit de CMRK set points te wijzigen of de lokale sturing geheel over te nemen. Deze wijze van besturing wordt algemeen 'supervisory control' genoemd, in Rotterdam wordt ook wel de benaming 'master-slave' besturing gebezigd. Tot voor kort waren de situaties waarin werd ingegrepen vanuit de CMRK beperkt tot buitengewone omstandigheden als zeer hevige neerslag, storingen, onderhoudswerkzaamheden enzovoort. Sinds men echter de beschikking heeft

TABEL I - Districtskenmerken.

Knoop	District	Berging (m ³)	Afvoercapaciteit	
			rwzi	Bem. ovst. (m ³ /min.)
1 en 2	Spaanse polder	8.000	60	60
2 en 3	Oud Mathenesse	4.000	11,5	11,5
4 en 5	Spangen	2.500	35	15
6 en 7	Tussendijken	6.500	21	40
8	Overschie	8.000	33,5	-
9	Blijdorp	9.000	39,5	-
10 en 11	Centrum	18.000	36	32
12	Het Westen	7.000	130	-
13	rwzi Dokhaven	-	166	-

over de weerradar en korte-termijn neerslagvoorspellingen van het KNMI, wordt veelvuldiger van de sturingsmogelijkheden gebruik gemaakt, bijvoorbeeld om het piekvermogen van pompen gedurende de dure energie-uren te minimaliseren [Geerse, 1990]. De in Rotterdam gerealiseerde modernisatie van het rioleringssysteem heeft geleid tot grote mogelijkheden voor een actief operationeel beheer. Zoals in de inleiding al is gesteld, is nu de cruciale vraag op welke wijze het systeem gestuurd moet worden dat het systeem optimaal aan de operationele doelstellingen, zoals geformuleerd in paragraaf 3, tegemoet komt.

5. De case-study

Voor de Westlus van het Rotterdamse rioolstelsel is een modelonderzoek uitgevoerd. De huidige wijze van sturing is gemodelleerd als een automatische regeling op basis van in- en uitslagpeilen. De resultaten van deze simulaties zijn een indicatie van het huidige systeemgedrag, met dit verschil dat in de simulaties de operator geacht wordt niet in te grijpen. De resultaten zijn vergeleken met het

systeemgedrag onder geoptimaliseerde sturing, gesimuleerd met behulp van LOCUS. Voor de systeembeschrijving is gebruik gemaakt van een meerbaksmodel, zoals weergegeven in afb.1. De in de modellering toegepaste districtskenmerken zijn samengevat in tabel I.

De doelfunctie

De verhoudingen tussen de verschillende wegingsfactoren bepalen het systeemgedrag. Per district worden 4 systeemvariabelen onderscheiden, waarvoor voor ieder tijdsinterval wegingsfactoren gespecificeerd moeten worden, namelijk

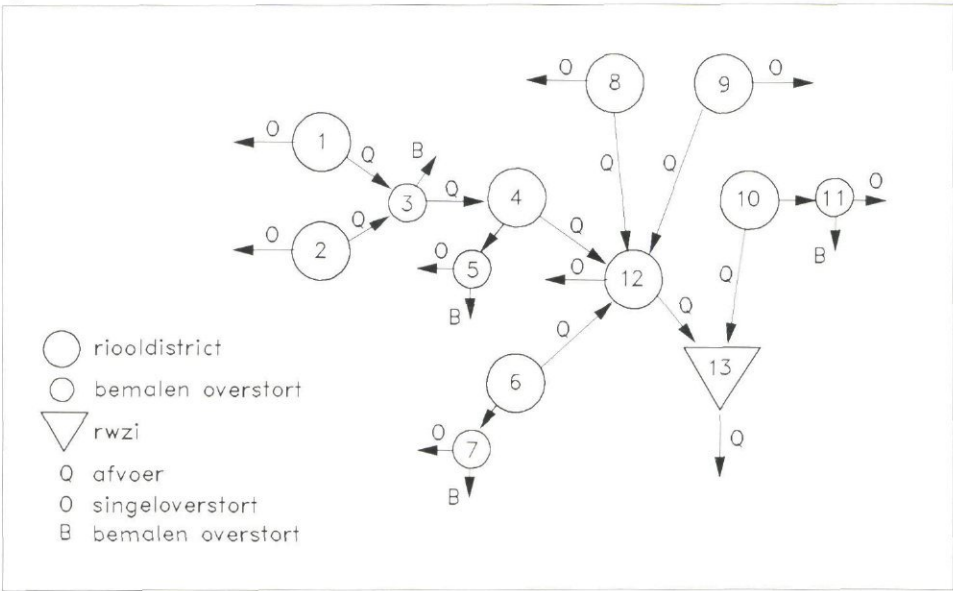
- Vi(t): geborgen volume in district i;
- Qi(t): afvoer naar een volgend district of rwzi;
- Oi(t): overstorting op een singel;
- Bi(t): bemalen overstorting op de Nieuwe Maas.

Bij de bepaling van de wegingsfactoren is uitgegaan van de prioriteitsvolgorde zoals in paragraaf 3 is aangegeven. Verder is verondersteld dat overstortingen op binnenwateren gelijk beoordeeld kunnen worden. Aan Qi(t) worden de laagste wegingsfactoren toegekend, om zoveel mogelijk water naar de rwzi te transporteren. Om overstortingen zoveel mogelijk te voorkomen worden hieraan de hoogste wegingsfactoren toegekend. Bemalen overstortingen op de Nieuwe Maas worden minder schadelijk geacht dan overstortingen op een singel. Met enig inzicht in de oplossingsmethode is het systeemgedrag voor verschillende wegingsfactoren relatief eenvoudig te voorspellen. In [Beenen, 1991] is een aantal 'vuistregels' geformuleerd, waarmee de operationele doelen kunnen worden vertaald naar indicatieve waarden voor de toe te passen wegingsfactoren.

De neerslag-inloop

De beschikbare neerslaggegevens bij de gemeente Rotterdam beperken zich tot dag- en maandsommen en enkele recente neerslaggebeurtenissen die met een interval van 5 minuten zijn geregistreerd. Aan de uitbreiding van het neerslagmeetnet wordt momenteel gewerkt.

Afb. 1 - Schematisatie van de Westlus.



In deze studie is gebruik gemaakt van neerslaggegevens, die in een periode van 2,5 jaar in West-Brabant zijn gemeten. Hieruit zijn de 15 zwaarste buien geselecteerd. Aangezien deze studie gericht is op de verschillen tussen het systeemgedrag onder lokale en geoptimaliseerde sturing, is het feit dat de gebruikte buien niet in Rotterdam zijn gemeten van minder belang. De neerslaginlooperelaties van de betrokken districten zijn afgeleid door middel van een waterbalansstudie. Door analyse van de meetgegevens van 2 recente neerslaggebeurtenissen zijn voor elk district de vertragingstijd en een afvloeiingscoëfficiënt bepaald. In de simulaties is bij de rioolloop een constante droogweerafvoer opgeteld.

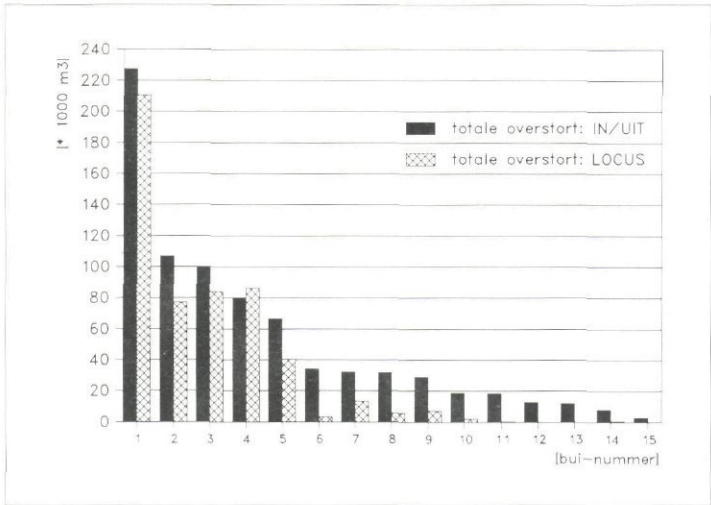
6. De simulatie-resultaten

De belangrijkste resultaten van de simulaties zijn samengevat in de afb. 2-5. In afb. 2 en 5 is duidelijk te zien dat het rioolstelsel aanzienlijk minder overstort

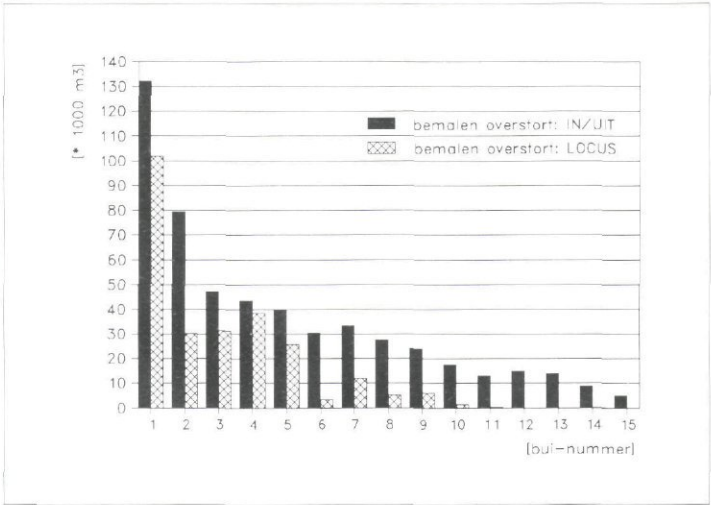
met geoptimaliseerde sturing, dan met lokale 'in/uit' sturing. In 5 van de 15 gebeurtenissen is een overstorting zelfs geheel te voorkomen. Slechts in één geval, bij buinummer 4, wordt met LOCUS een slechter resultaat geboekt voor de totale overstorthoeveelheid. In deze bui komen 2 opeenvolgende neerslagpieken voor, wat niet binnen de hier toegepaste voorspellingshorizon van een half uur wordt voorzien. LOCUS probeert zoveel mogelijk water in het systeem te houden en stopt de bemalen overstorting zo snel mogelijk nadat de eerste neerslagpiek gepasseerd is. De 'in/uit' sturing daarentegen continueert met de bemalen overstorting totdat het uitslagpeil is bereikt. In dit specifieke geval blijkt de laatste strategie echter gunstiger uit te pakken: de geringe reductie die LOCUS weet te bewerkstelligen voor de bemalen overstorthoeveelheid (afb. 3) gaat in dit geval ten koste van singeloverstort (afb. 4). Een langere voorspellingshorizon zal de resultaten met LOCUS gunstig

beïnvloeden. In een vervolgstudie zal onder meer dit aspect nader worden onderzocht. Opgemerkt wordt dat in het algemeen het absolute optimum slechts bereikt kan worden wanneer de gehele neerslaggebeurtenis kan worden voorspeld. Deze aanname is echter niet realistisch. In afb. 3 en 4 zijn de overstorthoeveelheden op de singels en de Nieuwe Maas weergegeven. Vergeleken met de resultaten van 'in/uit' sturing is met LOCUS, gesommeerd over 15 buien, de bemalen overstorthoeveelheid gehalveerd en de overstorthoeveelheid op singels met 14% gereduceerd. Uit afb. 5 blijkt dat de winst voor overstortingen op singels vrijwel geheel in district 12 geboekt wordt, in de overige districten is zelfs sprake van een geringe toename. Dit is te verklaren uit het feit dat singeloverstortingen voor alle districten als even schadelijk worden beoordeeld. Het model maakt geen onderscheid tussen de districten en minimaliseert de totale hoeveelheid.

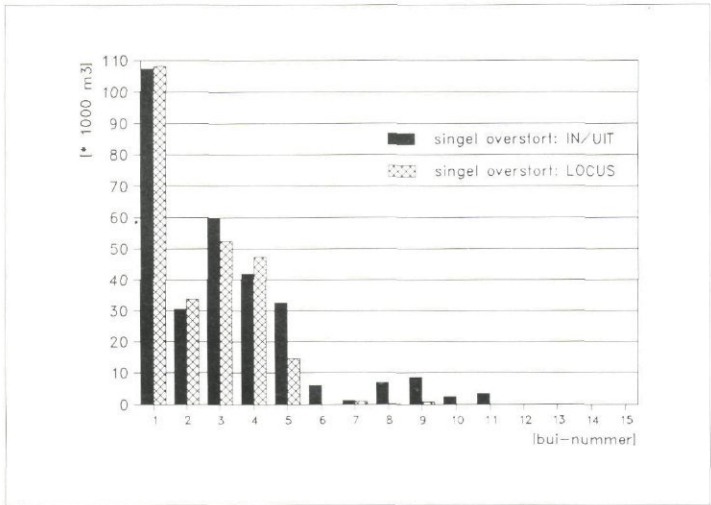
Afb. 2 - Totale overstorthoeveelheden per bui.



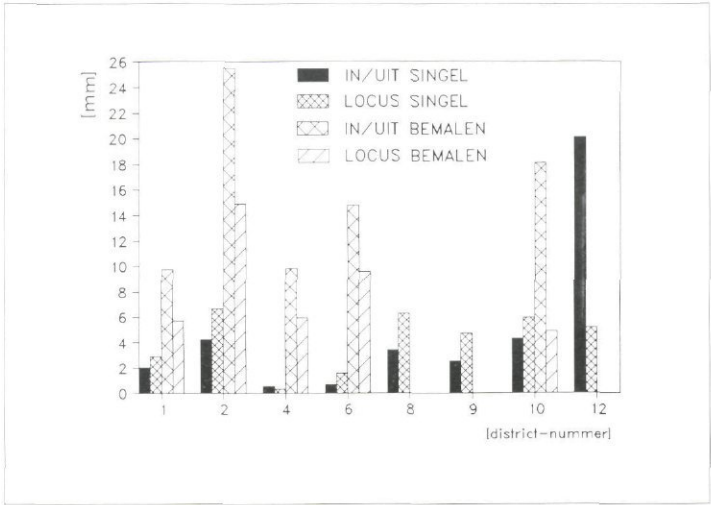
Afb. 3 - Bemalen overstorthoeveelheden per bui.



Afb. 4 - Overstorthoeveelheden op singels per bui.



Afb. 5 - Gesommeerde overstorthoeveelheden per district.



Wanneer de wegingsfactor van een overstorting in district 12 enigszins wordt verhoogd ten opzichte van de overige wegingsfactoren voor singel-overstortingen, volgt een ander beeld. De simulaties tonen aan dat door geoptimaliseerde sturing verbeteringen mogelijk zijn met betrekking tot overstortingen. Deze verbeteringen zijn echter niet in geld uit te drukken. Om een indicatie te krijgen van de 'waarde' van centrale sturing is een gevoeligheids-onderzoek uitgevoerd, waarbij is onderzocht hoeveel bergingsreductie met geoptimaliseerde sturing mogelijk is, zonder dat dit een toename van het overstortvolume op binnenwateren tot gevolg heeft. Onder deze voorwaarde blijkt een reductie van bijna 2 mm berging over de gehele Westlus mogelijk te zijn.

7. Slotbeschouwing

In de studie is aangetoond dat overstortingen in de Westlus van het Rotterdamse rioolstelsel kunnen worden gereduceerd door geoptimaliseerde sturing. Hoewel de mogelijkheden van sturing systeemafhankelijk zijn, kan algemeen worden gesteld dat theoretisch gezien met de conventionele lokale sturing, gebaseerd op vaste in- en uitslagpeilen, nimmer het optimum kan worden bereikt, om het simpele feit dat iedere belastingsituatie uniek is, waarbij een unieke sturingsstrategie behoort. Het operationele optimalisatieprobleem van een rioleringsstelsel kan in principe op 3 manieren worden benaderd: heuristisch, met een vooraf gedefinieerd scenario of door het probleem als een wiskundig optimalisatieprobleem te formuleren. Iedere methode heeft z'n voor- en nadelen, afhankelijk van de specifieke toepassing. Voor een systeem-analyse is mathematische optimalisatie het meest geschikt, omdat hiermee alle sturingsmogelijkheden, binnen de randvoorwaarden van het probleem, op een rationele en consistente wijze kunnen worden onderzocht.

LOCUS is een instrument waarmee een dergelijke analyse kan worden uitgevoerd. De hier gepresenteerde studie heeft zich beperkt tot de Westlus van het systeem, waarbij minimalisatie van overstortingen de belangrijkste doelstelling vormde. Een verbeterd gebruik van de in het systeem aanwezige berging heeft echter ook tot gevolg dat meer water naar de rwzi wordt geleid. Bij een optimalisatie zullen dus mogelijke effecten op het zuiveringsrendement moeten worden betrokken. De reductie van overstorthoeveelheden kan hier worden toegeschreven aan plaatselijke verschillen in

systeemcapaciteiten en een zo goed mogelijke afstemming van het afvoerregime van de bemalingsdistricten. Effecten van neerslagspreiding zijn nog niet in rekening gebracht. Ook de toegepaste voorspellingshorizon kan de resultaten aanzienlijk beïnvloeden. Inmiddels is een aanvang gemaakt met een vervolgstudie, waarin de mogelijkheden van sturing van het gehele Rotterdamse afvoersysteem, inclusief de zuivering, worden onderzocht. Hierbij zal nader worden ingegaan op de bovengenoemde aspecten. Tot slot wordt opgemerkt dat het in het algemeen aanbeveling verdient om in de huidige discussies over de normering en beoordeling van rioleringsstelsels, ook de operationele beheersing van het systeem te betrekken. De mogelijkheden van sturing zullen al in de ontwerpfasen van het systeem moeten worden onderkend en niet slechts als het systeem al is gerealiseerd.

Verantwoording

De modelontwikkeling voor de hier beschreven studie vindt plaats in het kader van een onderzoek naar de mogelijkheden van sturing van afvalwatersystemen, dat momenteel aan de TU Delft wordt uitgevoerd, in samenwerking met RIZA, STORA en DHV Water BV. De medewerkers van de Afdeling Waterhuishouding van de Dienst der Gemeentewerken Rotterdam verleenden enthousiaste medewerking. De gebruikte neerslagdata zijn beschikbaar gesteld door de LU Wageningen.

Literatuur

- Beenen, A. S., (1991). *Mogelijkheden en effecten van geoptimaliseerde sturing voor een stedelijk drainage systeem*. Afstudeerverslag TU Delft, vakgroep Waterbeheersing.
- EAWAG (1990). *Applications of Operations Research to Real Time Control of Water Resources Systems*. Proceedings of the 1st European Junior Scientist Workshop, Luzern, Switzerland, ISBN 3 90 6484 041.
- Geerse, J. M. U. (1990). *Weerkundige begeleiding van de rioolwaterbeheersing Rotterdam*. Rapport Gemeentewerken Rotterdam.
- SAMWAT rapporten, nr. 6, (1990). *Sturing in het Waterbeheer*. ISBN 90 6743 188 5.
- Nelen, A. J. M. (1991). *Optimized control of urban drainage systems*. Concept-artikel voor Advances in Water Resources, TUD.
- Witter, J. V., Dircke, P. T. M., en Stricker, J. N. M. (1989). *Mogelijkheid van reductie van de hydraulische capaciteit van regionale rioolwaterzuiveringsinrichtingen*. H₂O (22) 1989, nr. 23.
- Schilling, W. and Petersen S. O. (1987). *Real time operation of urban drainage systems - validity and sensitivity of optimization techniques*, in: *proceedings of the symposium: Systems analysis in water quality management*. University of London.
- Wagner, H. M., (1975). *Principles of Operations Research - With Applications to Managerial Decisions*. Prentice Hall, ISBN 0 13 709592 9.

Minder voedsel voor vogels door Oosterscheldedam

Het belang van de Oosterschelde als fourageergebied en overwinteringsplaats voor waadvogels en eenden zal door de stormvloedkering sterk teruglopen. Dit komt omdat er steeds minder voedsel voor deze dieren beschikbaar is door de vermindering van het getijdengebied met ongeveer dertig procent. Het Delta-instituut voor Hydrobiologie in Yerseke, de dienst getijdenwateren van Rijkswaterstaat in Middelburg, het Instituut voor Natuurbeheer in het Belgische Hasselt en de universiteit van Gent verrichtten onderzoek naar de ecologische gevolgen van de Oosterscheldedam. Zij presenteerden de resultaten van hun studies op het Europese symposium over marinebiologie dat deze week in Middelburg werd gehouden.

Het Oosterscheldegebied was voor waadvogels altijd een belangrijke plaats voor de voedselvoorziening tijdens hun trek en verblijf in de winter. Vijf jaar geleden was de constructie van de stormvloedkering met de Oester- en Philipsdam klaar. Ofschoon de half open afsluiting van de Oosterschelde bedoeld was om het bestaande natuurleven en de waarde van de riviermond als natuurgebied te handhaven, zijn er volgens de onderzoekers in de afgelopen paar jaar toch veranderingen opgetreden.

Door de stormvloedkering en de twee dammen zijn zowel het volume van het getij als de getijdenstromen aanzienlijk verminderd. De instroom van vers water in de riviermond is met vijftien procent teruggelopen. De verblijftijd van de watermassa in de Oosterschelde is sinds de bouw van de stormvloedkering twee keer zo lang geworden. Het gevolg hiervan is dat het getijdengebied steeds kleiner wordt. Uiteindelijk zal vijftienhonderd tot drieduizend hectare van deze gronden, waarop de vogels hun voedsel vinden, verdwijnen. In de getijdengebieden bevinden zich vele kleine, levende organismen. In de populatie van deze ongewervelde diertjes is nu verandering gekomen. De beschikbaarheid van dit voor de vogels belangrijke voedsel is verminderd.

Zo wordt de vooral in de duinen levende bergeend in het Oosterscheldegebied steeds minder waargenomen, omdat het specifieke voedsel volgens de onderzoekers dramatisch is teruggelopen. (ANP)