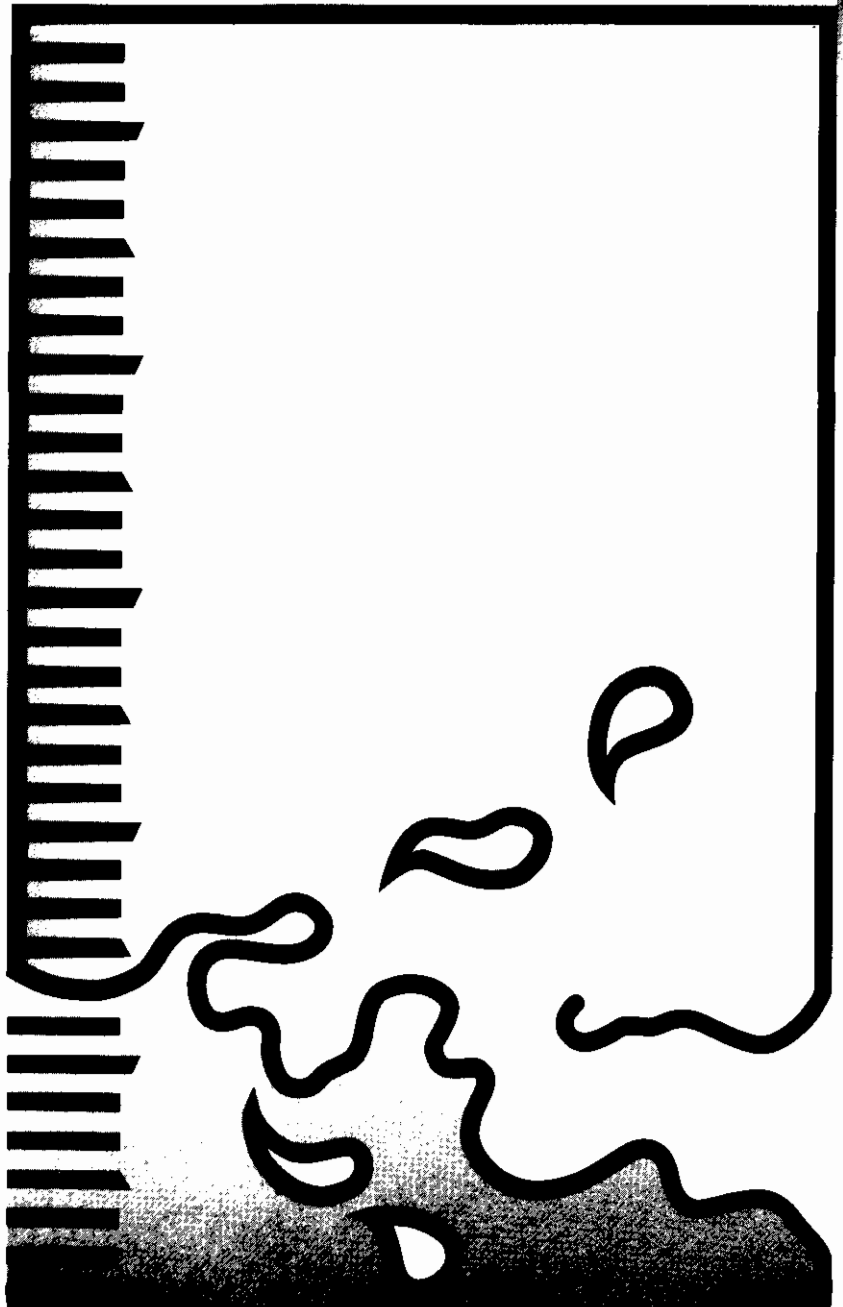


NN31068.06

ing in het waterbeheer



samwat

SAMenwerking op het
gebied van het onder-
zoek ten behoeve van
het WATERbeheer

STURING IN HET WATERBEHEER

BIBLIOTHEEK
STADINLGEBOUW

STURING IN HET WATERBEHEER

onder redactie van
P. Rog



0000 0470 0338

SAMWAT-rapporten nr. 6
's-Gravenhage, december 1990

16 JAN. 1992

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Sturing

Sturing in het waterbeheer/(red. P. Rog)

's-Gravenhage: Bureau SAMWAT, TNO, III

(SAMWAT-rapporten: nr 6)

Met lit. opg.

ISBN 90-6743-188-5

SISO 631.2 UDC (531.7:556.18)(492)

Trefwoorden.: meettechniek; waterhuishouding/waterbeheer;

Nederland

INHOUD

SAMENVATTING

1	STURING IN HET WATERBEHEER	1
1.1	Het kader: (dagelijks) operationeel beheer	1
1.2	Terminologie	3
1.3	Regel- en besturingsprincipes	8
1.4	De achilleshiel: het mathematisch model	10
1.5	Een waterkwaliteitsvoorbeeld: besturing van het Zaangemaal	11
1.6	Opbouw van het rapport	14
2	VAN PEILBEHEER NAAR WATERBEHEER	17
2.1	Inleiding	17
2.2	Benutting en beoordeling	18
2.3	De cycli in het waterbeheer	19
2.4	Normen in het heden en verleden	22
2.4.1	Het peil	23
2.4.2	Het HW-lijn en de NW-lijn	23
2.4.3	Aan- en afvoernormen	24
2.4.4	De maximale waterstandsstijging (h_{max})	24
2.4.5	De hersteltijd (ledigingstijd)	25
2.4.6	Scores en standaardafwijkingen	26
2.4.7	Bedrijfsgegevens	27
2.4.8	Waterkwaliteitsnormen	28
2.4.9	Ecologische normen	28
2.5	Beoordeling watersystemen in de toekomst	29
2.5.1	De gewenste toestand	29
2.5.2	Het dynamische systeemgedrag	31
2.6	Sturing in het waterbeheer	33
2.7	Van peilbeheer tot waterbeheer	34

3	NOODZAAK EN TOEPASSINGEN VAN STURINGSSIMULATIES	37
3.1	Inleiding	37
3.2	Het gedrag van een (gestuurd) watersysteem	38
3.3	Voorwaarden voor het gebruik van sturingssimulaties	42
3.3.1	Invoer van het systeem	42
3.3.2	Gedragsbeschrijving	43
3.3.3	Evaluatie van de uitvoer	46
3.3.4	Overige voorzieningen	47
3.4	Toepassingen van sturingssimulaties	47
3.4.1	Ontwerp	47
3.4.2	Beheer	48
3.4.3	Modernisatie	50
3.4.4	Training	50
3.5	Samenvatting en conclusies	51
4	DE INTELLIGENTIE VAN HET SYSTEEM: DE STURINGSSTRATEGIE	55
4.1	Inleiding	55
4.2	Argumenten voor sturing	57
4.3	Indeling van sturingssystemen	58
4.4	Noodzakelijke informatie voor de afleiding van de strategie	61
4.4.1	De operationele doelen	61
4.4.2	De verstoringen van het systeem	62
4.4.3	Randvoorwaarden	64
4.5	Methoden voor de bepaling van de sturingsstrategie	65
4.6	Samenvatting en slotbeschouwing	69
5	OPERATIONEEL WATERKWALITEITSBEHEER OP REGIONALE SCHAAL	73
5.1	De waterhuishouding van de Utrechtse Vecht	73
5.1.1	Inleiding	73
5.1.2	De waterkwantiteit	74

5.1.3	De waterkwaliteit	76
5.1.3.1	Algemeen	76
5.1.3.2	De zuurstofhuishouding	77
5.2	De regeling van het zuurstofgehalte	78
5.2.1	De opbouw van de regeling	78
5.2.2	De werking van de regeling	81
5.2.3	Alternatieve regelingen	82
5.3	Operationeel beheren of saneren	84
6	BESTURINGSSYSTEEM VOOR HET RIOOLSTELSEL VAN UTRECHT	89
6.1	Ontstaan en ontwikkeling Utrechtse rioolstelsel	89
6.1.1	Historische ontwikkeling	89
6.1.2	Het centraal rioolstelsel	90
6.2	Automatisering besturing rioolgemalen	91
6.2.1	Aanleiding tot de automatisering	91
6.2.2	Programma van eisen	92
6.2.3	Besturingsprogramma	92
6.2.4	Beperkingen en randvoorwaarden	95
6.2.5	Overige regelingen	95
6.3	Configuratie	96
6.4	Software	97
6.5	Uitvoering	98
7	AUTOMATISERING VAN HET PEILBEHEER IN DE FLEVOPOLDERS	101
7.1	Inleiding	101
7.1.1	Gebiedsbeschrijving	101
7.1.2	Wijze van waterbeheersing	101
7.1.3	Aanleiding voor automatisering	103
7.2	Vooronderzoek	104
7.2.1	Doelstellingen en maatregelen	104

7.2.2	Bepaling besturingsconcept	104
7.2.3	Onderzoek dynamische aspecten	105
7.2.4	Opstellen besturingsstrategie	106
7.2.5	Kosten/baten-analyse	107
7.3	Ontwerp	108
7.3.1	Functioneel ontwerp	108
7.3.2	Elektro-mechanische aspecten	111
7.3.3	Instrumentatie	111
7.4	Realisatie	112
7.4.1	Aannemersselectie	112
7.4.2	Testen en inbedrijfstelling	112
7.4.3	Planningsaspecten en kosten	113
7.5	Toekomstig gebruik	114
7.5.1	Gebruik van neerslaginformatie	114
7.5.2	Kwaliteitsmeetplannen	114

SAMENVATTING

In dit rapport wordt allereerst de te gebruiken terminologie behandeld, waarna het regel- en besturingsprincipe wordt belicht. Vervolgens wordt beknopt aandacht geschonken aan het belang van een mathematisch model. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de noodzaak de doelen van het operationeel beheer scherp te formuleren. Daarbij wordt een lans gebroken voor het althans ten dele vervangen van referentiewaarden (normen, standaards, vuistregels) door een doelfunctie waaruit het gewenste gedrag dynamisch kan worden afgeleid. Geen sturingsalgoritme zonder duidelijk geformuleerde doelstelling. Hierop aansluitend wordt ingegaan op het begrip besturingsstrategie, waarbij aan de orde komt met welke aspecten en factoren rekening moet worden gehouden. Een besturingsstrategie bestaat dus uit een tijdreeks van sturingen, die eventueel kunnen worden geïmplementeerd via dynamische instelling van de set-points van de primaire regelkringen. Zoals hierboven uiteengezet speelt in deze benadering van de dynamische optimalisatie van een expliciet geformuleerde doelstelling het model van het systeem een wezenlijke rol. Het model vormt het onderwerp van het volgende hoofdstuk. Hierbij wordt gewezen op het cruciale belang van modelsimulaties, niet alleen voor het beheer, maar ook voor ontwerp, modernisatie, en training van personeel.

Na deze inleidingen vanuit de theoretische hoek volgen de hoofdstukken waarin de praktijk centraal staat. Allereerst wordt ingegaan op het nieuwe automatische besturingssysteem voor het rioolstelsel van de stad Utrecht. Uit dit voorbeeld wordt duidelijk dat de te kiezen strategie afhankelijk kan zijn van de omstandigheden. De verstoringen in het waterbeheer zijn duidelijk niet te karakteriseren als kleine perturbaties, maar kunnen zeer wezenlijk zijn (droog versus regenweersituaties). Aansluitend wordt een overzicht gegeven van het ontvangende oppervlaktewater, en de mogelijkheden de waterkwaliteit te beïnvloeden door manipulatie van het debiet van de Vecht. Het is daarbij interessant om te bezien in hoeverre de nagestreefde optimaliteit bij het rioolbeheer ook geldt indien het zuiveringsbeheer en het oppervlaktewaterkwaliteitsbeheer in de beschouwingen worden betrokken. Tenslotte wordt een exposé gegeven over de automatisering van het peilbeheer in de Flevopolder, waarbij een groot aantal praktische aspecten de revue passeert.

1 STURING IN HET WATERBEHEER: WAT IS DAT?

G. van Straten

1.1 Het kader: (dagelijks) operationeel beheer

Nederland heeft een eeuwenoude traditie op het gebied van het dagelijks operationeel beheer van water. De belangrijkste middelen die onze voorouders in de lage poldergebieden ter beschikking stonden waren sluizen en door windmolens aangedreven vijzels. Ook tegenwoordig zijn dit nog steeds de belangrijkste stuurmiddelen, al hebben de molens vrijwel geheel plaats gemaakt voor moderne pompen en gemalen.

Eén van de belangrijkste doelstellingen van het operationeel beheer, zowel vroeger als nu, is het handhaven van het peil op een voor de landbouw en overige belangen geschikte waarde. Door het vastleggen van een streefpeil wordt bereikt dat in tijden van waterbehoefte water wordt aangevoerd, terwijl bij een overschot water moet worden afgevoerd. Ook in de hogere gebieden kent het beheer soortgelijke doelstellingen, waarbij de beekregulering heeft gezorgd voor een stuurmiddel in tijden van geringe wateraanvoer door de mogelijkheid water in stuwpanden vast te houden.

Naast het regionale waterbeheer zijn er nog andere vormen van operationeel waterbeheer. In de sfeer van het oppervlaktewater valt te denken aan het bedienen van de stuwmiddelen in de grote rivieren en het operationele beheer van de verschillende kustwerken. Ook onder de grond zijn watertransportsystemen te vinden waarvoor een operationeel beheer nodig is: het drink- en industriewaternetwerk, en het rioolstelsel.

De laatste decennia is steeds duidelijker geworden dat de klassieke algemene doelstellingen: zorgen voor voldoende water van de gewenste kwaliteit, zorgen voor een ontlasting bij

wateroverschot, en zorgen dat het niet te droog en niet te nat wordt, niet voor alle belanghebbenden kan worden vertaald in voor allen gelijke operationele doelstellingen. Dit was al niet zo bij het zuivere kwantiteitsbeheer, denk maar aan de belangentegenstelling tussen wateronttrekking aan het grondwater en de schade voor het boerenbedrijf en natuurgebieden, en de vaak tegengestelde belangen van natuur en agrarische sector in het peilbeheer. Maar deze problemen zijn nog verzaamd door de sterke toename van de aanwezigheid van vervuilende stoffen in het water, waardoor transport van water ook transport van stoffen met zich meebrengt die belangrijke gebruik- en verbruikfuncties kunnen aantasten.

Dit gegeven leidt ertoe dat het waterbeheer niet uitsluitend mag zijn gericht op het kwantiteitsbeheer, maar dat ook met aspecten van kwaliteit rekening moet worden gehouden. De complexiteit van het beheersvraagstuk is hierdoor aanzienlijk toegenomen. Dit is goed te zien aan de omvang van de rapporten die in het kader van de integrale planningsstudie Policy Analysis of Water management in the Netherlands (PAWN) zijn geproduceerd. Uit de PAWN-studie vloeit een toedeling van water voort die optimaal is bij de gekozen weging van de verschillende belangen. Deze lange termijn toedeling stelt randvoorwaarden aan het beheer, maar lost echter nog niet het dagelijkse beheersprobleem op.

Bij het dagelijkse 'tactische' beheer krijgt men te maken met het dynamisch karakter van het watersysteem, een aspect dat bij de strategische optimalisatie over langere termijn 'weggemiddeld' is. Bovendien is het niet zonder meer duidelijk hoe de korte termijn regeling en sturing moet worden ingericht om ervoor te zorgen dat ook op het detailniveau van de dagelijkse praktijk de verschillende belangen zo goed mogelijk kunnen worden gediend. Kortom, het lijkt geen twijfel dat het bij het dagelijks beheer nodig is rekening te houden met het dynamische karakter van de systemen. Het staat daarbij geenszins vast dat het streven naar vaste peilen in de belangenafweging in enige zin optimaal zou zijn. Ook ten aanzien van het kwaliteitsbeheer kan het streven naar rigide handhaving van vaste normen tot een verstarring leiden die tot verspilling leidt, terwijl de speelruimte die het dynamisch karakter van de watersystemen biedt onbenut wordt gelaten.

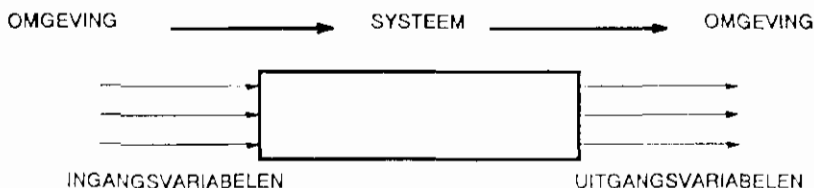
Het doel van dit symposium is om de mogelijkheden die kennis van de dynamische eigenschappen van de systemen biedt nader te bestuderen. Deze mogelijkheden zijn de

laatste jaren aanzienlijk groter geworden door twee oorzaken: enerzijds een aanzienlijke ontwikkeling in de theorie van sturing en regeling van dynamische systemen in het algemeen, en anderzijds de snelle ontwikkeling van de micro-electronica, waardoor althans hardware-matig de prestatie-kostenverhouding enorm is gestegen.

Vooraf moet worden opgemerkt dat het gebruik van moderne besturingstheorie niet noodzakelijkerwijs synoniem is met automatisering, al is het ontegenzeggelijk zo dat de moderne techniek vele functies automatisch kan uitvoeren. Dit rapport gaat niet over automatisering op zich, maar meer over de strategie en de concepten die aan de sturing in het waterbeheer ten grondslag liggen. Het gaat dus niet alleen om het mogelijkkerwijs automatisch uitvoeren van functies die voorheen door menselijke tussenkomst werden verricht, maar veel meer over een fundamenteel andere wijze van denken over het beheer zelf.

1.2 Terminologie

Alvorens dieper in te gaan op het thema van dit rapport, is het zinvol een toelichting te geven op de te gebruiken terminologie. We maken daarbij gebruik van begrippen uit het vakgebied van de systeemdynamica. De interactie van een systeem of proces met zijn omgeving gebeurt via ingangs- en uitgangsgrootheden, ook wel ingangs- en uitgangsvariabelen genoemd om aan te geven dat zij kunnen variëren in de tijd (zie Figuur 1.1):



Figuur 1.1 Systeem en omgeving

Ingangsvariabelen	De onafhankelijke variabelen die vanuit de omgeving op het systeem proces inwerken (Eng: inputvariables; inputs).
Uitgangsvariabelen	De afhankelijke variabelen die het resultaat zijn van de reactie van het proces of systeem op de ingangsvariabele (Eng: outputvariables of outputs).
Parameters	In principe constante grootheden van het proces of systeem die bepalend zijn voor het dynamisch gedrag (Eng: parameters).

Dezelfde terminologie wordt gebruikt als men het heeft over een model voor het systeem. Als het model een mathematisch model is, bijvoorbeeld in de vorm van differentiaalvergelijkingen, dan zijn de parameters de coëfficiënten van de vergelijkingen, de inputs de onafhankelijke grootheden die als tijdfuncties of tijdreeksen gegeven moeten zijn om met het model te kunnen rekenen, en de outputs de berekende variabelen. Een finesse is dat alle berekende variabelen waarvoor in het model een differentiaalvergelijking aanwezig is ook wel toestandsvariabelen (Eng: state variables) worden genoemd, terwijl de outputvariabelen dan de daadwerkelijk naar buiten gevoerde variabelen voorstellen. Een voorbeeld: om de concentratie in een rivier te berekenen wordt meestal gewerkt met een ruimtelijk gediscrèteerd model. De toestandsvariabelen zijn dan de waarden in elk berekeningselement (dit kunnen er vele honderden zijn), terwijl de outputvariabelen alleen de waarden zijn op de plaatsen waarop gemeten wordt.

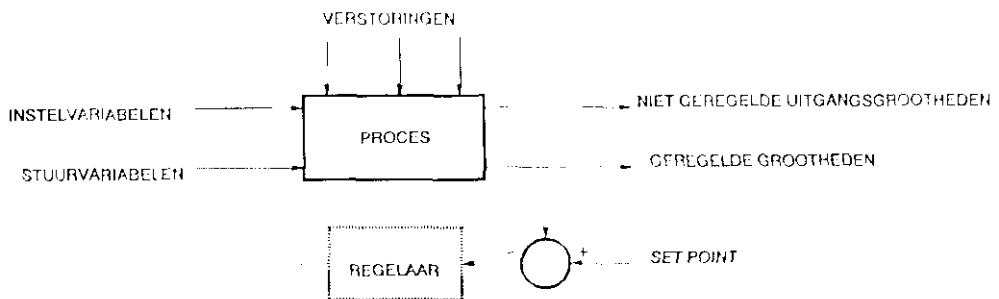
Bij een proces of systeem dat wordt geregeld of gestuurd is het gebruikelijk een verdere onderverdeling te maken (zie Figuur 1.2):

Stuurvariabelen	De ingangsvariabelen die worden gebruikt om via hun invloed het proces te regelen of te sturen. Ook regelvariabelen, soms ook instrumentvariabelen genoemd (Eng: control variables; control inputs).
Instelvariabelen	Ingangsgrootheden die niet worden gebruikt voor de regeling maar die wel een bepaalde waarde moeten hebben om het proces of systeem te

kunnen laten functioneren (Eng: adjustable inputs).

Verstoringsen De ingangsvariabelen die onbedoeld op het proces inwerken (Eng: disturbances).

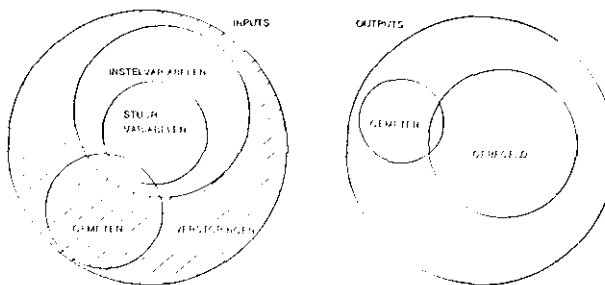
Geregelde grootheden De uitgangsvaariabelen die door middel van de regel- of stuuracties op een gewenste waarde worden gebracht of gehouden (Eng: controlled variables).



Figuur 1.2 Variabelen bij een geregeld systeem

Als de gewenste waarde een constante is spreekt men wel van regelen, terwijl de term sturen wel wordt gebruikt indien de uitgangsvaariabele een bepaald tijdspad moet volgen. Het onderscheid is echter niet scherp (in het Engels in beide gevallen: control).

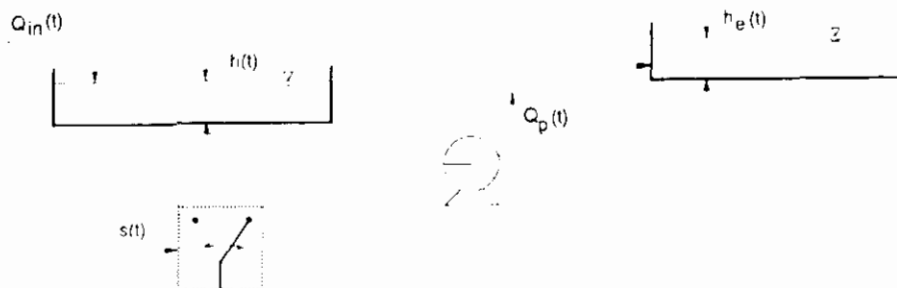
Naast deze indeling is het vaak zinvol een onderscheid te maken tussen gemeten en niet gemeten grootheden (zie voor combinaties het Venn-diagram van Fig. 1.3).



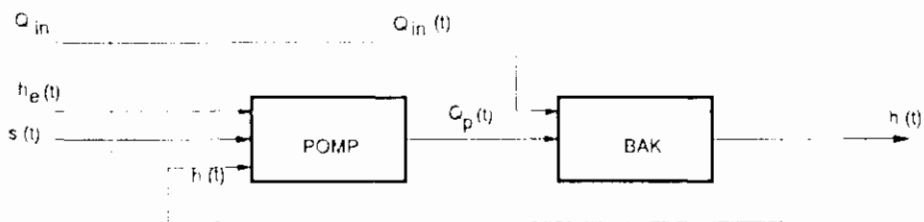
Figuur 1.3 Verzamelingen van variabelen en hun onderlinge verbanden

Voorbeeld

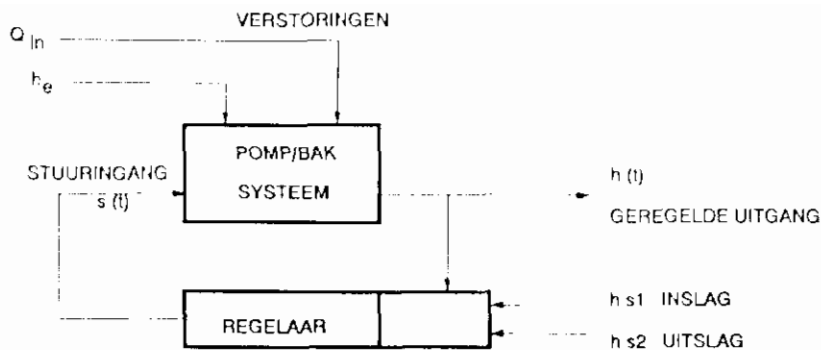
Beschouw het eenvoudige systeem getekend in Figuur 1.4a. Er is een bak (cq. een rioolbuis) die van tijd tot tijd water ontvangt met een tijdvariabel debiet $Q_{in}(t)$. Het niveau in de bak is $h(t)$. Een pomp, bestuurd door schakelaar $s(t)$ pompt water op naar een hoger gelegen bak met niveau $h_e(t)$. Het pompdebiet is $Q_p(t)$.



Figuur 1.4a Fysieke systeem



Figuur 1.4b Input output diagram van het ongeregelde systeem



Figuur 1.4c Input-output diagram van het geregelde systeem

Wat zijn nu de ingangen en uitgangen van dit systeem? Kijk hiervoor naar de benodigde informatie (Figuur 1.4b).

Voor de pomp alleen geldt dat het debiet Q_p afhankelijk is van de stand van de schakelaar $s(t)$. De variabele $s(t)$ is een instelvariabele, Q_p is een uitgangsvariabele. Omdat het pompdebiet afhankelijk is van de opvoerhoogte is ook kennis van h en h_e nodig. Deze inputs kan men voor de pomp opvatten als verstoringen.

Voor de bak alleen geldt dat $Q_m(t)$ een ingangsvariabele is, die fungeert als verstoring (van het niveau h). Het niveau $h(t)$ is uitgangsvariabele. Maar om h te kunnen berekenen is ook Q_p nodig. $Q_p(t)$ is voor de bak dus een ingangsvariabele.

Voor het systeem als geheel kan nu direct aan de figuur worden afgelezen wat de in- en uitgangen zijn. Verstoringen zijn Q_{in} en h_e , de instelvariabele is s , en h is de uitgangsvariabele. Ook Q_p kan voor het systeem als geheel als uitgangsvariabele worden gezien (al dan niet gemeten). De dimensies van de bak, en de pompkarakteristiek zijn de parameters van het systeem (niet getekend).

Als aan het systeem een regelaar wordt toegevoegd, bijvoorbeeld een automatische aan/uit schakelaar op basis van een inslag- en uitslagpeil, dan ontstaat de situatie van Figuur 4c.

Q_m en h_c blijven verstoringen, h wordt nu de geregelde uitgang, en $s(t)$ is de sturingang. Daarnaast zijn nu ook de set-points voor inslag en uitslagniveau $hs1$ en $hs2$ ingangen (instelvariabelen). Naast de parameters van de bak kunnen er nu ook dimensioneringsparameters van de regelaar zijn (bijvoorbeeld een inschakelvertraging). Als deze parameters van buiten af instelbaar zijn, kunnen ze ook worden opgevat als instelvariabelen. Het onderscheid tussen parameters en inputs vervaagt in dat geval.

1.3 Regel- en besturingsprincipes

Verreweg het belangrijkste principe voor de beheersing van dynamische systemen is de aloude terugkoppeling (Eng: feed-back). Het klassieke peilbeheer is op dit principe gebaseerd: het peil wordt gemeten en vergeleken met een streefwaarde of referentiewaarde (Eng: set point; reference value). Zodra er een verschil bestaat wordt er een commando gegeven om een pomp of gemaal in werking te stellen. Het commando kan automatisch worden gegeven, of door tussenkomst van de mens.

In het geval van een automatische regelaar is de relatie tussen de hoogte van de afwijking en het te geven stuursignaal vastgelegd in het regelalgoritme. Dit hoeft geen statische relatie te zijn; integendeel, regelaars met dynamische elementen hebben bewezen in vele gevallen superieur te zijn. Enkele zeer bekende regelaartypen zijn de aan/uit regeling, de proportionele (P), proportioneel en integrerende (PI), en de proportioneel-integrerende en differentiërende regelaar (PID).

In het geval van tussenkomst van de mens spelen in het algemeen de ervaring en vakkennis een rol. Zo zal een ervaren machinist bij een geconstateerde peilafwijking niets doen als hij weet dat de afwijking wordt veroorzaakt door opwaaiing. Ook weet hij op basis van ervaring vaak rekening te houden met de korte termijn weersverwachting. En hoewel het heel moeilijk is in het algemeen een compleet inzicht te hebben in de traagheden van het systeem, blijkt dat dit geleerd kan worden, zodat men rekening kan houden met de karakteristieke tijdconstanten van het systeem, waardoor bijvoorbeeld harder pompen dan nodig is wordt voorkomen.

Men kan zich afvragen of deze menselijke expertise en intelligentie ook niet in de regelaars kan worden verwerkt. Inderdaad heeft de ontwikkeling van de regeltheorie een hele reeks van modificaties op het bovenstaande thema te zien gegeven, die meer of minder tegemoet komen aan de beperkingen van de klassieke schema's. Om een aantal te noemen: zelf-instellende regelaars, adaptieve regelaars die inspelen op langzame wijzigingen in het proces, regelaars met meekoppeling (feed-forward) van gemeten verstoringen, multivariabele regelaars, model referentie regelaars als niet alle geregelde grootheden kunnen worden gemeten, en regelaars gebaseerd op een interne modelbeschrijving. Het einde van deze ontwikkeling is nog niet in zicht. Kenmerkend voor bijna al deze modificaties is dat voor een succesvolle implementatie een veel grotere kennis van de dynamica van de te regelen systemen nodig is. Anders gezegd: waar bij de klassieke teruggekoppelde regelaars slechts een globaal idee van de dynamica is vereist, is voor de meer geavanceerde vormen in het algemeen een expliciet model nodig. Zo'n model zal dus wel te voren moeten worden gemaakt, dan wel on-line moeten worden geschat uit de afwijkingen die optreden. Bovendien wordt veel intensiever van informatiestromen gebruik gemaakt. Dit is de keerzijde van de medaille. Het voordeel van de dalende hardwareprijzen wordt dan ook in de praktijk in belangrijke mate getemperd door de toenemende software kosten.

Het belangrijkste kenmerk van de tot nu toe besproken vormen van regeling is dat van te voren wordt vastgelegd hoe het na te streven referentiepatroon er uit moet zien. Anders gezegd, er wordt van uitgegaan dat op een of andere manier is vastgesteld dat de gekozen referentiewaarden of normen op de beste manier de belangen dienen. De wijze waarop dit gebeurt kan velerlei zijn, maar speelt voor de feitelijke regeling geen rol meer. De zin van de geformuleerde streefwaarden op zich wordt binnen dit concept dus niet ter discussie gesteld.

Dat is wel het geval bij het tweede concept van sturing, nl. dat van de optimaliserende regelaars. Bij dit principe wordt allereerst de doelstelling geanalyseerd van het systeem als geheel, en vastgelegd in een expliciete doelfunctie. Dit betekent dat niet wordt uitgegaan van een vaste set van peilen en andere set-points, maar van een doelfunctie waarin de kosten en opbrengsten van de beheersing worden vastgelegd, gewogen naar de verschillende belangen, en berekend over een bepaalde tijdsspanne.

De werkwijze is in grote trekken als volgt. De benodigde ingrediënten zijn in eerste instantie de doelfunctie, een dynamisch model voor het systeem, en een te voren aangenomen standaardpatroon van externe verstoringen (bijvoorbeeld weersinvloeden). Uitgaande van de geformuleerde doelfunctie wordt eerst met behulp van het model berekend wat bij de gegeven externe verstoringen het optimale verloop van de toestandsvariabelen én het daarvoor benodigde verloop van de stuurvariabelen zou moeten zijn, als het model correct was en de externe verstoringen zich zo zouden voordoen als aangenomen. Dit optimale verloop kan dus over de gegeven horizon tevoren worden berekend, waarbij het resultaat een reeks van stuursignalen voor de corrigerende organen zoals gemalen, kleppen, sluizen e.d. is. Vervolgens wordt het principe van feed-back toegepast om te compenseren voor het feit dat het model nu eenmaal niet correct is, en voor het feit dat de externe verstoringen zich anders gedragen dan oorspronkelijk aangenomen.

Het is duidelijk dat in deze benadering geen sprake is van vaste peilen e.d., maar dat te allen tijde gestreefd wordt naar minimalisatie van de netto lasten (kosten - opbrengsten) van het beheer, gesommeerd over alle belanghebbende partijen. Vandaar de naam optimaliserende regelaars, of, meer algemeen, dynamisch optimale sturing. Wat er gebeurt lijkt veel op de strategische optimalisatie, maar het verschil is dat de sturingen nu met een dynamisch model en niet met een statisch model of als lange termijn gemiddelden worden berekend.

Ook in het veld van dynamisch optimale sturing zijn vele varianten te vinden. De methode is nog betrekkelijk nieuw, waardoor er nog veel onderzoek aan wordt verricht. Enkele belangrijke thema's zijn onder meer de robuustheid van dergelijke regelalgoritmen (m.a.w. wat gebeurt er als de structuur van het systeem verandert), de wijze waarop het model moet worden bepaald, de problemen van niet-lineariteiten, algoritmen voor de schatting van de werkelijke toestand uit (beperkte) metingen, enzovoort. Het aantrekkelijke van de methode is gelegen in de integrale belangenafweging, maar daar staat tegenover dat een dynamisch model nodig is en intensief rekenwerk.

1.4 De achilleshiel: het mathematisch model

In beide geschetste concepten speelt het mathematisch model van het systeem een cruciale

rol. In de praktijk kan met het maken van een goed model een flinke hoeveelheid tijd (en geld) zijn gemoeid. Niet alleen is een goed inzicht nodig, maar vaak moeten ook heel wat meetgegevens worden verzameld. Bovendien is het maken van een geschikt model voorbehouden aan enkele schaarse specialisten. Het is derhalve van belang het onderzoek te richten op (a) het ontwerpen van algoritmen die minder gevoelig zijn voor de kwaliteit van het model, of (b) methoden van semi-automatische modelvorming. In dit rapport gaat het er om de aandacht te vestigen op de interessante mogelijkheden van nieuwe methoden voor sturing van waterbeheer. We moeten ons enthousiasme niet laten temperen door de beperkingen die gelegen zijn in de modelvorming. Aan de andere kant kunnen we natuurlijk niet de ogen sluiten voor deze problemen. Ik wil daarom de volgende stelling poneren:

De invoering van geavanceerde sturingssystemen in de praktijk zal alleen kunnen slagen indien het gebrek aan betrouwbare dynamische modellen wordt gecompenseerd door de toevoeging van zelf-lerende eigenschappen.

1.5 Een waterkwaliteitsvoorbeeld: besturing van het Zaangemaal

Ter illustratie van de mogelijkheden volgt hier een beknopte beschrijving van de regeling van het zuurstofgehalte van de Zaan door sturing van het Zaangemaal. Dit is een voorbeeld van de eerste categorie van toepassing van modelgebaseerde sturingsmethoden, waarbij de streefwaarden (grenswaarden) te voren zijn vastgelegd.

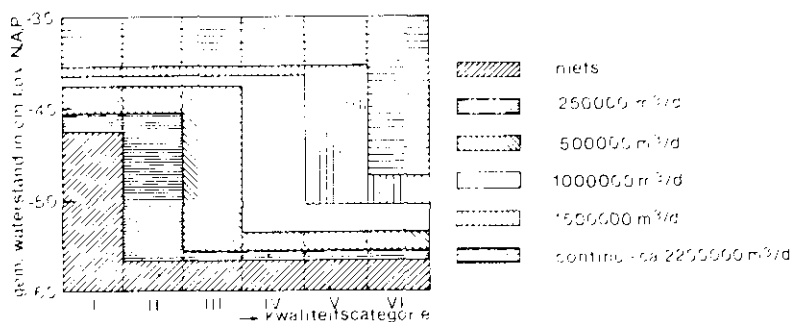
Hoewel de industriële lozingen reeds aanzienlijk zijn teruggebracht leidt de stagnatie van het water in de Zaan tot lokale ophoping van geloosde effluënten, waardoor plaatselijk de zuurstofgehalten tot onder de norm kunnen dalen. Om dit te voorkomen wordt op een tweetal plaatsen in de Zaan het zuurstofgehalte gemeten (zie Figuur 1.5a). Een mathematisch model is gebruikt om uit te rekenen bij welke condities acties nodig zijn, en wat de effecten daarvan zijn. In plaats van het on-line gebruik van het model zijn de uitkomsten van een groot aantal simulaties vertaald in een eenvoudige grafisch hulpmiddel, waarmee de pompmachinist kan beslissen of er gemalen moet worden, en zo ja, met hoeveel pompen. Omdat malen ook invloed heeft op de waterstand, wordt uitdrukkelijk rekening gehouden met het peil, zodat de regeling in feite een multi-variabele regeling is. Het gevolg

van het rekening houden met kwaliteitsaspecten is dat zeker niet gestreefd wordt naar handhaven van een vast peil, maar dat juist om wille van de stuurmogelijkheid het peil tot op zekere hoogte wordt losgelaten, uiteraard zonder dat bepaalde grenzen worden overschreden.

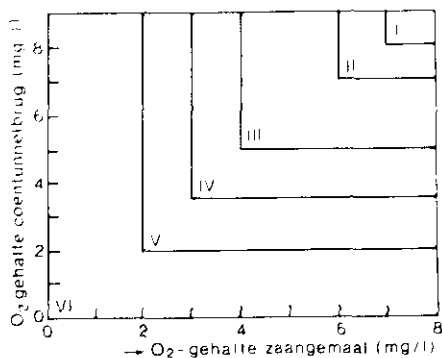
De gang van zaken ziet er als volgt uit. Op grond van het zuurstofgehalte zoals op de twee meetlokaties gemeten, wordt de waterkwaliteit geklassificeerd in één van de 6 mogelijke klassen volgens Figuur 1.5b. Vervolgens wordt het actuele peil bepaald door middeling van het peil bij het Zaangemaal en het telefonisch bij een automatische "peilspreker" op te vragen peil bij Spijkerboor (bovenstrooms). Bij de twee aldus verkregen gegevens, gemeten peil en gemeten zuurstofgehalte, wordt nu in het diagram van Figuur 1.5c afgelezen met welk debiet er gemalen moet worden. Van deze grafiek bestaat een zomer- en een winterversie, waardoor bereikt wordt dat rekening gehouden wordt met de per periode overwegend te verwachten weersomstandigheden en de verschillen in na te streven waterstand. Dit is dus in feite een eenvoudige vorm van een feed-forward element in de sturing, met daarnaast tijd variabele referentiewaarden die door de externe doelstellingen zijn bepaald. Deze regelstrategie wordt per etmaal gehanteerd, maar het maalregiem wordt aangepast indien tijdens het malen aanzienlijke wijzigingen in zuurstofgehalte en/of peil worden geconstateerd. Zo zijn er nog enkele details in het "algoritme" waarop hier niet wordt ingegaan.



Figuur 1.5a Het Zaan-systeem



Figuur 1.5b Waterkwaliteitsklassen



Figuur 1.5c Richtlijnen voor de besturing van het gemaal

Dit systeem wordt al een aantal jaren met redelijk succes toegepast. Wel wordt geconstateerd dat men soms te laat is met actie: het zuurstofgehalte op de meetpunten daalt dan aanvankelijk verder en herstel treedt pas later op. Vermoedelijk komt dit door de aanwezigheid van zuurstofarme propfen water op andere lokaties dan de meetplaatsen. Deze komen door de looptijd in het systeem pas geruime tijd na het begin van het malen aan het licht.

Uiteraard zijn op dit schema verbeteringen mogelijk. Voor de hand ligt het aantal meetplaatsen te vergroten. Nog beter zou het zijn indien de verstoringen, in casu de lozingen, on-line zouden kunnen worden geregistreerd. Vermoedelijk kan in dat geval het model nog steeds

off-line worden gebruikt, al zal de grafische procedure wat complexer worden.

Een andere mogelijkheid is gebruik te maken van een verondersteld standaardpatroon van de lozingen. Hierop kan dan volgens het principe van de dynamisch optimale sturing de sturing van het gemaal als tijdsfunctie worden berekend (waarbij het in principe geen probleem is in de doelfunctie rekening te houden met de bedieningskosten en de beperking dat slechts een discreet aantal pompdebieten mogelijk is in dit geval). Daarna wordt de actuele meting gebruikt om de optimale sturing te corrigeren. Hiervoor zal echter vrijwel zeker on-line een computer nodig zijn. Deze kan dan worden voorzien van simulatiegereedschap waarmee de bedieningsman de gevolgen van het malen voor de komende periode kan simuleren.

Natuurlijk staat het niet van te voren vast dat de kosten van de hierboven gesuggereerde verfijningen opwegen tegen de te behalen voordelen. Maar ook de eenvoudige implementatie die nu gekozen is geeft wellicht aan anderen een stimulans om eens verder na te denken over de mogelijkheden van sturing op basis van een goed inzicht in de systeemdynamica voor hun gebied. Daarnaast zal het duidelijk zijn dat er voor de onderzoekwereld nog een interessant terrein te betreden is. Dit rapport wil daarvan getuigen.

1.6 Opbouw van het rapport

De lezingen van deze publicatie zijn met opzet in een volgorde geplaatst waarin de boven geschetste ontwikkelingslijn is aangehouden. In de eerste bijdrage gaat Geldof in op de noodzaak de doelen van het operationeel beheer scherp te formuleren. Daarbij breekt hij een lans voor het althans ten dele vervangen van referentiewaarden (normen, standaards, vuistregels) door een doelfunctie waaruit het gewenste gedrag dynamisch kan worden afgeleid. Geen sturingsalgoritme zonder duidelijk geformuleerde doelstelling. Hierop aansluitend gaat Nelen in op het begrip besturingsstrategie, en met welke aspecten en factoren rekening moet worden gehouden. Een besturingsstrategie bestaat dus uit een tijdreeks van sturingen, die eventueel kunnen worden geïmplementeerd via dynamische instelling van de set-points van de primaire regelkringen. Zoals hierboven uiteengezet speelt in deze benadering van de dynamische optimalisatie van een expliciet geformuleerde doelstelling het model van het systeem een wezenlijke rol. Het model vormt het onderwerp

van de lezing van Schuurmans. Hij wijst op het cruciale belang van modelsimulaties, niet alleen voor het beheer, maar ook voor ontwerp, modernisatie, en training van personeel.

Na deze inleidingen vanuit de theoretische hoek volgen lezingen waarin de praktijk centraal staat. Allereerst gaat Van Oosten in op het nieuwe automatische besturingssysteem voor het rioolstelsel van de stad Utrecht. Uit dit voorbeeld wordt duidelijk dat de te kiezen strategie afhankelijk kan zijn van de omstandigheden. De verstoringen in het waterbeheer zijn duidelijk niet te karakteriseren als kleine perturbaties, maar kunnen zeer wezenlijk zijn (droog versus regenweersituaties). Aansluitend geeft De Smit een overzicht van het ontvangende oppervlaktewater, en de mogelijkheden de waterkwaliteit te beïnvloeden door manipulatie van het debiet van de Vecht. Het is daarbij interessant om te bezien in hoeverre de nagestreefde optimaliteit bij het rioolbeheer ook geldt indien het zuiveringsbeheer en het oppervlaktewaterkwaliteitsbeheer in de beschouwingen worden betrokken. Tenslotte geeft Hartong een exposé over de automatisering van het peilbeheer in de Flevopolder, waarbij een groot aantal praktische aspecten de revue passeert.

G. Geldof

2.1

Inleiding

In dit onderdeel van het rapport "Sturing in het waterbeheer" wordt ingegaan op de normerings- en beoordelingsproblematiek. Sturing in het waterbeheer is geen doel op zich, maar een hulpmiddel om te komen tot een optimaal waterbeheer met betrekking tot de te dienen functies en belangen. Hierbij zijn normen nodig, waarin de aan het waterbeheer gestelde eisen zijn vastgelegd. Sturing heeft alleen dan zin, als door die sturing beter wordt voldaan aan de gestelde normen, bij voorkeur tegen zo laag mogelijke kosten. Het is dan ook van groot belang veel aandacht te schenken aan het formuleren van die normen. Hoe worden ze vastgesteld, hoe moeten ze er uitzien en wat zijn de gevolgen als er al dan niet aan wordt voldaan?

In deze lezing wordt begonnen met een beperkte analyse van de problematiek rond het vaststellen van normen (eisen, wensen, beleid, richtlijnen, deelfuncties, operationele doelen enz.). Centraal daarbij staan de termen benutting en beoordeling. Aan de hand van een beschouwing van twee cycli binnen het waterbeheer wordt aangegeven wat de rol van normen binnen het waterbeheer is. Vervolgens wordt een beperkte opsomming gegeven van normen, zoals die in het verleden zijn toegepast of in het heden worden toegepast. Onderscheid wordt daarbij gemaakt naar normen die betrekking hebben op de gewenste toestand van een systeem en normen die betrekking hebben op de gewenste dynamische eigenschappen van een systeem. Op basis van de voor- en nadelen, die opgesomd kunnen worden bij de huidige normen, wordt een schets gemaakt van een beoordelingssysteem zoals dat er in de toekomst uit kan zien. Daarbij wordt ingegaan op de mogelijkheden om het waterbeheer af te stemmen op de verschillende belangen binnen een beheersgebied, leidend

tot een situatie waarbij meer inhoud aan het waterbeheer wordt gegeven dan uitsluitend peilbeheer. Tot slot wordt teruggekeerd naar het thema van de boek "Sturing in het waterbeheer". Aangegeven wordt wat wel en wat niet mogelijk is bij sturing en ingegaan wordt op de relatie met de in deze lezing naar voren gebrachte beoordelingsproblematiek.

2.2 Benutting en beoordeling

Het waterbeheer in Nederland wordt volop geautomatiseerd en gecomputeriseerd. Sensoren, Programmable Logic Controller's (PLC's), modems, datalijnen, PC's, regelaars, gegevensverwerkende programmatuur, van alles wordt aangeschaft om de taken in het waterbeheer zo efficiënt mogelijk uit te voeren.

De volgende vragen kunnen worden gesteld:

- 1 "Wordt door de aanschaf van de hard- en software het waterbeheer in Nederland ook daadwerkelijk verbeterd?" en
- 2 "Zo ja, hoe wordt deze verbetering uitgedrukt?".

Deze twee vragen staan centraal in dit rapport.

De eerste vraag heeft betrekking op de benutting van de mogelijkheden die geboden worden door de huidige apparatuur. Het kan namelijk niet de bedoeling zijn om met behulp van computers en meet- en regelapparatuur het beheer te imiteren dat voorheen handmatig werd uitgevoerd. Het moet toch mogelijk zijn om met de moderne hulpmiddelen iets extra's toe te voegen aan de kwaliteit van het waterbeheer? Geautomatiseerde beheerssystemen kenmerken zich door de grote hoeveelheid aan informatie die vrijkomt. Waterstanden, debieten, waterkwaliteitsgegevens, bedrijfsgegevens en informatie die men voorheen met veel pijn en moeite kon verzamelen komt nu na enkele toetsaanslagen ter beschikking van de waterbeheerder. Deze vrijkomende informatie moet kunnen worden benut om het waterbeheer te verbeteren:

- a door het grotere inzicht dat de waterbeheerder heeft in het functioneren van het watersysteem (meten is weten), kan hij het beheer zodanig aanpassen, dat beter wordt voldaan aan beleidsdoelstellingen die zijn geformuleerd. Ook wordt door het vrijkomen van informatie een basis gelegd voor het formuleren van meer genuanceerde beleidsdoelstellingen;

b in het dagelijks beheer kan vrijkomende informatie worden gebruikt om kunstwerken (pompen, stuwen) zo in te zetten, dat beter dan voorheen de gewenste toestand van het watersysteem wordt benaderd of nog algemener: dat beter dan voorheen wordt voldaan aan een vastgestelde doelfunctie. In beide gevallen wordt een beslissingscyclus op basis van kennis over het systeem van buitenaf beïnvloed en is er sprake van een sturing, een sturing in het waterbeheer. Ook al ligt het in de bedoeling van deze publicatie om met name aandacht te schenken aan de onder b. genoemde vorm van sturing in het waterbeheer, toch passeren in dit rapport beide vormen de revue. Dit omdat beide vormen van sturing onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn bij het vormgeven van een beheer dat meer is dan uitsluitend peilbeheer. Dit geldt met name als het begrip integraal waterbeheer om de hoek komt kijken.

De tweede vraag haakt vrij direct in op de eerste vraag. Gesproken is over beleidsdoelstellingen, de gewenste toestand en de doelfunctie. Hoe zien deze er uit en hoe kan het gedrag van een watersysteem er aan worden getoetst? We worden hier geconfronteerd met het zgn. beoordelingsvraagstuk. Waterbeheer dient er op gericht te zijn dat mens, milieu en welvaart optimaal worden bediend. Hoe kan dit optimaal waterbeheer worden gedefinieerd? Meer specifiek: het is noodzakelijk om technieken te hanteren waarmee het gedrag van watersystemen kan worden beoordeeld. Twee ingrediënten zijn daarbij onontbeerlijk:

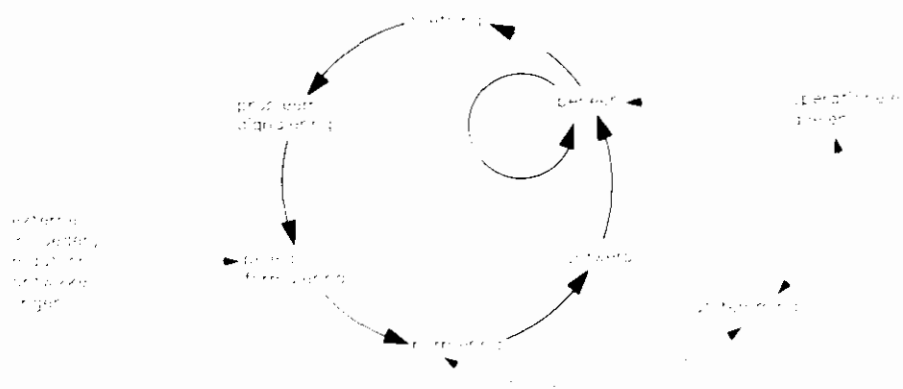
- a variabelen die representatief zijn voor het gedrag of de toestand van het watersysteem;
- b kentallen waaraan deze representatieve variabelen kunnen worden getoetst (normen).

Van een variabele (bijvoorbeeld: de waterstand) moet bekend zijn wat de positieve en negatieve gevolgen zijn van wijziging van de waarde ervan voor iedere groep van belangen die in het beheergebied aanwezig is. Bij het vaststellen van normen moeten de gevolgen voor de afzonderlijke, vaak tegenstrijdige belangen worden gekwantificeerd. Er moet dus impliciet een afwegingsprocedure in de norm zijn verwerkt.

2.3 De cycli in het waterbeheer

Ruwweg kunnen in het waterbeheer twee cycli worden onderscheiden: de beleidscyclus en

de beheercyclus. Beide zijn weergegeven in figuur 2.1.

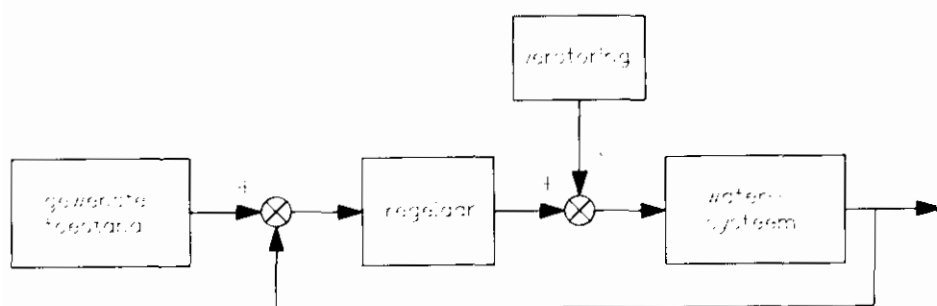


Figuur 2.1 Twee cycli in het waterbeheer

Bij de beleidscyclus wordt de beheersituatie getoetst aan normen. Daarbij wordt een probleem gesignaleerd als de beheersituatie een discrepantie vertoont met de gestelde eisen. Dit kan komen door ontwikkelingen in die beheersituatie of door ontwikkelingen in de normering. Daarbij is laatstgenoemd voorbeeld erg actueel. Door maatschappelijke ontwikkelingen of nieuw verkregen inzichten kan het voorkomen dat normen bijgesteld moeten worden. Een sprekend voorbeeld daarvan kan worden aangetroffen in de landinrichting. Jarenlang is op basis van economische overwegingen bij de ontwatering van akkerland uitgegaan van een optimale draandiepte van 1,20 meter. Door de kennis die is opgedaan met betrekking tot verdroging is deze norm bijgesteld en wordt er tegenwoordig naar gestreefd minder diep, maar wel intensiever te draineren. Hierdoor wordt meer water vastgehouden. Een ander voorbeeld betreft het braakleggen van landbouwgebieden. In landbouwgebieden wordt ten behoeve van de opbrengst en de begaanbaarheid van het land een strak peil aangehouden. Terecht wordt de vraag gesteld, of het bij braakliggende terreinen nog wel noodzakelijk is om dit strakke peil te handhaven. Wellicht kunnen de gebieden nu waterhuishoudkundig op een andere manier worden benut. Op basis van gesignaleerde

problemen of de gewijzigde inzichten wordt in de beleidscyclus een **beleid** geformuleerd. Bij deze beleidsvorming worden gewenste ontwikkelingen aangegeven. Om die gewenste ontwikkelingen kracht bij te zetten worden regels ontworpen (normen). Deze regels grijpen in op het bestaande beheer (er worden nieuwe operationele doelen geformuleerd) of er worden nieuwe systeemelementen ontworpen, waardoor met handhaving van dezelfde beheerstrategie wel aan de doelstellingen wordt voldaan. Tijdens het beheer wordt nagegaan of de beleidsdoelstellingen zijn gerealiseerd (de toetsing). Is dit niet het geval, dan wordt een probleem gesignaleerd en wordt het beleid aangepast etc. De beleidscyclus wordt met een geringe snelheid doorlopen.

Veel sneller wordt de beheercyclus doorlopen. Deze cyclus bevindt zich binnen in de beleidscyclus en bestaat ongeveer uit dezelfde elementen. In figuur 2.2 is een schematisatie van de beheercyclus weergegeven. Het betreft de klassieke weergave van een regelkring uit de meet- en regeltechniek.



Figuur 2.2 De beheercyclus

In de beheercyclus worden metingen verricht aan de toestand van een systeem. De gemeten waarden worden vergeleken met de gewenste waarden (normen). Wordt een verschil waargenomen, dan volgt een regelactie. Deze regelactie zorgt ervoor dat de toestand van het systeem zich wijzigt richting gewenste toestand. Is de gewenste toestand bereikt, dan blijft een regelactie achterwege. Aan de hand van het traditionele peilbeheer kan de beheercyclus worden geïllustreerd. De waterstanden worden op één of meerdere plaatsen gemeten.

Bevinden deze zich deze boven peil, dan wordt bijvoorbeeld een gemaal ingezet. Dit gemaal blijft werken totdat de waterstanden zo goed als mogelijk is overeenkomen met het peil. In dit geval wordt het peil als de norm, de gewenste toestand, gehanteerd.

Bestudering van de twee cycli leert, dat normen een zeer belangrijke plaats innemen. Ze komen niet uitsluitend op meerdere plaatsen in het schema voor, ze moeten er ook voor zorgdragen dat de verschillende cycli op elkaar afgestemd worden. Zonder goede normen zal het waterbeheer uiteenvallen in een aantal onsamenvangende acties. Er wordt altijd gezegd, dat een ketting net zo sterk is als zijn zwakste schakel. Wordt nu gekeken naar de praktijk van het huidige waterbeheer, de omvangrijke beleidsstudies en de enorme ontwikkelingen op het gebied van de techniek, dan kan worden geconstateerd, dat juist de normen de zwakste schakel zijn.

Gaat het in het waterbeheer om sturing, dan wordt verzamelde systeemkennis gebruikt om het statische karakter van een cyclus te doorbreken. Dit zal inhouden, dat bijvoorbeeld bij kwantiteitsbeheer in een polder niet een constant (streef)peil wordt gehanteerd, maar dat afhankelijk van de situatie een gewenste toestand wordt gedefinieerd. Het moge duidelijk zijn dat het daarbij van vitaal belang is dat de twee genoemde cycli zorgvuldig op elkaar worden afgestemd.

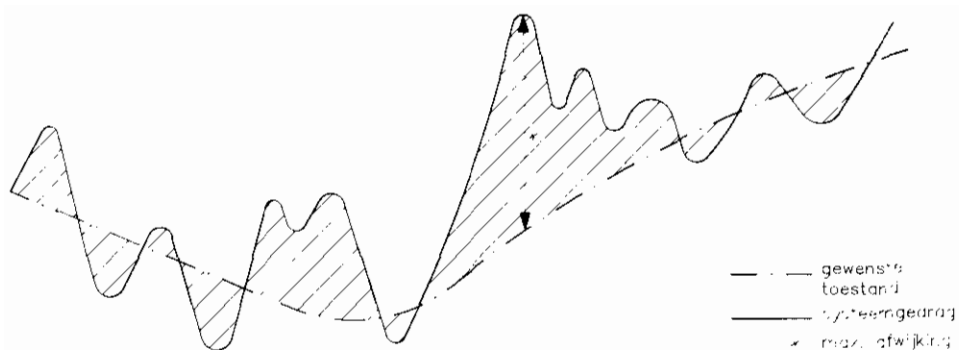
2.4 Normen in het heden en het verleden

Voordat wordt ingegaan op de gewenste systematiek bij het beoordelen van watersystemen worden enige bestaande normen op het gebied van het waterbeheer kort belicht. Daarbij wordt onderscheid gemaakt naar:

- 1 normen die betrekking hebben op de gewenste situatie;
- 2 normen die betrekking hebben op het gewenste dynamische systeemgedrag.

Het verschil tussen beide vormen van normen is weergegeven in figuur 2.3.

Zoals gesteld, wordt in het waterbeheer de werkelijke toestand getoetst aan de gewenste toestand. Komen deze niet overeen, dan volgt een actie. Normen die inhoud geven aan de gewenste toestand worden tot de eerste groep gerekend. Door invloeden van buitenaf



Figuur 2.3 De gewenste toestand en het dynamische systeemgedrag

(neerslag, lozingen etc.) zal de werkelijke toestand van een watersysteem regelmatig een afwijking vertonen ten opzichte van de gewenste toestand. Normen die grenzen stellen aan de afwijkingen ten opzichte van de gewenste toestand worden tot de tweede groep gerekend. Normen die betrekking hebben op de gewenste toestand kunnen worden gezien als een eerste orde norm, normen die betrekking hebben op het dynamische systeemgedrag kunnen worden gezien als een tweede orde norm.

2.4.1 Het peil

Het meest bekende voorbeeld in het traditionele waterbeheer van een norm die betrekking heeft op de gewenste toestand van een systeem is het peil. In polders worden nu in de meeste situaties een winter- en een zomerpeil gehanteerd. Het is mogelijk, dat in de toekomst een nog meer gedifferentieerd verloop van peilen zal worden gehanteerd. Aangezien een peil over een korte tijdsinterval constant is, zijn aanvullende normen nodig om grenzen te stellen aan het dynamisch gedrag van een systeem, bijvoorbeeld de maximale waterstandsstijging (2.4.4).

2.4.2 De HW-lijn en de NW-lijn

De Hoogwater-lijn (HW-lijn) en de Normaalwater-lijn (NW-lijn) worden in het waterbeheer voornamelijk toegepast in ontwerpsituaties. Aangezien de HW-lijn en de NW-lijn betrekking

hebben op stationaire (permanente) afvoersituaties, zijn ze ongeschikt voor toepassing in het real-time-beheer.

2.4.3 Aan- en afvoernormen

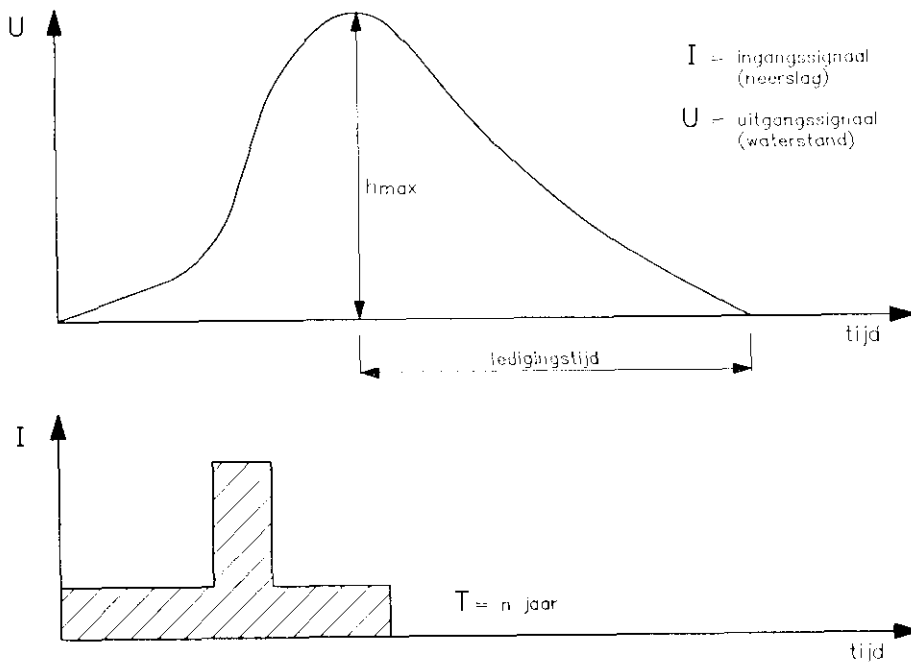
Bij aan- en afvoernormen worden eisen gesteld aan de hoeveelheden water die aangevoerd moeten kunnen worden of aan de hoeveelheden water die afgevoerd moeten kunnen worden. Een voorbeeld van een aanvoernorm is 0,167 l/s per ha en voorbeelden van afvoernormen zijn: 1,33 l/s per ha of 8 m³/min per 100 ha. Deze voorbeelden hebben betrekking op landelijke gebieden. Net als de HW-lijn en de NW-lijn hebben aan- en afvoernormen betrekking op stationaire situaties, waardoor ze ongeschikt zijn voor real-time-beheer. Het aardige van deze normen is echter, dat ze niet direct betrekking hebben op het peil in een beheergebied. Aan- en afvoernormen worden bepaald op basis van eisen, die door bepaalde belangengroeperingen binnen het beheergebied worden gesteld. Door de aan- en afvoernormen te koppelen aan waterkwaliteitseisen, kan een basis gelegd worden voor een aanpak die meer dan het hanteren van een (streef)peil gericht is op integraal waterbeheer.

2.4.4 De maximale waterstandsstijging (h_{max})

De maximale waterstandsstijging is wellicht de variabele die het meest gebruikt wordt voor de begrenzing van het dynamisch gedrag van een watersysteem. Gedefinieerd wordt een bui met een theoretische herhalingstijd T . Gesteld wordt dat de waterstand op een specifieke plaats niet hoger mag komen dan h_{max} boven peil.

Een voorbeeld van een norm is:

"Bij een bui, waarvan de inhoud een theoretische herhalingstijd heeft van 10 jaar, mag de waterstand niet hoger uitkomen dan 0,40 meter boven peil". De norm op basis van de waterstandsstijging is erg iel. Er wordt uitsluitend gekeken naar het systeemgedrag in een extreme situatie en er wordt geen onderscheid gemaakt tussen een situatie waarin het peil gedurende één uur met 0,40 meter wordt overschreden en de situatie waarin het peil gedurende meerdere dagen met 0,40 meter wordt overschreden. Om tegemoet te komen aan laatstgenoemde nadeel kan de hersteltijd (ledigingstijd) in beschouwing worden genomen.



Figuur 2.4 De maximale waterstandsstijging en de ledigingstijd

2.4.5 De hersteltijd (ledigingstijd)

Een voorbeeld van een norm, waarbij eisen worden gesteld aan de hersteltijd is:

"Bij een bui, waarvan de inhoud een theoretische herhalingstijd heeft van 10 jaar, moet na 24 uur 80% van de oorspronkelijke drooglegging (bij peil) wederom aanwezig zijn".

Voor polders worden door toepassing van deze norm duidelijke eisen gesteld aan de bemalingscapaciteit. Zoals te zien is, kunnen normen met betrekking tot de hersteltijd uitstekend worden gecombineerd met normen die betrekking hebben op de maximale waterstandsstijging. Het merkwaardige is, dat deze combinatie in Nederland zelden wordt gemaakt.

In figuur 2.4 is in algemene zin de samenhang weergegeven tussen de maximale afwijking ten opzichte van de gewenste situatie (bijvoorbeeld: de maximale waterstandsstijging) en de

Een mogelijkheid om tot een beoordeling (en een norm) te komen, is weergegeven in figuur 2.5. Daarbij wordt een drempelwaarde gekozen en wordt een integratie uitgevoerd over dat deel van de waarnemingen, dat zich boven de drempelwaarde bevindt. De maat (score) die dan gevonden wordt is het oppervlak van het in figuur 2.5 gearceerde gebied.

Een speciale score is de standaardafwijking. Daarbij wordt de drempelwaarde gelijk gesteld aan de gewenste waarde (bijvoorbeeld: het peil) en worden zowel te hoge als te lage waarden in beschouwing genomen. Voor waterstanden kan de standaardafwijking worden weergegeven als:

$$S_h = \frac{\sum (h - \text{peil})^2}{n-1}, \text{ waarbij } h = \text{de berekende waterstand (m);}$$

$n = \text{het aantal waarnemingen.}$

Het probleem bij scores en standaardafwijkingen is, dat ze geen fysische betekenis hebben. Een uitspraak van: de standaardafwijking is 0,05 m spreekt niet echt tot de verbeelding. Een voordeel van toepassing van de standaardafwijking is, dat het statistisch een betekenis heeft. De standaardafwijking kan een ingang betekenen voor de meer probabilistische benadering van het waterbeheer.

2.4.7 Bedrijfsgegevens

Iets wat de laatste tijd sterk in opmars is, is het in beschouwing nemen van bedrijfskundige gegevens bij de beoordeling van een systeem voor waterbeheer. Daarbij worden naast waterhuiskundige normen ook eisen gesteld aan werkuren, energieverbruik, etc..

Een voorbeeld, afkomstig uit een studie voor Capelle a/d IJssel, is weergegeven in tabel 2.1. Bij dit voorbeeld zijn simulaties uitgevoerd met neerslaggegevens van het jaar 1988. Verschillende regelingen zijn daarbij bedacht voor de inzet van de gemalen. Twee variabelen ter beoordeling van de regelingen zijn getoond in de tabel. Daarbij blijkt dat besparing op energiekosten, door voornamelijk buiten de piek- en plateau-uren te pompen, ten koste kan gaan van de peilhandhaving. Er moet een afweging worden gemaakt. Aangezien het in dit voorbeeld veenweidegebieden betreft met plaatselijk zeer geringe droogleggingen, is een waterstandsstijging hoger dan 0,40 m (bij dit neerslagpatroon) onacceptabel. Derhalve is gekozen voor regeling 5.

tabel 2.1 Simulatieresultaten

	energie- kosten	maximale waterstands- stijging
regeling 1	f 11045,00	0,38 m
regeling 2	f 12053,00	0,34 m
regeling 3	f 11300,00	0,32 m
regeling 4	f 5658,00	0,42 m
regeling 5	f 5902,00	0,36 m

2.4.8 Waterkwaliteitsnormen

Bij waterkwaliteitsnormen wordt vrijwel uitsluitend gekeken naar de gewenste toestand van een systeem. Daarbij valt op dat veel duidelijker dan bij waterkwantiteit getallen worden gegeven waaraan gemeten of berekende waarden (concentraties) kunnen worden getoetst. In dat opzicht is er ook veel duidelijker sprake van echte normen.

Waar bij waterkwaliteitsnormen nog een duidelijk behoefte aan is, zijn normen die iets zeggen over het dynamische systeemgedrag. Welke variaties mogen optreden en hoe moet er gehandeld worden in het geval van calamiteiten? Als er iets is, dat als een paal boven water staat, is het wel het feit dat sturing in het waterbeheer in de toekomst voornamelijk een sturing is op waterkwaliteit. *Dynamische normen zijn daarbij onontbeerlijk.*

2.4.9 Ecologische normen

Op meerdere fronten in Nederland wordt gewerkt aan een normering die gericht is op aquatisch leven (bijvoorbeeld: methode Roelofs). Bij deze normen, die een sterke relatie hebben met waterkwaliteitsnormen, wordt aangegeven wat de derving is aan aquatisch milieu als functie van de omstandigheden (de toestand van het systeem). Het kenmerkende van deze normen is, dat ze zijn gericht op een specifieke belangengroep binnen het

waterbeheer. In feite zou voor alle belangengroepen een serie normen opgesteld moeten worden, waarmee grenzen worden gesteld aan dervingen.

2.5 Beoordeling watersystemen in de toekomst

Het overzicht van normen uit het heden en het verleden van de vorige paragraaf is niet compleet. Er kunnen, met enige moeite, nog veel meer normen met betrekking tot het waterbeheer aan worden toegevoegd. Verwacht mag worden, dat door de ontwikkelingen die zich afspelen binnen het huidige waterbeheer het aantal normen in de toekomst alleen nog maar groter zal worden. We lopen hierbij het gevaar, dat een oerwoud aan normen en richtlijnen ontstaat, waarin uitsluitend sterk gespecialiseerde waterdeskundigen de weg kunnen vinden. Waar dan voor gevreesd moet worden is een verwijdering tussen de waterbeheerder en zijn te beheren water (vermindering van de betrokkenheid) en de kans is groot dat binnen al die normen de samenhang voor een deel verloren gaat. Zolang het aantal normen nog beperkt is, zal een waterbeheerder in staat zijn de relativiteit van bepaalde normen in te zien. Sommige normen zijn namelijk zeer slecht onderbouwd. Bij toenemende complexiteit is het niet ondenkbaar, dat normen dogmatisch worden toegepast.

Al met al kan worden geconcludeerd dat de kans groot is dat, ondanks de vele positieve ontwikkelingen, de normering de meest zwakke schakel zal blijven bij de cycli in het waterbeheer. Om te komen tot een oplossing, zal gezocht moeten worden naar een nieuwe systematiek voor het beoordelen van watersystemen. Daarbij moeten betere normen worden gegenereerd of er moet een methode worden gevonden om normen een minder belangrijke rol toe te delen. Dit laatste is het uitgangspunt bij de systematiek, waartoe in deze paragraaf aan aanzet wordt gegeven. Daarbij worden, zo goed als mogelijk is, de positieve punten van de huidige normen gecombineerd. Onderscheid wordt wederom gemaakt tussen de gewenste toestand en het gewenste dynamische systeemgedrag.

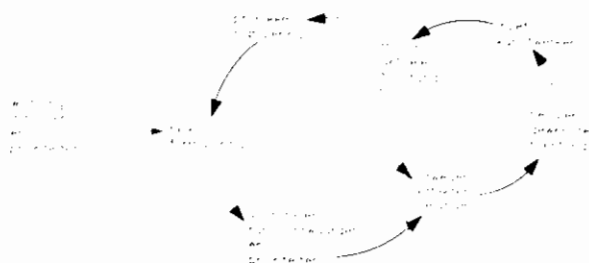
2.5.1 De gewenste toestand

Ten aanzien van de formulering van de gewenste toestand van een watersysteem is het wenselijk eisen vast te stellen op een relatief hoog abstractieniveau. Vastgesteld moet

worden welke belangen in een beheersgebied aanwezig zijn en hoe de relatie van de verschillende belangen met water kan worden beschreven. Bij deze oriëntatie op belangen zullen tegenstrijdigheden worden geconstateerd. Zo zal de landbouw vragen om een strakke peilhandhaving, terwijl vanuit de natuurtechnische hoek de voorkeur uitgaat naar een natuurlijk verloop van de waterstanden, zodat meer gradiënten worden verkregen. Deze tegenstrijdige belangen kunnen uitsluitend beleidsmatig worden opgelost (de beleidscyclus). Het definiëren van een gewenste toestand is vrijwel niet mogelijk als niet ergens in het proces prioriteiten worden gesteld (het geven van wegingsfactoren) en belangen tegen elkaar worden afgewogen. Technieken als lineaire programmering en multicriteria-analyses kunnen hierbij als hulpmiddel dienen.

Essentieel is, dat de mogelijkheden van de hedendaagse computermodellen goed worden benut. Door de grote snelheid waarmee diverse situaties kunnen worden doorgerekend is het nu mogelijk om (als wegingsfactoren bekend zijn) de gewenste toestand te bepalen op basis van de actuele toestand. Daarmee kan een aanzienlijke verbetering in het waterbeheer worden bewerkstelligd. Bijvoorbeeld: door een "real-time" afweging van belangen kan wellicht worden voorkomen dat een gemaal op volle capaciteit water uitslaat op een rivier, terwijl een paar dagen later (gebiedsvreemd) water moet worden ingelaten om droogteschade te voorkomen.

Bij deze methode is er geen sprake meer van normen in de letterlijke zin. Het beeld dat wordt verkregen is weergegeven in figuur 2.6.



Figuur 2.6 De cycli rond de bepaling van de gewenste toestand

Als figuur 2.6 wordt vergeleken met figuur 2.1 dan valt op dat er nog steeds sprake is van twee cycli. Er heeft zich echter een verschuiving in activiteiten voorgedaan. Een deel van de activiteiten, die eerst plaatsvonden in de beleidscyclus, is nu ondergebracht in de beheercyclus. Vanuit het beleid worden nu geen normen opgesteld, maar wordt aangegeven welke randvoorwaarden moeten worden gehanteerd en in welke volgorde waarde moet worden gehecht aan de diverse belangen binnen het beheersgebied. In feite worden door de beleidsmakers wegingsfactoren verstrekt. Op basis van de randvoorwaarden en de prioriteiten vanuit het beleid wordt binnen de beheercyclus een afweging van belangen gemaakt. Deze afweging leidt tot het formuleren van een gewenste toestand. Daarbij wordt aangegeven waar in het beheergebied hoeveel water aanwezig moet zijn van welke kwaliteit. Kunstwerken worden ingezet om deze gewenste toestand te bereiken. Een verbetering van het waterbeheer wordt bij deze methodiek bereikt, doordat:

- a de afstand tussen beleidsvorming en de in het beheergebied aanwezige belangen wordt verkort;
- b het afwegingsproces niet eenmalig wordt doorlopen, maar wordt herhaald bij elke rondgang van de beheercyclus. Daarbij wordt de actuele toestand van het systeem als uitgangspunt in de afweging betrokken.

Wat wellicht opvalt in figuur 2.6 is dat de term "ontwerp" niet meer aanwezig is. Dit is met opzet gedaan, omdat bij genoemde methodiek het ontwerp niet meer als een onderdeel van de beleidscyclus wordt gezien. In feite zou in figuur 2.6 een derde cyclus ingetekend moeten worden: de ontwerpcyclus. In de beheercyclus wordt een gewenste toestand bepaald en wordt door sturing van de kunstwerken geprobeerd die gewenste toestand zo goed mogelijk te benaderen. Nu zijn de mogelijkheden om met sturing iets te bereiken beperkt. Als blijkt dat het niet mogelijk is om door middel van sturing het gewenste doel te bereiken, is het noodzakelijk de eigenschappen of de belasting van het watersysteem aan te passen. Dit geschiedt in de ontwerpcyclus.

2.5.2 Het dynamische systeemgedrag

De gewenste toestand van een systeem kan worden bepaald door op basis van de actuele toestand de belangen in een gebied tegen elkaar af te wegen. Dit geldt in grote lijnen ook

voor het gewenste dynamische systeemgedrag. Als in een beheerssysteem een verstoring optreedt (bijv. neerslag of een lozing) zal de toestand van het systeem zich wijzigen.

Bijvoorbeeld:

- er treden waterstandsstijgingen op;
- stroomsnelheden nemen toe;
- het zuurstofgehalte neemt af.

Het beheer zal er op gericht zijn, dat zo snel mogelijk de verstoring wordt teniet gedaan en de gewenste toestand wordt hersteld. Echter bij het pad dat wordt doorlopen om van de verstoorte toestand bij de gewenste toestand te komen zijn vele vrijheidsgraden aanwezig.

Om optimaal te kunnen reageren op verstoringen op het systeem, moet per deelgebied vaststaan welke prioriteiten worden gehanteerd. Als gevolg van verstoringen zal schade optreden. Een systeem reageert optimaal als de som van alle schade wordt geminimaliseerd. Daarbij wordt ervoor gezorgd dat de schade die ontstaat daar optreedt, waar de meeste rek in het systeem aanwezig is (daar waar belangen het minst zwaar worden meegewogen).

Wordt nu gekeken naar de huidige normen die worden gebruikt om het dynamisch systeemgedrag te kunnen beoordelen, dan kan worden geconstateerd dat ze allemaal wel een onderdeel beschrijven, maar dat geen één een uitgangspunt kan zijn voor een volledige toetsing van het gewenste systeemgedrag.

Om te komen tot een meer genuanceerd beoordelingssysteem moet een methodiek worden gehanteerd, waarbij per belang en per systeemvariabele wordt vastgesteld:

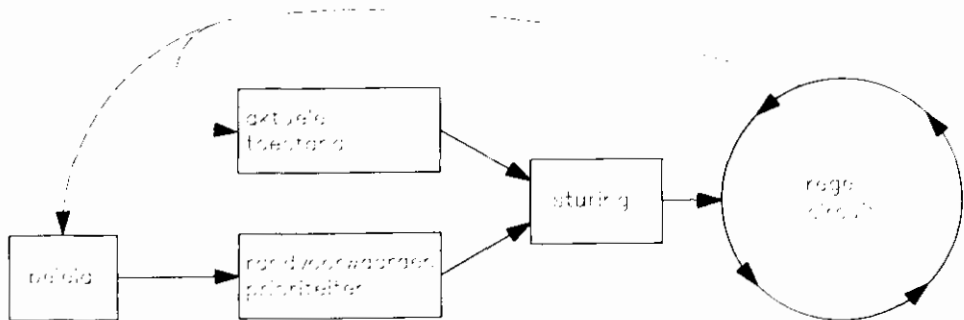
- wat de maximaal toelaatbare afwijking is ten opzichte van de gewenste toestand;
- wat de maximaal toelaatbare tijd is waarover een bepaalde afwijking ten opzichte van de gewenste toestand mag optreden. Deze maximaal toelaatbare afwijking en maximale toelaatbare tijd moeten afhankelijk worden gesteld van de herhalingstijd waarmee de verstoring optreedt. Een dergelijk beoordelingssysteem kan worden verkregen door verschillende normen met elkaar te combineren. Gebruik kan daarbij worden gemaakt van de inzichten die in de meet- en regeltechniek zijn verkregen met het begrip stabiliteit.

Aangezien het vormgeven van dit beoordelingssysteem een onderwerp op zich is, zal verdere behandeling in dit kader achterwege blijven. Geïnteresseerden die meer willen weten over het begrip stabiliteit als uitgangspunt voor het beoordelen van het dynamisch

systeemgedrag kunnen hierover contact opnemen met de auteur van deze tekst.

2.6 Sturing in het waterbeheer

Door binnen de beheercyclus (zie figuur 2.6) een afweging te maken van de effecten en op basis daarvan in te grijpen in de regeling van de kunstwerken is een vorm gegeven aan sturing in het waterbeheer. In figuur 2.7 is de rol van die sturing gevisualiseerd.



Figuur 2.7 De plaats van sturing in de beleids- en beheercyclus

Met behulp van de sturing wordt op basis van de gestelde randvoorwaarden en prioriteiten de optimale strategie bepaald voor de inzet van de kunstwerken. Deze optimale strategie komt tot stand door de verschillende effecten binnen het beheergebied tegen elkaar af te wegen.

Dit lijkt erg futuristisch, maar dat is het niet. In veel beheergebieden in Nederland zijn de hardware-ingredienten voor een uitgebreide sturing al aanwezig. Waterstandmeters, sensoren voor het meten van kwaliteitsparameters, telemetriecomponenten, centrale posten met PC's, enz. Deze elementen kunnen reeds op vele plaatsen langs het water van Nederland worden aangetroffen. Wat nog ontbreekt is de nodige software.

In het hierna volgende wordt in ruime mate ingegaan op de aspecten die een rol spelen bij het ontwikkelen van software voor sturing. Daarbij zal blijken dat de vorm van de sturing sterk afhankelijk is van de eisen die eraan worden gesteld. Voor elke set van "normen" is het mogelijk een sturing te ontwerpen. Het is echter niet zo, dat voor elke set van "normen" een sturing even zinvol is. Hiermee is nogmaals aangegeven, wat het belang is van een genuanceerd beoordelingssysteem (normering).

2.7 Van peilbeheer tot waterbeheer

In dit hoofdstuk is een vrij theoretische uiteenzetting gegeven over normen, beoordeling en besturing. Daarbij is gekeken naar twee cycli in het waterbeheer. Geconstateerd is, dat binnen deze cycli de normering een zeer belangrijke plaats inneemt. Normen zijn nodig voor het ontwerp van een beheerssysteem en normen zijn nodig om beheerssituaties te toetsen aan een geformuleerd beleid. Ook is geconstateerd, dat normen binnen de genoemde cycli de zwakste schakel vormen. Er is een opsomming gegeven van normen uit het heden en het verleden en daarbij valt op dat elke norm slechts een klein deel van het werkvlak van het waterbeheer bestrijkt en dat de normen onderling weinig verband vertonen. Bovendien kan in veel gevallen worden gesteld, dat normen slecht zijn onderhouden. De gebreken in normen kunnen zich zeer sterk manifesteren bij sturing in het waterbeheer. Bij sturing immers wordt de regeling van kunstwerken zodanig beïnvloed, dat beter dan voorheen voldaan wordt aan de gestelde normen. Wat nu, als het effect van de sturing vele malen nauwkeuriger is dan de normen? Waarom bijvoorbeeld zou er energie gestoken moeten worden in het op de millimeter nauwkeurig handhaven van een peil, als dat peil slechts op de decimeter nauwkeurig kan worden onderhouden?

Twee mogelijkheden zijn aanwezig om het probleem van de normering als de zwakste schakel op te heffen:

- 1 de schakel verstevigen, oftewel: de normering verbeteren;
- 2 de schakel verwijderen, oftewel: normen overbodig maken.

In deze lezing wordt een pleidooi gehouden voor het laatste. Er is een aanzet gegeven tot de formulering van een methodiek (zie figuur 2.6), waarbij beleid direct wordt afgestemd op belangen in een beheergebied en beheeractiviteiten worden uitgevoerd op basis van "real

time"-afwegingen. Daarbij neemt sturing een zeer essentiële plaats in. Sturing is bij deze methodiek geen luxe meer maar een bittere noodzaak.

Bij de gepresenteerde methodiek zijn betere mogelijkheden aanwezig om de verschillende aspecten binnen het waterbeheer op elkaar af te stemmen. Alle aspecten worden namelijk onder dezelfde noemer gebracht, te weten: schade of opbrengst (per belang). Daarom wordt er bij deze methodiek niet meer gesproken over de waterstand, maar over de actuele toestand van het systeem, en wordt er niet meer gesproken over het peil, maar over de gewenste toestand van het systeem. Bij deze methodiek wordt gesproken over waterbeheer in plaats van over peilbeheer.

Door binnen de cycli in het waterbeheer dat deel van de activiteiten, dat als routinematig kan worden bestempeld, te delegeren aan een computer (sturing), kan de beheerder zich gericht bezighouden met het afstemmen van beleid op belangen. Binnen de gepresenteerde methodiek is namelijk deze afstemming de moeilijkste factor (de nieuwe zwakke schakel). Een positief punt is echter, dat door de geautomatiseerde sturing snel gegevens vrijkomen, op basis waarvan correcties op de beheermaatregelen kunnen worden uitgevoerd. Daarbij kan de sturing voor een deel zelflerend worden uitgevoerd.

Is een goede samenwerking verkregen tussen beheerder en computer, en is het beleid goed afgestemd op de belangen in een beheergebied, dan is de kans groot dat de aangeschafte apparatuur goed wordt benut. Met behulp van de aanwezige hulpmiddelen wordt dan het onderste uit de kan gehaald. Hiermee kan de vraag aan het begin van dit hoofdstuk positief worden beantwoord (2.2).

We moeten ons echter wel bewust zijn van het feit, dat het effect van sturing beperkt is. Ook al wordt er nog zo goed gestuurd, vuil water wordt niet opeens schoon. Aanvullend zijn maatregelen nodig om de verstoringen op een watersysteem te beheersen. Wat met sturing kan worden bereikt is, dat binnen de geldende mogelijkheden, met een relatief geringe inspanning, schade kan worden geminimaliseerd. Op zichzelf is dat al heel wat waard.

3 NOODZAAK EN TOEPASSINGEN VAN STURINGSSIMULATIES

W. Schuurmans

3.1 Inleiding

De eisen die aan het waterbeheer worden gesteld zijn aan veranderingen onderhevig. Dit is een logisch gevolg van maatschappelijke en economische veranderingen. Tegenwoordig wordt de waterbeheerder met strengere eisen t.a.v. het beheer geconfronteerd dan vroeger. De toelaatbare peilfluctuaties worden nauwer en ook de waterkwaliteit speelt een steeds grotere rol. Het is de taak van de waterbeheerder om het waterbeheersingssysteem effectief en efficiënt te beheren. Dit is voorwaar geen eenvoudige opgave.

In het systeem staan tal van regelkunstwerken waarmee de beheerder debieten en peilen kan regelen. De vraag is alleen hoe en wanneer moeten de regelkunstwerken worden geregeld om aan de gestelde kwantiteit- en kwaliteitseisen te voldoen? Vaak kan pas achteraf worden vastgesteld of het systeem op de juiste wijze is geopereerd. Alleen beheerders met een jarenlange ervaring met een bepaald systeem kunnen de effecten van bepaalde handelingen voorspellen. Zij zijn meestal door "schade en schande" wijs geworden. Het operationeel beheer van het systeem is zo moeilijk omdat het systeem zich zo complex gedraagt. De stroming is niet permanent en niet uniform doordat allerlei verstoringen in het systeem optreden bijvoorbeeld t.g.v. sturing. Met andere woorden de waterstanden en debieten variëren in tijd en plaats. Wanneer in het systeem veranderingen plaatsvinden door b.v. automatisering van gemalen, dan zal het gedrag van het systeem mee veranderen. De beheerder zal weer opnieuw ervaring op moeten doen om het systeem succesvol te beheren.

Om het gedrag van het systeem te beschrijven is een model nodig. Dit hoeft niet noodzakelijkerwijs een computermodel te zijn, ook een schaal- of wiskundig model is denkbaar.

Wanneer met behulp van dit model sturingsacties kunnen worden gesimuleerd spreekt men van een sturingssimulatiemodel. In dit artikel zullen de mogelijke toepassingen van zo'n sturingssimulatiemodel worden besproken. Allereerst zal de noodzaak van sturingssimulaties worden aangetoond. Vervolgens zullen de benodigde informatie en voorzieningen voor sturingssimulaties worden besproken.

3.2 Het gedrag van een (gestuurd) watersysteem

De noodzaak van sturingssimulaties zal worden aangetoond door aan te geven hoe complex een (gestuurd) systeem zich gedraagt. Wanneer men niet in staat is om het gedrag van het systeem te voorspellen dan is men ook niet in staat om te zorgen dat het systeemgedrag (voldoende) overeenkomt met het gewenste gedrag. Hiermee is dan aangetoond dat een model waarmee men het systeemgedrag nauwkeurig kan voorspellen bijzonder nuttig kan zijn.

Traditioneel wordt het watersysteem als een permanent en uniform systeem beschouwd. Voor capaciteitsberekeningen is deze aanname gerechtvaardigd en zinvol omdat men met een aantal eenvoudige formules het systeem kan beschrijven. In werkelijkheid is het systeem nooit permanent en uniform, men heeft te maken met (lange) golven en stuwkrommen in het systeem.

Het gedrag van het systeem wordt bepaald door een samenspel van de volgende elementen:

- Kanalensysteem.
- Regelkunstwerken (Eng. regulator).
- Regelaars (Eng. controller).

Kanalensysteem

De waterbeweging in het kanalensysteem wordt veelal permanent en uniform aangenomen, maar door allerlei verstoringen in het systeem t.g.v. neerslag en operationele handelingen is dit eigenlijk nooit het geval. Dit betekent dat het systeemgedrag in het kanalenstelsel niet kan worden beschreven met alleen een weerstandsformule zoals die van Strickler/Manning of Chezy. Deze gelden namelijk alleen wanneer de stroming permanent en uniform is.

De wiskundige vergelijkingen die het gedrag van het systeem voor niet permanente, niet uniforme stromingscondities wel goed beschrijven waren al in de vorige eeuw bekend en worden aangeduid als de "Lange golf vergelijkingen" of de "De Saint Venant Vergelijkingen". Helaas zijn er tot op heden geen algemeen geldende analytische oplossingen voor gevonden.

Wel zijn er oplossingen bekend van vereenvoudigde vergelijkingen. De genoemde weerstandsformules zijn feitelijk een sterk gesimplificeerde vorm van de De Saint Venant Vergelijkingen. Een bekende oplossing van een gesimplificeerde vergelijking is bijvoorbeeld de voortplantingssnelheid van een kleine verstoring die gelijk is aan (gA/T) , met A als nat doorstroomprofiel en T als breedte ter plaatse van de waterlijn. Ten onrechte wordt vaak verondersteld dat deze voortplantingssnelheid gelijk is aan die van een lange golf, deze plant zich echter veel langzamer voort (Schuermans 1990).

Schematisch kan het gedrag van het kanalsysteem worden weergegeven in een blokdiagram als in Figuur 3.1 a. Een invoer wordt in de tijd vervormd volgens de De Saint Venant Vergelijking.



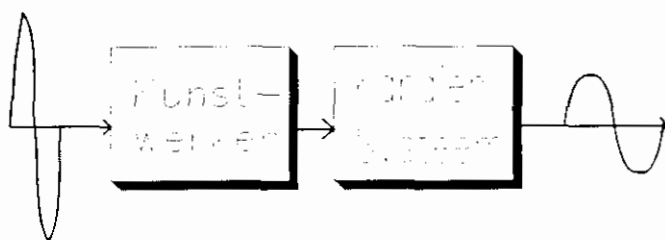
Figuur 3.1 a Kanalensysteem

Regelkunstwerken

De kunstwerken die in het kanalenstelsel staan kunnen worden opgevat als weerstandelementen die de stroming opstuw en vertragen. De wiskundige vergelijkingen die het gedrag van de kunstwerken beschrijven zijn algemeen bekend en te vinden in tal van handboeken (Bos 1976) (Ackers et. al., 1978). De mate van opstuw en vertraging is afhankelijk van

het type kunstwerk en zijn dimensies. In het algemeen kan worden gesteld dat onderlaten meer vertraging en opstuwing veroorzaken dan overlaten. Om het systeem van kanalen en kunstwerken te beschrijven moeten zowel de De Saint Venant Vergelijkingen als de kunstwerkvergelijkingen in beschouwing worden genomen.

Schematisch kan het gedrag van het kanalsysteem met kunstwerken worden weergegeven in een blokdiagram als in Figuur 3.1 b.



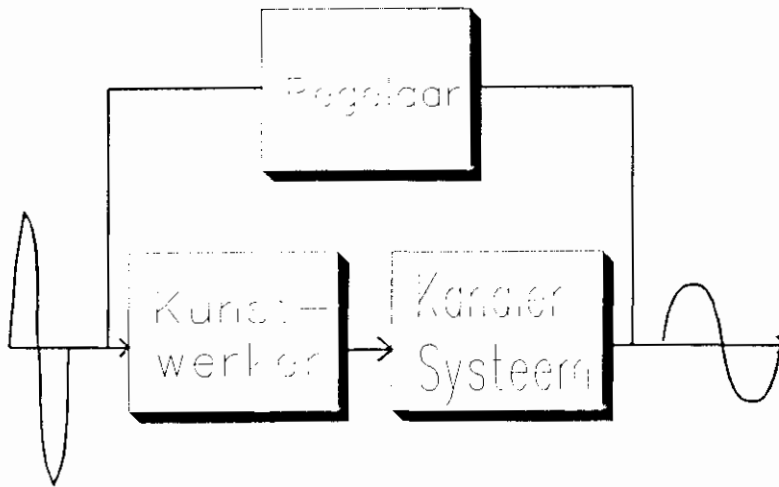
Figuur 3.1.b Kanalsysteem met kunstwerken

Regelaars

Het gedrag van de regelaars wordt bepaald door het type en zijn parameters. Er bestaan veel verschillende typen regelaars maar in het waterbeheer komen vooral de "stap-regelaar" en de "PID-regelaar" (Proportional Integral Differential) voor. De stap-regelaar werkt het eenvoudigst. Wanneer een afwijking wordt geconstateerd tussen een gewenste waarde (=setpoint) en een actuele gemeten waarde, dan wordt een corrigerende actie ondernomen, mits de afwijking groter is dan de "dead band" of hysteresis. De grootte van de corrigerende actie wordt bepaald door een opgegeven snelheid en de regelfrequentie.

De werking van een PID-regelaar is complexer. Weer is de invoervariabele de afwijking tussen de gewenste en gemeten waarde. Alleen wordt nu het uitgangssignaal niet alleen bepaald door de huidige afwijking maar ook door de voorafgaande afwijkingen. Met een PID-regelaar kan "mooier" worden geregeld, alleen is het gedrag van het geregelde systeem moeilijker te voorspellen.

Schematisch kan het (closed loop) geregelde systeem worden weergegeven in een blokdiagram als in Figuur 3.1 c.



Figuur 3.1 c Kanalsysteem met kunstwerken en regelaars

De afzonderlijke blokken uit Figuur 3.1 c, het kanalen systeem, de regelkunstwerken, en de regelaars, zijn met wiskundige (differentiaal) vergelijkingen te beschrijven. Ook het gedrag van het totale systeem is met analytische vergelijkingen te beschrijven. Deze vergelijkingen zijn echter complexer dan de som van de individuele vergelijkingen. Helaas bestaat er geen analytische oplossing voor de gevonden systeemvergelijkingen. Dit is op zich niet verwonderlijk daar er ook al geen oplossing voorhanden was voor alleen de De Saint Venant Vergelijkingen.

Er bestaan in principe twee wiskundige technieken om de onoplosbare differentiaalvergelijkingen toch op te lossen. Beide technieken komen neer op hetzelfde principe namelijk de bestaande onoplosbare vergelijkingen vervangen door oplosbare vergelijkingen. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de gevonden oplossingen altijd benaderingen zijn van de, nog immer onbekende, werkelijke oplossing.

De eerste techniek is lineariseren en de tweede discretiseren. In het geval van linearisatie worden de vergelijkingen vervangen door gelineariseerde vergelijkingen. In het tweede geval worden de continue vergelijkingen vervangen door gediscrètiseerde vergelijkingen. Aan beiden methoden zitten voor- en nadelen en het beste zou dan ook zijn om beiden naast elkaar te gebruiken. In de praktijk is het gebruik van de discretisatiemethode het meest populair omdat die eenvoudig in het gebruik en bovendien zeer krachtig is. Praktisch elk systeem kan worden gediscrètiseerd en opgelost. Hiervoor is echter wel een groot aantal berekeningen nodig, hetgeen een computer onmisbaar maakt. Er is dan ook een groot aantal computermodellen, ook wel hydrodynamische modellen genoemd, ontwikkeld.

Samenvattend kan worden gesteld dat gedrag van een waterbeheersingssysteem zeer complex is en dat voor een nauwkeurige beschrijving van dat gedrag, een hydrodynamisch model nodig is. Zonder model of met een vereenvoudigd model zal men i.h.a. het gedrag van het systeem niet of minder nauwkeurig beschrijven. De grootte van de fout is afhankelijk van het systeem en/of de vereenvoudigingen in het gebruikte model. Wanneer men het gedrag van het systeem in response op sturingsactie nauwkeuriger kan voorspellen is men in principe ook in staat om beter te kunnen sturen.

3.3 Voorwaarden voor het gebruik van sturingssimulaties

In het voorafgaande is plausibel gemaakt dat sturingssimulaties nuttig of noodzakelijk zijn. Om een sturingssimulatie daadwerkelijk uit te kunnen voeren moeten de volgende "gereedschappen" beschikbaar zijn:

- Beschrijving van de invoer van het systeem.
- Modelmatige beschrijving van het systeemgedrag.
- Evaluatie parameters om het systeemgedrag te karakteriseren.
- Expertise om de simulaties uit te kunnen voeren.

3.3.1 Invoer van het systeem

Bij de invoer van het systeem wordt hier gedacht aan fysische invoer zoals oppervlakte afvoer, kwel en windkracht en richting, maar ook vuilbelasting. De invoer kan worden

beschouwd als een verstoring waarop het systeem moet reageren. De grootte van de invoer moet "real time" worden gemeten om er "real time" op te kunnen reageren. Waterkwaliteit is vaak lastiger "real time" te meten dan waterhoogten en debieten. Ook wanneer men over een model beschikt waarin de waterkwaliteit niet wordt meegenomen is het van belang om de vuilbelasting te meten om zodoende de gewenste kwantitatieve staat van het systeem (b.v. grotere doorspoeling) aan te passen.

Wanneer er slechts op een beperkt aantal punten gemeten wordt of alleen met grote tijdsintervallen dan kunnen in veel gevallen modellen worden gebruikt om tussenliggende waarden te berekenen. In een aantal gevallen kan hiermee ook de invoer voor de toekomst worden voorspeld. Deze modellen hoeven zeker niet altijd ingewikkeld te zijn en kunnen bijvoorbeeld ook "black box" modellen zijn.

3.3.2 Gedragsbeschrijving

Om een model te maken dat het gedrag van het systeem beschrijft, zijn een modelleringspakket en een beschrijving van het systeem nodig. Beiden zullen kort worden behandeld.

Modelleringspakket

Er zijn tal van modelleringspakketten op de markt om de niet permanente en niet uniforme stroming in een kanalsysteem te beschrijven. Een inventarisatie van deze modellen is te vinden in het Modellenbestand van SAMWAT en in "Study of existing hydrodynamic flow models" (Schuurmans 1990). Helaas kunnen de bestaande hydrodynamische modellen niet worden gebruikt om automatisch geregelde systemen te beschrijven. Dit blijkt o.a. uit het volgende citaat "Models for the state of the system ... have been developed in a great number for static, non-controllable systems. However, hardly any model has been described allowing to simulate automatic regulators and external control input during the simulated process". (Schilling 1987).

Dat de bestaande hydrodynamische modellen veelal niet in staat zijn om sturingssimulaties in geautomatiseerde systemen uit te voeren komt waarschijnlijk omdat veel van deze modellen oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor rivieren en niet voor kunstmatige drainage- en irrigatie-

systemen. Om deze modellen geschikt te maken voor het waterbeheer is een aantal aanpassingen nodig. Deze aanpassingen hebben met name betrekking op de kunstwerken en de regelaars. Wanneer deze componenten in het model zijn geïntegreerd heeft men een modelleringspakket waarmee sturingssimulatiemodellen kunnen worden gebouwd.

In Nederland is er momenteel één modelleringspakket dat gebruikt kan worden voor automatisch geregelde hydrodynamische systemen. Het model MODIS (Modelleren van Drainage en Irrigatie Systemen), is ontwikkeld aan de TU-Delft op basis van een bestaand pakket genaamd Rubicon. Modis kan op een IBM-compatibel AT draaien en is voorzien van een gedetailleerde gebruikershandleiding.

Systeeminformatie

Om met behulp van een modelleringspakket een model van een specifiek systeem te formuleren is informatie nodig over het systeem. De vereiste nauwkeurigheid van deze informatie is afhankelijk van de toepassing. Het is een misverstand dat het model altijd geijkt zou moeten worden. Slechts in bepaalde gevallen is kalibratie noodzakelijk. Voor het ontwerpen van nieuwe systemen is ijking niet mogelijk en dus niet nodig, net zoals dat niet nodig is voor een stationaire ontwerpberekening. Kalibratie is nodig wanneer de uitkomsten van het model gebruikt worden voor het operationeel beheer van het systeem. Daarnaast moeten de termen kalibratie en verificatie niet door elkaar worden gehaald. Verificatie is het vergelijken van modelresultaten met meetresultaten nadat kalibratie is uitgevoerd en met een andere set meetwaarden. De vergelijkingen achter het model hoeven niet geverifieerd te worden. Wel moet men zich er natuurlijk van vergewissen dat het model de juiste vergelijkingen op de juiste wijze oplost, maar dit is met behulp van standaard testberekeningen na te gaan en hiervoor zijn geen meetwaarden nodig.

Het systeem kan worden ingedeeld naar de volgende systeemcomponenten:

- het kanalsysteem;
- de regelkunstwerken;
- de regelaars.

De benodigde informatie over de genoemde systeemcomponenten zal kort worden besproken.

Kanalensysteem

Informatie over het kanalensysteem betreft in de eerste plaats de configuratie en dimensies van het kanalenetwerk. De configuratie is (in Nederland) meestal voldoende nauwkeurig bekend. De dimensies van het dwarsprofiel hoeven niet altijd gelijk te zijn aan de ontworpen dimensies. Kleine afwijkingen kunnen worden gecompenseerd met de nader te bepalen weerstandsfactor. Voor het dynamisch gedrag van het systeem is met name de bergende oppervlakte van belang. De grote onbekende is de weerstandsfactor welke ook niet constant verondersteld mag worden maar die varieert met het seizoen. Het is niet altijd noodzakelijk om de weerstandscoefficiënt uit metingen te bepalen. Voor het ontwerp is het voldoende om te weten tussen welke waarden de weerstandsfactor varieert. Het ontwerp zal voor al deze waarden moeten voldoen en metingen zijn niet mogelijk en ook niet nodig. Ook voor modernisatie ontwerpen is het voldoende om te weten waartussen de weerstandsfactor varieert. Het ontwerp moeten immers voor alle mogelijke waarden voldoen.

Kunstwerken

In een kanalensysteem komen tal van kunstwerken voor. In het model hoeven deze niet altijd te worden opgenomen. Bruggen e.d. die slechts enkele centimeters verval veroorzaken kunnen geconcentreerd worden op enkele plaatsen of geheel worden verwaarloosd. De kunstwerken waarmee geregeld wordt, de zgn. regelkunstwerken moeten natuurlijk wel worden gemodelleerd. In veel bestaande hydrodynamische modelpakketten kunnen kunstwerken niet nauwkeurig worden gemodelleerd. Met name t.a.v. de verschillende stromingscondities zoals volkomen en onvolkomen stroming en de overgang van onderlaten naar overlaten en vice versa. In een goed pakket kan elke gevonden debiet-waterstandrelatie worden gemodelleerd. De vereiste nauwkeurigheid is ook hier weer afhankelijk van de toepassing. Kleine afwijkingen in de Q-h relatie resulteren in minimale waterstandveranderingen. In het geval van automatische peilregelkunstwerken worden kleine afwijkingen opgevangen door de regelaar (dit is het grote voordeel van closed loop control systemen). Grote nauwkeurigheid is gewenst wanneer het model wordt gebruikt om operationele instructies zoals een nieuwe klepstand, af te leiden.

Regelaars

In veel gevallen wordt een aantal regelkunstwerken automatisch geregeld zoals het in- en

uitslagpeil van pompen of stuwen die automatisch een bepaald peil vasthouden. Hiervoor kunnen verschillende soorten regelaars worden gebruikt variërend van hydraulisch automatische tot computergestuurde regelaars. Het aan de TU-Delft ontwikkelde modelleringspakket MODIS is in staat om de meest voorkomende regelaars zoals de stappen-motor en PID-regelaar te modelleren in een hydrodynamisch stromingsmodel.

In het geval van computergestuurde regelaars, kunnen exact dezelfde regelaars worden gebruikt als in werkelijkheid. In het geval van hydraulische en mechanische regelaars kunnen deze vaak ook met computergestuurde regelaars worden benaderd.

3.3.3 Evaluatie van de uitvoer

Een derde voorwaarde voor het gebruik van sturingssimulaties is dat men over evaluatieparameters moet beschikken waarmee de uitvoer eenvoudig gekarakteriseerd kan worden. Wanneer m.b.v. een modelleringspakket en informatie over het te modelleren systeem, een model van het systeem is gemaakt en de invoer van het systeem bekend is, kunnen sturings-simulaties worden uitgevoerd. De uitkomst van de simulatie geeft een beschrijving van het systeem, uitgedrukt in een geometrische en hydraulische grootheid, b.v. waterstanden en debieten, als functie van tijd en plaats. Deze informatie moet worden verwerkt tot bepaalde parameters die de kwaliteit van de sturingsactie aangeven. Dit is nodig om te vermijden dat men "verdrinkt" in de getallen en om te komen tot een objectieve kwantificering. Hierbij moet de gewenste uitvoer van het systeem vergeleken worden met de actuele of gesimuleerde uitvoer. Wanneer men niet in staat is om de gewenste uitvoer te specificeren, kan de kwaliteit van een sturingsactie of concept niet worden bepaald en is sturen dus ook niet zinvol.

Volp (Volp 1989) gebruikte voor het evalueren van bepaalde maatregelen in een glastuinbouwgebied, zowel hydraulische als economische parameters. De hydraulische criteria worden gespecificeerd als een maximaal toelaatbare overschrijdingsduur van een gewenst peil. Afhankelijk van de herhalingsfrequentie van een bepaalde gebeurtenis worden de toelaatbare overschrijdingen vastgesteld. Natuurlijk heeft de bepaling van de gewenste situatie iets subjectiefs. De bepaling van de gewenste uitvoer is zeer belangrijk maar valt

feitelijk buiten het probleem van sturing.

In MODIS zijn ook een aantal evaluatiecriteria opgenomen, maar deze hebben voornamelijk betrekking op de waterlevering en minder op de waterafvoer (Schuurmans 1989). Wel is het mogelijk om op een groot aantal punten een minimaal en maximaal peil te definiëren, waarna het model berekent hoe lang deze maximale peilen onder- respectievelijk overschreden zijn. Men moet niet vergeten dat de uiteindelijke evaluatie door mensen wordt uitgevoerd m.b.v. de genoemde parameters maar niet uitsluitend op grond van deze parameters.

3.3.4 Overige voorzieningen

Naast de genoemde drie voorwaarden voor het uitvoeren van een sturingssimulatie, te weten: invoer, model en uitvoer parameters is een zekere expertise nodig om een sturingssimulatie uit te kunnen voeren. De vereiste expertise is afhankelijk van de toepassing. Niet vergeten moet worden dat het model niet de werkelijke vergelijkingen oplost maar "slechts" gesimplificeerde gediscetiseerde vergelijkingen. De nauwkeurigheid van de numerieke oplossing kan door de gebruiker worden beïnvloed en deze moet in staat zijn de modeluitkomsten op hun waarde te schatten.

3.4 Toepassingen van sturingssimulaties

Momenteel worden sturingssimulaties nog weinig gebruikt en als ze worden gebruikt dan is dat voornamelijk voor het ontwerpen van sturingssystemen. Er zijn echter tal van toepassingen voor alle levensfasen van een waterbeheersingssysteem zoals ontwerp, beheer, onderhoud en modernisatie. Daarnaast kunnen simulaties worden gebruikt voor training. De mogelijke toepassingen zullen, gegroepeerd naar levensfase, in het navolgende worden behandeld en toegelicht met praktijkvoorbeelden.

3.4.1 Ontwerp

Wanneer een ontwerp wordt gemaakt voor een aan- of afwateringssysteem dan kan m.b.v. van (computer) simulaties worden bekeken hoe het ontworpen systeem, met een bepaald

sturingssysteem onder verschillende condities zal functioneren. Momenteel worden hydrodynamische simulaties al wel gebruikt voor het ontwerpen van afwateringssystemen, maar verschillende sturingsconcepten worden hierin nog niet meegenomen (ook omdat dit met de meeste modellen niet mogelijk is). Met behulp van simulaties kan het stabiliteitsgedrag van het systeem worden onderzocht. Naast het onderzoeken van de stabiliteit kan het gedrag van het systeem onder normale en extreme condities worden bepaald. Door het gebruik van sturingssystemen kan dit gedrag zeer complex zijn en zonder model niet goed te voorspellen.

Feitelijk legt men door middel van simulaties een brug tussen de ontwerp- en beheersfase. Ontwerpen kunnen via simulaties op hun gedrag in de beheersfase worden geëvalueerd. Juist in de ontwerpfase zijn dit soort simulaties zo belangrijk omdat men in deze fase het meest flexibel is in het aanbrengen van veranderingen. Wanneer de effecten van bepaalde sturingsconcepten eenvoudig kunnen worden gekwantificeerd is het mogelijk om een meer rationele afweging te maken tussen alternatieven waarbij kosten en baten tegen elkaar kunnen worden afgezet.

Bij de vakgroep Polders & Irrigatie van de TU-Delft is inmiddels ervaring opgedaan met het gebruik van sturings simulaties voor het ontwerpen van irrigatiesystemen (Monem, 1990), (Mehdi, 1990). Ook de Fransen hebben computersimulaties gebruikt voor het ontwerpen van "BIVAL-control" een real time regionaal besturingssysteem (Mahmood 1975) en voor "Dynamic-control" een real time centraal besturingssysteem in Canal du Provence (Rogier 1987).

Hoewel simulaties niet noodzakelijkerwijs tot een ander ontwerp hoeven te leiden, wordt het risico van een "verkeerd ontwerp" geminimaliseerd. Verwacht mag worden dat in de toekomst simulaties een vast onderdeel van de ontwerpcyclus worden. Niet alleen om de stabiliteit van het systeem te onderzoeken, maar ook om het functioneren van het ontworpen systeem te bepalen.

3.4.2 Beheer

In de beheersfase kan een simulatiemodel on-line of off-line worden gebruikt als een

"decision support" systeem voor de waterbeheerder. Wanneer het simulatiemodel on-line wordt gebruikt betekent dit dat actuele meetgegevens over de systeeminvoer (neerslag) rechtstreeks door het model worden ingelezen. Bij het off-line gebruik moet de beheerder zelf de (verwachte) invoer invoeren. Met behulp van het simulatiemodel kan een operator vooraf het effect van een voorgenomen beslissing evalueren. Op deze manier kunnen alternatieven worden geëvalueerd en verhoogt hij het vertrouwen in zijn beslissing.

Daarnaast kan een sturingssimulatiemodel worden gebruikt om een strategie af te leiden voor te verwachten situaties, of om een afgeleide strategie te toetsen. Het laatste kan nuttig zijn wanneer met een optimalisatiemodel een strategie is afgeleid waarbij een aantal vereenvoudigingen m.b.t. de waterstroming zijn aangenomen. Tenslotte kan men een simulatiemodel gebruiken voor het bepalen van het (meest) noodzakelijke onderhoud aan het systeem.

Bij het gebruik van sturingssimulaties voor het beheer van een systeem worden strengere eisen aan het model gesteld dan wanneer het model wordt gebruikt voor het ontwerpen van systemen. In de eerste plaats moet het model de werkelijkheid m.b.t. de waterstroming voldoende nauwkeurig weergegeven. Dit betekent dat de actuele weerstandswaarde bekend moet zijn en ook de actuele positie van regelkunstwerken. In de tweede plaats moet de invoer voldoende nauwkeurig en in real time bekend zijn. Gezien de huidige informatiesystemen bij veel waterschappen hoeft dit geen onoverkomelijk bezwaar te zijn. Alleen wanneer het model on-line wordt gebruikt kunnen er communicatiemoeilijkheden rijzen. Tenslotte moet de uitvoer van het model op een zodanige manier worden gepresenteerd dat de beheerder snel het effect van een voorgenomen actie kan beoordelen. Dit betekent dat diagnostische kwantitatieve parameters nodig zijn die grafisch gepresenteerd moeten kunnen worden. Het model moet ook voldoende snel de resultaten kunnen presenteren. Omdat de kritieke periode slechts enkele uren of hoogstens dagen duurt hoeft het met de huidige generatie PC's geen probleem te zijn om de resultaten voldoende snel te kunnen presenteren.

Het is dus zeker niet zo dat het sturingssimulatiemodel zelf beslissingen gaat nemen. Het beschreven model wordt alleen gebruikt om een sturingsstrategie af te leiden. Ook is het niet de bedoeling dat het model als regelaar in een "closed loop control" systeem wordt

opgenomen.

In Seine-Saint-Denis, een voorstad van Parijs, wordt voor het operationeel beheer van het rioleringsstelsel gebruik gemaakt van een hydrodynamisch model. Het simulatiemodel is een paar jaar operationeel en de ervaringen van de operators zijn positief. Men heeft met name meer vertrouwen dat een voorgenomen beslissing juist zal zijn, hoewel dit niet noodzakelijkerwijs de meest optimale beslissing hoeft te zijn. Ook wordt het model gebruikt om achteraf specifieke situaties door te rekenen. Op deze wijze krijgt men ervaring en kan men zijn beheersstrategie verbeteren voor soortgelijke toekomstige situaties.

3.4.3 Modernisatie

In de modernisatiefase, net als in de ontwerpfase, kan het sturingssimulatiemodel zijn diensten bewijzen door vooraf het effect van bepaalde modernisaties te evalueren. Het vergroten van capaciteiten, of het automatiseren van bepaalde gemalen, sluizen en stuwen kan worden gemodelleerd en via simulaties worden geevalueerd. Het grote voordeel van simulaties is dat men meer flexibel is in het zoeken naar een geschikt ontwerp. Er kan immers worden bepaald in hoeverre een verbeterd operationeel beheer c.q. automatisering en het vergroten van capaciteiten kan leiden tot een verbeterd systeemgedrag. Ook in de modernisatiefase zijn eerder genoemde evaluatieparameters van het grootste belang voor een objectieve kwantificering van alternatieven.

In Jordanië wordt momenteel door de TU-Delft in samenwerking met Haskoning m.b.v. een sturingssimulatiemodel een geschikt sturingssysteem ontworpen voor een 110 km lang kanaal, dat het huidige handmatig bestuurd systeem moet gaan vervangen. Zonder een dergelijk model zou het niet mogelijk zijn om een verantwoord ontwerp van het sturings-systeem te maken (Haskoning, 1990).

3.4.4 Training

Nieuwe operators, of operators die met een gemoderniseerd systeem moeten gaan werken, kunnen het gedrag van het nieuwe systeem leren kennen d.m.v. modelsimulaties. Het gebruik

van simulatiemodellen voor de training van bestuurders wordt in veel vakgebieden al uitgebreid toegepast. Denk bijvoorbeeld aan de opleidingen voor piloten en stuurlieden, die bijna hun gehele opleiding achter de simulator volgen.

In de irrigatiepraktijk is men al langer bezig met zgn. "irrigation management games". In het tijdschrift "Irrigation and Drainage Systems" is vorig jaar zelfs een apart nummer gewijd aan "Management Games". Het engelse ingenieursbureau Sir M. Mac Donald & Partners, is waarschijnlijk het verst gevorderd met de ontwikkeling van simulatie spelen voor operators en beheerders. Zo hebben ze o.a. een model voor het beheer van de Nijldelta ontwikkeld (Dempster et. al. 1989). Wanneer een simulatiemodel wordt gebruikt voor trainingsdoeleinden worden hoge eisen aan de gebruikersvriendelijkheid en uitvoer gesteld. De kosten van een trainingssimulatiemodel kan acceptabel zijn zodra er pakketten worden ontwikkeld waarmee relatief eenvoudig een specifiek systeem kan worden gesimuleerd. Hiervoor is niet alleen een modelleringspakket, maar ook een grafisch in- en uitvoer modelleringspakket nodig.

3.5 Samenvatting en conclusies

Samenvattend kan worden gesteld dat sturingssimulaties nuttig zijn in de ontwerp- en beheers- en modernisatiefase van een waterbeheersingssysteem. Daarnaast kunnen sturingssimulaties zeer nuttig zijn voor waterbeheerders die met een (ver)nieuw(d) systeem moeten werken. Sturingssimulaties zijn nuttig omdat de stroming in het systeem niet permanent en uniform is door allerlei verstoringen in het systeem t.g.v sturing en neerslag. Zonder een model is het niet (goed) mogelijk om het gedrag van het systeem te voorspellen en daardoor is het ook niet mogelijk om nauwkeurig te sturen.

Om sturingssimulaties uit te kunnen voeren is in de eerste plaats een simulatiemodel nodig, zoals het model MODIS, ontwikkeld aan de TU-Delft. Een model alleen is echter niet voldoende. Afhankelijk van de toepassing zijn additionele voorzieningen noodzakelijk.

Wanneer het model wordt gebruikt voor het ontwerpen van nieuwe systemen zijn de minste additionele voorzieningen nodig. Omdat het te ontwerpen systeem binnen een range van

situaties moet voldoen en omdat er nog geen data beschikbaar zijn, kan met verwachte data worden gerekend. Wel is het nodig om parameters te formuleren waarmee de resultaten van de simulaties kunnen worden gekwantificeerd. In de meeste gevallen worden deze parameters gedefinieerd door een verhouding tussen de actuele en de gewenste toestand. Wanneer de gewenste staat van het systeem niet bekend is, kan de kwaliteit van het ontwerp nooit worden bepaald en is een simulatie en zelfs sturing, overbodig.

Wanneer simulaties voor het operationeel beheer worden gebruikt, worden de meeste additionele voorwaarden gesteld. Informatie van de actuele staat van het systeem is nodig. Dit is in veel waterschappen al aanwezig dankzij automatische registratie-apparatuur. Verder moet de invoer bekend zijn. Hiervoor zijn neerslag-afvoermodellen en neerslagregistratie nodig of een redelijke aanname. (Bijvoorbeeld toekomstig waterbezwaar voor de komende drie uur is gelijk aan het waterbezwaar van de afgelopen drie uur). Tenslotte is periodieke of automatische kalibratie nodig om de weerstandsfactor van de kanalen te bepalen.

Wanneer sturingssimulaties voor trainingsdoeleinden worden gebruikt worden hoge eisen gesteld aan de presentatie van de in- en uitvoer. In andere vakgebieden worden computersimulaties veelvuldig gebruikt maar in het Nederlandse waterbeheer loopt men hier enigszins bij achter.

Literatuur

- Ackers 1978

P. Ackers, W.R. White, J.A. Perkins, A.J.M. Harrison, Weirs and flumes for flow measurement, Wiley-Interscience Publication,
ISBN 0 471 99637 8, U.K.

- Bos 1976

M.G. Bos, Discharge measurement structures, laboratory for hydraulics and catchment hydrology Report No.4,
ILRI, Wageningen

- Demster 1989
J.I.M. Dempster, S.L. Marsden, I.K. Smout, "Computer simulations in games for training in irrigation management", Irrigation and Drainage Systems, an international journal volume 3, No.3,
Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Nederland

- Haskoning 1990
Haskoning, Jouzy & Partners, Rehabilitation and upgrading of the King Abdullah Canal, Hydraulic model for calculation and analysis of the water in unsteady state conditions, final report

- Schilling 1987
Real time control of urban drainage systems, state of the art, The IAWPRC/IAHR Task Group on Real Time Control of Urban Drainage Systems

- Mahmood 1975
K. Mahmood, V. Yevjevich, W.A. Miller, Unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, Fort Collins Colorado

- Mehdi 1990
Development of Karun Irrigation Project,
IHE/TU-Delft

- Monem 1990
M.J. Monem, Performance analysis of delivery strategies, for manual and automatic upstream controlled irrigation systems, using a hydrodynamic simulation approach, IHE, TU-Delft

- Rogier 1987
D.C. Rogier, C. Couret, J. Bremond, Dynamic Regulation on the Canal de Provence, ASCE

- Schuurmans 1989
W. Schuurmans, Impact of unsteady flow on the waterdistribution, Proceedings of the International Conference Irrigation Theory and Practice, Southampton, Pentch press, London
- Schuurmans 1990
W. Schuurmans, Analitical formulae for the response time of irrigation canal, Irrigation and Drainage systems, volume 4 No.1, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Nederland
- Schuurmans 1990
W. Schuurmans, Study of existing hydrodynamic flow models, Delft University of Technology ISBN 90-800089-3-1
- Volp 1989
C. Volp, Some aspects of the design and operation of water management systems, Delft University of Technology, Faculteit der Civiele Techniek, ISBN 90-9003152-9.

4 DE INTELLIGENTIE VAN HET SYSTEEM: DE STURINGSSTRATEGIE

A.J.M. Nelen

4.1 Inleiding

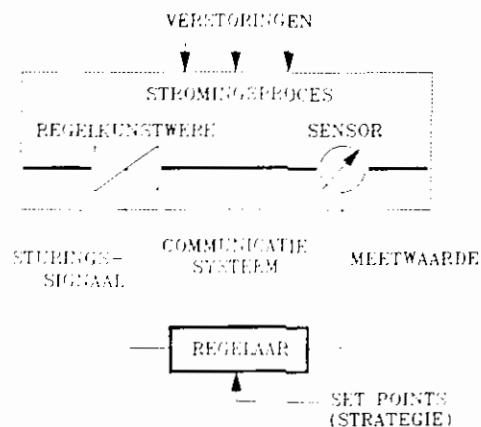
Sturing in het waterbeheer is niet nieuw. Een typisch voorbeeld is het peilbeheer in de Nederlandse polders, dat reeds lange tijd op een kunstmatige wijze geschiedt. Echter, vanaf de jaren 70 nemen de ontwikkelingen binnen de operationele waterbeheersing een hoge vlucht, als gevolg van de snel groeiende mogelijkheden op hardware en software gebied door de introductie van de microprocessor. Het gebruik van geavanceerde (geautomatiseerde) meet- en regelsystemen en computers (modellen), heeft in de eerste plaats geleid tot een verbeterd inzicht in de dynamische eigenschappen van het waterbeheersingssysteem. De praktijk heeft aangetoond dat dit inzicht, tezamen met de geboden mogelijkheden van de regeltechniek en de steeds strenger wordende eisen die aan het kwantiteits- en kwaliteitsbeheer van het (integrale) watersysteem worden gesteld, vervolgens vanzelf leiden tot de behoefte om ook zo goed mogelijk op deze dynamiek in te spelen (ofwel in 'real time' te sturen).

Met de automatisering heeft ook de benaming 'Real Time Control' (RTC) in het waterbeheer haar intrede gedaan. De term 'Real Time' is afkomstig uit de informatica en is hier van toepassing, wanneer voor de sturing van het systeem, actuele meetwaarden (en eventuele voorspellingen) van procesvariabelen en/of verstoringen, in een zo kort mogelijk tijdsbestek worden bewerkt en verwerkt tot een sturingssignaal voor de regelkunstwerken in het systeem.

Een sturingssysteem wordt gekarakteriseerd door de aanwezigheid van minimaal vier

functionele elementen, die samen een 'control-loop' vormen (Figuur 4.1):

1. een sensor, voor de meting van een fysische grootte (bijvoorbeeld peilen, debieten);
2. een regelkunstwerk (Eng.: regulator), voor het corrigeren van het stromingsproces (bijvoorbeeld pompen, kleppen, stuwen);
3. een regelaar (Eng.: controller), voor het instellen van het regelkunstwerk (bijvoorbeeld een PID regelaar);
4. een data-communicatiesysteem, voor de transmissie van de meetwaarden en de sturingssignalen.



Figuur 4.1 De functionele elementen van een sturingssysteem

Het stromingsproces wordt beïnvloed door verstoringen (bijvoorbeeld de neerslag afvoer, het bovenstroomse en/of het benedenstroomse peil), en door aanpassing van de stuurvariabele (bijvoorbeeld het pompdebiet of de kruinhoogte van een stuw). De functie van de regelaar is het verwerken van de meetgegevens tot sturingssignalen voor de regelkunstwerken, met als doel het stromingsproces terug te brengen tot de gewenste toestand. De stuurvariabele is afhankelijk van de afwijking van de meetwaarde met de ingestelde 'gewenste waarde' of het 'set point' van de regelaar.

Dit artikel gaat in op de wijze waarop de 'set points' kunnen worden bepaald. De tijdreeks van 'set points' van alle regelaars in het systeem wordt de sturingsstrategie genoemd. Bij automatische sturingssystemen wordt ook wel het algoritme aan de hand waarvan een dergelijke reeks wordt afgeleid, met sturingsstrategie aangeduid. De meest simpele strategie

is vanzelfsprekend om de 'set points' constant te houden. In dit geval wordt ook wel gesproken van 'regelen' in plaats van 'sturen'. Tot op heden wordt deze optie in de meeste waterbeheersingssystemen toegepast.

De strategie vormt (of wordt bepaald door) de 'intelligentie' van het systeem. Het beschrijft hoe de verschillende regelkunstwerken moeten werken in de tijd. Om bij zekere verstoringen van het waterbeheersingssysteem zo goed mogelijk te voldoen aan de operationele doelen van het systeem is een goede sturingsstrategie dus van cruciaal belang.

4.2 Argumenten voor sturing

Constance 'set points' zijn slechts zinvol in de situatie dat een procesvariabele (peil, debiet) op een bepaalde plaats in het systeem een min of meer constante waarde dient te hebben. In het algemeen is dit niet het geval. Het functioneren van het systeem wordt immers beoordeeld naar de effecten op de omgeving. De intensiteit en duur van deze effecten ('kosten') zullen altijd in meer of mindere mate variëren in tijd en ruimte. Dientengevolge is ook de gewenste toestand van het systeem, waarbij de 'kosten' minimaal zijn, geen constante.

Het verloop van de gewenste toestand kan niet los gezien worden van de belasting van het systeem en het systeemgedrag zelf. Traditioneel wordt een waterbeheersingssysteem ontworpen aan de hand van een constante, homogene ontwerpbelasting. Het behoeft geen betoog dat deze belasting in de praktijk nooit zal optreden. Er is altijd sprake van spreiding van de verstoring van het systeem in tijd en ruimte. Dit geldt voor zowel de waterkwantiteit als de waterkwaliteit. Indien de verstoring een bekende periodieke variabiliteit vertoont, zou voor de keuze van de 'set points' volstaan kunnen worden met een vooraf gedefinieerd tijdschema (open loop control). Dit zou bijvoorbeeld het geval kunnen zijn bij een drinkwatersysteem, waar het waterverbruik een zeker patroon heeft. Bij waterbeheersingssystemen is echter in het algemeen geen sprake van vaste belastingpatronen.

Afhankelijk van de dynamische eigenschappen van het systeem en het type regelaars zal de dynamiek van de verstoring, het verloop van de gewenste toestand van het systeem kunnen beïnvloeden. Het zo goed mogelijk benutten van de effecten van neerslagspreiding zal

bijvoorbeeld bij rioleringsbeheer eerder leiden tot variabele 'set points' dan bij het peilbeheer in een landelijk gebied, waar mogelijk een 'regeling' zou kunnen volstaan.

Niet alleen de belasting van het systeem, maar ook het waterbeheersingssysteem zelf ziet er in werkelijkheid nooit uit zoals gepland op de tekentafel. Zelfs al worden de plannen nauwkeurig uitgevoerd, dan bestaat er altijd nog een discrepantie tussen de capaciteiten van het geplande en werkelijke systeem door schematisaties en aannamen in het ontwerp. Ook is de 'afstemming' van bergings- en transportcapaciteiten van onderdelen van het systeem nooit optimaal. Het systeem is immers niet in één keer aangelegd, maar in de loop der jaren om uiteenlopende redenen gewijzigd en aangepast. Ook de systeemcapaciteiten en de eigenschappen van het stroomgebied zijn geen constanten. De conditie van het systeem en onderhoudswerkzaamheden spelen hierbij een grote rol. Een zo goed mogelijk gebruik van de systeemcapaciteiten vereist continue monitoring en correctie van het stromingsproces en eventueel aanpassing van het verloop van de gewenste toestand.

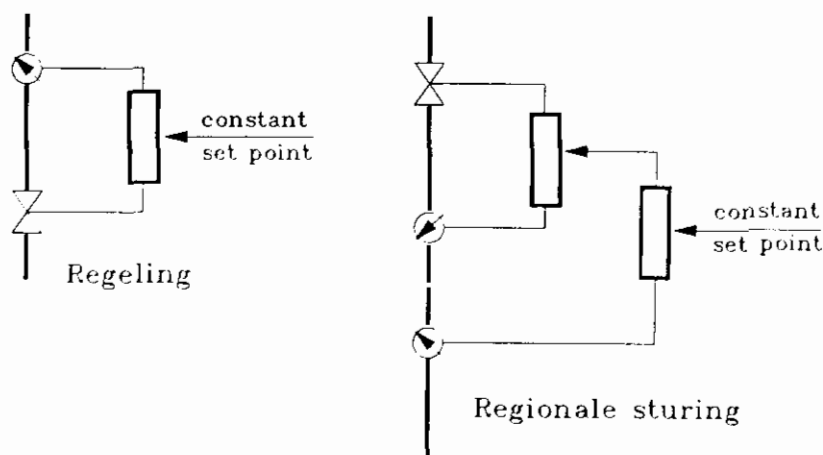
Resumerend kan men stellen dat voor een waterbeheersingssysteem iedere belastingsituatie uniek is waarbij, theoretisch gesproken, ook een unieke 'optimale' sturingsstrategie hoort. De mate waarin het waterbeheersingssysteem in 'real time' is te corrigeren, hangt af van een groot aantal factoren, zoals de configuratie van het waterbeheersingssysteem, de response tijd van het systeem, het type kunstwerken, de aanwezige berging, etc.. Deze factoren spelen vanzelfsprekend ook een grote rol bij de afleiding van de sturingsstrategie.

4.3 Indeling van sturingssystemen

Sturingssystemen variëren in niveau en complexiteit. Hoewel in de praktijk de scheiding niet altijd even duidelijk is, kan een bepaalde hiërarchie worden aangebracht in de opzet van de sturing, het gewenste beheer en de hiervoor benodigde informatie. Bij een hoger niveau is sprake van meer geïntegreerde beheersing en neemt per definitie de hoeveelheid informatie en de complexiteit van de sturing toe. Er worden drie niveaus onderscheiden:

- 1 Lokale sturing (Eng.: local control).
- 2 Regionale sturing (Eng.: regional control / unit process control).
- 3 Globale / integrale / centrale sturing (Eng.: global control / systems control).

Een lokaal sturingssysteem bestaat uit één 'control-loop' zoals weergegeven in Figuur 4.1. Wanneer de instelling van het regelkunstwerk alleen gebaseerd is op metingen van procesvariabelen nabij het kunstwerk is er meestal geen aanleiding om de gewenste toestand te variëren in de tijd, tenzij met behulp van modellen ook informatie over de 'omgeving' wordt gegenereerd. Lokale sturing betekent in de praktijk meestal 'regeling'. Een voorbeeld van een lokale regeling is een gemaal dat functioneert op een inslag- en uitslagpeil. Voorbeelden van lokale sturing zijn o.m. te vinden in (Lumadjeng, 1985) en (Van Bakel, 1986). In deze studies worden de set points van de kruinhoogte van een stuw gerelateerd aan de actuele grondwaterstand, met behulp van een model. Wanneer meerdere 'control-loops' met elkaar worden verbonden en de instelling van een regelaar afhankelijk is van de 'set point' van een andere regelaar, spreekt men van sturing op regionaal niveau. In tegenstelling tot lokale sturing, is regionale sturing niet noodzakelijkerwijs een onderdeel van elk sturingssysteem.



Figuur 4.2 Voorbeelden van regeling en regionale sturing

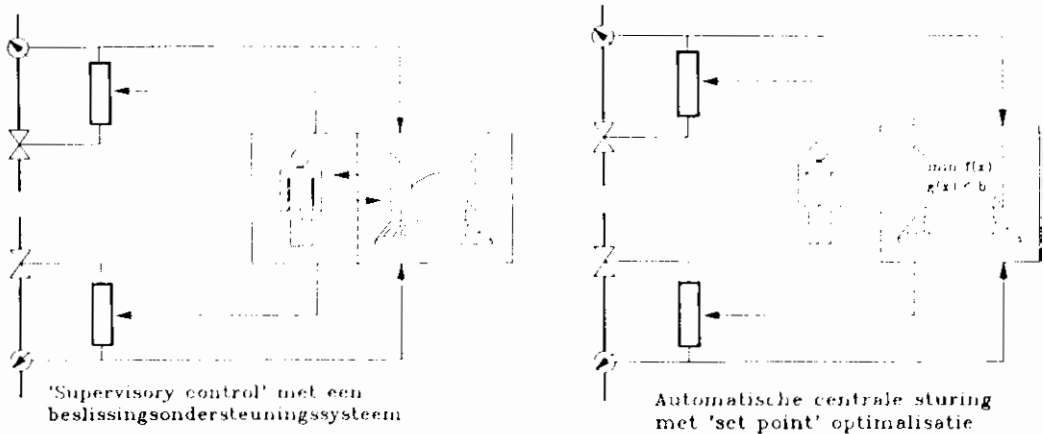
Bij een centraal sturingssysteem worden alle regelaars gecoördineerd vanuit een centrale 'intelligentie' (mens of computer). De instelling van een regelaar is dus afhankelijk van de metingen van alle sensoren in het systeem. In verband met een verminderd risico bij storing van het overkoepelende systeem worden bij centrale sturing veelal regelaars toegepast die ook geheel autonoom (onder lokale sturing) kunnen functioneren. Mede gezien de opmerkin-

gen in paragraaf 4.2, moge het duidelijk zijn dat voor een 'optimale' beheersing, de bepaling van de sturingsstrategie centraal dient te geschieden.

Voor elk niveau kan verder onderscheid worden gemaakt naar de wijze van opereren (Eng.: mode of operation). De sturing kan manueel (Eng.: manual control) of geheel automatisch (Eng.: automatic control) geschieden. Ook is het mogelijk dat de regelkunstwerken automatisch functioneren, maar de 'set points' van de regelaars centraal worden ingesteld door een operator (Eng.: supervisory control).

Een extra voordeel van centrale sturingssystemen is dat de informatie die nodig is voor de sturing ook gebruikt kan worden voor het dagelijkse beheer van het waterbeheersingssysteem. Men kan hierbij denken aan taken als:

- overzichten van meldingen, statistische gegevens en dergelijke;
- data-analyse, voor een beter inzicht in het functioneren van het afvoersysteem;
- planning van het onderhoud van het afvoersysteem, de regelkunstwerken en sensoren;
- alarmering en signalering.



Figuur 4.3 Voorbeelden van centrale sturing

Men kan de redenering natuurlijk ook omdraaien: in de praktijk blijken juist deze mogelijkheden de belangrijkste reden voor veel waterbeheerders te zijn om tot het installeren van een 'sturingssysteem' over te gaan. De behoefte om te gaan sturen groeit met een toenemend inzicht in het functioneren van het systeem.

4.4 Noodzakelijke informatie voor de afleiding van de strategie

Onafhankelijk van de oplossingstechniek zijn voor het afleiden van een sturingsstrategie 3 soorten informatie onontbeerlijk. Dit zijn de formulering van de operationele doelen, informatie over de verstoring van het systeem en de fysische randvoorwaarden van het probleem. Zonder deze informatie is geen sturing mogelijk.

4.4.1 De operationele doelen

Elke vorm van sturing vereist de formulering van de doelen, waaraan het waterbeheersingssysteem moet voldoen. Ofwel, het gewenste gedrag van het systeem dient bekend te zijn, alvorens men een sturingsstrategie kan afleiden. 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 ('schade' of 'kosten' beschouwing). Het formuleren van een doelfunctie, door specificatie van deze 'kosten', biedt een rationele basis om het gedrag van het systeem te evalueren, en de toegepaste strategie eventueel bij te stellen.

In het algemeen is het onmogelijk om alle operationele doelen te vertalen naar de werkelijke kosten. De schade als gevolg van bijvoorbeeld een peilafwijking of een hoeveelheid overstortend rioolwater is niet uit te drukken in guldens. Er zal derhalve gebruik gemaakt moeten worden van 'pseudo-kosten' of 'weegfactoren', die het relatieve belang van de verschillende doelen aangeven.

Een extra probleem bij het formuleren van een doelfunctie wordt gevormd door het feit dat in veel gevallen sprake is van met elkaar conflicterende doelen, waaraan niet tegelijkertijd kan worden voldaan. Minimalisatie van het energieverbruik van gemalen zou bijvoorbeeld

kunnen leiden tot ongewenste peilfluctuaties. Verder kan het relatieve belang van de doelen veranderen in de tijd. Prioriteiten kunnen wijzigen en doelen worden toegevoegd als gevolg van nieuwe wetten, of doordat de waterbeheerder door de 'gebruikers' van het systeem of door de publieke opinie wordt gevraagd zijn aandacht te vestigen op specifieke doelen. Een sprekend voorbeeld hiervan is de milieuproblematiek, die het laatste decennium enorm in belang is toegenomen.

Bovenstaande problemen geven tevens aan dat de 'optimale' strategie in de meeste gevallen niet bestaat, omdat de 'optimale' toestand van het systeem niet is te definiëren. Dit probleem wordt groter naarmate meer sprake is van geïntegreerde waterbeheersing. In de praktijk is de bepaling van een goede strategie een iteratief proces: slechts door steeds de resultaten te evalueren en de doelfunctie bij te stellen zal het gedrag van het systeem uiteindelijk het gewenste gedrag kunnen benaderen.

4.4.2 De verstoringen van het systeem

Het spreekt voor zich dat bij het bepalen van de strategie, informatie over de verstoring van het te besturen systeem nodig is om het probleem op te kunnen lossen. Voor het kwantiteitsbeheer zijn er in principe de volgende opties:

- on-line peil- en debietmetingen; waarmee de reactietijd voor het sturingssysteem beperkt is tot de orde van de response tijd van het systeem;
- neerslagmetingen in combinatie met een neerslag-afvoermodel; hetgeen de reactietijd verlengt met de afstromingstijd van de neerslag;
- neerslagvoorspelling m.b.v. radar; waardoor extra tijd gewonnen wordt, afhankelijk van de tijdshorizon van de voorspelling.

Voor het kwantiteitsbeheer wordt tot op heden in de meeste gevallen alleen gebruik gemaakt van peil- en debietmetingen. Hierdoor is relatief weinig tijd beschikbaar om het systeem bij te stellen, hetgeen tot grote afwijkingen van de gewenste toestand kan leiden.

Voor een voorspelling van de verstoring van het systeem levert de transformatie van neerslagmetingen tot afvoer met behulp van een neerslag-afvoermodel tegenwoordig de

meest betrouwbare resultaten. De voorspellingstijd van de neerslag-afvoer is bij het gebruik van traditionele regenmeters beperkt tot de afstromingstijd van de neerslag, welke ondermeer afhankelijk is van de stroomgebiedseigenschappen en de voorafgaande weersgesteldheid. Voor stedelijke gebieden betekent het gebruik van neerslag-afvoermodellen veelal een voorspellingshorizon in de orde van 0.5-1 uur, voor landelijke gebieden ligt dit in de orde van enkele uren. Voor landelijke gebieden is deze tijdshorizon veelal ruim voldoende om een aanzienlijke verbetering van het peilbeheer te kunnen bewerkstelligen (Hoogeveen, 1990).

De informatie met betrekking tot de ruimtelijke spreiding van de neerslag is met traditionele grondregenmeters beperkt. Wil men dit fenomeen voldoende nauwkeurig beschrijven dan is een dicht netwerk van regenmeters nodig. Er wordt dan ook naarstig gezocht naar methoden die een nauwkeuriger beschrijving geven van de neerslagspreiding en een grotere voorspellingshorizon hebben. De heterogeniteit van neerslag is echter een gecompliceerd meteorologisch verschijnsel. Mede door het ontbreken van de noodzakelijke neerslagdata van een dicht netwerk, is het tot op heden niet gelukt een (statistisch) model op te stellen dat in staat is dit fenomeen voldoende nauwkeurig te beschrijven. Er zijn een aantal studies uitgevoerd naar het gebruik van regressiemodellen om het tijdsafhankelijke verloop van een neerslaggebeurtenis te voorspellen (Schilling, 1986). De resultaten zijn niet bemoedigend in die zin, dat een gekalibreerd model niet in staat blijkt een correcte voorspelling van een gemeten bui te geven. De modelresultaten blijken echter wel bruikbaar bij de bepaling van de sturingsstrategie als aanvulling op de informatie verkregen uit het neerslagregistratienetwerk.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van radar voor neerslagvoorspelling. Hoewel een juiste interpretatie van de radarbeelden en de nauwkeurigheid van de voorspellingen nog een probleem is, lijkt radar een zeer geschikt instrument om zowel het tijdsafhankelijke verloop als de gebiedsverdeling van neerslag te voorspellen. Voor het 'supervisory control' systeem voor het rioleringssysteem van Rotterdam wordt reeds enige tijd gebruik gemaakt van de informatie van de neerslagradar van het KNMI. Ondanks de onnauwkeurigheden en de relatief lage resolutie van de informatie, worden de radarbeelden als zeer nuttig ervaren (Geerse, 1990). Kwalitatieve informatie over wel of geen regen en grove schattingen over een te verwachten neerslaghoeveelheid, bieden hier reeds mogelijkheden om de strategie te

verfijnen.

Algemeen geldt dat bij de bepaling van de sturingsstrategie een gevoeligheidsanalyse zal moeten worden uitgevoerd om de effecten van voorspellingsfouten te onderzoeken en de benodigde voorspellingshorizon vast te stellen. In het waterbeheer spelen waterkwaliteitsaspecten een steeds belangrijkere rol. In de meeste gevallen zal het waterkwaliteitsbeheer niet via directe beïnvloeding van de kwaliteitsvariabelen geschieden, maar door waterkwaliteitsaspecten mee te laten wegen in de doelen van de kwantiteitssturing. Voor de meeste waterkwaliteitsvariabelen bestaat er helaas geen apparatuur voor (betrouwbare) on-line metingen. De benodigde informatie over de waterkwaliteit en de response van het waterbeheersingssysteem op een bepaalde vuillast zal veelal verkregen moeten worden met behulp van modellen.

4.4.3 Randvoorwaarden

Een sturingsstrategie moet uitvoerbaar zijn. Bij het afleiden van een strategie moet met 3 soorten fysische randvoorwaarden rekening worden gehouden:

- de statische randvoorwaarden (capaciteitsvoorwaarden);
- de dynamische randvoorwaarden (de wetten van de hydrodynamica);
- de bedrijfstechnische randvoorwaarden.

Statische randvoorwaarden zijn bijvoorbeeld de maximale bergings- en afvoercapaciteit van elementen van het systeem. De formulering van de capaciteitsvoorwaarden is voor een pomp of bergingsreservoir veelal geen probleem. Het maximale debiet door een leiding is lastiger daar deze afhankelijk is van de energielijn. Over het algemeen zijn de statische randvoorwaarden van het probleem redelijk nauwkeurig vooraf vast te stellen.

Het zijn veelal de dynamische eigenschappen van het systeem die het vinden van een 'optimale' strategie moeilijk maken. Voor de formulering van de dynamische randvoorwaarden kunnen in principe de bekende stromingsvergelijkingen van De Saint Venant worden gebruikt. Echter, wanneer men de strategie zou willen uitrekenen door gebruik te maken van mathematische oplossingstechnieken moeten hier vereenvoudigingen worden

aangebracht. Bij lineair of quadratisch programmeren bijvoorbeeld dienen de voorwaarden lineair te zijn. Dit betekent dat veelal slechts simpele routing door superpositie van 'water-balans' vergelijkingen mogelijk is, van het type:

$$\text{berging}(t+1) = \text{berging}(t) + \{ (\text{instroom} - \text{uitstroom}) * (\Delta t) \}$$

Het spreekt voor zich dat per geval bekeken moet worden of een dergelijke simplificatie van het stromingsproces het werkelijke afvoerproces nog voldoende nauwkeurig beschrijft. De bruikbaarheid van meerbaksmodellen voor de simulatie van rioleringsystemen in vlak gebied, is reeds in vele onderzoeken aangetoond. Hier zouden genoemde optimalisatietechnieken bijvoorbeeld een toepassing kunnen vinden. Er zijn optimalisatietechnieken die flexibeler zijn in de formulering van de doelfunctie en randvoorwaarden (bijvoorbeeld Dynamisch Programmeren). Echter, ook met deze technieken zijn vereenvoudigingen noodzakelijk, omdat het probleem anders zo gecompliceerd en uitgebreid zou worden dat het niet oplosbaar meer is met de huidige computers.

Een ander type voorwaarden waar rekening mee gehouden moet worden zijn de zogenaamde bedrijfstechnische randvoorwaarden. Een pomp mag bijvoorbeeld niet te frequent in en uit worden geschakeld, een gemaal moet veelal een bepaalde tijdsduur inbedrijf of uitbedrijf zijn alvorens een nieuw pompbedrijf mag worden ingesteld (bijvoorbeeld in verband met waterslag) etc.. Dergelijke voorwaarden zijn vaak lastig in de oplossingsroutine op te nemen, het zijn daarentegen wel 'harde' randvoorwaarden waar te allen tijde aan moet worden voldaan.

4.5 Methoden voor de bepaling van de sturingsstrategie

'Set points' kunnen heuristisch worden bepaald of met behulp van een automatische procedure.

Heuristische sturing betekent dat een operator de strategie bepaalt, gebaseerd op ervaring. Een probleem hierbij is dat de rationele basis voor de beslissingen erg complex kan zijn en niet noodzakelijkerwijs consistent. De operator zal vaak intuïtief moeten handelen, hetgeen

de resultaten van de sturing moeilijk evalueerbaar maken. Van de andere kant is het, in het geval van een ervaren operator, natuurlijk zeer goed mogelijk dat met heuristische sturing het (bijna) optimum wordt bereikt. Het probleem is dan hoe deze ervaring over te brengen op zijn opvolger.

Om het inzicht te vergroten in de dynamica van het systeem kan de operator worden ondersteund door een interactief 'real time' simulatiemodel, waarmee hij de mogelijke effecten van sturingsacties kan modelleren alvorens ze daadwerkelijk uit te voeren. Een andere of aanvullende mogelijkheid wordt geboden door beslissingsondersteuningssystemen (Eng.: decision support systems) die gebaseerd op actuele metingen en/of modelvoorspellingen suggesties doen voor de te nemen acties. De operator kan dan beslissen deze suggesties op te volgen of niet.

Bij veel sturingssystemen wordt de strategie nog volgens een heuristische methode bepaald. Echter, het is waarschijnlijk dat de specificatie van 'set points' met behulp van een beslissingsondersteuningssysteem of door een volledig automatisch systeem de toekomstige benadering zal zijn. In het laatste geval wordt de beslissing over de instelling van de regelkunstwerken geheel overgelaten aan de computer. De taakstelling van de operator zal hiermee verschuiven van het bedienen van de regelkunstwerken naar het beheren en onderhouden van het computerprogramma. Ook zijn er mengvormen denkbaar, waarbij het systeem onder normale bedrijfsomstandigheden geheel autonoom functioneert en de operator alleen in buitengewone omstandigheden ingrijpt.

Bij geautomatiseerde systemen kan de strategie in principe op 3 manieren worden afgeleid:

- 1 gebaseerd op vooraf gedefinieerde regels van het 'if-then-else' type;
- 2 m.b.v. een expert-systeem ('een geprogrammeerde operator');
- 3 afgeleid m.b.v. mathematische optimalisatietechnieken.

De meest eenvoudige geautomatiseerde procedures zijn sturingsscenario's, waarbij een sturingsactie gerelateerd is aan een set meetwaarden volgens het 'if-then-else' principe of bepaald wordt aan de hand van een beslissingsmatrix (hetgeen fundamenteel op hetzelfde neerkomt). Zo'n 'if-then-else' structuur of beslissingsmatrix is in beginsel relatief eenvoudig

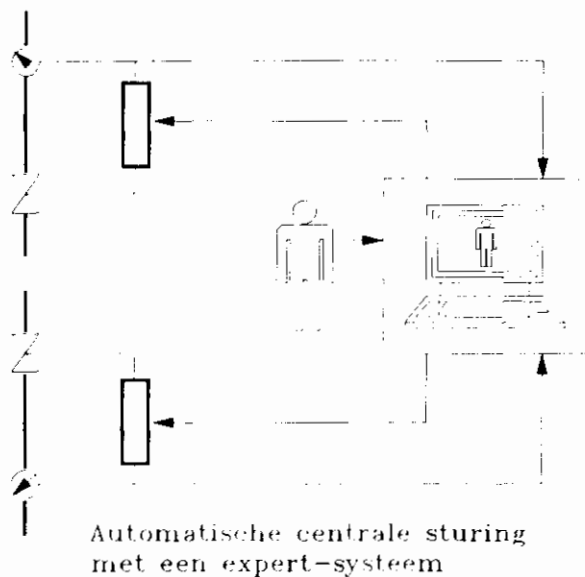
op te bouwen. Het grote voordeel van dit soort procedures is de doorzichtigheid van de genomen beslissingen. Het probleem is echter om alle mogelijke combinaties van meetwaarden (verstoringen van het systeem) en de daarbij behorende optimale sturingsactie in de matrix op te nemen. In de praktijk kan dit probleem alleen ondervangen worden door de resultaten van de sturing regelmatig te evalueren en het sturingsscenario bij te stellen en eventueel te verfijnen.

Een goede registratie van alle relevante variabelen van historische gebeurtenissen is dus van essentieel belang. Bij het ontwerp van het sturingssysteem verdienen de mogelijkheden ter evaluatie en bijstelling zeker zoveel aandacht als het sturingsalgoritme zelf!

Het bewaren en verwerken van eerdere ervaringen is ook te automatiseren in een 'zelflerend' expert-systeem. Een expert-systeem is te omschrijven als een computerprogramma dat zich 'gedraagt' als een expert op een specifiek gebied. Het programma bestaat uit een logische set 'gedragsregels' en een data-base met informatie over het systeem. Zijn taak is veelal de interpretatie en analyse van gegevens, het stellen van een diagnose en het geven van raad. Expert-systemen zijn flexibel in die zin dat kwantitatieve data (bijvoorbeeld m^3/s debiet), kwalitatieve data (bijvoorbeeld hevige neerslag), deterministische data (bijvoorbeeld berging vol) en probabilistische data (bijvoorbeeld regen waarschijnlijk) gecombineerd kunnen worden. Door de zelflerende eigenschappen van het programma, is het in staat zijn kennis omtrent het functioneren van het afvoersysteem te vergroten en zijn toekomstige beslissingen bij te stellen. Er wordt uitgebreid onderzoek gedaan naar het gebruik van expertsystemen in het waterbeheer. Echter, voor zover bekend, is deze techniek nog niet in de praktijk toegepast voor sturing van waterbeheersingssystemen.

Een andere mogelijkheid voor de bepaling van de sturingsstrategie is het optimaliseren van een doelfunctie (of 'kosten'functie), onderworpen aan een aantal (fysische) randvoorwaarden, met behulp van mathematische optimalisatietechnieken, zoals (niet-)lineair programmeren, quadratisch programmeren en dynamisch programmeren. De mathematische achtergronden van deze technieken worden beschreven in verschillende handboeken en blijven hier verder buiten beschouwing. De technieken hebben gemeen dat de operationele taken van het systeem naar hun prioriteit moeten worden gerangschikt en de 'kosten' van het niet

uitvoeren van deze taken moeten worden gespecificeerd. Zoals gezegd zijn de werkelijke 'kosten' van de meeste variabelen in de doelfunctie niet te bepalen, zodat gebruik gemaakt moet worden van weegfactoren, welke zijn gerelateerd aan de prioriteit van het specifieke doel. Ondanks het gebruik van een optimalisatietechniek, is het globale 'optimum' feitelijk niet te bepalen. Er is altijd sprake van een compromis tussen de gestelde doelen. Bij het opstellen van een doelfunctie is het derhalve belangrijk om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren om te onderzoeken hoe een bepaalde doelfunctie de sturingsstrategie beïnvloedt. In tegenstelling tot veel andere toepassingen van optimalisatietechnieken wordt de doelfunctie iteratief bepaald door de resultaten te evalueren en de doelfunctie bij te stellen totdat het gewenste systeemgedrag is bereikt.



Figuur 4.4 Het gebruik van een expert-systeem

Mathematische optimalisatietechnieken zijn, voor sturing in het waterbeheer, in de eerste plaats bruikbaar bij systeemanalyses, die gericht zijn op de bepaling van de potentiële mogelijkheden van sturing van het waterbeheersingssysteem. Het grote voordeel van optimalisatie is dat de rationele basis van de beslissingen duidelijk is en alleen afhankelijk

van de toegekende 'kosten' aan de systeemvariabelen. Het nut van zo'n systeemanalyse in de ontwerpfase van het systeem is dat men in deze fase nog flexibel is in de keuze van type regelaars en systeemcapaciteiten. Aan de TU-Delft is een model ontwikkeld, genaamd LOCUS (Linear Optimized Control of Urban drainage Systems), dat bij een dergelijke analyse van met name rioleringsystemen gebruikt kan worden. Het model is een meer-baksmodeel, waarbij met behulp van Lineair Programmeren (LP), voor een bepaalde voorspellingshorizon een geoptimaliseerde sturingsstrategie wordt bepaald. In tegenstelling tot andere LP toepassingen is de doelfunctie een quasi-lineaire functie, die voor elk tijdstip afhankelijk van de actuele situatie in het systeem wordt vastgesteld. Hierdoor is het mogelijk om ook waterkwaliteitsdoelstellingen in de weging mee te nemen. (Nelen, 1990).

Omdat simplificaties van de dynamische randvoorwaarden van het probleem (par. 4.3) nodig zijn om het probleem oplosbaar te maken, en bedrijfstechnische randvoorwaarden moeilijk in de optimalisatieroutine zijn op te nemen, is een aldus afgeleide strategie veelal niet zondermeer te gebruiken voor het werkelijke drainagesysteem. Voor praktijktoepassingen zouden mathematische optimalisatietechnieken bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden voor het 'invullen' van een beslissingsmatrix of als onderdeel van een beslissingsondersteunings-systeem of een expert-systeem. Praktijkvoorbeelden hiervan zijn nog niet voorhanden, maar het zijn onderwerpen waar uitgebreid onderzoek naar wordt verricht.

4.6 Samenvatting en slotbeschouwing

Kenmerkend voor sturen is dat de gewenste toestand, of het 'set point', niet constant is. De sturingsstrategie is de tijdreeks van 'set points' van alle regelkunstwerken in het systeem, of het algoritme waarmee een dergelijke reeks wordt afgeleid. Om een strategie te kunnen bepalen zijn 3 soorten informatie onontbeerlijk, namelijk de operationele doelstellingen, de verstoringen van het systeem (de input), en de fysische randvoorwaarden van het probleem. Met deze informatie kan de strategie heuristisch of met behulp van een automatische procedure geschieden. Aangezien iedere sturingsactie de situatie elders in het systeem beïnvloedt, is voor een 'optimaal' systeemgedrag, een centrale sturing noodzakelijk.

Steeds meer waterbeheerders gaan over tot de installatie van (geautomatiseerde) meet- en

regelsystemen. Het toenemende inzicht in de relevante processen door het gebruik van computermodellen en de mogelijkheden van regelsystemen zullen uiteindelijk leiden tot veranderingen in de houding ten opzichte van de operationele waterbeheersing. Hoewel nog een aantal bestuurlijke en technische problemen het hoofd geboden moet worden is nu reeds te voorspellen dat een algemene introductie van (centrale) sturingssystemen in het waterbeheer slechts een kwestie van tijd is.

Ingrijpen in het afvoerproces brengt voor de beheerder nu nog een zeker risico met zich mee. Mogelijke overlast van welke aard dan ook zou tenslotte toegerekend kunnen worden aan de ondernomen sturingsactie. Dit artikel geeft echter een aantal argumenten aan waarom voor een optimaal rendement van het systeem het risico om te handelen zou moeten veranderen in het risico om niet te handelen. Dit aspect zal in de toekomst reeds in de ontwerpfase van het systeem moeten worden onderkend. Inzicht in de mogelijkheden van sturing en het functioneren van waterbeheersingssystemen zal uiteindelijk betekenen dat ongewenste gebeurtenissen die nu nog als 'overmacht' gekwalificeerd worden, in de toekomst gekenschetst worden als nalatigheid.

Literatuur

- Geerse, H., 1990
Weerkundige begeleiding van de rioolwaterbeheersing Rotterdam,
Rapport Gemeentewerken Rotterdam
- Hoogeveen, D., 1990
Het nut van peilvoorspellingen bij geautomatiseerd peilbeheer in landelijke gebieden,
afstudeerverslag TUD, vakgroep G & W
- Lumadjeng, H.S., 1985
Een eerste aanzet tot een ontwerp van een lineair optimaal regelsysteem ten behoeve van
het stuwbeheer, afstudeerverslag TUD, vakgroep G & W

- Nelen, A.J.M., 1990
Control strategies based on water quality aspects, proc. 5th International Conference on Urban Storm Drainage, Osaka, Japan

- Schilling, W., 1986
Operationelle Stadtentwässerung, Mitteilungen Heft 64, Universität Hannover, ISSN 0343-8090

- Van Bakel, P.J.T., 1986
A systematic approach to improve the planning, design and operation of surface water management systems, ICW, Wageningen.

5 OPERATIONEEL WATERKWALITEITSBEHEER OP REGIONALE SCHAAL

D. de Smit

5.1 De waterhuishouding van de Utrechtse Vecht

5.1.1 Inleiding

Eeuwen geleden vormde de Vecht de natuurlijke afwatering van de gehele Vechtstreek. Gevoed met water uit de Kromme Rijn stroomde de Vecht vanuit Utrecht naar de Zuiderzee bij Muiden. Door inpoldering daalde het maaiveld in de Vechtstreek, waardoor de Vecht ten opzichte van de omringende polders een hogere ligging kreeg. Aan de verziltende invloed van de Zuiderzee kwam in de 17e eeuw een einde met de bouw van de zeesluizen in Muiden. Sinds de afsluiting van de Zuiderzee loost de Vecht haar water voornamelijk op het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) en wordt de hydrologie van de Vecht voor een groot deel kunstmatig bepaald door inlaten en uitslaan van water. Naast de wateraan- en afvoerfunctie heeft de Vecht een aantal andere belangrijke functies. Zo wordt de rivier door het rijk aangemerkt als een hoofdscheepvaartroute voor de recreatie. Daarnaast zijn er een drietal visverenigingen en vier beroepsvissers actief. Ook biedt het water een ligplaats voor een groot aantal woonboten. Nationaal gezien heeft de Vecht grote landschappelijke en cultuur-historische waarde door de aanwezigheid van een reeks buitenplaatsen met bijbehorende parken. Voor een deel stammen deze uit de periode van de Hollandse graven en Utrechtse bisschoppen, maar de meeste zijn in de 17e en 18e eeuw gesticht door Amsterdamse kooplieden. Daarnaast maakte de Vecht deel uit van de Hollandse waterlinie.

Het beheer van de Vecht is in handen van een drietal overheidsinstanties. Voor het Noord-Hollandse deel ligt het totale beheer bij Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland. Het

nautisch en kwantiteitsbeheer van het Utrechtse deel wordt verzorgd door directie Utrecht van Rijkswaterstaat. De provincie Utrecht is waterkwaliteitsbeheerder voor dat deel van de Vecht, evenals voor alle andere regionale oppervlaktewateren in die provincie. De stadswateren van Utrecht zijn (nog) niet in waterschapsverband ingedeeld. De gemeente voert hier het vaarweg- en kwantiteitsbeheer. De Kromme Rijn en de daarin uitstromende wateren worden beheerd door het waterschap Kromme Rijn.

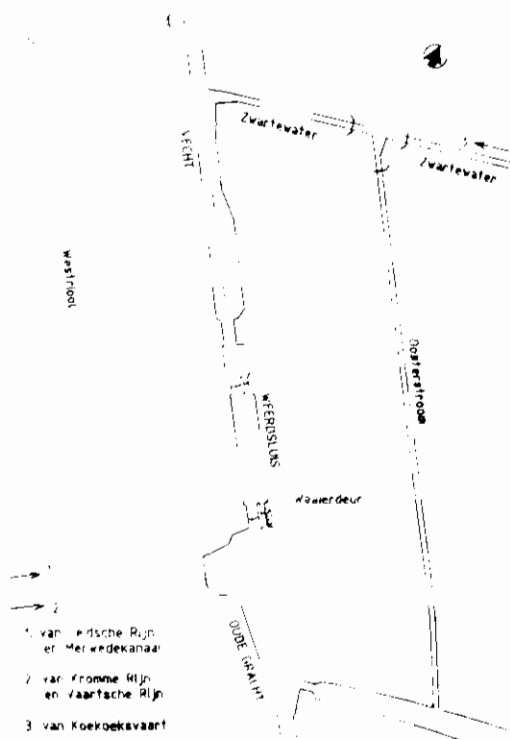
5.1.2 De waterkwantiteit

In het noordelijk deel van de Vecht wordt met name in de zomer water ingelaten vanuit het IJmeer. Dat water voorziet in de waterbehoefte van de omliggende gebieden. Het overschot komt via de Muidertrekvaart, het Smalweesp en de sluis bij Nigtevecht in het ARK terecht. Het zuidelijk deel van de Vecht, dat via de Vechtsluis bij Maarssen, de Danne in Breukelen, de Nieuwe Wetering in Nieuwersluis en de sluis bij Nigtevecht in open verbinding met het ARK staat, wordt gevoed vanuit de stadsboezem van Utrecht (zie figuur 5.1). Dat water is van oorsprong Rijnwater. Ongeveer de helft wordt via een inlaatwerk bij Wijk bij Duurstede en de Kromme Rijn aangevoerd. Het Merwedekanaal, dat met een sifon onder het ARK wordt geleid, verzorgt de aanvoer vanuit Nieuwegein (voorheen Vreeswijk).



Figuur 5.1 Het stroomgebied van de Kromme Rijn en de Utrechtse Vecht

Het inlaatwerk aldaar wordt beheerd door de gemeente Utrecht. Niet al het water, dat bij Nieuwegein wordt ingelaten, bereikt die stad. Via de Doorslag gaat een aanzienlijk deel naar de Hollandsche IJssel (zie figuur 5.1). Het inlaten vanuit de Lek gebeurt zowel in Wijk bij Duurstede als in Nieuwegein onder vrij verval. In droge perioden kan de waterinlaat stagneren door lage waterstanden op de Lek. Daarnaast is met name de inlaat bij Vreeswijk afhankelijk van de getijbeweging op de Lek: er kan alleen bij hoogwater worden ingelaten. In situaties met onvoldoende wateraanvoer kan water uit het ARK worden opgepompt. Er is een rijksgemaal met een capaciteit van 12 m³/s dat op het Merwedekanaal uitslaat en een gemaal met een capaciteit van ruim 3 m³/s dat via de Caspergouwse Wetering op de Kromme Rijn loost (zie figuur 5.1).



Figuur 5.2 Het Weerdsluiscapex in Utrecht

Het Weersluiscomplex aan de noordzijde van centrum van Utrecht vormt de bron van de Vecht. Het peilverschil over dit complex bedraagt zo'n 80 cm. Naast een schutsluis bestaat dit complex uit twee omlopen: een open watergang (Oosterstroom, Koekoeksvaart) en een omloopriool (Westriool). Een en ander is weergegeven in figuur 5.2. Het debiet van beide omlopen kan met stuw en een afsluiter worden geregeld. Ook kan er worden gespuid via de schutkolk. In het bovenhoofd is naast de puntdeuren een waaierdeur aanwezig. Spuien tijdens schutbedrijf is echter niet mogelijk, omdat de scheepvaart (voornamelijk pleziervaart) daar te veel hinder van ondervindt. Dit leidt tot een voor de zuidelijke Vecht karakteristiek debietsverloop over een etmaal: overdag een laag debiet van ongeveer 2 m³/s en 's nachts een hoog debiet van 8 à 9 m³/s.

5.1.3 De waterkwaliteit

5.1.3.1 Algemeen

De waterkwaliteit van de Utrechtse Vecht laat nog te wensen over. Zo zijn de gehalten aan nutriënten te hoog. Dat leidt in de Vecht zelf niet zo zeer tot problemen vanwege de korte verblijftijd, maar in gebieden waar Vechtwater wordt ingelaten loopt het ecologisch evenwicht en daarmee belangrijke natuurwaarden het gevaar te worden verstoord. Voor wat betreft de microverontreinigingen geeft de Vecht een zelfde beeld als de Rijn: de concentraties van de meeste van deze stoffen in de waterfase nemen geleidelijk af. De waterbodem van de Vecht is in het verleden echter al zodanig opgeladen, dat vrijwel overal de toetsingswaarde en op veel plaatsen de signaleringswaarde voor de waterbodem wordt overschreden. Een veel positiever beeld is te schetsen ten aanzien van de zuurstofhuishouding. Dankzij fikse inspanningen in de afgelopen 20 jaar, zoals de aanleg van riolering en de bouw van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), is de zuurstofhuishouding aanzienlijk verbeterd. Tegen het eind van de zestiger jaren was de Vecht nog een stinkende rivier, waar geen vis meer in voorkwam. Nu is er weer een behoorlijke visstand (Oosterbroek, 1990) en komen vissterftes de laatste jaren slechts bij hoge uitzondering voor. Door verdergaande maatregelen van de provincie en de gemeente zal de situatie verder verbeteren. Ook ten aanzien van de nutriënten en de microverontreiniging zal vooruitgang worden geboekt als gevolg van de uit het Rijn Actie Plan en Noordzee Actie Plan voortvloeiende maatregelen.

5.1.3.2 De zuurstofhuishouding

De zuurstofhuishouding van de zuidelijke Vecht tot Maarssen wordt voornamelijk bepaald door de volgende factoren (zie ook figuur 5.1):

- de kwaliteit van het ingelaten Rijnwater;
- de lozingen van een vijftal Utrechtse RWZI's op de Kromme Rijn:
 - . Doorn (28.000 i.e.);
 - . Driebergen (48.000 i.e.);
 - . Bunnik (32.000 i.e.);
 - . Zeist (75.000 i.e.);
 - . De Bilt (65.000 i.e.);
- overstorten van de rioolstelsels in het stroomgebied van de Kromme Rijn;
- overstorten van het rioolstelsel in de stad Utrecht bovenstrooms van de Weerdsuis;
- RWZI Utrecht (400.000 i.e.);
- circa 15 overstorten van de stad Utrecht direct op de Vecht;

Van de genoemde vervuilingbronnen dragen de eerste vier gedachtenstreepjes bij aan een minder goede aanvangskwaliteit bij de Weerdsuis. De belangrijkste bron volgt echter kort daarna: de RWZI Utrecht die op 1300 m van de Weerdsuis loost. In de huidige situatie kan onder ongunstige omstandigheden het effluentdebiet van deze zuivering even groot of zelfs groter zijn dan het debiet in de Vecht waarmee het wordt gemengd. Bij hevige regenval komen daar de overstorten nog bij.

Daarnaast heeft het karakteristieke debietsverloop een belangrijke invloed op de zuurstofhuishouding van de zuidelijke Vecht. Uit modelonderzoek is gebleken dat het dag-nacht ritme van het zuurstofgehalte, zoals dat bij Oud-Zuilen wordt gemeten, vrijwel geheel is toe te schrijven aan het debietsverloop. De massa water, die overdag langs het lozingspunt van de RWZI Utrecht stroomt, krijgt hogere concentraties aan zuurstofverbruikende stoffen als gevolg van het dan heersende, lage debiet.

In de huidige situatie kunnen zich nog omstandigheden voordoen, waarbij het zuurstofgehal-

te daalt tot waarden van minder dan 2 mg/l. Een hoge watertemperatuur en weinig lichtinstraling zijn daarbij de randvoorwaarden. Als daaraan wordt voldaan, kunnen lage zuurstofgehalten optreden door lage debieten op de Vecht en/of door een regenbui met hoge intensiteit boven de stad Utrecht. In het eerste geval is er sprake van lage rivierstanden op de Lek. Dergelijke omstandigheden treden niet van de één op de andere dag op, maar zullen geleidelijk ontstaan en langere tijd duren. Anders is dat in het tweede geval. Tijdens en kort na een zomerse onweersbui treedt een kortstondige piekbelasting op met zuurstofverbruikende stoffen uit overstorten en de RWZI Utrecht. Dat leidt tot lage zuurstofgehalten, maar er treedt, mits er voldoende water voor handen is, spoedig herstel op.

5.2 De regeling van het zuurstofgehalte

5.2.1 De opbouw van de regeling

De regeling van het zuurstofgehalte bestaat eigenlijk sinds 1983. In dat jaar is het hart van de regeling geïnstalleerd: het meetstation in Oud-Zuilen, op ongeveer 4700 m van de Weerdsluis (zie figuur 5.1). De lokatiekeuze werd gemaakt op basis van het vermoeden, dat het minimum zuurstofgehalte ongeveer op deze afstand van de RWZI Utrecht zou liggen. Ook de aanwezigheid van openbare nutsvoorzieningen in het brugwachtershuisje van de D.M. Plompbrug heeft bij de lokatiekeuze een rol gespeeld. Er vindt daar continu-meting van de temperatuur en het zuurstofgehalte van het Vechtwater plaats. Het oppervlaktewater wordt met behulp van een pomp naar een klein meethuisje gepompt, waar het via een PVC-buizenstelsel langs de meetcellen wordt geleid. Van het begin af aan was er een alarmeringssysteem aanwezig. Bij een zuurstofgehalte dat onder een in te stellen waarde was gedaald, ging aan de buitenkant van het meethuisje een rode lamp branden. De brugwachter van de Plompbrug hield dat in de gaten en nam in geval van een brandende lamp contact op met een medewerker van bureau Oppervlaktewater van de provincie Utrecht. Gedurende de eerste 5 jaar werden de meetwaarden op een papierstrook geprint, hetgeen erg lastig was voor de verwerking van die gegevens. Sinds 1988 is de dataregistratie en de alarmering geautomatiseerd. Een datalogger verzorgt de opslag van de gegevens. Elke tien minuten wordt er een waarde voor de temperatuur en het zuurstofgehalte opgeslagen. Deze is met behulp van een PC en een modem via een telefoonverbinding uit te lezen. Daalt nu het

zuurstofgehalte onder de ingestelde waarde (setpoint: 2 mg/l), dan zoekt het substation via dezelfde telefoonlijn automatisch contact met het hoofdstation dat op het provinciekantoor staat. Daar gaat vervolgens een alarm over. Het systeem alarmeert ook als de pomp te weinig opbrengst heeft ten gevolge van vervuiling of een defect en waarschuwt als de stroomvoorziening uitvalt. In dat laatste geval wordt gebruik gemaakt van een ingebouwde noodvoeding. Het meetstation wordt eenmaal per week bezocht door een analist om te controleren of de meetinstrumenten nog de juiste waarden aangeven. In het geval van afwijkingen worden de elektrodes gereinigd en zo nodig opnieuw gekalibreerd. Met name in het najaar is het wekelijks reinigen van de pomp noodzakelijk, vanwege vermindering van de opbrengst als gevolg van vooral afgevallen bladeren.

Om het zuurstofgehalte te kunnen sturen is een regelvariabele nodig met voldoende regelmacht, dat wil zeggen dat het manipuleren met die grootte ook daadwerkelijk het gewenste effect heeft. Voor 1986 was uit ervaring al gebleken dat het debiet van de Vecht een behoorlijke invloed had op het zuurstofgehalte. De modelstudies, die in 1985 en 1986 zijn uitgevoerd, bevestigden dit. Uit deze studies kwam overigens ook naar voren dat Oud-Zuilen geen slechte keuze was geweest om een meetstation te plaatsen; het minimum treedt volgens die modellen inderdaad rond die lokatie op. Ter illustratie volgen hier enkele uitkomsten van modelberekeningen. Het uitgangspunt is daarbij een zomerse situatie met een constant Vechtdebiet over een etmaal van slechts 1 m³/s als gevolg van een te geringe wateraanvoer door lage waterstanden op de Lek. Onder dergelijke omstandigheden zal het zuurstofgehalte bij Oud-Zuilen waarschijnlijk tot minder dan 2 mg/l dalen. Een verdubbeling van het debiet leidt tot een toename van het zuurstofgehalte met ruim 1,5 mg/l. Herstel van de normale situatie met een nachtdebiet van zo'n 8,5 m³/s heeft ten opzichte van de uitgangssituatie een stijging met bijna 2,5 mg/l tot gevolg. Het beste resultaat wordt echter bereikt door het instellen van een over het etmaal gelijk verdeeld debiet. Bij 4 m³/s constant over een etmaal wordt ten opzichte van de uitgangssituatie een winst geboekt van bijna 3 mg/l. Deze cijfers zijn samengevat in tabel 5.1. Uit deze tabel blijkt dat het effect van debietsverhoging in gelijke stappen afneemt naarmate het debiet hoger is. Met andere woorden de toename van het zuurstofgehalte bij een stijging van het debiet van 2 naar 4 m³/s is veel groter dan bij een debietsverhoging van 4 naar 6 m³/s. Daarom moet voor de bepaling van de regelmacht van de stuurvariabele worden uitgegaan van een situatie,

Tabel 5.1 De toename van het zuurstofgehalte als gevolg van een hoger Vechtdebiet, ofwel de regelmacht van het Vechtdebiet

Vechtdebiet	toename van het zuurstofgehalte bij Oud-zuilen	
[m³/S]		[mg/l]
uitgangssituatie:		
constant: 1		
constant: 2	ruim	1,5
constant: 4	bijna	3
constant: 6	ruim	3
normaal: dag: 2 nacht: 8,5	ruim	2

waarin de regeling in werking wordt gezet. De regelmacht is in elk geval voldoende groot om vissterfte te voorkomen. In de huidige situatie blijkt de regeling dan ook tot herstel te leiden, waarbij een minimum zuurstofgehalte van ongeveer 4 mg/l wordt bereikt. Door nog uit te voeren, structurele maatregelen zal dat verder toenemen en zal het aantal malen dat de regeling in werking treedt, afnemen.

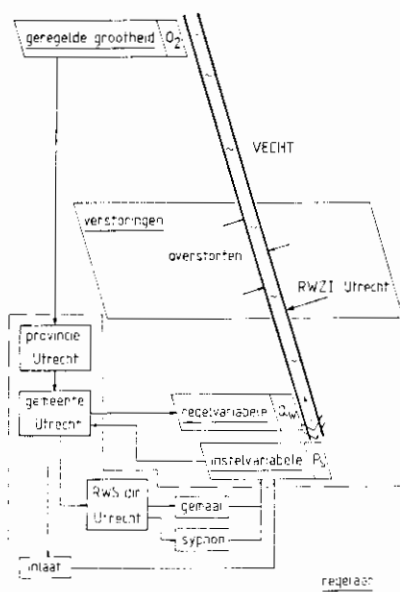
Bovenstaande debietsverhogingen zijn te bereiken door meer water via het Weerdsluisc-complex naar de Vecht te spuien. Dat is echter alleen mogelijk als er voldoende wateraanvoer is, omdat het peil in de stadswateren niet te veel mag dalen, vanwege de in die wateren afgemeerde woonboten en om bouwkundige redenen. In het geval dat de waterstanden op de Lek te laag zijn om onder vrij verval voldoende water aan te voeren, hetgeen in de meeste gevallen juist de oorzaak is van de problemen, kan gebruik worden gemaakt van het rijksgemaal aan de oostelijke ARK-oever. Daarmee wordt water vanuit het ARK in het Merwedekanaal gepompt. Er zijn twee vijzels met elk een capaciteit van 6 m³/s. Een deel van het opgepompte water stroomt echter via de sifon onder het ARK naar de Hollandsche IJssel. In de meest nijpende situaties kan dat lek eventueel gesloten worden om al het water te benutten voor doorspoeling van de Vecht. Een complicerende factor daarbij is, dat Rijkswaterstaat zo lang mogelijk een debiet van minimaal 10 m³/s op het ARK handhaaft in

verband met de koelwaterontrekking van de elektriciteitscentrale van de PUEM in Utrecht.

De regelaar bestaat verder uit minimaal een vijftal ambtenaren van drie overheidsinstanties, die met de beschikbare hardware (Weerdsloop, rijksgemaal en sifon) manipuleren om de instelvariabele (het stadspeil P_s) en de regelvariabele (het Vechtdebiet Q_w) de gewenste waarde te geven (zie figuur 5.1).

5.2.2 De werking van de regeling

Zoals hierboven al is gesteld, vormt het meetstation in Oud-Zuilen het hart van de regeling.



Figuur 5.3 Een schematische weergave van de regeling van het zuurstofgehalte van de Utrechtse Vecht

Indien daar een in te stellen grenswaarde voor het zuurstofgehalte (momenteel 2 mg/l) wordt onderschreden, leidt dat tot alarmering van een provinciaal medewerker van het bureau Oppervlaktewater. Ging dat vroeger via een rode lamp op het meethuisje, gevolgd door een telefoontje van de brugwachter, tegenwoordig is dat een volautomatisch alarmeringssysteem. De provinciaal ambtenaar neemt vervolgens contact op met de dienst Openbare Werken,

afdeling Riolering en Waterhuishouding van de gemeente Utrecht. Die afdeling heeft naast het rioolbeheer het kwantiteitsbeheer van de oppervlaktewateren in de stad als taak. Daaronder valt eveneens het beheer van het inlaatwerk bij Nieuwegein. De gemeentelijk ambtenaar waarschuwt de gemeentelijke Havendienst, in de meeste gevallen direct in de persoon van de sluiswachter van de Weerdsluis. Ook wordt contact opgenomen met de directie Utrecht van Rijkswaterstaat om te melden, dat er meer water naar de Vecht gespuid zal/moet worden. In overleg wordt beoordeeld in hoeverre er behoefte is aan het inschakelen van het rijksgemaal en eventueel het sluiten van de sifon. Met behulp van het telemetrie-systeem houdt de provincie de waterkwaliteit van de Vecht in de gaten. Zodra een bevredigend verloop van het zuurstofgehalte is bereikt wordt via dezelfde communicatielijnen, voor zover de omstandigheden ten aanzien van de wateraanvoer het toelaten, de normale situatie hersteld. De periode met kunstmatige wateraanvoer kan in zeer droge tijden oplopen tot 3 of 4 weken. In theorie is de toegepaste regeling van het zuurstofgehalte van het type feedback-ward. In de praktijk wordt echter onder specifieke omstandigheden al gereageerd op de weersvoorspelling in plaats van op het gemeten zuurstofgehalte in de Vecht. De regeling krijgt daarmee een feedforward karakter. Omstandigheden waaronder dit gebeurt, doen zich bijvoorbeeld voor als na een droge, warme periode onweersbuien worden verwacht. Op dat moment worden maatregelen genomen om door een verhoogd Vechtdebiet lage zuurstofgehalten te voorkomen. Of die maatregelen echt noodzakelijk waren is achteraf moeilijk na te gaan. In de huidige situatie wordt er een keer of 5 per jaar, steeds in de zomer, gebruik gemaakt van de regeling.

De regeling kenmerkt zich, doordat het een discontinu proces is. Er wordt slechts actie ondernomen als het setpoint wordt onderschreden. Bij veel regelingen in het kwantiteitsbeheer, bijvoorbeeld een peilregeling, zal worden gereageerd, zodra er teveel wordt afgeweken van een te handhaven waarde, dus zowel bij onder- als bij overschrijding. Afhankelijk van de grootte van de nog acceptabele afwijking zal een dergelijke regeling een meer of minder continu karakter krijgen. Automatisering wordt dan onvermijdelijk.

5.2.3 Alternatieve regelingen

De hierboven beschreven regeling van het zuurstofgehalte kent een aantal nadelen. Zo zal in

de meeste gevallen een eigenlijk al te laag zuurstofgehalte optreden, voordat de maatregelen effect gaan sorteren. Dit probleem is inherent aan het type van de regeling: feedbackward. Verder loopt de regeling over een groot aantal menselijke schijven. Alleen het meetstation en de alarmering zijn geautomatiseerd. Daardoor kan een regelactie stagneren als één van de schakels in het communicatienetwerk onbereikbaar is en leidt een alarm, dat buiten kantooruren optreedt, niet direct tot actie. Deze knelpunten kunnen worden opgeheven door verfijning van de regeling. Hieronder volgen enkele mogelijkheden.

Een verbetering van de huidige regeling kan worden verkregen door het verhogen van het setpoint naar bijvoorbeeld 3 of 4 mg/l of het aanbrengen van meer dan één setpoint. In het laatste geval zou aan elk setpoint een bepaalde aanpassing van het Vechtdebiet kunnen worden gekoppeld. Een dergelijke verbetering van de regeling zal leiden tot minder lage zuurstofgehalten, omdat eerder gereageerd wordt. Er zal echter veel vaker dan nu het geval is, aanspraak worden gemaakt op de regeling, hetgeen vanwege het aantal mensen dat daarbij moet worden ingezet minder aantrekkelijk is. Overigens zal de winst beperkt zijn als buiten kantooruren niet op alarmen gereageerd wordt. Dat laatste kan natuurlijk ook onderdeel uitmaken van de verbetering, maar stuit eveneens op het bezwaar van de vereiste personele inzet.

Een echte verfijning van de regeling is pas goed mogelijk als meer onderdelen worden geautomatiseerd. Daarbij valt te denken aan automatisering van het Weerdsuiscomplex, liefst in combinatie met het rijksgemaal, de klep in de sifon en het inlaatwerk bij Nieuwegein. Het spuidebiet zou dan in eerste instantie kunnen worden afgestemd op het beheer van het stadspeil. Om echter een Vechtdebiet te kunnen realiseren, dat afwijkt van het voor dat peilbeheer benodigde debiet, is koppeling met het inlaatwerk in Nieuwegein, het rijksgemaal en de sifon noodzakelijk. Een bijbehorend regelalgoritme zal dan een aanzienlijke hoeveelheid ingangsvariabelen nodig hebben om tot het gewenste Vechtdebiet in combinatie met een optimaal beheer te komen. Tot die input behoren naast het stadspeil zaken als het peil op de Lek en de Hollandsche IJssel, de stand van de schuif in de sifon, het peil en debiet op het ARK en het debiet van de Kromme Rijn in de buurt van Utrecht.

Indien het bovenstaande wordt gerealiseerd, zijn er mogelijkheden om van de regeling een

volwaardige feedforward regeling te maken. Als signalerende grootheid wordt dan niet het zuurstofgehalte van de Vecht gebruikt, maar bijvoorbeeld het peil op één of meer strategische lokaties in het rioolstelsel van de stad Utrecht. Met het rioolpeil als signalerende grootheid is niet alleen dat peil in absolute zin van belang, maar ook de snelheid waarmee het stijgt. Dan wordt ook de intensiteit van een regenbui en daarmee de kans op in werking treden van riooloverstorten, meegenomen. Nog beter is het, als aan de hand van het verloop van de rioolpeilen met behulp van een simulatiemodel een schatting wordt gemaakt van de vuiluitwerp van de verschillende overstorten en de RWZI Utrecht. Daarmee wordt namelijk de mogelijkheid geschapen om in de regelaar een voorspellingsmodel voor de zuurstofhuishouding van de Vecht in te bouwen. Als gebruik wordt gemaakt van een goed gekijkt waterkwaliteitsmodel, dan is het mogelijk om de regeling zodanig te optimaliseren, dat er geen water verspild wordt. Er wordt dan vooraf met dat model berekend hoeveel extra water via het Weerdsluiscomplex op de Vecht moet worden gebracht, om te voorkomen dat het zuurstofgehalte onder een gewenst niveau daalt. Daarvoor zijn naast de geschatte vuiluitwerp van het rioolstelsel en de RWZI Utrecht gegevens nodig van het zuurstofgehalte en andere waterkwaliteitsparameters in de Vecht en in de stadswateren. De uitkomst van deze berekeningen, een gewenst Vechtdebiet, kan vervolgens als input dienen voor het hierboven omschreven regelalgoritme voor het peilbeheer in de stadswateren en het Vechtdebiet.

Het moge duidelijk zijn, dat optimalisering van de regeling grote investeringen vraagt. Omdat het doen van een beroep op de regeling in de toekomst naar verwachting alleen maar zal afnemen, zijn dergelijke investeringen vooralsnog niet te verantwoorden.

5.3 Operationeel beheren of saneren

De provincie Utrecht streeft voor de Vecht onder andere naar de hier relevante functie water voor karperachtigen. Deze functie stelt met name voor wat betreft de zuurstofhuishouding zwaardere eisen dan de algemene milieukwaliteit. Om structureel aan de bijbehorende normen te kunnen voldoen, wordt in de eerste plaats een brongerichte aanpak voorgestaan. Op basis van modelstudies wordt verwacht dat een dergelijke aanpak ook tot succes zal leiden. Diverse saneringsmaatregelen zijn, worden of zullen worden uitgevoerd om de

doelstellingen te halen. In de eerste plaats wordt er fors geïnvesteerd in de RWZI Utrecht. In 1987 is een uitbreiding van de nabezinkcapaciteit met een factor 2,5 gereed gekomen. Dat was nodig om in RWA-situaties de maximaal aangevoerde hoeveelheid water (9000 m³/h) te kunnen verwerken. Voorheen werd ongeveer één derde van die 9000 m³ vanaf de voorbezinking direct naar de Vecht gevoerd om slibuitspoeling uit de nabezinktanks te voorkomen. Op het ogenblik is een ingrijpende verbouwing van de hele installatie gaande. Daarbij wordt, met uitzondering van de nabezinking en twee beluchtingstanks, de hele installatie opnieuw opgebouwd. Het doel is tweeledig: verhoging van het zuiveringsrendement (één van de effluent-eisen: Kjeldahl-stikstof < 3 mgN/l) en vergroting van de hydraulische capaciteit (van 9000 m³/h naar 15000 m³/h). Dat laatste betekent een grotere pompovercapaciteit voor het rioolstelsel van Utrecht, waardoor de belasting van het oppervlaktewater via riooloverstorten zal afnemen. De belasting vanuit het rioolstelsel zal echter veel duidelijker afnemen door maatregelen, die voor de komende decennia door de gemeente gepland zijn. Er is al vooruitgang geboekt door het aansluiten van bebouwing in het oude centrum van de stad. Ook het besturingssysteem van de rioolgemaal draagt al een steentje bij. Het meeste effect wordt echter verwacht van de vergroting van de berging van het stelsel door het aanbrengen van grote bergriolen en de toepassing van randvoorzieningen, zoals bergbezinkbassins bij de overstorten. De gefaseerde realisatie van deze maatregelen is al van start gegaan.

Naast deze verontreinigingsbronnen, die direct of vrijwel direct op de Vecht lozen, speelt de kwaliteit van met name het door de Kromme Rijn aangevoerde water een rol. In 1992 wordt er voor dat stroomgebied een onderzoek ingesteld naar de bijdrage van de verschillende verontreinigingsbronnen. Doel van dat onderzoek is het aangeven van maatregelen, waarmee de doelstellingen gehaald of zo dicht mogelijk benaderd kunnen worden. Uitvoering van die maatregelen zal ook een positief effect hebben op de waterkwaliteit van de Vecht. De RWZI's van Doorn en Driebergen zijn in elk geval aan een opknappbeurt toe.

Als gevolg van het gereed komen van onderdelen van de hierboven genoemde saneringsmaatregelen zal er in de komende jaren steeds minder aanspraak worden gemaakt op de regeling, die het zuurstofgehalte behoedt voor uitschieters naar beneden. Dit zal versterkt worden, doordat uit recent onderzoek is gebleken, dat er overdag permanent een hoger

debiet op de Vecht is te realiseren. Via de omloopkanalen is een debiet van ruim 4 m³/s haalbaar, zonder dat de pleziervaart daar hinder van ondervindt. Het resultaat is een gelijkmatiger verdeling van het gespuide water over een etmaal. Als daarnaast met de diverse waterbeheerders afspraken kunnen worden gemaakt over het zo goed mogelijk garanderen van voldoende wateraanvoer, dan wordt de regeling in zijn huidige vorm waarschijnlijk overbodig.

Over 10 a 15 jaar zullen de genoemde saneringsmaatregelen grotendeels gerealiseerd zijn. De doelstellingen voor de Vecht worden dan zeer waarschijnlijk gehaald. Sanering van verontreinigingsbronnen heeft dan steeds centraal gestaan. Maatregelen in de sfeer van symptoombestrijding, zoals geforceerd doorspoelen, al dan niet in het kader van een regeling, dienen slechts om op korte termijn verbetering te verkrijgen. Structurele toepassing van dat soort maatregelen moet zoveel mogelijk beperkt blijven.

Literatuur

- Mameren, H.J. van, D. de Smit, 1986
Mededelingen van de Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, De zuurstofhuishouding van de Utrechtse Vecht
Technische Universiteit Delft, Delft
- Oosterbroek, F.M.J., 1990
Verslag van een onderzoek naar de visfauna van het Noord-Hollandse en Utrechtse deel van de Utrechtse Vecht
Katholieke Universiteit, Nijmegen
- Riel, ir. P.H. van, ir. J.C. Heins, ir. G. van Straten, 1986
Effect van voorgenomen saneringsalternatieven op de waterkwaliteit van het zuidelijk deel van de Utrechtse Vecht
Technische Hogeschool Twente, Enschede

- Rooy, drs P.T.J.C. van, et al., 1989
Probleemverkenning Restauratieplan Vecht
DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV, Amersfoort

- Uffelen, E.J.F. van, 1987
Effect van korte termijn regeling op de waterkwaliteit van de Utrechtse Vecht
Universiteit Twente, Enschede

6 BESTURINGSSYSTEEM VOOR HET RIOOLSTELSEL VAN UTRECHT

J.C. van Oosten

6.1 Ontstaan en ontwikkeling Utrechtse rioolstelsel

6.1.1 Historische ontwikkeling

Uit historische documenten is bekend, dat reeds in de 14e en 15e eeuw in de toenmalige stad Utrecht gemetselde riolen bestonden. Voornamelijk nabij de diverse kloostergemeenschappen. Deze riolen, die uitmondden in de grachten en rivierarmen, dienden voornamelijk voor de afvoer van overtollig regenwater. Restanten van oude gemetselde riolen worden nu nog als historisch monument in stand gehouden. In de loop der eeuwen groeiden deze plaatselijke riolen uit tot kleine rioolstelsels, echter nog steeds voornamelijk bedoeld voor regenwaterafvoer. Eind 19e eeuw, begin 20e eeuw werd begonnen met de aanleg van waterleidingsystemen. De systematische distributie van leidingwater maakte ook een systematische afvoer van gebruikt water (afvalwater) noodzakelijk. Sinds die tijd werd bij straataanleg ook steeds een straatriool aangebracht. De riolen werden gekoppeld tot kleine plaatselijke rioolstelsels die elk rechtstreeks in de aanwezige watergangen en grachten uitmondden. Menselijke faecaliën werden toen nog verzameld in beerputten of beertonnen. De uitvinding van het watercloset maakte het mogelijk water te gebruiken als transportmedium om menselijke afvalstoffen op de riolering af te voeren. Sindsdien werd de aanleg van beerputten verboden. Daarmede kwam wel een einde aan veel huiselijk ongemak, het probleem was echter niet opgelost maar verplaatst. De lozing van ongezuiverd afvalwater zowel van huishoudens als van de inmiddels sterk opkomende industrie leidde tot onhoudbare toestanden in de stadswateren. Het sterk vervuilde water dat een hevige stank verspreidde maakte de stadsgrachten tot open riolen. In de periode 1930-1940 werden plannen voorbe-

In dat hoofdrioolgemaal werd een controlekamer ingebouwd. Vanuit die controlekamer werden de pompen en schuiven van de zuiveringsinrichting op afstand bediend. Daar waren echter ook grote schakelpanelen aangebracht voor elk van de rioolgemalen in de stad. Het verloop van de waterniveaus in de rioolgemalen werd met peilschrijvers op grafiekenpapier zichtbaar gemaakt. Op basis daarvan en met behulp van ervaringsgegevens werden de rioolgemalen handmatig op afstand bediend. Deze wijze van besturing kan dus als een heuristische besturing worden aangeduid. Dit systeem van handmatige afstandsbesturing maakte een permanente bezetting van de controlekamer noodzakelijk zowel voor het zuiveringsproces als voor de bediening van de rioolgemalen. Uit de historische ontwikkeling van het rioolstelsel volgt, dat de oudere stadsdelen zijn voorzien van een gemengd rioolstelsel (d.w.z. afvalwater en regenwater worden in één buizennet verzameld). Sinds ongeveer 1960 werden stadsuitbreidingen (o.a. Rijnsweerd, Universiteitscentrum De Uithof) voorzien van een gescheiden rioolstelsel (d.w.z. afvalwater en regenwater worden in afzonderlijke rioolstelsels verzameld) en sinds 1970 wordt voor stadsuitbreidingen alleen nog maar het verbeterd gescheiden stelsel toegepast (d.w.z. een gescheiden stelsel met een bijzondere voorzieningen). De aanleg van het centraal rioolstelsel met rioolwaterzuiveringsinrichting had uiteraard een enorme verbetering van de waterkwaliteit in de stadswateren tot gevolg. Bij hevige regenval worden echter via de overstorten grote hoeveelheden ongezuiverd regenwater vermengd met rioolwater op het oppervlaktewater geloosd. Om daarop te kunnen inspelen werden een tiental maatgevende overstorten voorzien van peilmetingen. Deze gegevens werden eveneens via signaalkabels overgebracht naar de controlekamer van de RWZI en daar geregistreerd. Het bedienend personeel gebruikte deze informatie bij de besluitvorming over de schakeling van de rioolgemalen.

6.2 Automatisering besturing rioolgemalen

6.2.1 Aanleiding tot de automatisering

Als uitvloeisel van de Wet verontreiniging oppervlaktewateren is de RWZI in 1973 overgedragen aan de waterkwaliteitsbeheerder in casu de provincie Utrecht. Daarmee ging ook de gehele controlekamer over in provinciale handen. Vanaf dat moment werden de gemeentelijke rioolgemalen bediend door provinciaal personeel, waarvoor door de gemeente

Utrecht uiteraard richtlijnen werden gegeven, en waarvoor ook de kosten door de gemeentewerken gedragen. In 1983 maakte de provincie de wens kenbaar om de RWZI te automatiseren en de permanente bezetting van de controlekamer op te heffen. Tegelijkertijd groeide bij de gemeente de behoefte aan optimalisatie van de bergingsbenutting in het stelsel bij hevige regenval. De structuur van het rioolstelsel maakte het mogelijk de rioolgemalen zodanig te besturen dat een optimaal gebruik kon worden gemaakt van de beschikbare berging in het totale rioolstelsel. Daarmee kunnen de hoeveelheden overstortend rioolwater bij hevige regenval en dus de vervuiling van het oppervlaktewater worden beperkt.

6.2.2 Programma van eisen

Bij het ontwerp van het geautomatiseerde besturingssysteem moest aan een aantal eisen worden voldaan.

De belangrijkste eisen waren:

- een volledig onbemand systeem ter vervanging van de controlekamer RWZI;
- een sober systeem zonder grote investeringen c.q. ingrepen in de bestaande rioolgemalen;
- een zodanige besturing, dat de overstortfrequentie wordt beperkt door middel van een optimale benutting van de beschikbare berging in het rioolstelsel.

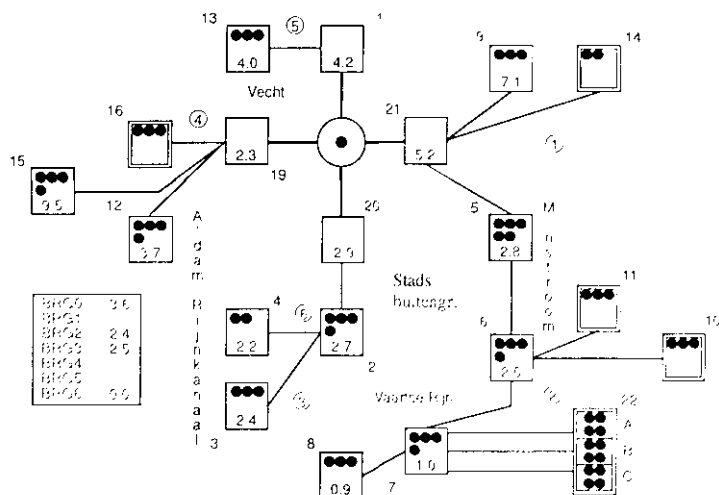
6.2.3 Besturingsprogramma

Op basis van deze eisen en met het bestaande stelsel als gegeven is een regeling en besturing ontworpen. Het totale rioolstelsel is geschematiseerd en ingedeeld in 5 afvoertakken waarin 11 rioolgemalen voorkomen die in de besturing zijn opgenomen.

Het bemalingsgebied van het hoofdrioolgemaal op de RWZI bestaat uit 4 kleinere bemalingsgebieden. Daarvan zijn wel de peilmetingen in de besturing opgenomen. Het gemaal zelf wordt niet aangestuurd omdat dit deel uitmaakt van de geautomatiseerde besturing van de RWZI. In het besturingsprogramma wordt onderscheid gemaakt tussen twee bedrijfstoestanden; de "droogweer"-situatie (DWA-bedrijf) en de "regen"-situatie (RWA-bedrijf).

In DWA-bedrijf wordt elk gemaal lokaal geregeld met behulp van een PLC. De keuze en

het aantal van de in te schakelen pompen is afhankelijk van het waterpeil in de zuigmondenkelder.



Figuur 6.3 Schema rioolstelsel

In RWA-bedrijf worden de rioolgemalen opgenomen in een centraal besturingssysteem. Daarbij wordt gebruik gemaakt van geheel andere parameters. Er wordt gestreefd naar het optimaal benutten van de nog beschikbare berging in het rioolstelsel. Deze berging wordt uitgedrukt in mm regen op het verharde oppervlak dat afvoert naar de riolering.

Dit vindt uitsluitend plaats voor de bemalingsgebieden met een gemengd rioolstelsel. In gebieden met een gescheiden of verbeterd gescheiden stelsel wordt, tijdens hevige regenval, de afvoer van vervuild afvalwater geblokkeerd.

Die gebieden zijn ontworpen op een tijdelijke (max. 24 uur) berging van het vuile afvalwater. Het verband tussen waterniveau en vullingsgraad is afhankelijk van de geometrie van het rioolstelsel. Per bemalingsgebied is dat vastgelegd in een niet lineaire functie. In elk bemalingsgebied wordt aan de hoge en aan de lage zijde van de verhanglijn het waterniveau gemeten met behulp van impuls-echo-meetapparatuur. Met de gemeten niveauwaarden en het

100%-punt van een bepaald gebied wordt de theoretische restberging voor dat gebied berekend, uitgedrukt in mm regen. Het 100%-punt wordt bepaald door het moment dat net nog geen overstorting op het oppervlaktewater plaats vindt. In gebieden waar de overstorten zijn voorzien van terugslagkleppen (de meest voorkomende situatie) is dat 100%-punt afhankelijk van de buitenwaterstand. Die peilen worden daarom eveneens met impuls-echometing gemeten en als variabelen in het besturingsprogramma ingevoerd. Met behulp van de berekende restbergingen in de diverse bemalingsgebieden wordt een gemiddelde restberging voor een bepaalde afvoertak berekend. Die gemiddelde waarde, die dus voortdurend varieert en continu wordt herberekend, geldt als streefwaarde voor de restberging in de bemalingsgebieden van één afvoertak.

De grootte van de afwijking tussen de gewenste waarde en de actuele waarde, bewerkt door de proportionele en integrerende werking van de regelaar, is bepalend voor de keuze van de in te schakelen pomp of het aantal in te schakelen pompen in de diverse gemalen van die afvoertak.

Op deze wijze wordt gestreefd naar een gelijke restberging (uitgedrukt in mm regen) voor de afzonderlijke gebieden in een bepaalde afvoertak, waardoor het moment van overstorten zo lang mogelijk wordt uitgesteld. Bij hevige regenval, waarbij de aanvoer van regenwater langdurig groter blijft dan de afvoercapaciteit van de rioolgemalen zal, in het ideale geval, de restberging in alle bemalingsgebieden van een bepaalde afvoertak gelijktijdig de waarde nul bereiken en zullen de overstorten gelijktijdig alle in werking komen. Het successievelijk leegpompen van de bemalingsgebieden wordt ingeleid door het hoofdrioolgemaal dat het rioolwater in de RWZI pompt. In dat bemalingsgebied treedt dan de eerste niveaudaling op. Uit de daardoor ontstane peilverschillen worden weer besturingssignalen gegenereerd.

Het besturingsproces wordt continu gevoed met actuele waarden die door de impuls-echometers worden gemeten. Elke 12 seconden worden alle meetwaarden geactualiseerd en alle besturingsvariabelen herberekend. Daarom kan dit systeem worden aangeduid als een "real-time-control"-besturingssysteem.

De overschakeling van DWA-bedrijf naar RWA-bedrijf en omgekeerd, is afhankelijk van

het waterpeil in het rioolstelsel. Als in één van de bemalingsgebieden van een bepaalde afvoertak het peil een bepaalde, vooraf ingestelde, vaste waarde overschrijdt gaat die gehele afvoertak over op RWA-bedrijf. Alle rioolgemalen van die tak worden dan centraal bestuurd. Als het peil in alle bemalingsgebieden weer onder de respectievelijke RWA-uitschakelpelen zijn gedaald, valt die gehele afvoertak weer terug in DWA-bedrijf. Alle gemalen worden dan weer lokaal geregeld met behulp van een PLC.

6.2.4 Beperkingen en randvoorwaarden

Het is niet altijd mogelijk de in het besturingsprogramma berekende gewenste pompcapaciteit in te zetten. Bijvoorbeeld door:

- storingen in een gemaal;
- maximale schakelfrequentie van de pompen;
- minimale "in-bedrijf-" en "uit-bedrijf"-tijden;
- beschikbaarheid of paraatheid van bepaalde pompen (bv. door onderhoudswerkzaamheden of door lokale handbediening etc.).

Met deze aspecten wordt in de regeling rekening gehouden. Zo mogelijk wordt een equivalente pomp ingeschakeld. Daarbij wordt rekening gehouden met factoren als: welke pomp staat het langste stil en welke is het langst in bedrijf etc. Bij lijnstoringen of storing in de telemetrie valt een gemaal terug in lokaal bedrijf.

6.2.5 Overige regelingen

Buiten de hiervoor genoemde DWA en RWA regelingen worden ook nog de volgende regelingen toegepast:

- centrale niveau-regeling
- centrale handbediening
- lokale handbediening

waarbij elke regeling steeds overheersend is over de eerdergenoemde regelingen.

Met behulp van de centrale niveauregeling kan op afstand, voor elk willekeurig bemalingsgebied, een bepaald gewenst waterpeil worden ingesteld. Het programma kiest de benodigde

pompcapaciteit om dit waterpeil zo goed mogelijk te benaderen. De gewenste waarden kunnen vanaf een operator terminal via een toetsenbord of met "muis"-bediening en beeldscherm worden ingesteld.

Bij centrale handbediening kan vanaf een operator-terminal elke willekeurige pomp worden in- of uitgeschakeld. De commandosignalen kunnen worden ingegeven door via pijlaanwijzing op een beeldscherm bepaalde velden te activeren. Het allesoverheersende bedienings-commando is de lokale handbediening waarbij in een bepaald rioolgemaal op het schakelpaneel één of meer pompen kunnen worden in- of uitgeschakeld b.v. ten behoeve van onderhoudswerkzaamheden.

6.3 Configuratie

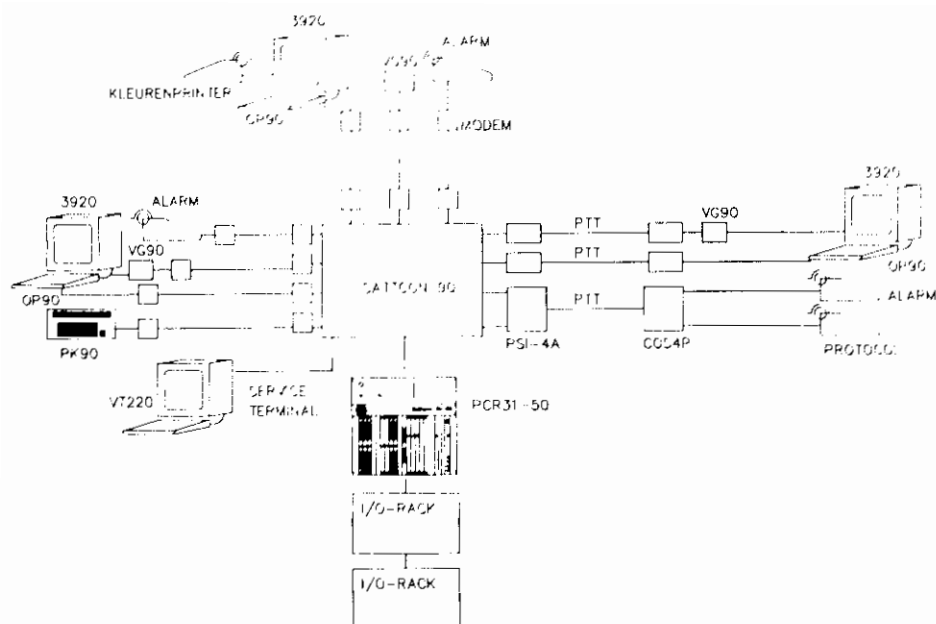
Voor dit geautomatiseerde besturingssysteem is toegepast een mini-computer PDP 11/73 met 2 MB geheugen, een Winchester harddisk van 71 MB en een tape streamer met 95 MB. Voor het besturingsprogramma is toegepast een PLC (Satteon 31-50) met een RAM-geheugen van 256 kB en een ROM programmeergeheugen van 512 kB (EPROM).

In de gerealiseerde configuratie zijn aan te sluiten:

- 208 digitale uitgangen;
- 320 digitale ingangen;
- 88 analoge ingangen.

Het systeem is voorzien van 3 werkstations bestaande uit kleurenbeeldscherm en toetsenbord. Deze werkstations bevinden zich op verschillende lokaties in de stad. Er zijn 4 printers aangesloten voor het presenteren van meldingen (alarmen en gebeurtenissen), protocollen en een kleurenprinter voor het kopiëren van beeldschermen.

Voor de overdracht van signalen is aanvankelijk gekozen voor een toonfrequent - telemetrie-systeem omdat de reeds bestaande afstandsbediening daarmee was uitgerust en er goede ervaringen mee waren opgedaan. Geleidelijk wordt thans overgeschakeld op digitale signaaloverdracht via gehuurde PTT-adapters, wegens de mogelijkheid daarmee meer signalen over te brengen.



Figuur 6.4 Configuratie

6.4 Software

De toegepaste software bestaat uit twee delen.

- 1 operating system RSX 11 M +, geleverd door de computerleverancier;
- 2 werkprogramma (Sattcon 90) geleverd door de leveranciers van het totale systeem.

Het operating system heeft tot taak de hardware te besturen (schijfbesturing, geheugeninde-
ling, uitvoeringstijd etc.). Het Sattcom 90-programma werkt onder dit operating system en
maakt veelvuldig gebruik van de ter beschikking staande functies. Het programmapakket
omvat o.a.:

- database behandeling;
- alarmafhandeling;
- creëren van kleurenbeeldschermen;
- communicatiemodule;
- rekenmodule;

- tijdmodule;
- protocollenmodule;
- historische-gegevensmodule.

Verder zijn er nog wat kleinere modules en testprogramma's die systeemtest en in-bedrijf-stellen vergemakkelijken. Gestructureerd programmeren met Fortran is eveneens mogelijk.

In de database wordt o.m. veel historische informatie opgeslagen. Via bepaalde protocol-procedures kan deze informatie op een printer worden gepresenteerd in de vorm van tabellen en overzichten. Informatie over het verloop van waterpeilen in gemalen of in het rioolstelsel kan ook worden gepresenteerd in grafiekvorm op het beeldscherm. De tijd kan daarbij naar keuze een bepaalde periode omvatten variërend van 8 uur tot één jaar. Om de sturings- en regelprocessen te kunnen volgen zijn diverse beeldschermen ontworpen, onder meer met een overzicht van de bemalingsgebieden, geschematiseerd rioolstelsel met de diverse afvoertakken, schema's van de geïnstalleerde pompen per gemaal, overzicht van regenoverstorten etc.

Alle besturingsprogramma's zijn opgenomen in de PLC. Daarin vindt tevens de omzetting plaats van analoge naar digitale meetwaarden. Bovendien worden daarin ook de inkomende digitale signalen en de digitale uitgaande signalen verwerkt.

Alle bedieningshandelingen vinden plaats in een gebruikersvriendelijke dialoog via toetsenbord, "muis" en beeldscherm. Het systeem is voorzien van een uitgebreide alarmeringsregeling. Bij het optreden van bepaalde urgente alarmen wordt met een automatische telefoonkieser eventueel via de semafoon de dienstdoende functionaris opgeroepen. Bij het terugbellen naar het systeem, wordt met een gesproken tekst de aard en de plaats van de opgetreden storing gemeld. Deze gestandaardiseerde meldingen zijn vooraf ingesproken en digitaal in het geheugen opgeslagen.

6.5 Uitvoering

De ombouw en aanpassing van de elektrische en elektronische apparatuur van de rioolgemalen en de apparatuur voor de signaaloverdracht tot in de klemmenkast van de computerruim-

te zijn geheel in eigen beheer uitgevoerd door de afdeling Installaties van de Dienst Openbare Werken. Deze afdeling heeft ook een uitvoerige beschrijving gemaakt van de benodigde hard- en software, waarna aan enkele potentiële leveranciers prijsopgave is gevraagd. De opdracht tot levering is in augustus 1987 verstrekt aan Sattcontrol B.V. te Etten-Leur. In april 1988 is het geheel gebruiksgereed opgeleverd. Sindsdien zijn enkele kleinere aanpassingen uitgevoerd aan apparatuur en aan het besturingsprogramma ter verbetering en uitbreiding. Het systeem functioneert thans naar wens en voldoet aan de daaraan gestelde verwachtingen.

7 AUTOMATISERING VAN HET PEILBEHEER IN DE FLEVOPOLDERS

H.J.G. Hartong

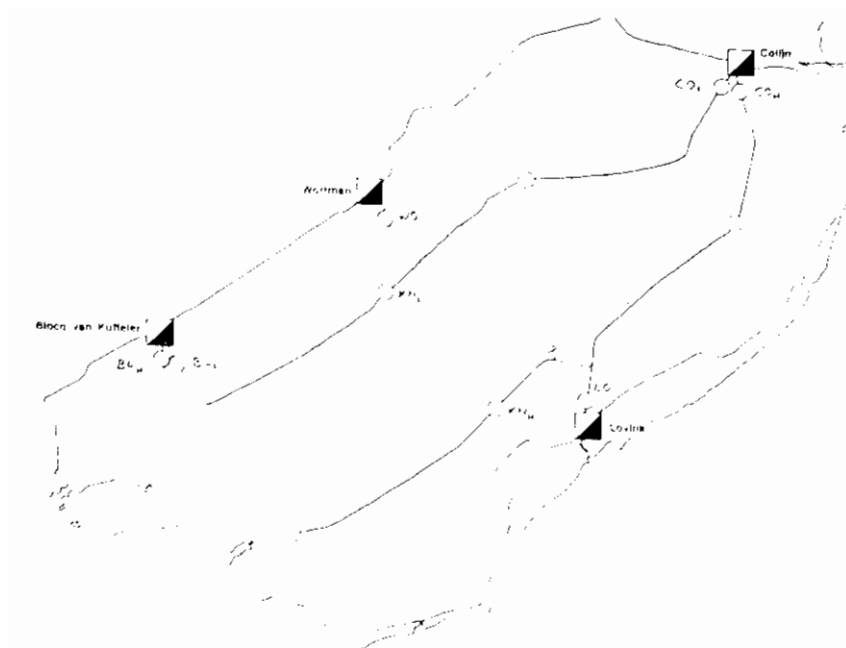
7.1 Inleiding

7.1.1 Gebiedsbeschrijving

De Flevopolders worden onderscheiden in Oostelijk en Zuidelijk Flevoland, een onderscheid dat stamt uit de historie van de aanleg van de beide polders, waarmee in 1950 een begin is gemaakt. Daarnaast bestaan de Flevopolders uit twee hydrologisch gescheiden gebieden: de hoge afdeling en de lage afdeling, met resp. de Hoge Vaart voor het verzamelen en afvoeren van overtollig water (zie fig. 7.1). De oppervlakte van de hoge afdeling bedraagt ca. 57.000 ha en van de lage afdeling ongeveer 40.000 ha. In de polders worden twee streefpeilen aangehouden te weten: NAP -5.20 m voor de hoge en NAP -6.20 m voor de lage afdeling. De polders zijn volledig omgeven door open water op een niveau van NAP +0.10 - +0.20 m, zodat door het grote peilverschil er een aanzienlijke kwel optreedt van ca. 400 mm per jaar. Het bergend vermogen in de polders is gering, slechts 1% van de totale oppervlakte draagt daartoe bij. Het gevolg is dat bij hevige neerslag relatief grote peil-stijgingen kunnen optreden, die in najaar en winter ongeveer 6 uur na de neerslaggebeurtenis merkbaar zijn in de hoofdvaarten.

7.1.2 Wijze van waterbeheersing

De Flevopolders worden bemalen door vier gemalen (zie fig. 7.1): de twee elektrische gemalen Colijn en Lovink en de twee dieselmalen de Blocq van Kuggeler en Wortman. Het gemaal Lovink bij Harderwijk heeft tevens de functie om het Veluwemeer door te



Figuur 7.1 Overzicht van het beheersgebied

spoelen. In totaal zijn er op de gemalen 13 pompen opgesteld met een gezamenlijke bemalingscapaciteit van $130,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie tabel 1). Dagelijks wordt gemiddeld 2 miljoen m^3 polderwater uitgemaal, hetgeen overeenkomt met 20% van de gezamenlijke bemalingscapaciteit. Tussen de hoge en de lage afdeling is voorts nog een afllaatwerk gesitueerd met een capaciteit van $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 7.1 Capaciteit van de gemalen

Gemaal	Aantal pompen	Afdeling	Gezamenlijke capaciteit (m^3/s)
Grijn (elektrisch)	2	Laag	16,7
	1	Hoog	9,2
Looank (elektrisch)	2	Laag	19,6
Wortman (diesel)	4	Laag	33,3
de Blaas van Kuffeler (diesel)	2	Laag	23,2
	2	Hoog	28,0
Totaal	13		130,2

De bemaling werd tot voor kort handbediend uitgevoerd. Onder normale omstandigheden waren de gemalen gedurende werkdagen bemand, maar bij groter waterbezwaar ook gedurende de weekeinden en 's nachts. De verantwoording voor de bemaling ligt steeds bij een van de gemalen: het dienstgemaal. Deze functie rouleert tussen de vier gemalen; de hoofdwerktuigkundige van het dienstgemaal bepaalt wanneer en met hoeveel pompen er moet worden gemalen. Hij doet dit op basis van peilmetingen op de gemalen, informatie over de historische en de te verwachten weersgesteldheid en een grote hoeveelheid ervaring. In het verleden bestond hiertoe regelmatig telefonisch contact tussen de diverse gemalen. Tevens werden op de gemalen iedere twee uur de pomp- en bemalingsgegevens op overzichtstaten verzameld voor verdere rapportage en analyse.

7.1.3 Aanleiding voor automatisering

Het waterbeheer van de Flevopolders is in 1987 overgedragen door Rijkswaterstaat aan de nieuwe waterbeheerder van de polders: het Heemraadschap Fleverwaard. Het streven van het heemraadschap is erop gericht het peilbeheer zo optimaal mogelijk te laten verlopen, d.w.z. een flexibel peilbeheer gericht op de verschillende gebruiksfuncties van land en water tegen zo gering mogelijke kosten en personele belasting. Bij het heemraadschap bestond, de indruk dat door middel van automatisering van de elektrische gemalen o.m. de volgende voordelen bereikt konden worden:

- geringere energiekosten t.g.v. het gebruik van relatief goedkope nachtstroom;
- minder peilvariaties en daardoor minder kosten van het onderhoud t.g.v. oeverbeschadigingen;
- geringere belasting van het personeel door het beperken van nacht- en weekend-diensten.

Bovenstaande voordelen zijn gebaseerd op het feit dat met de twee elektrische gemalen Colijn en Lovink de dagelijkse gemiddeld uit te malen hoeveelheid water (kosten)effectief kan worden gerealiseerd. Concrete aanleiding om de automatisering te starten is gelegen in de wens het gemaal Lovink zoveel mogelijk (ook 's nachts) in te zetten voor het doorspoelen van het Veluwemeer, waarvoor geen personeelscapaciteit beschikbaar was. Daarnaast dienden de elektrische gemalen gerenoveerd te worden.

7.2 Vooronderzoek

7.2.1 Doelstellingen en maatregelen

Op grond van een eerste indicatief vooronderzoek kon al snel worden vastgesteld dat op de kosten voor elektrische energie sterk kon worden bespaard door de bemaling meer in de nachturen te laten plaatsvinden. Derhalve werd besloten een meer uitgebreid vooronderzoek te starten, waarin een voorontwerp van het automatiseringssysteem diende te worden opgesteld en de technische en financiële haalbaarheid moest worden aangegeven. Tijdens de fase van probleemdefinitie zijn hiertoe de volgende doelstellingen en maatregelen geformuleerd:

- het volledig automatisch (onbemand en bewaakt) functioneren van de beide elektrische gemalen;
- het op afstand kunnen bedienen van de elektrische gemalen vanuit de vier gemalen en het hoofdkantoor te Lelystad;
- idem voor het aflatwerk;
- het verminderen van de energiekosten door het aangesloten vermogen per maand te optimaliseren, piekuren te vermijden en het gebruik van goedkopere nachstroom;
- het opzetten van een meetnet voor de waterpeilen en toekomstige waterkwaliteitsmetingen;
- het opzetten van een centraal verwerkingssysteem voor de meetwaarden en overige signaleringen teneinde historische analyses te kunnen uitvoeren over het functioneren van het waterbeheersingssysteem;
- het automatisch generen van de bemalingsrapporten en waterbalansen.

7.2.2 Bepaling besturingsconcept

De meest eenvoudige besturing voor de gemalen is een niveauregeling gebaseerd op lokale peilmetingen en schakelpeilen. Voor beide afdelingen geldt dat de gemiddelde waterstand in de vaarten niet hoger dan 7 cm boven het streefpeil en niet lager dan 15 cm beneden het streefpeil mag komen. Echter om een aantal redenen is uitsluitend een lokale peilmeting hiertoe niet toereikend:

- het waterpeil bij de gemalen fluctueert sterk t.g.v. externe invloeden zoals scheepvaart en schutsluizen;
- zuid-westenwind heeft, door de grote strijklengte over de vaarten, in korte tijd een grote invloed op het peil (50 cm peilverschil in 30 min. bij matige wind);
- hydrodynamische effecten van het pompbedrijf beïnvloeden het lokale peil voor het gemaal en het peil verder in de vaarten.

Derhalve dient per afdeling een representatief peil te worden vastgesteld (het zgn. RPP) dat overeenkomt met het polderpeil dat zou optreden wanneer bovengenoemde invloeden niet aanwezig zouden zijn. Om het RPP te kunnen berekenen is per afdeling een meetnet van peilmetingen gedacht (zie fig. 7.1). Het RPP wordt bepaald uit een gewogen gemiddelde van deze metingen en dient continu op een centraal punt beschikbaar te zijn voor automatische niveauregeling van de gemalen. Het in- en uitschakelen van de pompen gebeurt dan op basis van schakelpeilen die worden gerelateerd aan het RPP; voor de dag en de nacht-situatie bestaan verschillende schakelpunten ('s nachts lager dan overdag) teneinde meer met het nachttarief te malen. Tevens dienen op een centraal niveau de energiekosten bewaakt te worden, rekening houdend met de contracten van de stroomleverende bedrijven. Met name de kosten van het aangesloten vermogen (600 kW per pomp) kunnen worden geoptimaliseerd en piekverbruiken worden vermeden. Besturingstechnisch dienen de beide gemalen dan ook als een geheel te worden beschouwd, waarvan de bedrijfssituatie centraal wordt vastgesteld, maar decentraal geëffectueerd.

7.2.3 Onderzoek dynamische aspecten

Teneinde het bovenstaande besturingsconcept verder te kunnen uitwerken is een simulatie-model opgesteld met behulp van een spreadsheet. Met het model zijn de volgende onderzoeken gedaan:

- het bepalen van het minimaal benodigd aantal meetpunten en de lokaties daarvan per afdeling;
- het bepalen van de berekeningstechniek voor het maatgevende RPP en de invloed van meetinterval op het RPP;
- het vaststellen van de hydrodynamische effecten van het pompbedrijf en het meenemen

daarvan bij de berekening van het RPP uit de individuele metingen;

- het bepalen van een filteringstechniek voor het filteren van peilmetingen voor golfslag en scheepvaart/schuttingen;
- het vaststellen van de gebruiksmogelijkheid van dag- en nachtschakelpunten en de invloed daarvan op de peilvariaties.

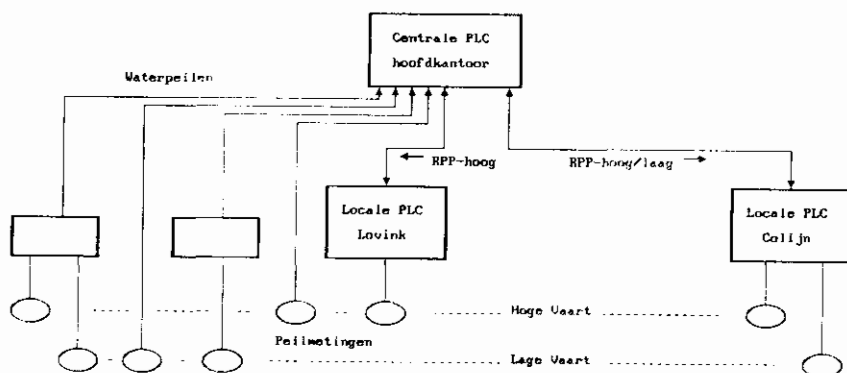
Voor het bovenstaande onderzoek was het noodzakelijk de beschikking te hebben over de werkelijke bemalingsgegevens (schrijvers en rapporten) van alle objecten gelijktijdig.

7.2.4 Opstellen besturingsstrategie

Op grond van de resultaten van de dynamische simulaties is het besturingsconcept verder ontwikkeld tot een besturingsstrategie, waarin ook het bedieningsconcept is geïntegreerd. De volgende niveaus zijn in de besturing geïmplementeerd:

- 1 automatische centrale niveausturing voor de gemalen;
- 2 centrale handbediening vanuit alle bedieningslokaties;
- 3 lokaal-automatische niveausturing van de gemalen bij communicatie-uitval met het centrale systeem (zolang het lokale peil niet teveel afwijkt van de laatste RPP-waarde);
- 4 lokale handbediening vanaf een bedieningspaneel (conform de oude wijze van bedrijfsvoering) bij (gedeeltelijke) systeemuitval;
- 5 prioriteitenschakeling voor de gemalen en keuzeschakeling voor de pompen uitgaande van een volledig gecombineerde werking van beide gemalen evenals automatische overname bij pompstoring.

De besturingsstrategie is in deze fase van voorontwerp weergegeven door principe-flow-schema's, die globaal de ontworpen strategie weergegeven. Tevens wordt op dit moment een prinsipeschets van de datacommunicatiestructuur opgesteld zowel voor de over-dracht van de meetsignalen (zie fig. 7.2) als voor de bediening. Hierbij is uitgegaan aan PLC's voor de diverse besturingsfuncties en meetlokaties en beeldschermbedieningssytemen voor de informatievoorziening.



Figuur 7.2 Principe van informatie-overdracht voor automatische niveauregeling

7.2.5 Kosten/baten-analyse

Een kosten-batenanalyse dient de besluitvorming t.a.v. de vervolg ontwerpwerkzaamheden te ondersteunen. Naast de kosten ten behoeve van de aanschaf en installatie van hard- en software dienen ook de jaarlijkse kosten met betrekking tot datatransmissie en systeem-onderhoud als relevante kostencomponenten te worden geraamd. Voorts dient bijzondere aandacht geschonken te worden aan de aanschaf en installatie van de benodigde meet-systemen alsmede de vervanging van bestaande technieken. Een kostenraming hiervoor wordt bemoeilijkt doordat een definitieve keuze voor de meettechniek in deze fase nog niet gemaakt kan worden. Daarnaast moet worden geïnventariseerd tot op welk niveau de bestaande elektrotechnische en mechanische installatiedelen worden vervangen en/of ingepast in het geautomatiseerde besturingssysteem. Een kostenraming kan in deze fase slechts indicatief zijn. De kosten die hiermee gemoeid zijn overtreffen overigens verre de kosten voor de computertechnische installaties. De baten die zich het eenvoudigst laten kwantificeren zijn de besparingen op de energiekosten. Verschillende factoren bepalen deze kosten: het verbruikte kWh, de brandstofvergoeding, het aangesloten vermogen (startgeld) en het aangesloten vermogen gedurende de piekuren. De grootste kostenpost werd gevormd door het aangesloten vermogen (40%), waar ook een grote besparing kon worden bereikt. De kosten van verbruikte kWh zijn overdag aanmerkelijk hoger dan 's nachts, echter bij

toeneming van het aantal draaiuren daalt dit verschil weer aanzienlijk. De brandstofvergoeding per verbruikte kWh is onafhankelijk van de dag- of nachstroom.

Niet kwantificeerbare baten zijn onder meer te vinden in:

- minder oeverbeschadiging door gelijkmatig peilverloop (deze baten kunnen zeer aanzienlijk zijn, maar zijn pas achteraf vast te stellen);
- betere kwaliteit van de informatievoorziening en minder handmatige administratie.

Voorts zij opgemerkt dat bij het onderhavige project besparing op personeelskosten geen uitgangspunt is geweest. De personele gevolgen van de automatisering liggen hoofdzakelijk in een veranderde en bredere taakstelling.

Er bestaat in deze fase van projecten veelal de neiging de kosten enigermate te onderschatten en bij de baten uit te gaan van ideale bedrijfsomstandigheden. Het verdient derhalve aanbeveling indien de kosten-batenanalyse tevens gebruikt wordt voor een kredietaanvraag, hiertoe een extra marge te hanteren.

7.3 Ontwerp

De voor de realisatie benodigde ontwerp- en opdrachtdocumenten betreffen in ieder geval een bestek voor de elektrotechnische gemaakaanpassingen, een bestek t.b.v. de hardware en software levering en een functionele omschrijving van de installatie. Bij voorkeur zijn deze documenten zodanig samengesteld dat separate aanbesteding (installateur en systeem-leverancier) dan wel aanbesteding met een verantwoordelijke hoofdaannemer beide tot de mogelijkheden behoren. Wel dienen taakstellingen en verantwoordelijkheden zeer eenduidig te worden beschreven, met name daar waar beide installatiedelen gekoppeld dienen te worden en getest.

7.3.1 Functioneel ontwerp

Naast de "klassieke" bestekdocumenten dient de werking van het geautomatiseerde systeem beschreven te worden in een functioneel ontwerp. Dit bevat de volgende onderdelen:

- a een besturingsplan;
- b een bedieningsfilosofie;

- c een bedrijfsvoeringsconcept;
- d een beschrijving van de gegevensverwerking;
- e een automatiseringsconcept.

ad a

Het besturingsplan is een gedetailleerde uitwerking van de in het vooronderzoek opgestelde besturingsstrategie en wordt weergegeven d.m.v. flowdiagrammen. Het besturingsplan wordt uitgewerkt op twee niveaus. Op centraal niveau beschrijft het plan de berekenings-techniek om te komen tot het RPP alsmede alle interacties tussen de beide gemalen, de keuze van de pompen en de toekenning van de juiste combinatie van schakelpeilen aan de juiste pompen. Op lokaal niveau beschrijft het besturingsplan tot in alle details de besturing van de individuele pompen in combinatie met de aanwezige persschuiven en de krooshek-reinigingsinstallatie. Daarnaast behoort tot het besturingsplan het definiëren van alle besturingsafhankelijke meldingen en alarmeringen.

ad b

De bedieningsfilosofie beschrijft de diverse bedieningsniveaus (zie 7.2.4), de bedieningsdialoog via beeldscherm en de autorisatieprocedure met bijbehorende autorisatieniveaus.

ad c

Het bedrijfsvoeringsconcept legt vast welke informatie benodigd is voor de dagelijkse bedrijfsvoering, op welke wijze deze informatie gepresenteerd dient te worden alsmede een volledige beschrijving van de te gebruiken beeldplaatjes. Tevens wordt beschreven op welke wijze storingen worden verwerkt en kenbaar gemaakt aan de dienstdoende werktuigkundige, inclusief het oproepsysteem met bijbehorende procedures.

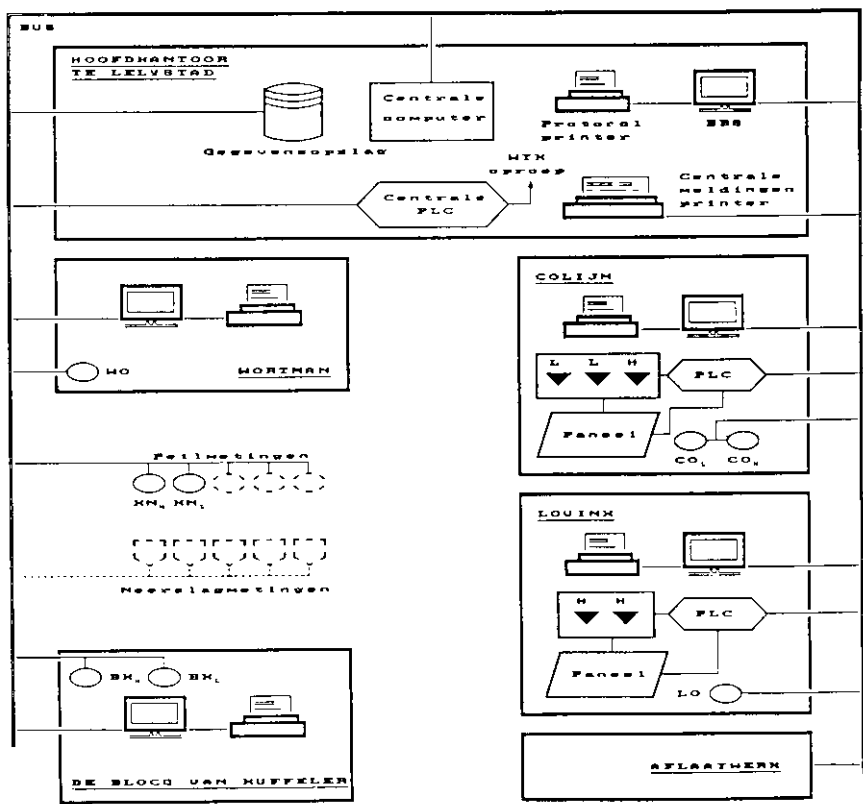
ad d

De gegevensverwerking omvat een gedetailleerde beschrijving, inclusief lay-out van de dag/week/maand en jaarrapporten en overige bemaalingsrapportages. Voor relevante onderdelen uit de rapporten wordt bovendien aangegeven op welke wijze deze moeten worden berekend. Verder worden beschreven de opslagduur van de historische gegevens en

de presentatie daarvan op alfanumerieke en/of grafische wijze.

ad e

Het automatiseringsconcept (zie fig. 7.3) geeft een principe-schets van de hardware-configuratie en de datacommunicatie (opstelling van telemetriestations, PLC's en beeldschermbedieningssysteem), maar dient voldoende systeemvrijheid te bieden voor specifieke invulling door de systeemleverancier. De functie en capaciteiteneisen van de hardware alsmede de eisen die gesteld worden aan de software-levering, de documentatie, de testprocedure, de inbedrijfstelling en het onderhoud worden in een apart bestek beschreven.



Figuur 7.3 Principe systeemconfiguratie

Goede ervaringen zijn in het onderhavige project bereikt met de instelling van een referentiegroep van de toekomstige gebruikers van het geautomatiseerde systeem. Met deze groep zijn alle onder a t/m d genoemde punten teruggekoppeld om een informatie- en bedieningssysteem te krijgen dat zoveel mogelijk was toegespitst op de wensen van de toekomstige gebruikers.

7.3.2 Elektro-mechanische aspecten

Naast de gebruikelijke aanpassingen die gemoeid zijn met de elektromechanische renovatie van een gemaal, zijn een aantal specifieke aanpassingen te noemen die verband houden met de introductie van de automatisering, zoals:

- aanpassing van de smeerinstallaties voor pompen;
- automatisering van de controle op het pompbedrijf zoals bewaking lagertemperatuur etc.;
- vervanging van het bestaande bedieningspaneel;
- aanpassing van de ventilatie;
- hydraulisering van de persschuiven;
- vervanging en automatisering van de krooshekreiniging op het gemaal Colijn en aanpassing van deze installaties op Lovink. De te vervangen installatie op Colijn diende te worden ontworpen op een piekaanvoer van ca. 15 ton vuil per dag met een opslagcapaciteit voor het roostergoed van 3 dagen. Hiertoe diende het gemaal ook ingrijpend civiel-technisch te worden aangepast.

Genoemde aanpassingen zijn noodzakelijk, omdat een geautomatiseerde bemaling uitgaat van een onbemande installatie, waar voorheen handmatig uitgevoerde controles nu automatisch dienen te verlopen en niemand meer aanwezig is om het raam open te zetten of de krooshekreiniger aan te sturen.

7.3.3 Instrumentatie

Uitvoering is stilgestaan bij de keuze van de instrumentatie voor de peilmetingen. Het meetbereik is vastgesteld op 2 meter (meetgrenzen: 1 meter opwaaiing versus 1 meter max. verval over het krooshek); de meetnauwkeurigheid is 1 cm (0.5%). Gekozen is voor

speciaal geselecteerde (i.v.m. de vereiste hoge nauwkeurigheid) drukdozen, die volledig onder water (met een speciale ophang- en beschermconstructie) gemonteerd zijn.

Doorslaggevend voor deze keuze is geweest de vandalismevrije opstelling, die op deze wijze gerealiseerd kon worden. De niveaumeters geven een signaal af dat ter plaatse is geïntegreerd over een minuut (voortschrijdend gemiddelde), verdere filtering, bijvoorbeeld t.b.v. scheepvaart geschiedt op centraal niveau. Voor de buitenwaterstandsmetingen is gekozen voor borrelbuizen.

7.4 Realisatie

7.4.1 Aannemersselectie

Opvallende bij de selectie van de systeemleverancier is geweest het zeer grote aantal mogelijke leveranciers in ons land van transmissie-apparatuur, PLC's en centrale dataverwerkende systemen. Eveneens opvallend was de constatering dat in de voorselectie bijna geen leveranciers gevonden konden worden die het gevraagde automatiseringsconcept technisch konden realiseren. Struikelpunt in deze was de gevraagde integrale besturing in combinatie met bedrijfsvoeringsfuncties (bediening en presentatie van historische gegevens) vanuit een vijftal lokaties. Systeemlevering en elektrotechnische aanpassingen zijn voor het project separaat aanbesteed met name om tijdens de uitvoering voldoende controle te kunnen uitoefenen op de systeemtechnische levering.

7.4.2 Testen en inbedrijfstelling

De belangrijkste fase bij de uitvoering is de fabrieksacceptatietest (FAT) voor de systeemlevering. Daar het onmogelijk is alle denkbare besturingsfuncties van het peilbeheersingssysteem bij de inbedrijfstelling te testen, is dit uitgevoerd tijdens de FAT. Hiertoe is het gehele toekomstige automatiseringssysteem bij de systeemleverancier opgebouwd, inclusief alle onderstations, PLC's, communicatielijnen en beeldscherm-bedieningsstations. De FAT omvat een volledige controle van alle ingangs- en uitgangssignalen vanaf de desbetreffende PLC-kaarten alsmede de verdere signaalverwerking en presentatie. Daarnaast omvat de FAT een test van alle functies zoals deze beschreven

staan in het functioneel ontwerp inclusief alle besturingen. Aan het opstellen van de testprotocollen dient bij dit soort projecten dan ook zeer veel zorg en tijd besteed te worden. Na goedkeuring van de FAT zijn de systemen op de desbetreffende lokaties aangesloten, de installatie wordt dan nog slechts steekproefsgewijs getest. De elektrotechnische installatie is daarvoor al getest op het werk, vanuit de PLC's via de eerder genoemde in- en uitgangskaarten. Aansluitfouten tussen de klemmenstroken voor de aansluiting van de signalen en de PLC's worden hiermee tevens gelokaliseerd.

Na de inbedrijfstelling zijn enige maanden door het bedienend personeel gebruikt om vertrouwd te raken met het informatiesysteem en het storings-oproepsysteem en om de geleidelijke overstap te maken van handmatig bedrijf, via bewaakt automatisch bedrijf gedurende de dag tot volautomatisch onbemand dag- en nachtbedrijf.

7.4.3 Planningsaspecten en kosten

De voortgang van het automatiseringsproject t.b.v. de gemalen van het Heemraadschap Flevervaard is wat betreft de planning als volgt verlopen:

o gedachtenvorming	duur ca. 1 jaar
o voorstudie	sept.-dec. 1988
o bestuurlijke besluitvorming	jan. 1989
o bestek gereedmaken	febr.-juni 1989
o bestuurlijke besluitvorming	juni 1989
o aanbesteding	juni-sept. 1989
o bestuurlijke besluitvorming	okt. 1989
o systeemlevering gereed na FAT	juni 1990
o oplevering	aug. 1990
o inbedrijfneming	aug.-okt 1990
o volautomatisch bedrijf	vanaf okt. 1990

De investeringskosten van het geautomatiseerde systeem bedragen ca. 750.000 gulden. De kosten voor de elektrotechnische gemaalaanpassingen liggen in dezelfde orde van grootte. De investeringen die verband houden met de civieltechnische ombouw van het gemaal Colijn

t.b.v. de stortlokatie voor het roostergoed alsmede de krooshekreinigingsinstallaties zelf bedragen tezamen ca. 1 miljoen gulden. De terugverdientijd voor het automatiseringsproject wordt geschat op zeven tot negen jaar uitgaande van de besparing op de energiekosten. Hierbij is geen rekening gehouden met een jaarlijkse vermindering van de kosten voor het onderhoud aan de oevers van de vaarten.

7.5 Toekomstig gebruik

Onderstaand wordt een tweetal potentiële gebruiksmogelijkheden van het geautomatiseerde systeem aangegeven. Realisatie hiervan, op termijn, wordt overwogen.

7.5.1 Gebruik van neerslaginformatie

Door het gebruik van neerslaginformatie kan het peilbeheer voor de Flevopolders verder worden verbeterd. Het waterafvoersysteem in de polders reageert relatief traag, waardoor de waterbeheerder tijd heeft om te reageren op een aankomende peilstijging. Dit in tegenstelling tot snel afvoerende stedelijke gebieden of kassengebieden. Een neerslagmeter kan in veel gevallen volstaan om voldoende voorspellingstijd te geven (in de Flevopolders ca. 6 uur in najaar en winter). Indien de neerslag gemeten wordt, kan er m.b.v. een neerslagafvoer-model berekend worden hoe deze neerslag tot afstroming komt. Zodoende kan het optimale moment, d.w.z. optimaal in relatie tot minimale peilvariatie en minimale energiekosten, bepaald worden waarop de bemaling in werking gesteld dient te zijn. Gemalen kunnen derhalve ingeschakeld worden nog voordat een merkbare peilstijging optreedt (automatisch voormalen). Onderzoek heeft aangetoond dat de momenteel geïmplementeerde automatische besturing van de gemalen in de Flevopolders hierdoor verbeterd kan worden.

7.5.2 Kwaliteitsmeetplannen

Nieuwe meettechnieken maken automatische bemonstering en analyse van waterkwaliteitsparameters mogelijk in landelijke gebieden. Daarnaast zijn voor eenvoudig meetbare parameters directe metingen mogelijk van bijv. de geleidbaarheid, de zuurgraad of het zuurstofgehalte. De direct meetbare parameters lenen zich in principe goed voor

automatische verwerking in verspreidingsmodellen. Indien de verspreidingskarakteristiek van bijv. een verontreiniging bekend is, kan worden bepaald met welke beheerstechnische maatregelen de gevolgen van de verontreiniging beperkt kunnen worden. Het huidige meetnet voor de waterpeilen in de vaarten van de Flevopolders biedt hiertoe de benodigde communicatie-infrastructuur met gegevensopslag en -verwerking op centraal niveau. Het centrale bedieningssysteem kan daarbij worden gebruikt voor de uitvoering van de maatregelen.

Literatuur

- A.H. Lobbrecht, H.J.G. Hartong, K.W. Snabel
Real-time control of watermanagement for the Flevopolder, the Netherlands
Hydrocomp 1989 Conference, Dubrovnik YU, june 1989
In: Computational Modelling and Experimental Methods in Hydraulics, Elsevier Applied Science, 1989
- A.H. Lobbrecht, H.J.G. Hartong, O.P. Landheer, K.W. Snabel
Automatisering van de bemaling in de Flevopolders
Waterschapsbelangen, 1990, nr. 15, p 499-503
- A.M.E. Hoogeveen
Het nut van peilvoorspellingen bij geautomatiseerd peilbeheer in landelijke gebieden
Afstudeerverslag TU Delft, Fac. Civiele Techniek, oktober 1990
- A.H. Lobbrecht, A.M.E. Hoogeveen, P.P. Verbruggen
Automatisering in het waterbeheer: Voorspelling voor optimale regeling van een waterbeheerssysteem
H₂O, 1991, concept publikatie
- H.J.G. Hartong
Planning and Realization of Real-Time-Control Systems

Workshop "Simulation and real-time control of urban drainage and waste water systems"
WPCF 63rd Annual Conference, Washington, USA

SAMWAT. SAMenwerken op het gebied van het onderzoek ten behoeve van het WATERbeheer.

In de serie SAMWAT-rapporten zijn verschenen:

- 1 Meet-, signalerings- en regelsystemen voor het waterbeheer, 1987
- 2 The SAMWAT database for models in watermanagement, 1988*
- 3 Kwaliteit van meetgegevens, 1988
- 4 Beleidsanalyse voor het Nederlandse waterbeheer, 1989
- 5 Specificaties voor meetsystemen in het waterbeheer, 1989
- 6 Sturing in het waterbeheer, 1990.

* uitverkocht

De rapporten kosten f 25,- en kunnen worden besteld bij:

Bureau SAMWAT
Postbus 6067
2600 JA DELFT
tel: 015 - 697412
fax: 015 - 571201