

Dynamische Sturing van Watersystemen

Ontwerp en Beheer van Regionale Watersystemen



97

35

Dynamische Sturing van Watersystemen
Ontwerp en Beheer van Regionale Watersystemen

97

35

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66

Publicaties en het publicatie-
overzicht van de STOWA kunt u
uitsluitend bestellen bij:

Hageman Verpakkers BV

Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079 - 361 11 88
fax 079 - 361 39 27

o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.
ISBN 90.5773.006.5

© 1997 A.H. Lobbrecht en Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. Behoudens de door de wet gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in welke vorm ook, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever die daartoe door de auteur met uitsluiting van ieder ander is gemachtigd. Aan de totstandkoming van deze uitgave is de uiterste zorg besteed. Voor informatie die nochtans onvolledig of onjuist is opgenomen, aanvaarden auteur en uitgever geen aansprakelijkheid. Voor eventuele verbeteringen van de opgenomen gegevens behouden zij zich gaarne aanbevolen.

Deze uitgave is een Nederlandse samenvatting van het boek "Dynamic Water-System Control", dat in opdracht van de STOWA is vervaardigd. Het boek is te bestellen bij Balkema Uitgevers, Postbus 1675, 3000 BR Rotterdam (ISBN 90.5410.431.7).

Omslag ontwerp: T. van Veen, Plato, Delft.

Inhoud

Ten geleide	1
1 Inleiding	3
1.1 Watersysteembenadering	3
1.2 Doel	4
1.3 Typering van belangen	5
1.4 Dynamische sturing	6
2 Ontwikkelingen in de waterbeheersing	7
2.1 Capaciteiten in het watersysteem	7
2.2 Van lokale regeling naar dynamische sturing	7
3 Beslissingsondersteuning	11
3.1 Het algemene besturingssysteem	11
3.2 De prestaties van sturingsvormen	13
3.3 Belangenafweging	13
4 Het beslissingsondersteunende systeem Aquarius	15
4.1 Opzet	15
4.2 Simulatiemodule	15
4.3 Optimalisatiemodule	16
4.4 Voorspellingsmodule	17
5 Praktijkstudies	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Delfland	19
5.3 De Drie Ambachten	25
5.4 Salland	28
5.5 Conclusies	33
6 Ontwerpen met dynamica	35
6.1 Achtergrond	35
6.2 Zes stappen	35
6.3 Ontwerpvoorbeeld	37
6.4 Conclusies	38
7 Resumé	39

Ten geleide

De toepassing van moderne computertechnieken voor de analyse van het waterbeheer heeft de laatste jaren tot het inzicht geleid dat met sturing van watersystemen enorme verbeteringen kunnen worden bereikt in de kwaliteit van het beheer. Voorts blijkt het mogelijk om, uitgaande van die sturing, een veilig en afgewogen ontwerp van een watersysteem te maken.

Het doel van het onderzoeksproject was het ontwikkelen van een algemeen toepasbare methodiek voor afgewogen ontwerp en beheer van regionale watersystemen. De concrete resultaten die in het project zijn behaald zijn een uitgewerkte methode voor het ontwerp: de "dynamische ontwerp procedure" en een methode voor een geoptimaliseerd beheer: "dynamische sturing". De methoden en hun de theoretische achtergronden, zijn gedetailleerd beschreven in het boek "Dynamic Water-System Control" (STOWA rapport 97-24) en in deze uitgave samengevat.

De methode van dynamische sturing is praktisch vorm gegeven in het computerprogramma AQUARIUS, waarmee ook de dynamische ontwerpprocedure kan worden gevolgd. Het computerprogramma is eveneens een product van het onderzoek en verkrijgbaar bij de STOWA.

De eisen die in de dagelijkse praktijk worden gesteld door de belangen in het watersysteem dienen als uitgangspunt voor de ontwikkelde methodiek. In de waterbeheersing blijkt dat de diverse belangen zelden gelijktijdig de meest stringente eisen stellen. Dynamische sturing maakt actief gebruik van deze tijdsvariabiliteit en schept ruimte voor de waterbeheerder om continu zo goed mogelijk te voldoen aan alle eisen; ook in het geval de eisen worden verscherpt of nieuwe eisen worden geformuleerd. De beschikbaar gekomen ruimte voor het waterbeheer laat een economischer ontwerp toe, waarmee investeringen in infrastructuur kunnen worden uitgesteld of zelfs geheel achterwege kunnen blijven. Dat kan aanzienlijke kostenbesparingen voor de waterbeheerders opleveren.

Het project is in de periode 1993 - 1997 als promotieonderzoek door dr.ir. A.H. Lobbrecht uitgevoerd aan de TU Delft. De STOWA heeft het project ondersteund, in co-financiering met het Hoogheemraadschap van Delfland, het Waterschap De Drie Ambachten, DHV Water BV en de TU Delft.

De STOWA is bijzondere dank verschuldigd aan de begeleidingscommissie van het project. In die commissie hadden zitting: ir. H. van der Honing (Waterschap Regge en Dinkel, voorzitter), ing. F.C. Hamster (Waterschap Noorderzijlvest), ir. J.D. Heijnis (Heemraadschap Fleverwaard), prof.ir. W.A. Segeren (TU Delft), ir. M.D. Sinke (Hoogheemraadschap van Delfland) en dr. ir. W.C. Witvoet (DHV Water BV). Verder hadden vanuit het STOWA-bureau ir. P.C. Stamperius en ir. L.R. Wentholt zitting in de commissie.

Bij de ontwikkeling van de methodiek is op het wiskundige vlak ondersteuning geleverd door prof. dr. F. A. Lootsma en dr. T. Terlaky, beiden van de TU Delft.

De STOWA is de volgende personen erkentelijk voor hun aandeel in de begeleiding van de praktijkstudies: ing. S.B. Bouma (Hoogheemraadschap van Delfland); ir. C.J.H. Griffioen (Waterschap Groot Salland) en ir. P.J. Stouten (Adviesdienst Waterbeheer Zeeuwsch-Vlaamse Waterschappen).

Utrecht, november 1997

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

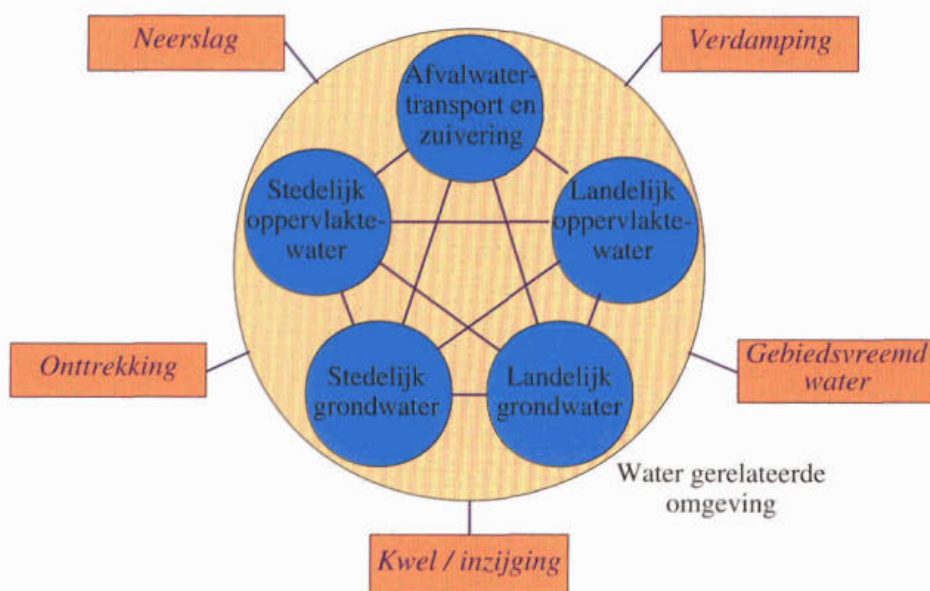
1 Inleiding

1.1 Watersystemenbenadering

In Nederland wordt een groot aantal belangen gediend met oppervlaktewater en grondwater. Belangen die elk hun specifieke eisen stellen aan de wijze waarop dat water wordt beheerd. Met integraal waterbeheer wordt ingespeeld op de complexe situatie die in het waterbeheer is ontstaan, door op strategisch en tactisch niveau afstemming met andere beleidsvelden te zoeken en van daaruit een afweging van belangen te maken. Er worden keuzes gemaakt en functies toegekend. Het gehele watersysteem wordt daarbij in samenhang beschouwd. Dit betekent onder meer dat de relaties tussen de verschillende deelsystemen, zoals het grond- en oppervlaktewater van landelijke en stedelijke gebieden, en eveneens het afvalwatersysteem, nadrukkelijk in de beschouwingen worden betrokken (Afb. 1).

De afstemming en prioriteitstelling bij keuzes voor de inrichting van de omgeving en het integreren of juist scheiden van belangen leidt echter lang niet altijd tot een eenduidige beheerssituatie. Voor de meeste watersystemen zijn nog altijd verschillende belangen met elk hun eigen, soms tegenstrijdige, eisen in het geding. Bij het ontwerpen van watersystemen en bij het operationele beheer moet daar op een afgewogen wijze op worden ingespeeld en bij voorkeur tegen zo laag mogelijke maatschappelijke kosten. Een dergelijke aanpak op het operationele niveau is een nieuwe ontwikkeling, die nog maar in een prille beginfase is. Voor een nadere invulling op het meer strategische niveau wordt verwezen naar de uitgave *Interactieve Planvorming gericht op Effectiviteit en Acceptatie* (STOWA-boekenreeks nummer 12).

Er zijn nog diverse problemen in het huidige waterbeheer die moeten worden opgelost, voordat kan worden gesproken over afstemming in de uitvoerende taken van de verschillende beheerders van deelsystemen. Niet in de laatste plaats ontbreekt het aan de juiste methoden om te bepalen welke interacties tussen deelsystemen van belang zijn en een rol zouden moeten spelen in het operationele beheer van het watersysteem.



Afb. 1. Deelsystemen van een watersysteem en de externe belastingen.

1.2 Doel

Het doel van het project was het ontwikkelen van een algemeen toepasbare methodiek voor afgewogen ontwerp en beheer van regionale watersystemen, waarin rekening wordt gehouden met de dynamica van de processen die zich voltrekken in het watersysteem en de in de tijd variërende eisen van diverse belangen.

Tabel 1. Voorbeelden van belangen, mogelijke doelen en eisen.

Belang	Doelen	Eisen
Veiligheid	Geen overstromingen in landelijk en stedelijk gebied	Houd waterstanden beneden de gestelde grens Voorkom schade aan dijken en kaden
Ecologie / milieu	Voldoen aan algemene waterkwaliteitsnormering	Handhaaf de geschikte waterkwaliteit
Landbouw	Optimale groeiomstandigheden voor het gewas Begaanbaarheid en bewerkbaarheid van het land	Handhaaf oppervlakte- en grondwaterstanden binnen de gestelde grenzen Houd het vochtgehalte in de grond binnen de gestelde grenzen Houd oppervlaktewater in het systeem voor bevoeding Handhaaf de geschikte waterkwaliteit
Scheepvaart	Transport over water	Handhaaf oppervlaktewaterstanden binnen de gestelde grenzen Houd de stroomsnelheid beneden de gestelde grens
Waterrecreatie	Voldoende water met de juiste kwaliteit	Handhaaf oppervlakte- en grondwaterstanden binnen de gestelde grenzen Houd oppervlaktewaterkwaliteit binnen de gestelde grenzen
Natuur	Optimale omstandigheden voor ontwikkeling en behoud van flora en fauna Geen droogteproblemen Biodiversiteit	Handhaaf oppervlakte- en grondwaterstanden binnen de gestelde grenzen Houd oppervlaktewaterkwaliteit binnen de gestelde grenzen Conserveer gebiedseigen water Voorkom ongewenste instroming van gebiedsvreemd water Voorkom riooloverstortingen
Waterbeheersing	Minimale kosten voor beheer en onderhoud Bedrijfszekerheid	Minimaliseer de bedrijfsduur en het schakelen van regelbare kunstwerken Voorkom hoge energiekosten Houd de stroomsnelheden in waterlopen binnen de gestelde grenzen

In het ontwerp van een watersysteem dient rekening te worden gehouden met de feitelijke toestand en de wijze waarop dat systeem in operationele zin wordt beheerd. Bij dat beheer dient rekening te worden gehouden met de aan de belangen verwante doelen zoals:

- het voorkomen van overstromingen in stedelijk en landelijk gebied;
- het handhaven van condities ten gunste van de ontwikkeling en het behoud van flora en fauna;
- het ontwikkelen en handhaven van biodiversiteit;
- het voorkomen van verdrogingsproblemen in stedelijk en landelijk gebied;
- het mogelijk maken van transport over water;
- het voorkomen van ongeschikte waterkwaliteit;
- het beperken van operationele kosten van het waterbeheer.

In het project is de nadruk gelegd op het met behulp van sturing van het watersysteem zo goed mogelijk voldoen aan dergelijke doelen.

1.3 Typering van belangen

Evenals op het strategisch niveau, is het in de ontwerp- en beheersituatie van belang om afwegingen te maken en voorkeuren vast te leggen. Dit is in het operationele beheer een nieuw fenomeen. Ten dienste van deze afweging is een wegingsmechanisme ontwikkeld, waarmee waterbeheerders prioriteiten kunnen toekennen aan de belangen in het watersysteem. Voorkeuren die volgen uit bepaalde beleidsafspraken kunnen in de weging worden betrokken. De volgende typen belangen zijn onderkend: *algemene* belangen, *sectorale* belangen en *operationele* belangen.

Belangen van algemene aard hebben betrekking op de eisen die voortvloeien uit de primaire taken van het waterbeheer, zoals het voorkomen van overstromingen en de zorg voor het ecologisch functioneren van watersystemen.

Sectorale belangen worden gekenmerkt door het profijt dat een zekere groep heeft bij het voldoen aan de gestelde eisen, of door de maatschappelijke wenselijkheid van een bepaalde situatie. Voorbeelden zijn: de landbouw, de recreatie en de natuur.

Operationele belangen hebben betrekking op het efficiënt laten verlopen van de waterbeheersing, zoals het sturen van het watersysteem tegen de laagste kosten.

De eisen die aan watersystemen worden gesteld zijn vaak tijdsafhankelijk. Zo stelt de landbouw de zwaarste eisen in het zaai- en groeiseizoen, de waterrecreatie in het recreatie seizoen en de natuur bijvoorbeeld gedurende het ontkiemen van zaad in het voorjaar. Een uitgangspunt is dat het welbevinden van een belang kan worden uitgedrukt in de waarden van toestandsvariabelen van het watersysteem. Zo kunnen de eisen die vanuit belangen worden gesteld worden vertaald in de gewenste waarden van die variabelen en kan met sturing worden getracht die situatie te realiseren of zo goed mogelijk te benaderen.

Tabel 1 geeft enkele voorbeelden van hoe de benodigde omstandigheden voor de belangen door middel van doelen kunnen worden vastgelegd in technische eisen die worden gesteld aan het waterbeheer.

1.4 Dynamische sturing

Om bij iedere toestand van het watersysteem de beste sturing van regelbare kunstwerken te kunnen bepalen, dient rekening te worden gehouden met de dynamica van het watersysteem en de tijdsvariabiliteit van de eisen. Ook de hydrologische belasting van het watersysteem, zoals de neerslag, is dynamisch.

De dynamica van het watersysteem vraagt om een dynamische aanpak van het waterbeheer, waarbij continu wordt ingespeeld op de actuele en eventueel geanticipeerde situatie, de voor dat moment geldende eisen en de hydrologische belasting. Een dergelijke benadering is fundamenteel anders dan de op het moment veelal gebezigde praktijk, waarbij onafhankelijk van de actuele situatie wordt gezocht naar vaste streefwaarden in het beheer, zoals een vast streefpeil.

De aanpak waarbij rekening wordt gehouden met de genoemde tijdsvariabiliteit van de eisen, de dynamiek van de belasting en de interne processen, wordt *dynamische sturing* genoemd.

2 Ontwikkelingen in de waterbeheersing

2.1 Capaciteiten in het watersysteem

Het ontwerpen en beheren van het waterbeheerstechnisch hoofdsysteem is een kwestie van capaciteitstoekenning. De feitelijke reden dat waterstanden stijgen en vervolgens leiden tot overstroming, is het gebrek aan bergings- of afvoercapaciteit in deelsystemen zoals het oppervlaktewater, het grondwater of het afvalwatersysteem. In principe kunnen ongewenste situaties, die zich onder extreme omstandigheden van neerslag voordoen, worden voorkomen door meer capaciteit toe te kennen aan de verschillende onderdelen van het watersysteem. Een absoluut voldoende capaciteit zal men in de praktijk niet vinden, zodat er blijkbaar sprake is van een geaccepteerde frequentie waarmee zich ongewenste situaties mogen voordoen: de *faalfrequentie*. De duur waarover niet aan de eisen wordt voldaan, wordt de *faalduur* genoemd.

Door niet meer uitsluitend de deelsystemen van het watersysteem te beschouwen bij het ontwerp en beheer, maar het gehele watersysteem, kan in het operationele beheer de overtollige capaciteit in het ene deelsysteem soms worden aangewend ten gunste van een ander deelsysteem. Zo kan de berging in een rioolstelsel helemaal worden benut voordat zich overstortingen voordoen, kan overstortwater worden geleid naar een gebied waar deze relatief weinig schade aanricht en kan water tijdelijk in de bodem worden geborgen om te voorkomen dat zich ergens een overstroming voordoet. Kortom, de totale prestaties van het beheerste watersysteem nemen toe door alle capaciteit voor het totaal aan belangen te gebruiken.

Dynamische sturing kan ook leiden tot een situatie waarbij kan worden volstaan met geringere systeemcapaciteit dan op grond van een statische beschouwing zou worden verwacht. In veel bestaande watersystemen blijkt een overcapaciteit aanwezig, die kan worden gebruikt om beter te voldoen aan het toenemende aantal eisen dat wordt gesteld door nieuw onderkende belangen, of kan worden benut om een eventueel tekort aan capaciteit te compenseren. In de praktijk komt dat laatste neer op het uitstellen, beperken, of geheel laten vervallen van aanpassingen, zoals het verruimen van vaarwegen en/of het installeren van meer bemalingscapaciteit. Dat kan aanzienlijke kostenbesparingen opleveren.

2.2 Van lokale regeling naar dynamische sturing

Automatisering is één van de eerste stappen naar verbeterde operationele waterbeheersing. Men dient zich echter te realiseren dat automatische regelingen alleen, de kennis die de waterbeheerder in de praktijk gebruikt niet kan vervangen. Automatisering van uitsluitend routinematige handelingen is daarom niet voldoende om tegemoet te komen aan de huidige eisen die aan het waterbeheer worden gesteld.

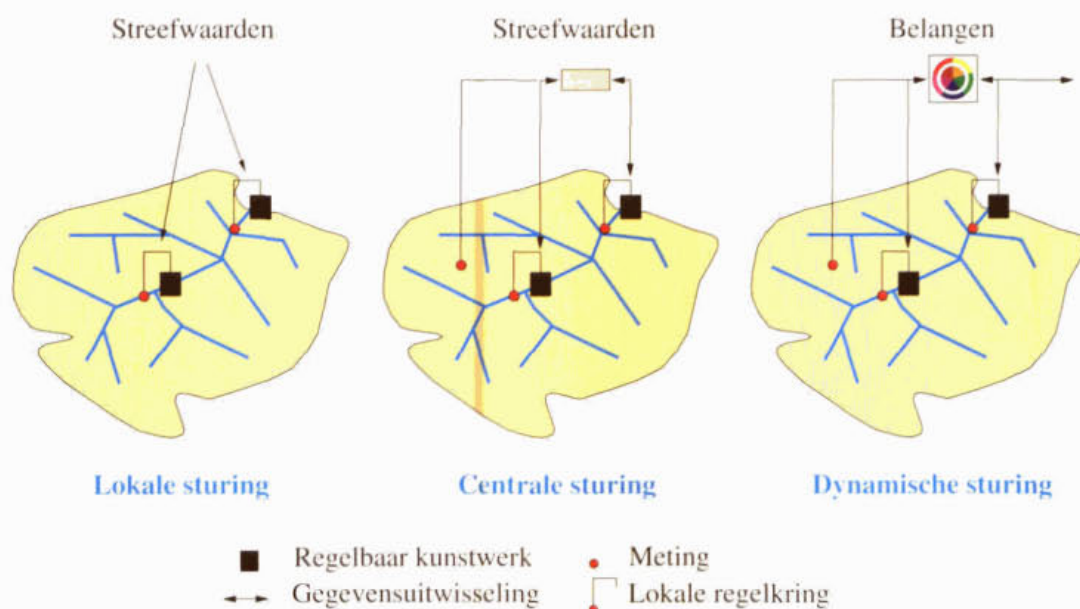
In de evolutie van sturing in het waterbeheer kan een aantal fasen worden onderkend (Afb. 2):

- lokale sturing,
- centrale sturing,
- dynamische sturing.

Van lokale sturing wordt gesproken als een kunstwerk wordt geregeld op basis van informatie in de nabijheid van dat kunstwerk. Bijvoorbeeld een gemaal dat in- en uitschakelt op grond van de bovenstroomse waterstand. Lokale sturing vindt in de regel plaats op grond van streefwaarden en grenswaarden die gelden voor een deelsysteem van het watersysteem, zoals het oppervlaktewater.

Onder centrale sturing vallen alle vormen van sturing waarbij informatie van verschillende locaties wordt gebruikt. Bij sturing van regelbare kunstwerken wordt aldus informatie uit verschillende deelsystemen verwerkt. Evenals bij lokale sturing, wordt bij de meest eenvoudige vorm van centrale sturing gebruik gemaakt van streefwaarden.

Het voordeel van centrale sturing ten opzichte van lokale sturing is dat er een beter beeld van de feitelijke toestand in het watersysteem wordt gebruikt om tot beslissingen over sturingsacties te komen. Daardoor kunnen tegenstrijdige lokale sturingsacties worden voorkomen. Centrale sturing wordt op het moment op verschillende plaatsen in Nederland toegepast in diverse vormen. Daarbij wordt veelal gebruik gemaakt van meetnetten en centraal opgestelde computers die sturingsacties bepalen op grond van vastgestelde regels. Een voorbeeld van deze vorm van sturing is de beheersing van de oppervlaktewaterstand in een geheel beheersgebied.



Afb. 2. De evolutie van sturing in het waterbeheer.

Dynamische sturing is een speciale vorm van centrale sturing, waarbij sturingsacties worden bepaald op grond van in de tijd variërende eisen die door belangen in het watersysteem worden gesteld. Dynamische sturing is met name interessant als er sprake is van tegenstrijdige eisen en vooral in situaties van extreme belasting van het watersysteem, zoals het geval is bij extreem waterbezwaar of grote droogte.

Bij dynamische sturing wordt in eerste instantie alle beschikbare systeemcapaciteit gebruikt. In geval van onvoldoende systeemcapaciteit wordt een vooraf ingesteld wegingsmechanisme

toegepast om te bepalen welke sturingsacties nodig zijn om de schade aan de belangen zo klein mogelijk te houden. Toepassing van dynamische sturing zorgt ervoor dat, als het niet anders kan, als eerste de minst zwaarwegende belangen worden geschaad en als laatste de meest zwaarwegende belangen.

De methode van dynamische sturing maakt gebruik van optimalisatietechnieken, schadefuncties en gewichtentoekenning. Onderdelen van de methode worden toegepast in verschillende landen, waarbij met name de toepassingen in de Verenigde Staten moeten worden genoemd. Bij de verdeling van water tussen de belangen energieopwekking (waterkracht) en landbouw (irrigatie) worden daar vergelijkbare technieken ingezet voor het beheer van grote kanaalsystemen en zelfs complete rivieren.

Lokale, centrale en dynamische sturing worden in de praktijk, afhankelijk van de situatie, ook in samenhang toegepast. Bij alle vormen van sturing, inclusief dynamische sturing, kan zowel automatische als handmatige bediening van regelbare kunstwerken worden uitgevoerd. Dat is afhankelijk van het aantal kunstwerken en het belang dat de waterbeheerder hecht aan handmatig of juist automatisch bedrijf.

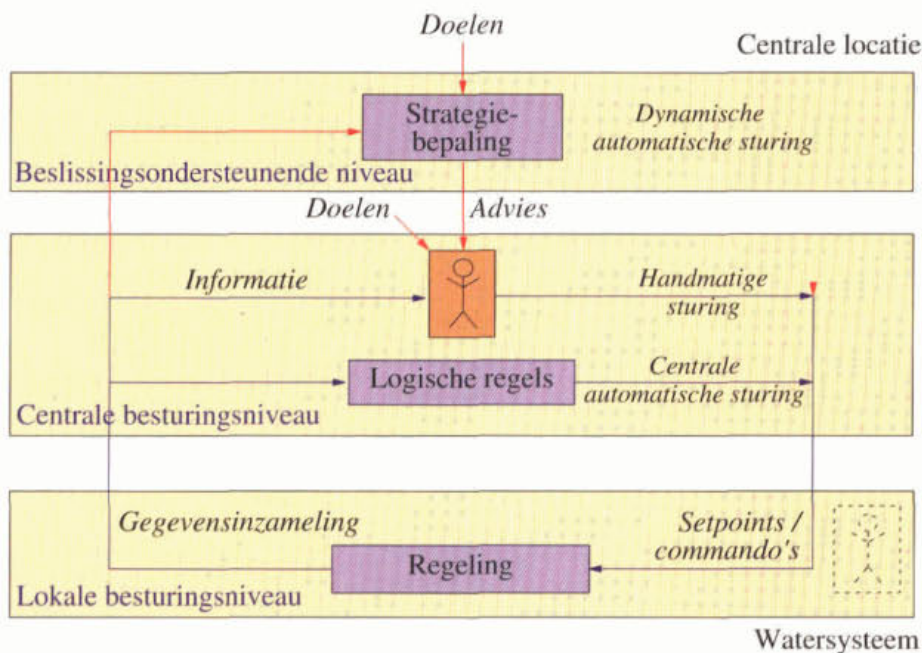
3 Beslissingsondersteuning

3.1 Het algemene besturingssysteem

Een besturingssysteem is opgebouwd uit elementen die op drie niveaus kunnen worden geplaatst (Afb. 3):

- het beslissingsondersteunende niveau,
- het centrale besturingsniveau,
- het lokale besturingsniveau.

Sturingsacties kunnen vanuit alle drie niveaus worden ingezet. De feitelijke regelingen worden uitgevoerd in het watersysteem, door apparaten op het lokale niveau. De regelaars die de kunstwerken aansturen maken gebruik van streefwaarden die worden geleverd vanaf een centrale locatie en die lokaal zijn opgeslagen. Dergelijke streefwaarden worden aangeduid met *setpoints*. Voorbeelden van setpoints zijn: de waterstand bovenstrooms van een stuw en het debiet door een sluis. Kunstwerken kunnen verder op afstand worden bediend, waartoe vanaf het centrale niveau bedieningscommando's worden gegeven.



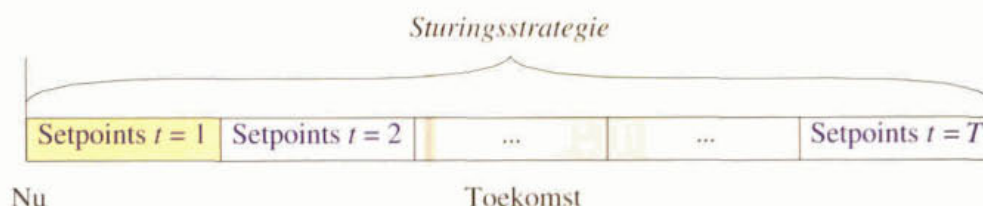
Afb. 3. Algemene opzet van een besturingssysteem.

Op het centrale niveau worden gegevens over de lokale processen ingezameld en verwerkt tot informatie. Op grond van verschillen tussen de gewenste en de actuele toestand in het watersysteem, beslist de beheerder over de uit te voeren sturingsacties. Deze kunnen door hem handmatig worden ingezet via afstandsbediening (centrale handmatige sturing). De noodzakelijke sturingsacties kunnen ook door een centrale eenheid worden bepaald en ingezet op grond van automatisch ingezamelde gegevens en logische regels (centrale automatische sturing).

De gewenste inzet van regelbare kunstwerken over een periode vooruit, wordt aangeduid met

sturingsstrategie. Een bepaalde sturingsstrategie is afhankelijk van de omstandigheden in het watersysteem en kan daarom variëren in de tijd. Afbeelding 4 laat zien hoe de sturingsstrategie is opgebouwd uit een reeks van setpoints voor regelbare kunstwerken.

Het beslissingsondersteunende niveau wordt gebruikt om de beheerder te helpen bij het bepalen van de gewenste sturingsstrategie. Mogelijke beslissingen kunnen op hun effectiviteit worden getoetst, bijvoorbeeld door het gebruik van computermodellen. Dergelijke toepassingen worden ook wel aangeduid met beslissingsondersteunende systemen, afgekort met BOS.



Afb. 4. De sturingsstrategie als serie van setpoints in de tijd.

Een sturingsstrategie die is bepaald via interactie van de beheerder met het BOS, kan worden beschouwd als een *advies*. Dat advies kan door de beheerder handmatig worden uitgevoerd (dynamische handmatige sturing). Ook bestaat er de mogelijkheid dat de strategieën die door het BOS worden bepaald automatisch worden geëffectueerd (dynamische automatische sturing).

Bij dynamische sturing wordt het geheel aan belangen dat in het watersysteem aanwezig is, betrokken bij de bepaling van de sturingsstrategie. Daarbij wordt rekening gehouden met de actuele situatie in het watersysteem en de verwachte belasting van dat systeem.

De benamingen voor de verschillende vormen van sturing zijn weergegeven in tabel 2. Een sturingsstrategie kan verder ook worden bepaald door het aflopen van logische regels (logica) of op grond van ervaring (heuristiek).

Het BOS kan, behalve voor de toepassing voor het dagelijkse beheer, ook bij het maken van plannen en het ontwerpen worden gebruikt als analyse-instrument.

Tabel 2. Benaming van sturingsvormen voor waterbeheersing.

Bediening	Sturingsniveau	Strategiebepaling	Sturingsvorm
Automatisch	Centraal	BOS	Dynamische automatische sturing
		Logica	Centrale automatische sturing
	Lokaal	Logica	Lokale automatische sturing
Handmatig	Centraal	BOS / Heuristiek	Dynamische handmatige sturing
		Heuristiek	Centrale handmatige sturing
	Lokaal	Heuristiek	Lokale handmatige sturing

3.2 De prestaties van sturingsvormen

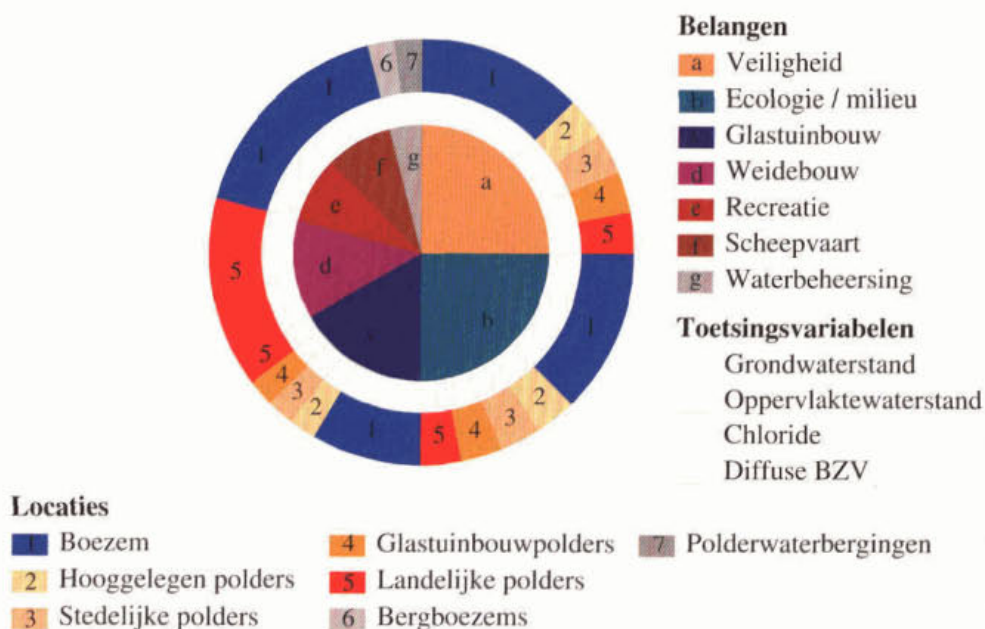
Het succes van sturing wordt bepaald met behulp van modellen en tijdreeksberekeningen (zie praktijkstudies). Hierbij wordt onder meer de prestatie-index bepaald, die weergeeft hoe goed een bepaalde manier van sturen over een lange periode voldoet aan de gestelde eisen. Verder kunnen nog andere succesindicatoren worden bepaald, zoals de *conserveringsfactor* voor gebiedseigen water en de *doorspoelfactor* voor het oppervlaktewater.

De consequenties van dynamische en andere vormen van sturing kunnen verder worden bepaald aan de hand van de *faalfrequentie* van het watersysteem en de bijbehorende *faalduur*. Daarbij wordt gekeken naar extreme situaties, zoals hoogwater en extreem slechte waterkwaliteit. Al deze indicatoren zijn in praktijkstudies gebruikt om de verschillende vormen van sturing met elkaar te vergelijken.

Voor kalibraties van de opgestelde modellen is gebruik gemaakt van lokaal gemeten waterstanden, debieten, neerslag en verdamping. Ten behoeve van het vergaren van statistisch materiaal zijn tijdreeksberekeningen uitgevoerd met hydrologische gegevens zoals door het KNMI gemeten in De Bilt in de periode van 1965 t/m 1994.

3.3 Belangenafweging

Bij dynamische sturing wordt gebruik gemaakt van belangenafweging. Een voorbeeld van deze afweging uit één van de praktijkstudies, is visueel weergegeven in Afb. 5. De grootte van de middelste sectoren van de taartgrafiek geeft het relatieve gewicht dat aan de belangen is toegekend. Hoe groter het belang, hoe groter de bijbehorende sector. Belangen worden gekoppeld aan locaties in het fysieke watersysteem door middel van toetsingsvariabelen. De toetsingsvariabelen zijn in de afbeelding weergegeven in de gearceerde ring. De eisen die de belangen stellen kunnen worden uitgedrukt in iedere gedefinieerde variabele. De waarde van



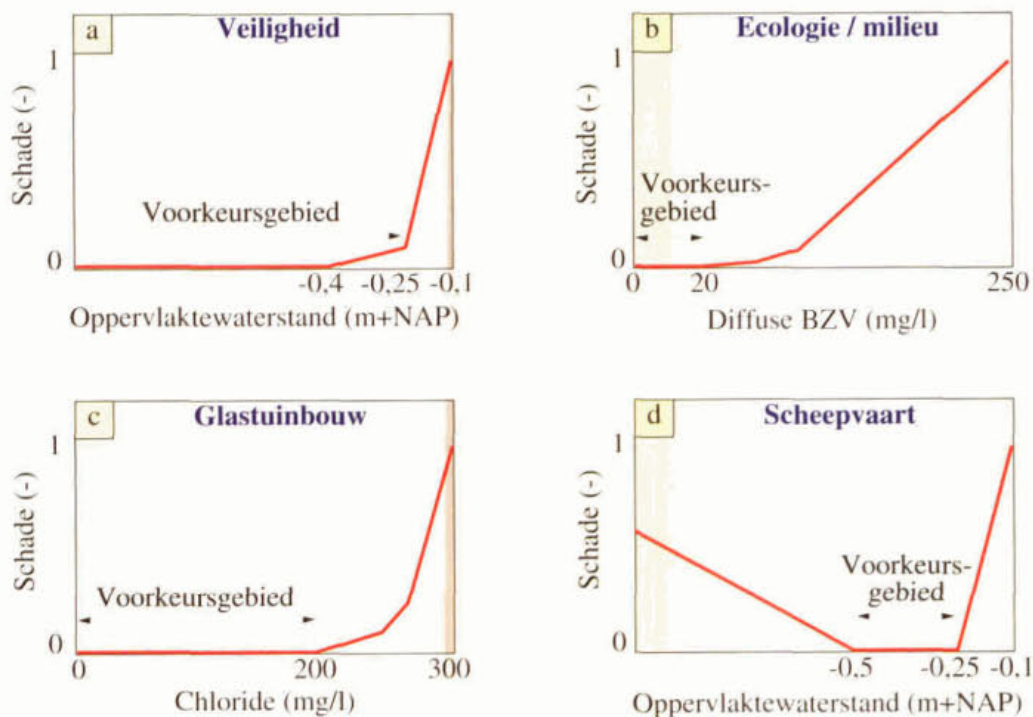
Afb. 5. Belangenafweging voor het Delflandse watersysteem.

de toetsingsvariabelen bepaalt aldus in welke mate wordt voldaan aan de gestelde eisen. De relatie tussen de waarde van toetsingsvariabelen en het al dan niet voldoen aan de eisen, kan worden weergegeven met behulp van schadefuncties.

Er worden schadefuncties opgesteld voor de toetsingsvariabelen die horen bij de in het geding zijnde belangen. Deze schadefuncties zijn dimensieloos, om onderlinge afweging van belangen mogelijk te maken. Afbeelding 6 geeft een voorbeeld van hoe geschematiseerde schadefuncties eruit kunnen zien. Iedere schadefunctie heeft een punt of een gebied waarbij er geen schade optreedt of waar de schade erg klein is. Indien er sprake is van een dergelijk gebied wordt dat het *voorkeursgebied* voor die variabele genoemd.

De gekozen afweging en de vorm van de schadefuncties bepalen de optimale sturing van het watersysteem. In eerste instantie wordt getracht om alle variabelen van het watersysteem binnen hun voorkeursgebied te houden. Dit principe garandeert dat eerst alle beschikbare capaciteit in het watersysteem wordt benut voordat ergens in het systeem schade wordt opgelopen.

Over het algemeen kunnen, over een lange periode gezien, de prestaties van watersystemen enorm worden opgevoerd, alleen al door zo goed mogelijk binnen de voorkeursgebieden te blijven. Zodra alle beschikbare systeemcapaciteit is gebruikt, zal een belang in het watersysteem worden geschaad doordat de betreffende toetsingsvariabelen buiten hun voorkeursgebied komen. Belangen met de laagste toegekende gewichten worden als eerste geschaad (over het algemeen operationele belangen) en belangen met de hoogste toegekende gewichten als laatste (over het algemeen belangen van algemene aard).



Afb. 6. Enkele geschematiseerde schadefuncties voor het Delflandse watersysteem.

4 Het beslissingsondersteunende systeem AQUARIUS

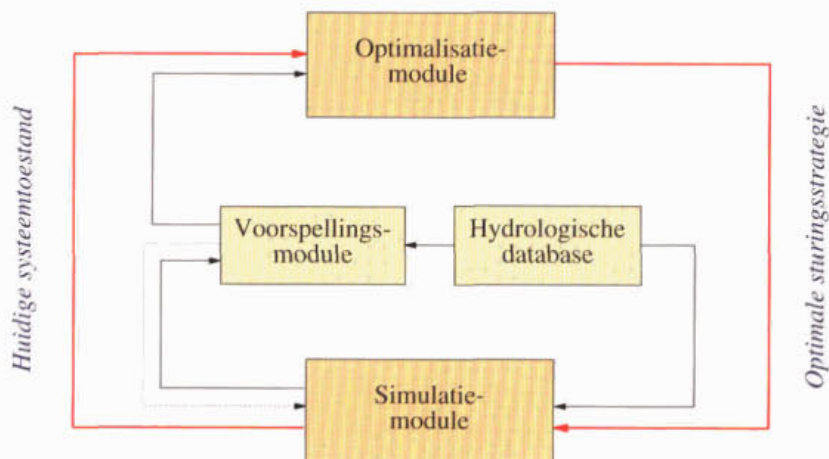
4.1 Opzet

Om waterbeheerders te ondersteunen bij het vaststellen van sturingsstrategieën is een BOS ontwikkeld met de naam AQUARIUS. Het BOS is een interactief computerprogramma dat kan worden toegepast om sturingsstrategieën te bepalen of sturingsstrategieën te toetsen. In geval van strategiebepaling wordt dit gebaseerd op een ingestelde afweging van belangen, waarbij continu zo goed mogelijk wordt voldaan aan de eisen die door die belangen worden gesteld. AQUARIUS is opgebouwd uit een aantal samenwerkende programmamodules: een *simulatiemodule*, een *voorspellingsmodule* en een *optimalisatiemodule*. De simulatiemodule bepaalt nauwkeurig de huidige toestand van het watersysteem voor zowel waterkwantiteit als waterkwaliteit.

De voorspellingsmodule voorspelt, indien nodig, voor een periode vooruit de hydrologische belasting van het watersysteem, op grond van weersverwachtingen. Deze periode wordt de *sturingshorizon* genoemd.

De optimalisatiemodule bouwt het *optimalisatieprobleem* op voor een periode gelijk aan de sturingshorizon en bepaalt de optimale sturingsstrategie. De wiskundige formulering van het probleem bestaat uit de diverse relaties die tussen de delen van het watersysteem gelden, de eisen die door de belangen in het watersysteem worden gesteld, de actuele toestand van het watersysteem en de voorspelde hydrologische belasting.

De optimale sturingsstrategie wordt aan de simulatiemodule doorgegeven, die op grond van de eerste sturingsacties die volgen uit de sturingsstrategie, de nieuwe toestand van het watersysteem bepaalt. Dit samenwerken van programmamodules en tegelijkertijd doorgeven van gegevens wordt *simultane simulatie en optimalisatie* genoemd (Afb. 7).



Afb. 7. Simultane simulatie en optimalisatie.

4.2 Simulatiemodule

De simulatiemodule die in AQUARIUS wordt gebruikt, is gebaseerd op een niet-lineair reservoirmodel, waarbij er reservoirs worden gebruikt voor het nabootsen van de onverzadigde

zone, het grondwater, het oppervlaktewater en rioolstelsels. Er kunnen zowel vlakke als hellende gebieden worden gemodelleerd. In een gebied kunnen één of meer deelsystemen aanwezig zijn. Er wordt onderscheid gemaakt tussen langzaam en snel afvoerende deelsystemen. Voor de deelsystemen kunnen op gekoppelde wijze waterkwantiteits- en waterkwaliteitsberekeningen worden uitgevoerd.

Afhankelijk van de gewenste schematisatie kunnen neerslag-afvoerrelaties worden opgenomen van de volgende deelsystemen: het oppervlaktewater, het landelijk grondwater, het stedelijk water (grondwater en diverse typen rioolstelsels) en speciale typen verhard gebied (glastuinbouw). Tevens kan de situatie van wateraanvoer worden nagebootst.

De deelsystemen van een AQUARIUS model worden met elkaar verbonden door middel van stromingselementen: *vaste kunstwerken* (stuwen en inlaten), *regelbare kunstwerken* (gemalen, stuwen, sluizen en inlaten) en *vrije stromingselementen* (kanalen en grondwater). Met deze werkwijze kunnen oppervlakte- en grondwaternetwerken met elkaar worden gekoppeld.

4.3 Optimalisatiemodule

Bij het opstellen van het BOS is veel aandacht besteed aan de keuze van een efficiënte optimalisatiemethode en de modellering van het watersysteem en de daaraan gestelde eisen. Er is gekozen voor mathematische optimalisatie met *Successieve Lineaire Programmering* (SLP). Belangrijke redenen hiertoe zijn geweest: de snelheid van de methode en de te behalen nauwkeurigheid. Snelheid bij het vinden van de beste oplossing voor het sturingsvraagstuk kan van belang zijn bij on-line toepassing van de methode.

De processen die zich voltrekken in een watersysteem zijn niet lineair. Om de gewenste nauwkeurigheid te kunnen garanderen worden de niet-lineaire processen voor de sturingshorizon gelineariseerd rond de geschatte waarden van de variabelen van het watersysteem. De ontwikkelde methode om dit op efficiënte wijze te kunnen doen is *voorwaartse schatting* genoemd. Bij het doorrekenen van een tijdreeks wordt voor iedere tijdstap van de sturingshorizon een optimalisatieprobleem opgebouwd. Bij het opstellen van dat probleem maakt de voorwaartse schatting telkens gebruik van de optimale oplossing van de vorige tijdstap.

Het principe van voorwaartse schatting blijkt in de uitgevoerde praktijkstudies zo efficiënt te zijn, dat het optimalisatieprobleem voor iedere tijdstap uit een doorgerkende reeks slechts eenmaal hoeft te worden opgelost. Hierdoor is de gebruikte methode van SLP nagenoeg even snel als standaard Lineaire Programmering (LP).

De methode bepaalt voor een eenvoudig watersysteem, dat bestaat uit tientallen landelijke en stedelijke deelsystemen en waarin aan een beperkt aantal eisen moet worden voldaan, de optimale sturingsstrategie op een hedendaagse PC binnen enkele seconden. Zelfs voor een groot en ingewikkeld watersysteem, dat bestaat uit honderden deelsystemen en waarin aan een groot aantal eisen moet worden voldaan, wordt de optimale sturingsstrategie nog binnen enkele minuten bepaald.

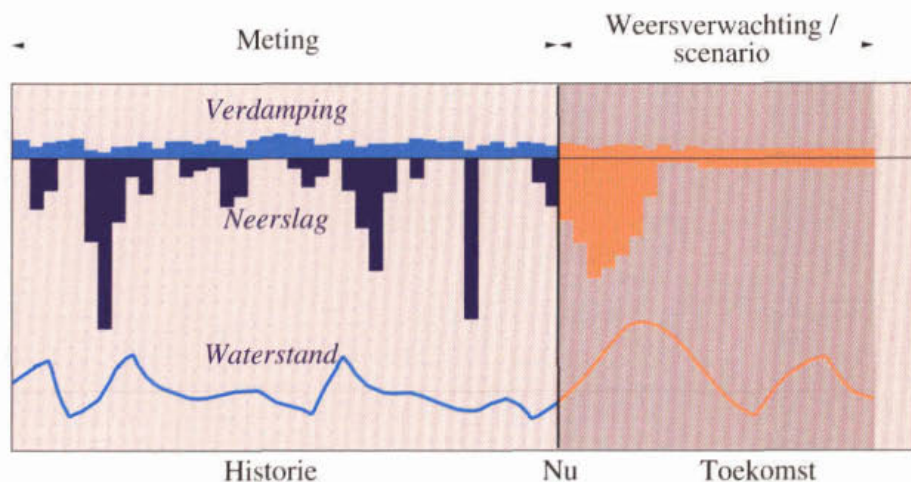
Over het algemeen zijn de behaalde rekentijden kort genoeg voor toepassing van de methode in de operationele praktijk en voor het uitvoeren van tijdreeksberekeningen over lange perioden.

4.4 Voorspellingsmodule

Bij langzaam reagerende watersystemen kan veelal worden gestuurd op grond van de actueel gemeten situatie in het watersysteem. In dat geval is geen voorspelling van de hydrologische belasting van het watersysteem nodig. Bij snel reagerende watersystemen kan deze noodzaak wel aanwezig zijn en daarom voorziet AQUARIUS in voorspelling van de hydrologische belasting van het watersysteem door middel van een voorspellingsmodule.

De nauwkeurigheid van de weersverwachting die door de meteorologische diensten beschikbaar worden gesteld, is nader onderzocht. Hieruit is onder meer gebleken dat op dit moment, extreme neerslag slecht kan worden voorspeld. Daarom is er een theorie ontwikkeld waarmee op grond van de beschikbare voorspellingen een sturing kan worden bepaald met het kleinste risico op ongewenste effecten, zoals onnodige overstromingen of riooloverstorten. Een eenvoudige toepassing van de theorie is opgenomen in de voorspellingsmodule van Aquarius.

Afbeelding 8 laat zien hoe, aan de hand van een bepaalde weersverwachting, de consequenties van een bepaalde sturingsstrategie zichtbaar kunnen worden gemaakt.



Afb. 8. De gemeten en verwachte systeemtoestand.

5 Praktijkstudies

5.1 Inleiding

Een belangrijk onderdeel van het onderzoek heeft zich gericht op de toetsing van dynamische sturing in de praktijksituatie. Daartoe is in eerste instantie een inventarisatie gemaakt van mogelijke studiegebieden in Nederland (STOWA-rapport 94-10). Uit de geïnventariseerde gebieden is een selectie van drie gemaakt.

De effectiviteit van dynamische sturing is getoetst voor de beheersgebieden van Delfland, De Drie Ambachten en Salland. Deze gebieden zijn gekozen vanwege de variatie in type watersysteem, bodemgebruik en beheerssysteem. In tabel 3 zijn de belangrijkste aandachtsvelden van de praktijkstudies weergegeven. Alleen de meest in het oog springende resultaten van de praktijkstudies worden hier gepresenteerd.

Er is voor een conceptuele benadering gekozen bij de uitvoering van de praktijkstudies. Dat heeft tot gevolg dat de praktijkgebieden niet tot in elk detail zijn onderzocht. Een voordeel van deze benadering is dat de verkregen resultaten niet specifiek voor deze gebieden zijn, maar een bredere geldigheid hebben.

Tabel 3. Aandachtsvelden van de praktijkstudies.

	Delfland	De Drie Ambachten	Salland
Landelijke deelsystemen	Ja	Ja	Ja
Stedelijke deelsystemen	Ja	-	-
Waterkwantiteitssturing			
• oppervlaktewater	Ja	Ja	Ja
• grondwater	-	-	Ja
Waterkwaliteitssturing	Ja	-	-

5.2 Delfland

Probleemformulering en doel

Het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Delfland heeft een oppervlakte van circa 40.000 ha en ligt in het zuidwesten van de provincie Zuid-Holland. Dit poldergebied heeft een zeer groot verhard oppervlak (35%) en een klein percentage oppervlaktewater (2%). Het merendeel van het verharde oppervlak wordt gevormd door bebouwing en kassen in glastuinbouwgebieden (Afb. 9).

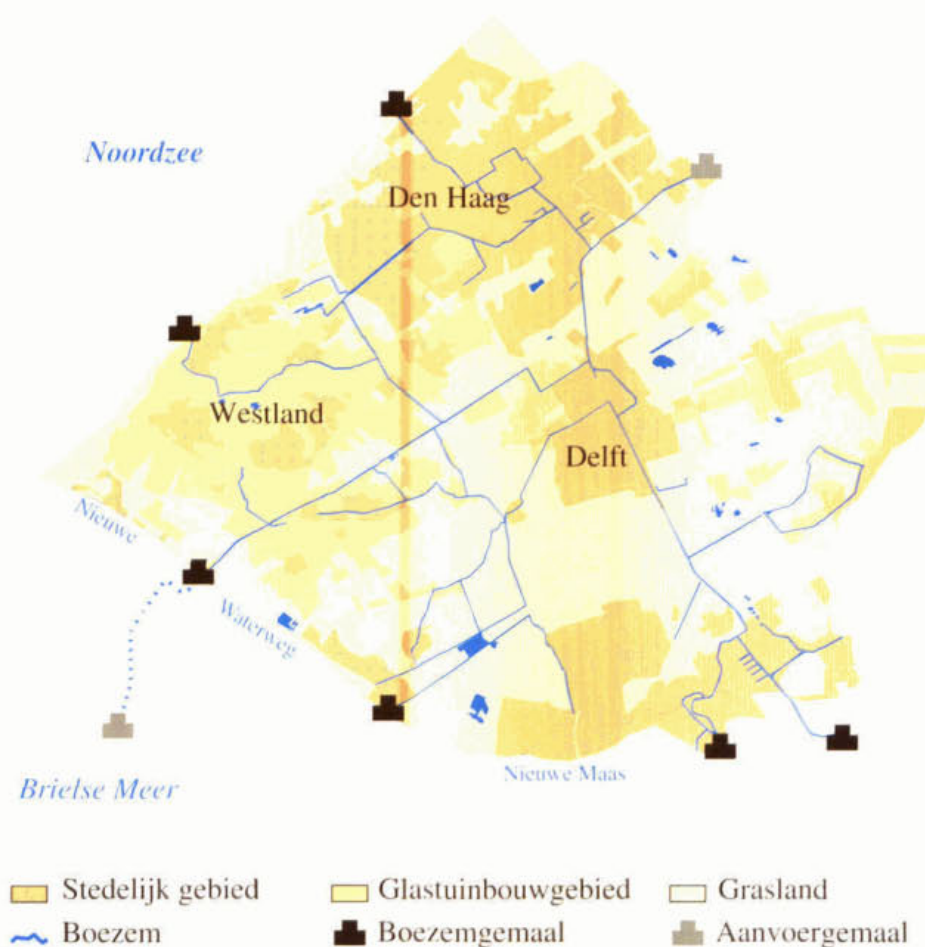
De neerslag komt zeer snel tot afvoer en in korte tijd kunnen grote waterstandsstijgingen optreden in de polder- en boezemwateren. De kwaliteit van het oppervlaktewater staat onder druk door zoute kwel, lozingen uit glastuinbouwgebieden en overstortingen uit rioolstelsels.

Daarom is het hoogheemraadschap genoodzaakt om de boezem- en polderwateren regelmatig door te spoelen. De doorspoeling, en daarmee de inlaat van gebiedsvreemd water, is op het moment slechts indirect gerelateerd aan de waterkwaliteit. Het hoogheemraadschap heeft zich echter tot doel gesteld om zo min mogelijk water in te laten.

In de toekomst zal het bodemgebruik in Delfland veranderen. Nog meer onverhard gebied zal plaats moeten maken voor verhard gebied. Als gevolg daarvan zal de oppervlaktewaterstand sneller en sterker fluctueren en wordt aanpassing van de capaciteit van de polder- en de boezemgemalen voorzien.

Nu al is de totale aanvoercapaciteit naar de boezem groter dan de afvoercapaciteit. Het gelijktijdig inschakelen van alle poldergemalen levert dan ook problemen op en tijdens extreem waterbezwaar kan de bemalingscapaciteit van de boezemgemalen te klein zijn om alle afvoer direct te verwerken. Daarbij komt dat de capaciteit van de boezemkanalen beperkt is en het maximale debiet niet zondermeer kan worden afgevoerd. Het vergroten van de bemalingscapaciteit is niet altijd een werkbare oplossing. Mede daarom heeft het hoogheemraadschap besloten om tijdelijke bergingsfaciliteiten, zoals bergboezems, te bouwen en de aanwezige polderwaterbergingen beter te benutten.

Het doel van de praktijkstudie was het bepalen of de problemen in het huidige en toekomstige waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer, kunnen worden opgelost met behulp van sturing van het watersysteem.



Afb. 9. Beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Delfland.

Aanpak

Overeenkomstig de ontwikkelde methodiek zijn doelen voor het waterbeheer geformuleerd en zijn de daaruit voortvloeiende eisen bepaald die aan het waterbeheer worden gesteld. De afweging van belangen die bij de dynamische sturing wordt gebruikt, is weergegeven in Afb. 5 (Pag. 13).

Om het watersysteem goed te kunnen modelleren, zijn eerst verschillende deelmodellen gemaakt van afzonderlijke polders. Daarmee is de techniek eerst op kleine schaal getoetst. Vervolgens is een groter en gedetailleerder model van het watersysteem gemaakt, waarbij is gelet op de nauwkeurige beschrijving van het waterafvoer- en aanvoerproces en de waterkwaliteitsontwikkeling voor chloride in het oppervlaktewater door middel van kalibratie en verificatie. Dit model is het "Delfland model" genoemd.

Analyse

Glastuinbouwpolder

De noodzaak van het doorspoelen van de polders is nader onderzocht. Hiervoor is een glastuinbouwpolder geselecteerd en gemodelleerd: De Woudse Droogmakerij. In die polder treedt in de zomer toename van het chloridegehalte van het oppervlaktewater op als gevolg van intensief oppervlaktewatergebruik en drainage van de ondergrond in glastuinbouwgebieden. Om te voorkomen dat het chloridegehalte boven de gestelde grenswaarde van 200 mg/l komt, wordt de polder op twee manieren doorgespoeld met boezemwater: via een vaste inlaat die continu open staat en via een gestuurde inlaat die door het hoogheemraadschap wordt bediend. Het poldergemaal wordt automatisch gestuurd.

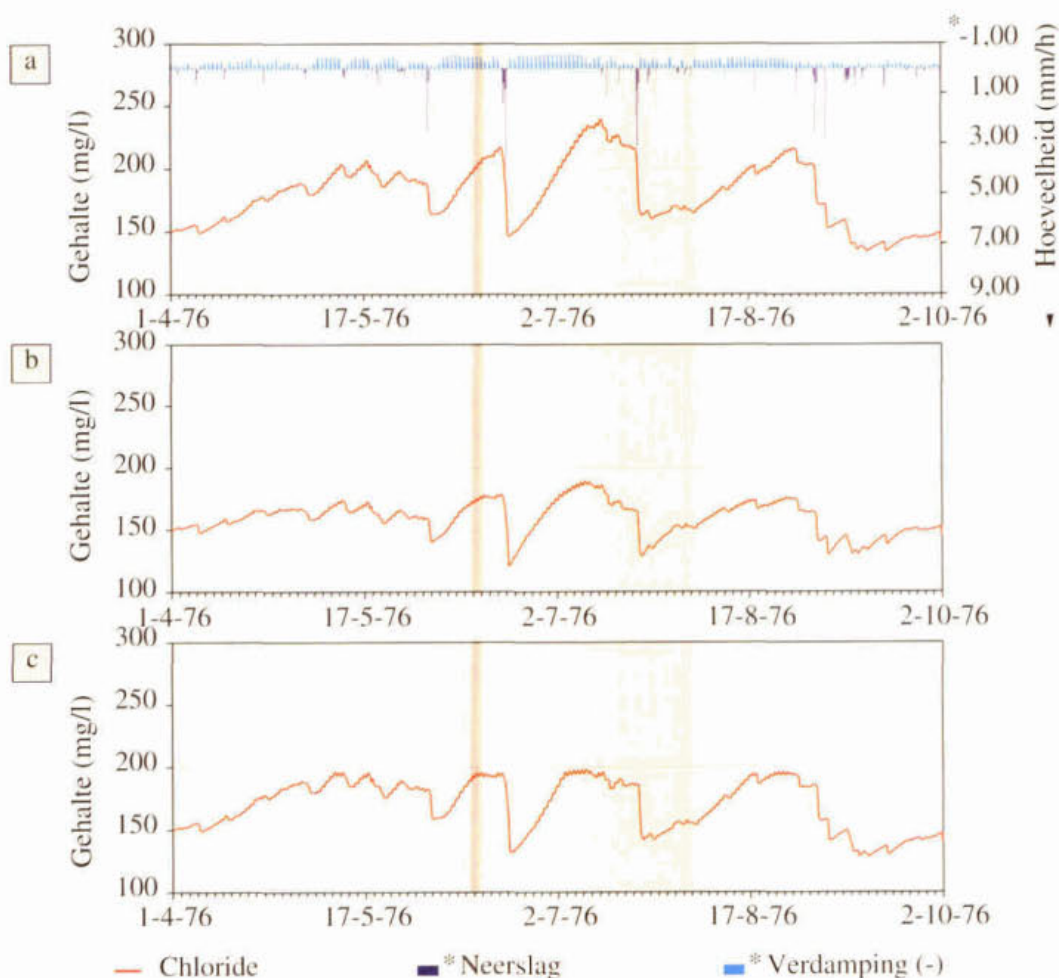
Drie alternatieve sturingsstrategieën zijn op hun consequenties voor het waterkwaliteitsbeheer geanalyseerd, waarbij de volgende situaties voor de gestuurde inlaat zijn onderzocht:

- a. inlaat de hele zomer gesloten;
- b. inlaat de hele zomer geopend;
- c. inlaat dynamisch gestuurd.

Voor de analyse van de ontwikkeling van het chloridegehalte is gebruik gemaakt van neerslag- en verdampingsgegevens van het KNMI van de zeer droge zomer van 1976. De resultaten van de tijdreeksberekeningen zijn gegeven in afbeeldingen 10 en 11.

Afbeelding 11a laat zien dat, ondanks de droogte, het poldergemaal geregeld in bedrijf is (blauwe staven), waaruit kan worden afgeleid dat de vaste inlaat meer water toevoert dan nodig zou zijn voor de handhaving van alleen de oppervlaktewaterstand. De conclusie is daarom dat het oppervlaktewatersysteem wordt doorgespoeld. Het chloridegehalte van het oppervlaktewater overschrijdt evenwel regelmatig de grenswaarde van 200 mg/l (rode lijn in Afb. 10a).

Het is normaal gesproken de praktijk om de gestuurde inlaten in droge zomers geopend te houden. In Afb. 10b is te zien dat in dat geval het chloridegehalte beneden de gestelde grenswaarde blijft. De doorspoeling van het oppervlaktewater is dan echter aanmerkelijk groter, wat kan worden afgeleid uit de hoge frequentie waarmee het poldergemaal in bedrijf is (Afb. 11b). Afbeeldingen 10c en 11c geven de situatie weer die ontstaat bij dynamische sturing op waterkwaliteit en waterkwaliteit. Alleen de inlaat is dynamisch gestuurd. Onnodig bedrijf van de regelbare kunstwerken wordt met dynamische sturing van de inlaat voorkomen. Dat resulteert in de aanvoer van boezemwater, uitsluitend wanneer het nodig is. In Afb. 6c (Pag. 14) is te zien

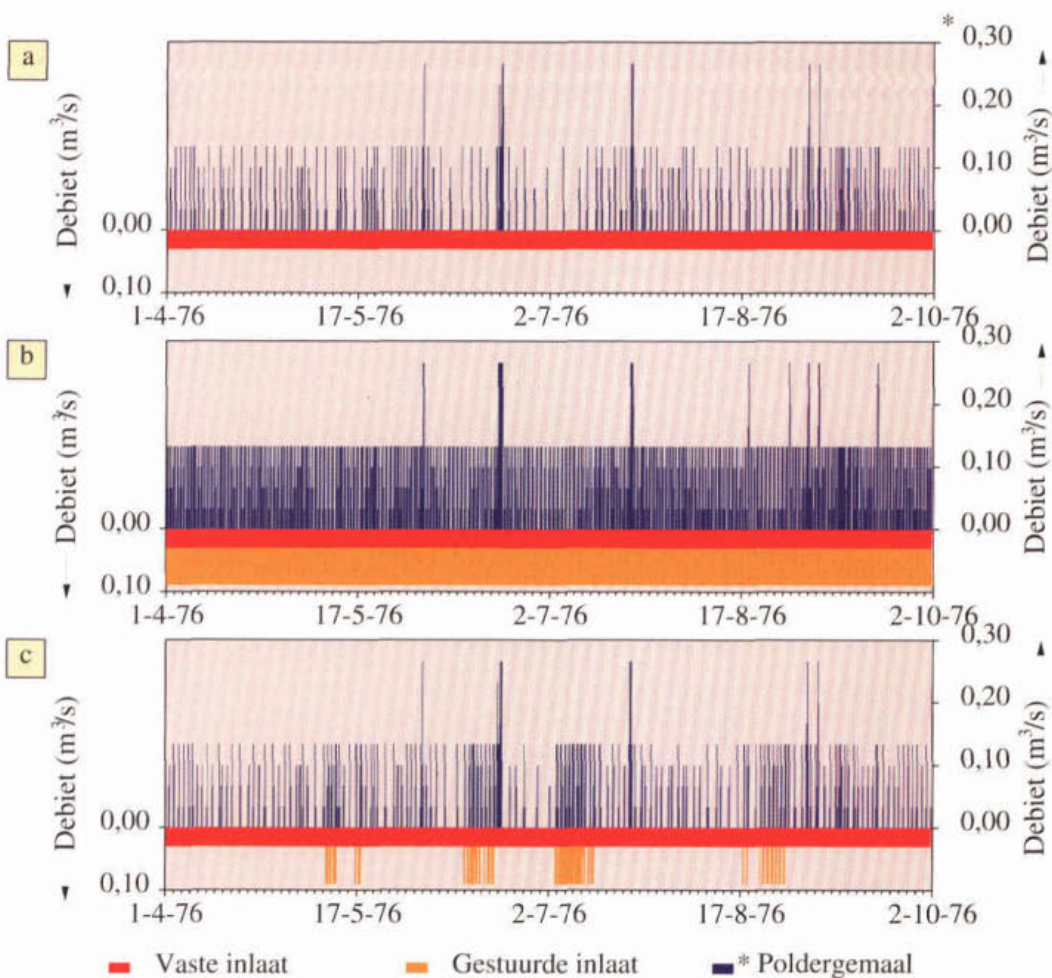


Afb. 10. Alternatieven voor beheersing van het chloridegehalte: gestuurde inlaat gesloten (a); gestuurde inlaat open (b, huidige situatie); inlaat open indien nodig (c, dynamische sturing).

dat de schadefunctie voor de glastuinbouwgebieden zodanig is dat schade optreedt als de grenswaarde van 200 mg/l voor chloride wordt overschreden. Als die situatie zich dreigt voor te doen, wordt de inlaat open gestuurd. Afbeelding 10c laat zien dat het chloridegehalte in dat geval voortdurend beneden de grenswaarde blijft.

Tabel 4. Doorspoeling van polderwater voor waterkwaliteitsbeheersing.

Situatie	Afvoer gemaal ($10^3 \text{ m}^3/\text{d}$)	Doorspoel- factor polders (d^{-1})
a. inlaat gesloten	2,1	0,04
b. inlaat open	7,3	0,16
c. inlaat open wanneer nodig	2,5	0,05



Afb. 11. Alternatieven voor beheersing van het chloridegehalte: gestuurde inlaat gesloten (a); gestuurde inlaat open (b, huidige situatie); inlaat open indien nodig (c, dynamische sturing).

De mate van doorspoelen van het polderwater wordt uitgedrukt in de *doorspoelfactor*. Deze factor geeft de fractie van het oppervlaktewater dat per dag wordt verversd voor waterkwaliteitsbeheersing.

In tabel 4 is te zien wat het resultaat van dynamische sturing (situatie c) is ten opzichte van de huidige praktijk (situatie b). De doorspoelfactor is met dynamische sturing teruggebracht van 0,16 per dag naar 0,05 per dag. De afvoer van het poldergemaal is met dynamische sturing in de berekende periode gereduceerd met 65% ten opzichte van de huidige praktijk. Dat betekent een aanmerkelijke reductie van het aantal bedrijfsuren en de daarmee gepaardgaande kosten.

Geheel Delfland

Het volledige Delfland model is gebruikt voor het analyseren van de huidige beheerssituatie en die van na de verwachte groei van het stedelijk gebied in tien jaar. De volgende situaties zijn doorgerekend:

- de huidige situatie met lokale sturing;
- de huidige situatie met dynamische sturing;
- de toekomstige situatie met lokale sturing;
- de toekomstige situatie met dynamische sturing.

Tabel 5 geeft de resultaten van tijdreeksberekeningen die zijn uitgevoerd met het Delfland model over een aaneengesloten periode van 30 jaar. De sturingsvormen lokale automatische sturing en dynamische sturing zijn onderzocht. Dynamische sturing van de polder- en boezemgemalen gaf in slechts 6.6% van de tijd andere sturingsstrategieën dan lokale automatische sturing.

Vanwege het feit dat er veel belangen in het watersysteem aanwezig zijn, is de *prestatie-index* gebruikt voor een vergelijking van de resultaten van de verschillende sturingsvormen en ontwikkelingssituaties in het gebied.

De prestatie-index wordt bepaald door deling van de totale schade, die tijdens de tijdreeksberekening in de referentiesituatie is geregistreerd, door de totale schade in een alternatieve situatie. Hoe hoger de prestatie-index, hoe beter aan de gestelde eisen is voldaan. In dit geval wordt de totale schade die optreedt in de situatie van lokale automatische sturing van de gemalen als referentie gebruikt en daarom is de prestatie-index van die situatie (a) gelijk aan één.

Uit de tabel valt af te lezen dat de prestaties van dynamische sturing met een index van 1,69 aanzienlijk beter zijn dan die van lokale sturing. De waarde betekent dat de totale schade die als gevolg van ongewenste systeemtoestanden optreedt bij dynamische sturing circa 40% lager is dan bij lokale sturing.

Voor de bepaling van de resultaten van dynamische sturing onder extreme omstandigheden, is bijgehouden hoe vaak en hoe lang ongewenste situaties zich voordeden. Specifiek is gekeken naar het optreden van het maalpeil in de boezem. Bij het bereiken van dat peil kan het hoogheemraadschap besluiten tot een maalstop voor poldergemalen. Overschrijding van het maalpeil is beschouwd als situatie van falen. Uit tabel 5 blijkt dat onder de huidige omstandigheden de frequentie van falen van de boezem 0,13 keer per jaar (a^{-1}) is en dat die frequentie bij dynamische sturing afneemt naar 0,03 per jaar. De duur van falen neemt ook af: van 1,27 naar 0,07 uur per jaar (h/a). Deze resultaten worden met dynamische sturing bereikt door het bijtijds inzetten van de boezem- en poldergemalen en het effectief verdelen van het teveel aan water over het watersysteem, zodanig dat de schade aan de aanwezige belangen voortdurend minimaal is.

Tabel 5. Resultaat van tijdreeksberekeningen voor het Delflandse watersysteem.

Sturing	Situatie	Prestatie-index (-)	Faalfrequentie boezem (a^{-1})	Faalduur boezem (h/a)	Doorspoel- factor polders (d^{-1})
a. Lokaal automatisch	huidig	1	0,13	1,27	0,043
b. Dynamisch	huidig	1,69	0,03	0,07	0,021
c. Lokaal automatisch	toekomst	0,87	0,30	1,33	0,043
d. Dynamisch	toekomst	1,38	0,03	0,07	0,021

Verder is de noodzakelijke doorspoeling van alle polders in het beheersgebied onderzocht. Bij het gebruik van dynamische sturing is de doorspoeling voor waterkwaliteitsbeheer ruim 50% lager dan bij lokale automatische sturing: 0,021 in plaats van 0,043 per dag.

De komende tien jaar zal in het Delflandse gebied het verharde oppervlak toenemen als gevolg van stedelijke uitbreiding. In tabel 5 is te zien hoe de prestaties van het watersysteem in die situatie zullen veranderen. Bij handhaven van de huidige infrastructuur en toepassing van lokale sturing zal de prestatie-index van het watersysteem dalen van 1 naar 0,87. In geval van dynamische sturing zal de prestatie-index dalen van 1,69 naar 1,38. Deze laatste waarde is nog altijd beter dan in de huidige situatie met lokale automatische sturing.

De duur van falen van de boezem zal door de uitbreiding van het verharde oppervlak niet noemenswaardig wijzigen. Het doorspoelen van de polders verandert niet.

Resultaten Delfland

Bij invoering van dynamische sturing kan het hoogheemraadschap zich uitbreiding van de capaciteit van de boezembemaling besparen en behoeven de toevoerkanalen naar de boezemgemalen geen grotere capaciteit.

De prestaties van het watersysteem nemen met toepassing van dynamische sturing ten opzichte van lokale automatische sturing toe, wat tot uitdrukking komt in een reductie van de frequentie van optreden van het maalpeil met 75%. De doorspoeling van de polders ten behoeve van de waterkwaliteitsbeheersing kan worden gereduceerd met 50%.

5.3 De Drie Ambachten

Probleemformulering en doel

Het beheersgebied van het Waterschap De Drie Ambachten ligt in Zeeuws-Vlaanderen. In deze praktijkstudie is aandacht besteed aan het watersysteem rondom de Braakmankreek in het westelijke deel van het beheersgebied (Afb. 12). Het overtollige water uit de omliggende gebieden wordt op deze kreek geloosd. Een aanzienlijk deel van dat water, circa 70%, is afkomstig vanuit België. De afvoer van de Braakmankreek vindt plaats via de Braakmansluis, die alleen gedurende voldoende laag tij op de Westerschelde kan afvoeren. Deze sluis is op afstand handmatig te openen en te sluiten.

De Braakmankreek heeft een belangrijke recreatieve functie. De recreatie langs de flauw hellende zandstranden is gebaat bij een zo constant mogelijke waterstand. De waterstand kan echter met 0,2 m per getijcyclus stijgen als gevolg van de afvoer van het Isabellagemaal dat op de grens tussen België en Nederland ligt en onder Belgisch beheer valt. Indien door langdurig hoge waterstanden op de Westerschelde de afvoer van de Braakmankreek is gestremd, kan de waterstand in de kreek aanzienlijk stijgen.

Het waterschap heeft zich voorgenomen om de Braakmansluis in de toekomst automatisch te gaan sturen, ter verbetering van het peilbeheer.

De praktijkstudie had tot doel vast te stellen hoe moderne sturingstechnieken kunnen helpen bij het verbeteren van het peilbeheer in de Braakmankreek, waarbij wordt uitgegaan van de huidige infrastructuur.

Aanpak

In lijn met de ontwikkelde methodiek zijn belangen en de daaruit voortvloeiende eisen geformuleerd. Het voorkomen van overstromingen en het handhaven van de door de recreatie gewenste waterstand, stellen de strengste eisen. Er is een model opgesteld van het gehele watersysteem rondom de Braakmankreek: het "Braakman model". Van het totale gemodelleerde gebied van 23.000 ha, ligt een aanzienlijk deel in België (18.000 ha). Het model is ge-kalibreerd met onder meer waterstandsmetingen van de Braakmankreek en de Westerschelde.

Eén van de essentiële onderdelen van dynamische sturing is dat er gekeken wordt naar de prestaties van een geheel watersysteem en niet alleen naar de afzonderlijke deelsystemen. Daarom is bij de uitgevoerde analyses ook aandacht besteed aan de invloed van de sturingen op het waterbeheer in het Belgische gebied.



Afb. 12. Beheersgebied van het Waterschap De Drie Ambachten.

Analyse

Voor een aantal kenmerkende perioden zijn met het Braakman model tijdreeksberekeningen uitgevoerd. Hierbij zijn verschillende combinaties van sturing met elkaar vergeleken (Tabel 6).

Tabel 6. Sturingssituaties voor het Braakman watersysteem en de berekende prestaties.

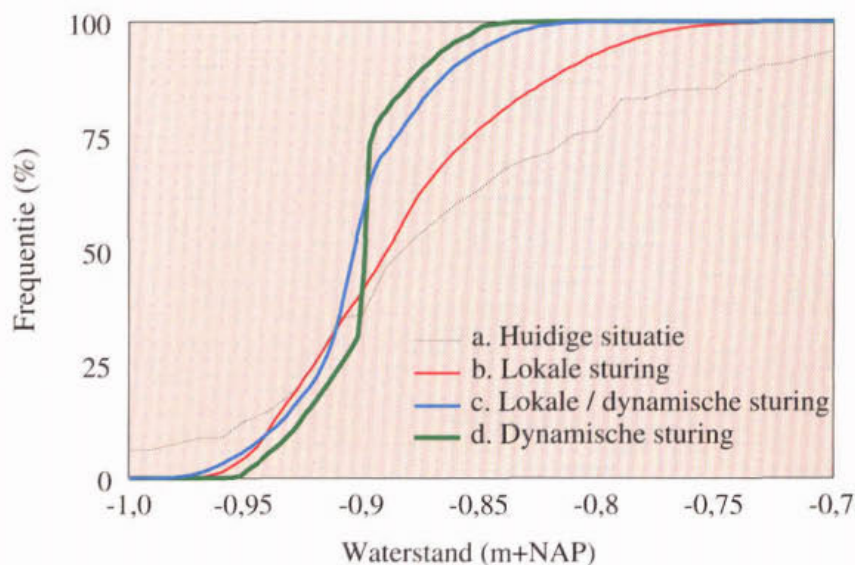
Sturing Isabellagemaal	Sturing Braakmansluis	Prestatie-index (-)
a. Lokaal automatisch	Handmatig	-
b. Lokaal automatisch	Lokaal automatisch	1
c. Lokaal automatisch	Dynamisch	1,84
d. Dynamisch	Dynamisch	2,75

In de huidige situatie (a) is het Isabellagemaal lokaal automatisch gestuurd en de Braakmansluis handbediend. Van die situatie zijn de beschikbare meetgegevens van het gemiddelde hydrologische jaar 1992 gebruikt. Voor analyse van de andere vormen van sturing (b, c en d) zijn tijdreeksberekeningen voor de natte winter van 1974/1975 gemaakt.

Afbeelding 13 geeft de frequentieverdelingen van de waterstand zoals met het model zijn bepaald. Uit de figuur kan worden afgeleid dat het streefpeil in de Braakmankreek, van NAP - 0,90 m, beter wordt gehandhaafd naar mate meer geavanceerde vormen van sturing worden gebruikt.

Het fenomeen dat zich bij dynamische sturing voordoet, is dat water via de sluis wordt gespuid, nog voordat de afvoer uit het watersysteem op gang is gekomen. Dit creëert een reserveberging die beschikbaar is om het waterbezwaar op te vangen in perioden dat niet kan worden geloosd. Dat vooraf spuien vindt alleen plaats indien neerslag ook werkelijk tot afvoer komt. Indien de grond droog is en de neerslag daarin kan worden opgenomen, wordt er niet vooraf gespuid.

De afvoer uit het watersysteem blijkt zo langzaam te zijn dat het gebruik van neerslagvoorspelling geen verbetering van de prestaties geeft. Speciale aandacht is geschonken aan het resultaat van dynamische sturing in het Belgische gebied. In dat deel van het watersysteem trad geen wijziging van de waterstandsfluctuatie op.



Afb. 13. Frequentieverdeling van de waterstand in de Braakmankreek bij verschillende vormen van sturing.

Resultaten De Drie Ambachten

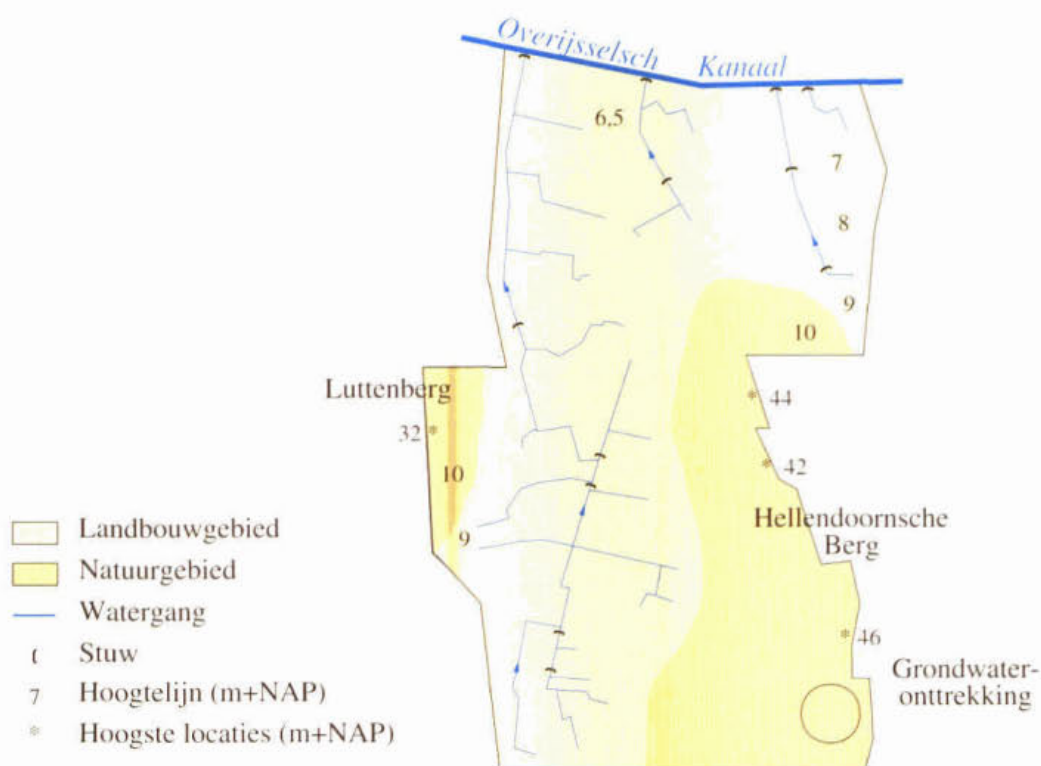
De belangen in het gebied rondom de Braakman Kreek kunnen beter worden behartigd met invoering van geavanceerde vormen van sturing. De grootste verbetering in het peilbeheer wordt verkregen door toepassing van dynamische sturing van de Braakmansluis en eventueel ook het Isabellagemaal dat water uit België aanvoert.

Het afvoersysteem reageert langzaam en daarom is met toepassing van dynamische sturing, ook zonder neerslagvoorspelling, voldoende tijd beschikbaar om op tijd de juiste hoeveelheden water uit de Braakmankreek af te voeren. Zodoende kan een nauwkeurige peilbeheersing worden bereikt.

5.4 Salland

Probleemformulering en doel

Binnen het beheersgebied van het Waterschap Groot Salland is het gebied Luttenberg gekozen voor nader onderzoek naar de mogelijkheden van sturing (Afb. 14). Het gebied Luttenberg, met een oppervlak van 3.700 ha, wordt begrensd door het Overijsselsch Kanaal, de Hellendoornsche Berg en de Luttenberg. Deze heuvels zijn begroeid met naaldbomen en enkele kleine loofboompopulaties. Het graslandgebied in het dal tussen de heuvels, dat voor de landbouw wordt gebruikt, daalt licht in de richting van het Overijsselsch Kanaal. De bodem van het gehele gebied bestaat tot op enkele tientallen meters diepte in hoofdzaak uit zand.



Afb. 14. Gebied Luttenberg (beheersgebied Groot Salland).

In het verleden zijn in het gebied Luttenberg intensieve drainagewerkzaamheden uitgevoerd en als gevolg daarvan daalde de grondwaterstand 0,5 tot 1 m en treedt nu verdroging op. In droge perioden lopen landbouwgewassen en natuur schade op. Het grondwater daalt in de zomer tot enkele meters beneden het maaiveld als gevolg van de grote drainagecapaciteit, de geringe aanvoer van grondwater, de sterke verdamping en wegzijging.

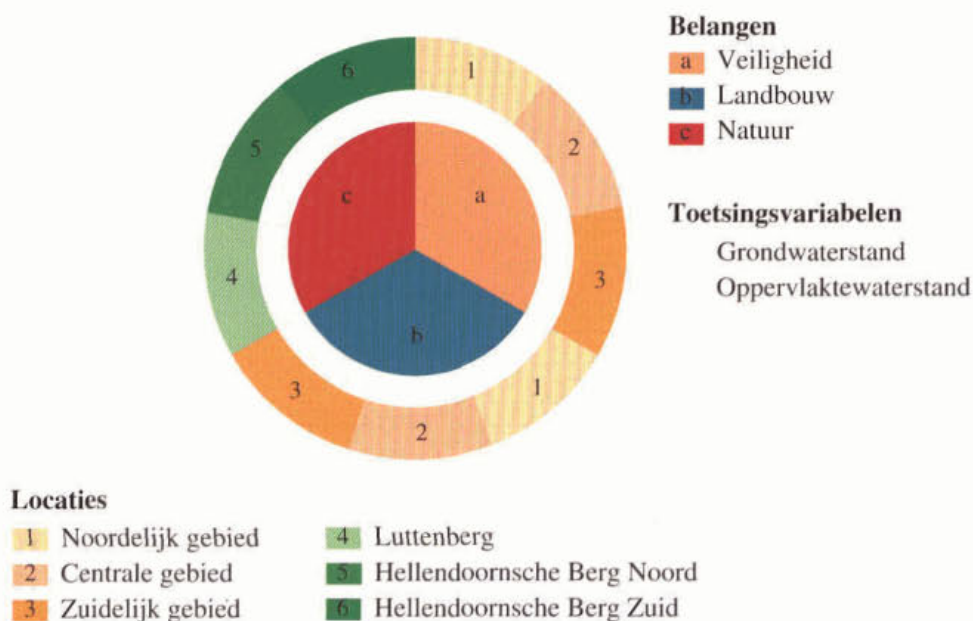
In de zomer wordt vooral grondwater voor de beregening gebruikt omdat de meeste watergangen dan droogvallen. Dit heeft een voortgaande daling van de grondwaterstand tot gevolg. Op de Hellendoornsche berg ligt de drinkwaterwinning Nijverdal die de verdrogingsproblemen nog versterkt.

Het waterschap is op diverse plaatsen binnen het beheersgebied bezig met het aanleggen van wateraanvoerwerken. Water wordt met kleine gemalen aangevoerd en naar de verdrogingsgevoelige plaatsen geleid via een stelsel van bestaande en nieuwe watergangen.

De praktijkstudie had tot doel vast te stellen of sturing van het watersysteem kan helpen bij het bestrijden van verdroging in hellende gebieden zoals dat van Salland.

Aanpak

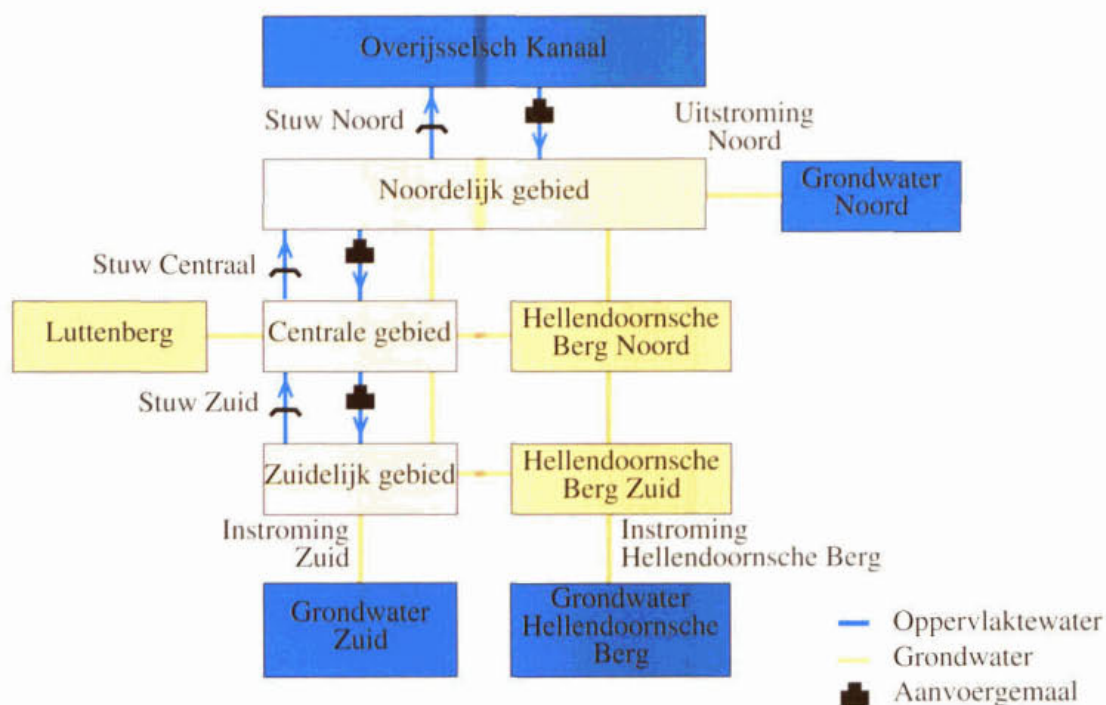
De volgende belangen dienen te worden behartigd in het gebied Luttenberg: veiligheid door middel van overstromingsbestrijding, landbouw en natuur. Het gebied heeft geen stedelijke kernen en daarom zijn aan het belang veiligheid minder strenge eisen gesteld dan gebruikelijk. Afbeelding 15 laat zien welke belangenverdeling is gekozen. Landbouwbelangen zijn gekoppeld aan het grondwater, maar ook aan het oppervlaktewater in het dal. De grondwaterstand bepaalt mede de vochtigheidsgraad in de grond en is daarom van belang voor de landbouw. In geval de grondwaterstand te ver daalt, is beregening nodig. Het water dat



Afb. 15. Belangenafweging voor het Luttenbergse watersysteem.

daarvoor nodig is, wordt verondersteld aan het oppervlaktewater te worden onttrokken. Natuurbelangen zijn uitsluitend gekoppeld aan de grondwaterstand aan de voet van de heuvels.

Er is een model opgesteld van het gebied Luttenberg, waarin het oppervlaktewatersysteem is gekoppeld aan een grofmazig grondwaternetwerk (Afb. 16). In het model zijn stuwen opgenomen voor de afvoer van overtollig water en kleine gemalen voor de aanvoer van bevoeiingswater.



Afb. 16. Schematische weergave van het Luttenbergse watersysteem met de geplande wateraanvoer.

Analyse

Gemiddelde situatie

Er zijn verschillende alternatieven opgesteld voor de sturing van het Luttenbergse watersysteem:

- de huidige situatie met alleen handbediende stuwen voor de afvoer van water;
- de situatie met lokale sturing van te bouwen aanvoergemalen;
- de situatie met dynamische sturing van aanvoergemalen en stuwen.

Tabel 7 geeft het resultaat van de tijdreeksberekeningen die zijn uitgevoerd voor een periode van 30 jaar. Uitgangspunt is de huidige situatie. De prestaties van het alternatief (b), met handbediende stuwen en lokaal automatisch gestuurde gemalen, blijken veel beter te zijn dan in de huidige situatie (prestatie-index 13,1). Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de continue beschikbaarheid van oppervlaktewater voor de landbouw in de zomer bij alternatief (b).

Alternatief (c) voegt aan dat resultaat toe dat de gewenste grondwaterstand beter kan worden gehandhaafd. De prestatie-index bij dynamische sturing van zowel stuwen als gemalen is dan ook het hoogst: 20,2.

Voor de alternatieven is bekeken in welke mate het systeem in staat is om water in het gebied vast te houden. Daartoe is gebruik gemaakt van de *conserveringsfactor*. De conserveringsfactor geeft de fractie van het water dat door de aanwezige belangen is gebruikt ten opzichte van de totale beschikbare hoeveelheid water. Hoe kleiner de conserveringsfactor, hoe meer water het systeem ongebruikt verlaat via wegzijging of afstroming.

Door de aanvoer van gebiedsvreemd water blijkt weliswaar continu water beschikbaar te zijn, maar er stroomt ook meer water het systeem uit naar omliggende gebieden via de stuwen en de grond. Deze verspilling van water blijkt met dynamische sturing van stuwen en gemalen minder groot te zijn dan met handbediende stuwen en lokaal automatisch gestuurde gemalen (0,66 ten opzichte van 0,60). Dit betekent dat bij dynamische sturing meer van het aangevoerde water ten goede komt van de landbouw en de natuur. In algemene zin kan echter worden geconcludeerd dat de situatie van waterconservering door toepassing van sturing niet echt verbetert.

De grondwatersituatie verbetert in geval van wateraanvoer wel aanmerkelijk. Alternatief (b) laat een grondwaterstandsstijging van 0,54 en 0,71 m zien voor het dal en de heuvels. Alternatief (c) voegt daar voor beide nog eens circa 0,15 m aan toe.

Tabel 7. Resultaat van tijdreeksberekeningen voor het Luttenbergse watersysteem.

Alternatief sturing	Prestatie-index (-)	Conserveringsfactor (-)	Grondwaterstijging dal ² (m)	Grondwaterstijging heuvels ² (m)
a. Stuwen Handmatig ¹ Gemalen -	1	0,67	-	-
b. Stuwen Handmatig ¹ Gemalen Lokaal automatisch	13,1	0,60	0,54	0,71
c. Stuwen Dynamisch Gemalen Dynamisch	20,2	0,66	0,70	0,86

¹ Bediening tweemaal per jaar

² Gemiddeld ten opzichte van alternatief (a)

Extreme situatie

Om de werking van dynamische sturing te demonstreren, zijn in Afb. 17 voor een korte, extreem natte periode, de resultaten van alternatief (b) en alternatief (c) gepresenteerd. Bij het voorbeeld moet in gedachten worden gehouden dat een relatief hoge grondwaterstand gewenst is, maar dat die situatie problematisch kan worden bij hevige neerslag.

Als eerste valt in Afb. 17 op dat de kruin van de stuw (rood) in de aanvangssituatie

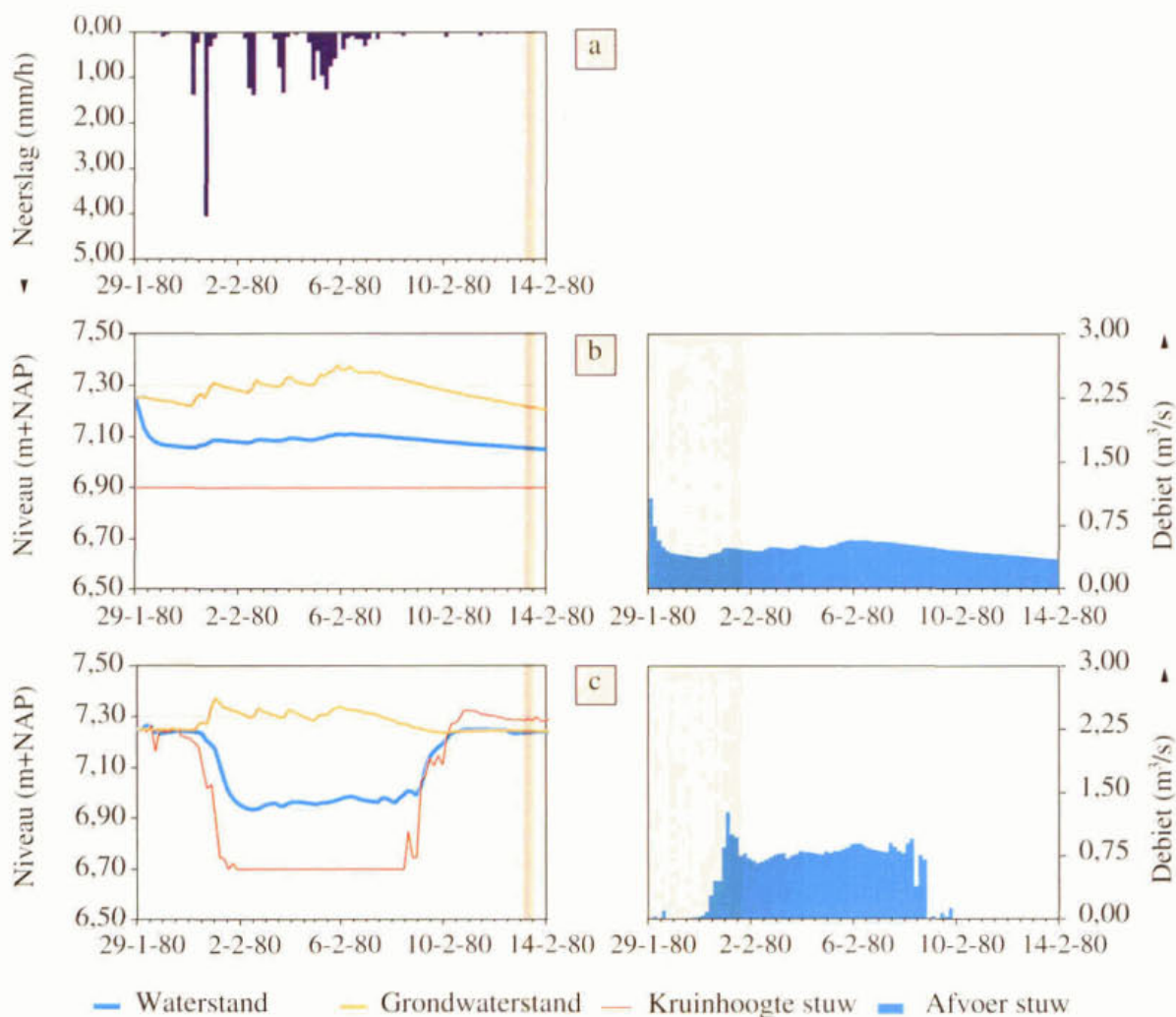
aanmerkelijk hoger is bij dynamische sturing dan bij lokale sturing (circa 0,35 m). Het resultaat is dat de oppervlaktewaterstand, en daarmee ook de grondwaterstand, hoger kan worden gehouden.

Bij alternatief (b) is de bovenstroomse waterstand continu hoger dan de kruin, waardoor er over de hele periode water uit het Centrale gebied stroomt. De grondwaterstand ligt regelmatig boven NAP + 7,30 m, wat de waarde is waarbij de gewassen vernattingsschade kunnen oplopen.

Daarop wordt in alternatief (c) ingespeeld. Zodra de grondwaterstand buiten het gewenste bereik komt, wordt de stuw naar beneden gestuurd, om afstroming uit het oppervlaktewater en de grond mogelijk te maken. Over een periode van drie dagen wordt de stuw circa 0,55 m neergelaten en tegelijkertijd daalt de oppervlaktewaterstand circa 0,2 m. Het resultaat is dat de grondwaterstand goed beheerst kan blijven.

Het voorbeeld met dynamische sturing laat zien dat, bij aanvang van de bui, het verschil tussen de grond- en de oppervlaktewaterstand geleidelijk oploopt. Die geleidelijkheid is van cruciaal belang om schade aan oevers te voorkomen.

Het staartverloop van grafiek (c) laat zien dat dynamische sturing in staat is om de grondwaterstand beter op peil te houden dan lokale sturing. In geval van lokale sturing (b) blijft de grondwaterstand dalen.



Afb. 17. Grondwater- en oppervlaktewaterbeheersing in het Centrale gebied van Luttенberg met lokale sturing (b) en dynamische sturing (c).

Resultaten Salland

Modelberekeningen van het Luttenbergse watersysteem tonen aan dat met wateraanvoer naar verdrogingsgevoelige gebieden, beter kan worden voldaan aan de eisen die worden gesteld door de belangen landbouw en natuur. De grondwaterstand kan door wateraanvoer aanzienlijk stijgen en in de buurt komen van het niveau van voor de aanleg van drainage in het hellende gebied.

Dynamische automatische sturing maakt het mogelijk om een gemiddeld hogere grondwaterstand te handhaven dan lokale automatische sturing. Wel dienen in dat geval regelbare stuwen in het gebied aanwezig te zijn die in geval van hevige neerslag, als het nodig is, tijds kunnen afvoeren.

5.5 Conclusies

Voor zowel vlakke als hellende gebieden blijken met dynamische sturing aanzienlijke verbeteringen in het operationele beheer te kunnen worden bereikt. In vlakke watersystemen zijn veelal de beste omstandigheden voor sturing aanwezig en daarom kunnen daar de hoogste prestaties worden behaald. In hellende gebieden kan, door de veelal zandige ondergrond, de afvoer via het grondwater soms zo groot zijn dat waterlopen droogvallen. De huidige praktijk is dat in hellende gebieden de mogelijkheden tot sturing van het watersysteem vaak beperkt zijn. Deze situatie verandert als de waterbeheersing in deze gebieden wordt aangepast aan de waterbehoefte, wat kan betekenen dat water moet worden aangevoerd.

Verder is in de praktijkstudies nagegaan hoe wordt gereageerd in situaties van extreme hydrologische belasting, zoals extreme neerslag of extreme droogte. In algemene zin kan worden geconcludeerd dat in dynamisch gestuurde watersystemen beter gebruik wordt gemaakt van de aanwezige systeemcapaciteit, zoals de berging in het oppervlaktewater, de berging in het grondwater, de berging in riolering en de bemalings- of inlaatcapaciteit. Een nauwkeurige voorspelling van de hydrologische belasting is daarbij lang niet altijd nodig. Met name in langzaam afvoerende systemen kan een dergelijke voorspelling soms geheel achterwege blijven.

Op grond van de uitgevoerde analyses met dynamische sturing kan worden geconcludeerd dat met deze vorm van sturing beter kan worden voldaan aan de eisen die tegenwoordig aan het waterbeheer worden gesteld. Door de flexibiliteit die het gevolg is van dynamische sturing, komt daarnaast veelal systeemcapaciteit vrij. Met die beschikbare capaciteit kan in sommige gevallen de geplande uitbreiding van het watersysteem worden opgevangen, zonder infrastructuurle aanpassingen of vergroting van de aanwezige kunstwerken voor de waterbeheersing. Wel dient ten behoeve van dynamische sturing op een centrale locatie een real-time uitvoering van het BOS operationeel te zijn, dat wordt gevoed met meetgegevens over waterkwantiteit en waterkwaliteit. De sturingsstrategieën die met dynamische sturing zijn bepaald, kunnen zowel handmatig als automatisch worden ingezet.

6 Ontwerpen met dynamica

6.1 Achtergrond

Moderne methoden voor het ontwerpen van watersystemen houden rekening met de ruimtelijke inrichting van die systemen. Daarmee kunnen onnodige reserves worden voorkomen en eventueel gewenste reserves op bekende plaatsen in het ontwerp worden toegevoegd.

Bij een modern ontwerp wordt ook rekening gehouden met de wijze waarop het systeem wordt gestuurd. Op die manier kunnen de voordelen van geavanceerde vormen van sturing op betrouwbare wijze worden meegenomen. Dit in tegenstelling tot traditionele ontwerpmethoden die louter zijn gebaseerd op statische capaciteitsrichtlijnen.

In het project is een ontwerpmethode ontwikkeld die wordt aangeduid met *dynamische ontwerpprocedure*. Dat geeft aan dat het ontwerpen niet statisch is maar dat rekening wordt gehouden met de dynamica van het watersysteem, van de belasting van dat systeem en van de gestelde eisen.

De dynamische ontwerpprocedure werkt op grond van verificatie van de prestaties van een watersysteem. De kwaliteit van een ontwerp wordt aan de hand van tijdreeksberekeningen bepaald door het vaststellen van de *faalfrequentie* en de *faalduur* van het watersysteem. Hierbij is falen gedefinieerd als de situatie die zich voordoet indien niet kan worden voldaan aan één of meer van de eisen die worden gesteld door de onderkende belangen.

6.2 Zes stappen

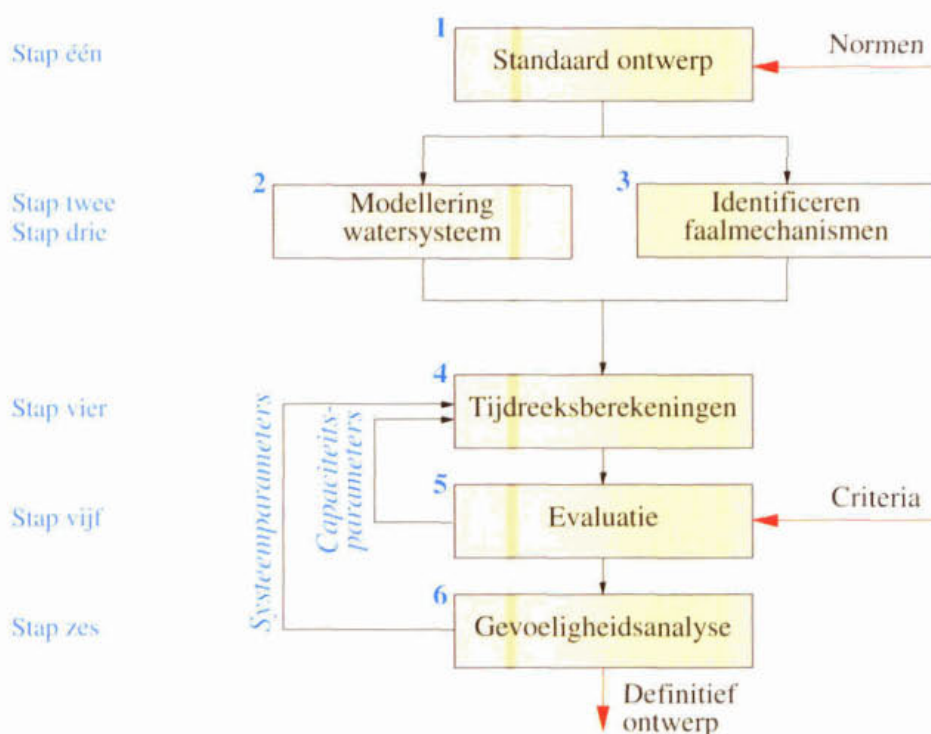
In de dynamische ontwerpprocedure worden de zes stappen van Afb. 18 onderscheiden.

Stap één

Als eerste wordt een standaard ontwerp gemaakt met behulp van een traditionele ontwerpmethode. Dit ontwerp wordt als basis gebruikt voor de procedure. De globale inrichting van het te ontwerpen watersysteem dient te worden bepaald en de verwachte ontwikkelingen in het systeem en daarbuiten moeten worden vastgelegd. Daarnaast dienen de belangen in het watersysteem te worden geïdentificeerd met de daarbij behorende situaties van falen, zoals het optreden van extreme waterstanden en ongewenste concentraties van verontreinigingen. Bij deze situaties worden de kritische frequentie en duur van optreden vastgesteld. Bijvoorbeeld overstroming met een kritische frequentie van 0,1 maal per jaar en een kritische duur van 100 uur per gebeurtenis. Op grond van deze criteria wordt in stap vijf van de ontwerpprocedure geëvalueerd of het ontworpen watersysteem voldoet.

Stap twee

Als tweede stap wordt een deterministisch model van het watersysteem gemaakt, waarbij de gemodelleerde dimensies nauw aansluiten bij de configuratie zoals deze in de praktijk zal worden gerealiseerd. Het model dient te worden gekalibreerd. Dit is alleen mogelijk als er sprake is van een beperkte aanpassing in een bestaand watersysteem. In andere gevallen dienen de modelparameters te worden gebaseerd op andere, vergelijkbare watersystemen. De



Afb. 18. De dynamische ontwerpprocedure.

onderdelen van het watersysteem die het gedrag van falen bepalen, moeten nauwkeurig worden gemodelleerd. Daarom is er in deze ontwerpstep een interactie met de parallelle stap drie, waarin de faalmechanismen in het watersysteem worden onderkend. Bij het modelleren van de sturing van het watersysteem en de alternatieven die daarin kunnen worden onderkend, moet rekening worden gehouden met het veilig omschakelen van geavanceerde vormen van sturing naar eenvoudiger vormen van sturing, zoals de overschakeling van centrale sturing naar lokale sturing. Onderdeel van de tweede ontwerpstep vormt verder het bepalen van de gevoeligheid van het model voor de gekozen modelparameters. Parameters die een sterke invloed hebben op de prestaties van het watersysteem worden vastgelegd voor nadere analyse in stap zes.

Stap drie

Deze ontwerpstep bestaat uit het identificeren van mogelijke faalmechanismen in het gehele watersysteem, met inbegrip van regelbare kunstwerken, computersystemen, communicatie, etc. De mogelijke operationele situaties in het watersysteem dienen zorgvuldig te worden bepaald. Daaronder vallen: standaard bedrijf, bedrijf tijdens onderhoud en bedrijf bij storing. De faalmechanismen en de daarbij nog mogelijke vormen van sturing, worden ingedeeld in scenario's die worden gebruikt in de tijdreeksberekeningen van de vierde ontwerpstep.

Stap vier

In deze stap worden tijdreeksberekeningen voor lange perioden uitgevoerd, ten behoeve van het verkrijgen van betrouwbare statistische informatie over de prestaties van het watersysteem. Hiervoor worden hydrologische gegevens gebruikt, zoals de neerslag en de verdamping, over een periode van bijvoorbeeld 30 jaar of zelfs langer. Voor de verschillende scenario's die zich kunnen voordoen, wordt het watersysteem doorgerekend en worden de prestaties bepaald. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat als het systeem bijvoorbeeld driemaal faalt in een periode van 30 jaar, de faalfrequentie 0,1 maal per jaar is.

Stap vijf

In de evaluatiestap worden de berekeningsresultaten verwerkt en worden de verwachte faalfrequentie en faalduur van het watersysteem bepaald. In die verwachte frequentie en duur wordt de kans op het optreden van de verschillende operationele situaties betrokken.

Het ontwerp kan worden geëvalueerd aan de hand van verschillende criteria die betrekking kunnen hebben op bijvoorbeeld grondwaterstanden, oppervlaktewaterstanden en waterkwaliteit.

De uitkomst van de evaluatiestap is een reeks met frequentie en duur van falen van het watersysteem voor iedere eis die aan het watersysteem is gesteld. Zolang de verwachte frequentie en duur niet op of beneden de kritische frequentie en duur liggen, dient het ontwerp te worden aangepast en moeten de stappen vier en vijf opnieuw worden doorlopen.

Stap zes

In deze laatste stap van de ontwerpprocedure worden de systeemparameters waarvoor het ontwerp gevoelig is gebleken in stap twee, nader geanalyseerd. De gevoeligheid van het ontwerp voor aannames wordt getoetst en, indien nodig, worden de stappen vier en vijf nogmaals doorlopen.

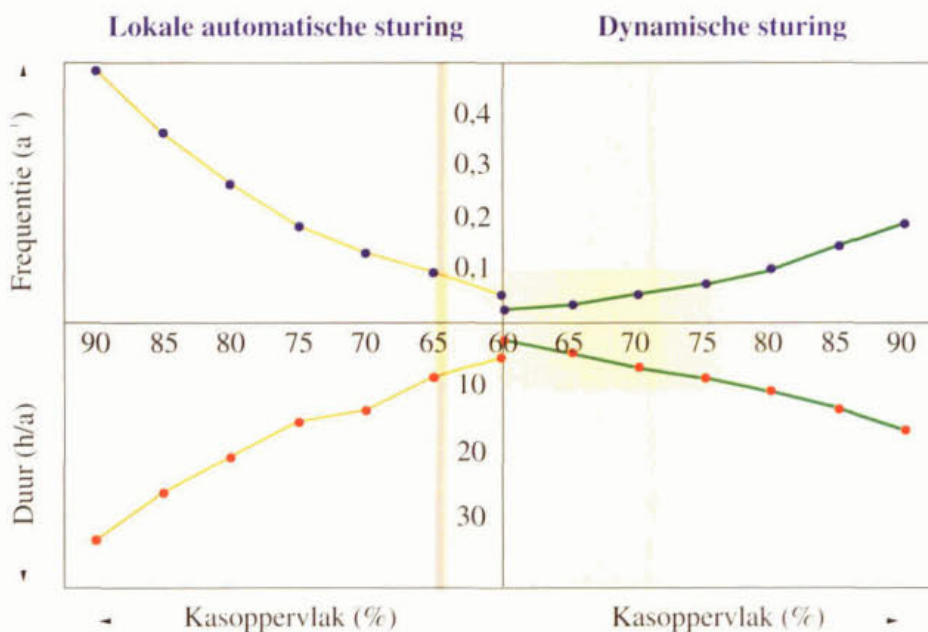
Als dat door de ontwerper nodig wordt gevonden, kunnen reserves in het ontwerp worden ingebouwd. Op die wijze wordt rekening gehouden met de onbekendheid van bepaalde systeemparameters. Als alle stappen zijn doorlopen en aan alle criteria is voldaan, is het ontwerp gereed.

6.3 Ontwerpvoorbeeld

Afbeelding 19 geeft een voorbeeld van het resultaat van de dynamische ontwerpprocedure, toegepast op een glastuinbouwpolder in Delfland. In het ontwerp van de betreffende polder stond de vraag van de toegestane uitbreiding van het kasoppervlak centraal. In de uitgangssituatie bedraagt het kasoppervlak 60% van het totale oppervlak.

In de gevolgde procedure is uitgegaan van een standaard ontwerp van de polder en is gekeken hoe ver het kasoppervlak kan worden vergroot, tot dat niet meer aan de eis van het veiligheidsbelang wordt voldaan; in dit geval overstromingsbestrijding. De kritische frequentie voor overstroming is bij dit belang gesteld op 0,1 per jaar (a^{-1}).

In het gedeelte van de grafiek links boven, kan worden afgelezen dat met de huidige inrichting en capaciteiten in het watersysteem, het kasoppervlak kan groeien van 60 naar 66%, als de poldergemalen lokaal automatisch worden gestuurd. Een groei naar 80% kan worden toegelaten indien de poldergemalen dynamisch worden gestuurd. Overigens ligt in dat geval de faalduur wel hoger dan bij toepassing van lokale sturing: 10 in plaats van 9 uur per jaar (h/a). In overeenstemming met de dynamische ontwerpprocedure is bij het verkrijgen van deze uitkomsten rekening gehouden met de kans op falen van verschillende onderdelen van het sturingssysteem, zoals storing van pompen, dichtslaan van het krooshek bij het gemaal en uitvallen van de communicatie tussen de centrale en de lokale besturingssystemen.



Afb. 19. Faalfrequentie en faalduur als functie van de sturingsvorm en het kasoppervlak in een glastuinbouwpolder.

6.4 Conclusies

In het bovenstaande, eenvoudige voorbeeld is vastgesteld dat het dynamisch gestuurde watersysteem een aanzienlijk kosten-effectiever ontwerp toelaat, waarin veel meer van de reservecapaciteit in het watersysteem wordt benut dan met lokale automatische sturing. Daarom is de conclusie gerechtvaardigd dat er bij het ontwerp van een watersysteem uit economisch oogpunt rekening moet worden gehouden met de toegepaste sturingstechniek. De dynamische ontwerpprocedure laat de veiligheden die in het watersysteem aanwezig zijn duidelijk zien. Onnodige capaciteiten voor bijvoorbeeld het oppervlaktewater of de bemaling, kunnen worden voorkomen. Reserves kunnen evenwel in het ontwerp worden toegevoegd op plaatsen waar de waterbeheerder dat wenst.

7 Resumé

Bij de inrichting en het beheer van de hedendaagse watersystemen speelt een groeiend aantal belangen een rol. Deze belangen stellen alle hun specifieke eisen aan het watersysteem. Waterbeheerders staan voor een complex beheerstechnisch probleem als ze aan al deze eisen moeten voldoen. Niet in de laatste plaats omdat watersystemen zich vaak over de beheersgrenzen heen uitstrekken.

In het project is een methodiek ontwikkeld om de regionale waterbeheerders te assisteren bij het ontwerp en het beheer van hun watersysteem. De methode van dynamische sturing is daartoe uitgewerkt in een beslissingsondersteunend systeem met de naam AQUARIUS. Met dynamische sturing wordt het watersysteem op de meest effectieve manier gestuurd en worden optimale condities geschapen voor de individuele belangen, maar ook voor het watersysteem als geheel.

Dynamische sturing resulteert in efficiënt beheer van watersystemen, omdat alle beschikbare capaciteiten die aanwezig zijn volledig kunnen worden benut.

De traditionele manier waarmee ingespeeld wordt op nieuwe eisen, is het vergroten of bijbouwen van infrastructuur voor de waterbeheersing. Dynamische sturing laat zien dat dit vaak niet nodig is en dat de bijbehorende grote investeringen achterwege kunnen blijven. Toepassing van dynamische sturing kan daarom aanzienlijke besparingen opleveren voor waterbeheerders.

De ontwikkelde methodiek kan voor analysedoeleinden worden gebruikt en voor ondersteuning van de dagelijkse beheerspraktijk. Wanneer de toepassing van dynamische sturing wordt meegenomen in de ontwerpfase van een watersysteem, kan een zeer efficiënte inrichting worden verkregen, waarbij de aanwezige capaciteiten in het watersysteem ten volle worden benut.

