

# Afstudeeronderzoek

## *De potentie van de meet- en regeltechniek op de rivier de Linge*

Jan Willem Bronkhorst  
Technische Universiteit Delft  
C1091395



## Colofon

### Afstudeerder

J.W. Bronkhorst, BSc.  
Stud.nr.: 1091395

Nieuwe Walsteeg 8A  
4201 JH Gorinchem

E-mail: [J.W.Bronkhorst@live.com]  
Telefoon: 06 - 42 24 07 96

### Afstudeercommissie

Prof. Dr. Ir. N.C. van de Giesen  
Faculteit CiTG, Afdeling Watermanagement  
E-mail: [N.C.vandeGiesen@tudelft.nl]

Dr. Ir. P.J.A.T.M. van Overloop  
Faculteit CiTG, Afdeling Watermanagement  
E-mail: [P.J.A.T.M.vanOverloop@tudelft.nl]

Dr. Ir. M.W. Ertsen  
Faculteit CiTG, Afdeling Watermanagement  
E-mail: [M.W.Ertsen@tudelft.nl]

Dr. R.R. Negenborn  
Faculteit 3ME, afdeling Delft Center for Systems and Control  
E-mail: [R.R.Negenborn@tudelft.nl]

### Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Afdeling Watermanagement, sectie Waterhuishouding  
Stevinweg 1  
2628 CN Delft  
Tel: +31 (0)15 2781646

### Waterschap Rivierenland

Gé van de Eertwegh  
Afdeling Water, teamleider Wateradvies  
Website: [www.wsrl.nl]

## Voorwoord

Met dit rapport besluit ik mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het voltooien van de studie heeft nogal wat voeten in de aarde gehad. Vanuit dit oogpunt klopt het credo van mijn voetbalteam zeer goed:

*"Het waren moeilijke jaren, maar het waren mooie jaren"*

Maar het resultaat mag er zijn. De graad "Master of Science" is er één om trots op te zijn. Deze graad had ik niet kunnen halen zonder een aantal mensen, die ik bij deze graag wil bedanken voor hun bijdrage.

Allereerst wil ik Peter-Jules bedanken voor de begeleiding van het afstudeerproject. De sparringssessies waren erg nuttig, net als de werksessies in Zeeland. Maar bovenal de ontspannen omgang en het vertrouwen in de goede afloop waren erg belangrijk.

In de aanloop naar het afstuderen heb ik ook veel gehad aan de adviezen van Maurits Ertsen. De discussies over het onderwijs waren altijd goed. En ik ben hem dankbaar voor het begeleiden van mijn stage en het project in Vietnam, ook al kwam mijn vraag daarvoor soms erg kort dag.

Bij het Waterschap wil ik Vincent Struik en Daan Quint bedanken voor hun input voor de modellering en praktijkkennis voor het staven van de uitkomsten. Ook Gé van den Eertwegh wil ik bedanken voor het mogelijk maken van de samenwerking met het waterschap en zijn feedback op het afstudeerrapport.

Daarnaast wil ik mijn ouders, broers en zusje, mijn vriendin Sanne, mijn goede vrienden Niels, Kim en Lonneke, familie en vakgenoten Saskia en Marcel, de mede afstudeerders, maar ook de vele anderen bedanken voor het geduld en het motiveren tijdens deze lange weg. Zij hebben nooit getwijfeld aan de goede afloop.

Bedankt!

Delft, april 2010.

## Samenvatting

Watersystemen hebben een veelheid aan functies, waarvoor verschillende eisen worden gesteld aan stromingscondities en hoeveelheden in plaats en tijd. Om dit te bewerkstelligen worden watersystemen gestuurd.

Waterschap Rivierenland is geïnteresseerd in nieuwe vormen van sturing op de rivier de Linge, zodat nu en in de toekomst aan alle eisen die aan het systeem worden gesteld kan worden voldaan.

De meet- en regeltechniek is het aangewezen instrument om tot deze verbeteringen te komen. De hoofdvraag is dan ook op welke wijze de meet- en regeltechniek ingezet moet worden om tot beter waterbeheer te komen. Beter waterbeheer wordt hier gedefinieerd als minder peilfluctuaties en sneller herstel van het watersysteem na extremen. Tevens moet de meet- en regeltechniek de aansturing transparanter maken en eenvoudiger aan te passen.

In een digitale omgeving wordt het watersysteem van de Linge getest met verschillende door middel van de meet- en regeltechniek tot stand gekomen regelingen. Deze regelingen maken in toenemende mate gebruik van informatie. Tevens worden de verschillen tussen lokale en centrale sturing bekeken.

Het ontwerp van de regelingen gebeurt op basis van de meet- en regeltechniek. Hiervoor zijn de basisprincipes van meet- en regeltechniek, de sturingslus en de daarin voorkomende parameters, geïntroduceerd. Deze principes gelden voor iedere lokale regelaar. Tevens is er ingegaan op systemen met meerdere regelaars en de interactie tussen regelaars.

Als afsluiting van de theorie van de meet- en regeltechniek zijn waterbeheerspecifieke toepassingen en modellen gepresenteerd. Dit is de vertaling van de algemeen geldende principes naar voor het waterbeheer bruikbare methodes voor het ontwerpen van regelaars.

Het studiegebied waarin de regelaars worden getest is het stroomgebied van de Linge. De Linge is een middelgrote rivier centraal in Nederland. De waterstanden in de rivier worden actief beheerd middels onder andere 13 regelbare stuwen en 3 regelbare gemalen. Voor deze kunstwerken zijn de regelaars ontworpen.

Van het Lingesysteem is een hydrologisch - hydraulisch model voor handen dat de belangrijkste karakteristieken van het stroomgebied goed beschrijft. Tevens zijn in het model alle functionaliteiten aanwezig om de verschillende type regelingen voor de kunstwerken te testen. Het model doet daarom dienst als testomgeving voor de verschillende regelingen.

In een gekoppelde module aan het model zijn een zevental regelingen geprogrammeerd. Ter vergelijking is eerst de huidige regeling zo goed mogelijk nagebouwd in de modelomgeving en getest. Na deze test zijn de overige zes regelingen geprogrammeerd en in het modelinstrumentarium doorgerekend.

Vervolgens is er een variant op deze regeling gemaakt, de pandgemiddelde regeling. De derde regeling is net als de huidige regeling gebaseerd op lokale bovenstroomse

sturing, maar dan geprogrammeerd volgens de meet- en regeltechniek. Alle hiervoor benodigde geometrische parameters zijn uit het model onttrokken of door veldonderzoek achterhaald. Daarna is de stap naar een centrale regeling gemaakt, eveneens door toepassing van uit de meet- en regeltechniek bekende regels. Omdat de centrale regeling werkt volgens een ander principe, moeten de gemaalregelingen hierop worden aangepast. De centrale regeling is uitgebreid met een anticiperende gemaalmodule, die is getest in de laatste drie scenario's.

De resultaten van de simulaties zijn op basis van de voor dit onderzoek belangrijke punten kwalitatief geïnterpreteerd. Uit de resultaten blijkt eveneens dat het systeem een aantal knelpunten bevat die de regelbaarheid van het systeem belemmeren, waardoor de resultaten minder verschillen dan gehoopt.

De huidige regeling blijkt in vergelijking met de nieuw ontworpen regelingen goed te presteren, maar is niet aan te passen bij wijzigende sturingsdoelen of omstandigheden. De pandgemiddelde regeling geeft geen significante verbetering, terwijl daar wel een investering voor nodig is. Dit in tegenstelling tot de gedecentraliseerde regeling, die zonder excessieve kosten wel verbeteringen geeft en ook nog eens bruikbaar blijft bij systeemwijzigingen. De beste resultaten worden gehaald met de centrale regeling, zeker wanneer deze wordt uitgebreid met een vernieuwde gemaalregeling met anticiperende module. Er wordt dan ook geadviseerd om deze regeling toe te passen.

# Inhoudsopgave

<i>Hoofdstuk 1 – Introductie</i>	<i>1</i>
Inleiding	2
Aanleiding	2
Probleemstelling en doelstelling	2
Werkwijze	3
Leeswijzer	4
<i>Hoofdstuk 2 - De theorie van de meet- en regeltechniek</i>	<i>5</i>
Inleiding	6
Basisprincipes van sturing	6
Het sturingsblok	10
Systemen met meerdere regelaars	11
Meet- en regeltechniek in het waterbeheer	13
<i>Hoofdstuk 3 - De Linge</i>	<i>20</i>
Inleiding	21
Omschrijving van het studiegebied	21
Panden en stuwen	24
Toegepaste sturing	27
Modellering van het systeem	29
<i>Hoofdstuk 4 - Control Scenario's</i>	<i>33</i>
Inleiding	34
Het instrumentarium	34
Case 1 – Huidige sturing	36
Case 2 – Pandgemiddelde regeling	39
Case 3 – Gedecentraliseerde sturing	41
Case 4 – Gecentraliseerde sturing	43
Case 5, 6 en 7 – Gecentraliseerde sturing met anticiperende pompen	44
Samenvatting	45
<i>Hoofdstuk 5 – Resultaten</i>	<i>46</i>
Inleiding	47
Afwegingskader	47
Resultaten	48
<i>Hoofdstuk 6 – Conclusies en aanbevelingen</i>	<i>58</i>
Inleiding	59
Conclusies	59
Afweging	63
Aanbevelingen	64
<i>Referenties</i>	<i>66</i>
<i>Bijlagen</i>	<i>67</i>

# **Hoofdstuk 1 – Introductie**

## Inleiding

Watersystemen vervullen tal van functies. Ze zorgen voor de aanvoer van water in droge tijden en de afvoer van water in natte tijden. Schepen navigeren via waterwegen naar hun bestemming en er wordt op water gerecreëerd. Water heeft een belangrijke natuurfunctie.

Voor al deze functies stellen we eisen aan een watersysteem, zodat er voldoende water beschikbaar is en op de juiste plaats en tevens dat we voldoende beveiligd zijn tegen overstromingen.

Om aan al deze eisen te kunnen voldoen, moeten we het water sturen. Dit doen we door in watersystemen beweegbare kunstwerken aan te leggen die het water doorlaten als we het willen laten stromen en tegenhouden wanneer we het willen scheiden. Het aansturen van deze kunstwerken kan op vele manieren, samengevat in het werkveld van de meet- en regeltechniek.

## Aanleiding

Het gebruik van meet- en regeltechniek in waterlopen is nog grotendeels onontgonnen. De huidige meet- en regeltechniek is met name getest op irrigatiekanalen.

Nederland kent echter veel grote watersystemen. Deze waterlopen dienen als aan- en afvoerkanalen en vormen een belangrijke schakel binnen het Nederlandse waterbeheer. Een van deze waterlopen is de rivier de Linge gelegen in centraal Nederland. Deze rivier met de daarin aanwezige kunstwerken is onder beheer van Waterschap Rivierenland.

Waterschap Rivierenland is geïnteresseerd in het implementeren van een nieuwe vorm van aansturing van de Linge kunstwerken. Hoewel de huidige aansturing vooralsnog voldoet, zijn zij op zoek naar verbetermogelijkheden die het anders aansturen van de huidige kunstwerken kunnen opleveren. Mogelijke verbeteringen zijn kostenbesparingen, beter waterbeheer (kleinere peilfluctuaties) en verdere automatisering.

Het gebruik van de, uit de meet- en regeltechniek bekende, methoden voor het aansturen van deze kunstwerken wordt gezien als één van de opties voor het verbeteren van het waterbeheer, het verlichten van werkdruk en het besparen op de kosten.

## Probleemstelling en doelstelling

### Probleemstelling

Er bestaat onduidelijkheid over het huidige beheer van de Linge. Het beheer is tot stand gekomen door jarenlange ervaring, welke is verweven in een geautomatiseerde regeling. De wijze van aansturing van de kunstwerken is daardoor geslepen, maar niet onderbouwd en, bij wijzigende stuurdoelen, moeilijk te modificeren. De vraag is dan ook hoe goed het huidige beheer presteert ten opzichte van een volgens de meet- en regeltechnische opgestelde sturing.



De aanwezige infrastructuur voor het aansturen van de Lingekunstwerken is dermate geavanceerd dat er mogelijkheden zijn voor een centrale sturing. Momenteel wordt nog lokale sturing toegepast. Het benutten van deze mogelijkheden behoort tot de toekomstvisie van het waterschap.

Het inzetten van nieuwe middelen voor de sturing bereiden de weg naar beter waterbeheer. Dit beter waterbeheer is het primaire doel van het waterschap, of iedere andere waterbeheerder. Het zetten van vraagtekens bij de huidige wijze van handelen is de eerste aanzet tot verbetering. Ook al is er geen sprake van een direct probleem voor het waterbeheer, door in een vroeg stadium te zoeken naar verbeteringen kunnen problemen voorkomen of sneller aangepakt worden.

Daarnaast worden in het dagelijks beheer van de Linge nog vaak ingrepen gedaan om te anticiperen op verwachte neerslag en goedkope spuumogelijkheden. Het dagelijks beheer is een geautomatiseerd proces, maar door het ontbreken van een geautomatiseerde, globale, anticiperende module zijn in het proces handmatige ingrepen noodzakelijk. Deze aanpassing zorgen voor een verhoogde werkdruk van de peilbeheerders, een onwenselijke situatie.

### **Doelstelling**

Aantonen dat door toepassing van meet- en regeltechniek het dagelijkse beheer van de Linge zodanig kan worden verbeterd dat:

- 1) Er minder peilfluctuaties optreden bij normale en extreme omstandigheden,
- 2) het systeem sneller herstelt van piekbelastingen
- 3) en de regelingen onder alle huidige en veranderende omstandigheden functioneert.

Hierbij moet worden aangetoond op welke wijze deze verbeteringen tot stand komen. Dus een identificatie van de karakteristieken van de nieuwe regelingen die voor een verbetering zorgen. Het derde criterium houdt in dat bij wijzigingen in het watersysteem de regelingen op snelle wijze aangepast kunnen worden aan de nieuwe situatie.

### **Werkwijze**

Om aan te tonen dat het gebruik van de meet- en regeltechniek het beheer verbetert, wordt gebruik gemaakt van een testomgeving. De testomgeving bestaat uit een hydrologisch model van het gebied, gekoppeld aan een hydraulisch model van de Linge (Hydrologic 2009). De sturing van de kunstwerken wordt gedaan door een aparte softwaremodule dat met het model communiceert.

In de digitale testomgeving wordt het stroomgebied van de Linge zo nauwkeurig mogelijk nagebootst. Vervolgens wordt de huidige regeling geprogrammeerd en getest. Hierdoor ontstaat een referentiecasse waarmee nieuwe regelingen vergeleken kunnen worden.

De eerste stap is het programmeren van een vergelijkbare regeling ontworpen met meet- en regeltheorie. Hierin wordt nog steeds lokaal gestuurd, maar gebruik gemaakt van de kennis van het systeem. Hiermee wordt getracht aan te tonen dat

het gebruik van de meet- en regeltechniek op zich al een verbetering is, zonder het systeem op een andere basis (informatie) te gaan sturen.

Tevens wordt een regeling geprogrammeerd waarbij meer gegevens worden gebruikt. Zo wordt van een lokale regeling naar een centrale regeling gegaan. Deze centrale regeling heeft als doel waterlast evenredig te verdelen over het gehele systeem. Het waterprobleem wordt centraal aangepakt en in het gehele systeem opgelost.

Een vervolg hierop is het gebruiken van voorspellingen. Hierdoor wordt de regeling niet alleen in ruimtelijke zin uitgebreid, maar ook in de tijdsdimensie. De regeling wordt in staat gesteld te anticiperen op zowel een verwachte wateroverlast als een verwacht watertekort.

Alle regelingen worden getest op (delen van) januari 2007. Hiervan zijn alle gegevens aanwezig die nodig zijn voor de simulaties, zoals de buitenwaterstanden op de Merwede, neerslag verloop en windkracht en snelheid. Het neerslagverloop van januari 2007 biedt voldoende afwisseling (zie H3) zodat de verschillende regelingen uitvoerig getest kunnen worden.

## Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de basisprincipes van de meet- en regeltechniek. De gebruikte theorie voor het ontwerp van de regelingen wordt gepresenteerd en toegespitst op specifiek het waterbeheer.

Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van het studiegebied, de Linge. De relevante onderdelen van het watersysteem worden beschreven als mede het huidige beheer. Als laatste wordt de modellering van het gebied voor de testcases beschreven, net als de afwegingen voor het gebruikte model en de keuze van de simulatieperiode.

Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van het modelinstrumentarium en de regelingen. Belangrijke afwegingen in het opzetten van het modelinstrumentarium worden gepresenteerd. Er wordt vervolgens dieper in gegaan op het ontwerp van de regelingen en waarom voor deze regelingen is gekozen.

In Hoofdstuk 5 worden de resultaten van de cases besproken. De resultaten worden per gesimuleerde regeling weergegeven.

Hoofdstuk 6 presenteert de conclusies op basis van de resultaten. Dit leidt tot een afweging van de regelingen en een slotconclusie. Tenslotte worden aanbevelingen gepresenteerd.

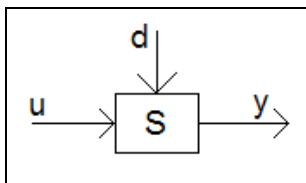
## **Hoofdstuk 2 - De theorie van de meet- en regeltechniek**

## Inleiding

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat de meet- en regeltechniek is en worden de basisprincipes besproken die zullen gebruikt worden in deze studie. Een begrip van deze principes is van belang voor het ontwerpen van een regeling. Daarnaast wordt er ingegaan op verschillende typen regelingen en de instrumenten die hiervoor gebruikt kunnen worden om deze in de praktijk te brengen.

## Basisprincipes van sturing

De meet- en regeltechniek wordt ingezet wanneer een dynamisch systeem moet worden bestuurd. Het begrip dynamisch systeem is breed en omvat een groot deel van de systemen die in de wereld ons heen te vinden zijn. Van de thermostaat in huis, de cruise control in een auto tot het stabiliseren van een ruimtestation met behulp van stuwaketten. De overeenkomst tussen al deze systemen en waarom ze (bij)gestuurd moeten worden is dat er verstoringen op werken die het systeem uit zijn gewenste toestand brengen. Dit kan grafisch worden weergegeven met het volgende blokkenschema.



Figuur 2.1. Blokenschema ongestuurde open loop.

In de figuur is  $u$  de input van het systeem,  $d$  de verstoring (disturbance) en  $y$  de output van het systeem (de toestand), voor zover deze bekend of relevant is. Het systeem zelf (en daarmee de "regels" hoe het op  $u$  en  $d$  reageert) zijn weergegeven met het blok  $S$ . Het systeem is niet gestuurd en is een "open loop", een open lus. Er bevindt zich naast de verstoring, die vanaf nu als ongewenst wordt beschouwd, geen andere pijl die de toestand  $u$  verandert in  $y$ . In de volgende paragrafen wordt gebruik gemaakt van dezelfde blokkenschema's om uit te leggen hoe een systeem gestuurd kan worden.

De sturing van een systeem heeft tot doel het systeem in een wenselijk toestand te krijgen en te houden. De wenselijke toestand is geen vast begrip en wordt bepaald door de bestuurder. In het waterbeheer is het vaak het waterschap die de bestuurderstaak heeft. Watersystemen worden vaak gestuurd op waterstanden, maar ook andere sturingsparameters kunnen worden gebruikt. In de vorige figuur is de sturingsparameter de letter  $u$ . Watersystemen ondervinden ook verstoringen, bijvoorbeeld door neerslag (de letter  $d$ ) en worden daardoor in een andere toestand gebracht, de letter  $y$ .

### Het sturingsblok

Om de toestand van een systeem weer terug te brengen naar de gewenste toestand  $y_{ref}$  (in de figuren *ref*) zijn verschillende typen sturing mogelijk, die verderop worden gepresenteerd. Allereerst is het van belang te weten wat de gewenste toestand is. De gewenste toestand wordt ook wel setpoint of referentie genoemd. De gewenste toestand is niet eenduidig, voor de waterbeheerder kan dit een waterstand op een bepaalde plaats zijn, maar ook een bepaald debiet of bepaalde eisen aan de kwaliteit

van een waterlichaam. Voordat een systeem gestuurd kan worden moet de sturingsparameter en de waarde ervan worden vastgesteld.

De wijze waarop vervolgens moet worden gestuurd om deze toestand te bereiken is wederom niet eenduidig. Om de gewenste waterkwaliteit te bereiken kan de beheerder bijvoorbeeld spoelen met water van een betere kwaliteit, maar ook het water machinaal filteren. Daarvoor moet hij weten hoeveel water hij nodig heeft om te spoelen of hoeveel water er gefilterd moet worden. Of in het geval van een waterstand, hoeveel water moet er in of uit het systeem om de gewenste toestand te bereiken?

Dit wordt grafisch weergegeven door het blok  $C$  aan het blokkenschema toe te voegen:

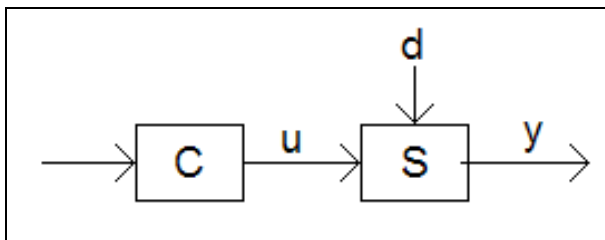


Figure 2.2. *Blokkenschema sturing.*

Het nieuwe blok  $C$  is het sturingsblok (Control). In het sturingsblok is een routine aanwezig die op basis van de input van het blok een bepaalde output genereert. De output van het sturingsblok is op zijn beurt weer de input van het systeem, die eerder  $u$  is genoemd. De pijl naar het control blok toe is bewust geen letter gegeven. Op de basis (of informatie) die het sturingsblok gebruikt om de sturingsacties te bepalen wordt later terug gekomen. Het systeem krijgt opnieuw zijn input en levert samen met de verstoring weer een nieuwe toestand op.

Het sturingsblok  $C$  kan op verschillende wijzen in het blokkenschema worden opgenomen. Van welke informatie het sturingsblok gebruik maakt bepaalt het eerste onderscheid in type sturing. Er kunnen twee typen worden onderscheiden, feedback en feedforward.

### Feedback

De eerste en meest bekende vorm van sturing is feedback. In de volgende figuur is hiervan het blokkenschema gegeven.

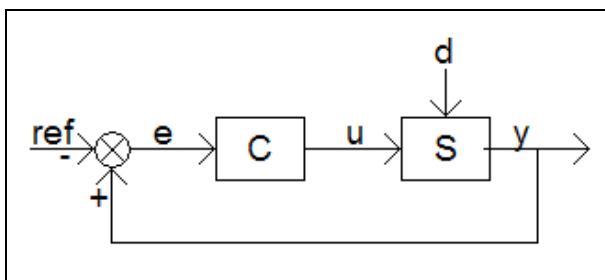
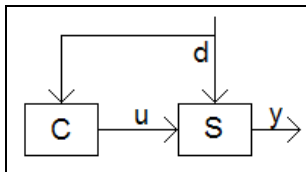


Figure 2.3. *Blokkenschema feedback*

In het begin van dit hoofdstuk is gesproken de gewenste toestand, setpoint of referentie van het systeem. Door deze te vergelijken met de huidige toestand van het systeem  $y$  en van elkaar af te trekken ontstaat de afwijking  $e$  (error). Deze dient als input voor het sturingsblok, welke op zijn beurt de sturingsactie  $u$  bepaalt. Vanaf hier wordt tezamen met de verstoring  $d$  weer een nieuwe toestand  $y$  bepaald en de cirkel is rond. Bij feedback is er daarom sprake van een gesloten lus (closed loop), er wordt gereageerd op wat er al is. Er wordt teruggekeken. Het voordeel hiervan is, dat het systeem altijd de neiging heeft naar de referentietoestand terug te willen keren.

### Feedforward

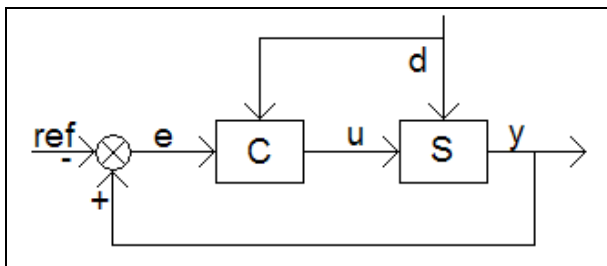
Een andere vorm van sturing is feedforward. Hierbij wordt niet gekeken naar de toestand van het systeem, maar naar de verstoring. In feite wordt er vooruit gekeken naar de verstoring die komen gaat en wordt er geprobeerd een sturingsactie te genereren die de verstoring ongedaan zal maken. De verstoring wordt hiertoe gemeten en het effect van de verstoring op het systeem wordt voorspeld. Omdat er niet wordt gekeken naar de werkelijke toestand van het systeem is het nooit zeker of het systeem in de gewenste toestand verkeert. Er kunnen immers verstoringen zijn die niet gemeten worden of het effect van de verstoringen op het systeem kunnen verkeerd worden berekend. Anders gezegd, de toestand  $y$  wordt niet met een referentie vergeleken, hier is dus sprake van een open lus.



Figuur 2.4. Blokkenschema feedforward.

### Combinatie feedback en feedforward

Natuurlijk is het ook mogelijk beide vormen van sturing te combineren, ze staan elkaar niet in de weg. Het sturingsblok en de "regels" die het omvat krijgt nu twee bronnen van input, de verstoring  $d$  en de afwijking  $e$ . De verstoring en de sturingsactie zijn input voor het systeem en daaruit volgt de nieuwe toestand.



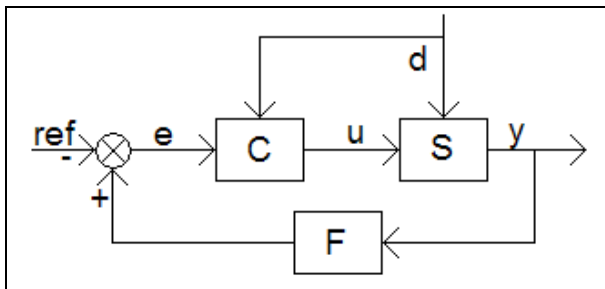
Figuur 2.5. Blokkenschema gecombineerde feedback en feedforward loop.

Vaak wordt de verstoring  $d$  gesplitst in twee delen: een bekend deel, waarop gestuurd kan worden en een onbekend deel. In het bovenstaande figuur zou dit betekenen dat een tweede pijl naar het systeemblok  $S$  wordt getrokken, met een tweede verstoring  $d$ .

### Sturingstijdstap en filtering

Iedere keer dat een systeem gestuurd wordt, wordt de open of gesloten lus één maal doorlopen. Hoe vaak dit gebeurt hangt af van de grootte van de sturingstijdstap. De sturingstijdstap is de tijd tussen de start van twee sturingscycli. Het doorlopen van een sturingscyclus (berekenen én uitvoeren van de sturingsacties) moet gebeuren binnen 1 sturingstijdstap. Een andere eis aan de sturingstijdstap is dat deze klein genoeg moet zijn om te reageren op de verstoring. Anders gezegd, er moet tijdig gereageerd worden op een verstoring, voordat deze te veel invloed krijgt.

Het output signaal  $y$  is het signaal waarbij in een feedbacksturing op gereageerd. Het signaal wordt in de praktijk gemeten. Deze metingen kunnen fouten bevatten, maar ook lokale verstoringen hebben invloed op de meting. Zwemmende eenden hebben bijvoorbeeld invloed op de gemeten waterstand, maar hier wil men niet op reageren. Om deze korte "foute" metingen geen invloed te laten hebben, wordt de meting gefilterd. In het onderstaande schema is hiervoor een extra blok toegevoegd, het Filterblok  $F$ .

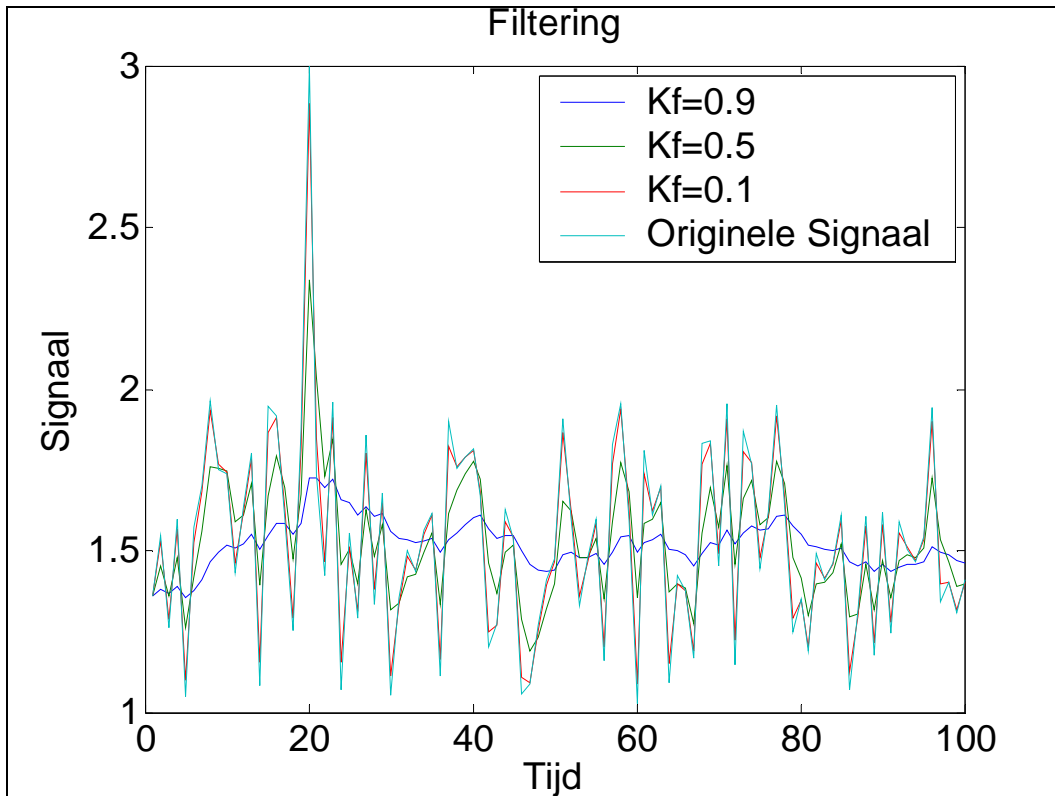


Figuur 2.6. Blokkenschema met filter.

De meest eenvoudige vorm van filtering wordt verkregen door de nieuwe gemeten waarde  $y(k)$  te combineren met de eerder gemeten en gefilterde waarde  $y_f(k-1)$ . De index  $k$  staat voor de tijdstap.

$$y_f(k) = K_f y_f(k-1) + (1 - K_f) y(k)$$

De waarde van  $K_f$  bepaalt de mate van filtering. Hogere waarden dicht bij 1 levert een zware filtering op, terwijl lagere waarden het signaal ongemoeid laten. De volgende figuur geeft een voorbeeld van een signaal dat met drie waarden van  $K_f$  is gefilterd. Het signaal is random gegenereerd met waarden tussen 1 en 2 met een gemiddelde van 1,5. Dit zou bijvoorbeeld een waterstand kunnen zijn die wordt verstoord. Rond de tijd  $T=20$  is een piek aangebracht met waarde 3, bijvoorbeeld een meetfout of een momentane verstoring. De verschillende waarden van  $K_f$  laten zien hoe het signaal wordt omgevormd. De waarden moeten liggen tussen 0 en 1. Te zien is dat een waarde dichtbij 0 het signaal nauwelijks aanpast terwijl een waarde van dichtbij 1 de waarde van de vorige meting benaderd.



Figuur 2.7. Voorbeeld filtering.

De waarden van  $K_f$  moet minimaal 0.67 zijn om *aliasing* te voorkomen. Aliasing is een fenomeen waarbij frequenties uit het bemeeten signaal worden vervormd (Brouwer 2005). Het fenomeen treedt met name op bij hogere frequenties. Door het signaal eerste te filteren worden deze hoge frequenties uit het signaal gehaald.

### Van analoog naar digitaal, ZOH

Sturing is een proces waarbij iedere tijdstap de sturingsketen wordt doorlopen. Het is dus een discreet proces. Het systeem dat gestuurd wordt is dat meestal niet. Hierdoor is er een overgang van analoge signalen naar digitale variabelen ( $e$ ,  $u$  en  $d$ ). Het omzetten van analoge signalen naar digitale signalen kan op verschillende manieren. De bekendste is de "Zero Order Hold" methode. Hierbij wordt de gemeten analoge waarde gedurende de duur van een tijdstap als constante gebruikt. Deze methode zal in dit onderzoek ook gebruikt worden.

## Het sturingsblok

De kern van dit onderzoek is de invulling van het sturingsblok  $C$  uit de sturingsketen. Vanuit de sturingsketen is te zien dat er ook voor het blok  $C$  een input is ( $e$ ) en een output ( $u$ ). De invulling van het blok geeft gestalte aan de verandering van  $e$  naar  $u$ . Anders gezegd, hoe de sturingsacties op basis van  $e$  worden bepaald en omgezet in een output  $u$ .

### Proportionele regelaars

Een logische manier van sturen is de proportionele regelaar. Dit type regelaar reageert op de afwijking van de sturingsparameter ten opzichte van de streefwaarde met een proportionele sturingsactie. Bij een kleine afwijking is de reactie klein.



Wordt de afwijking  $n$  keer zo groot, dan wordt ook de sturingsactie  $n$  keer zo groot. In formule vorm:

$$u = K_p e$$

De sturingsactie  $u$  is proportioneel met de afwijking  $e$ . Hierin is  $K_p$  een constante die bepaald moet worden. De waarde van  $K_p$  kan niet zondermeer gegeven worden. De grootheden  $u$  en  $e$  hebben niet per definitie dezelfde eenheid (zodat  $K_p$  dus niet dimensieloos is). In dit geval vindt er ook een schaling tussen  $u$  en  $e$  plaats, die wordt verwerkt in de constante.

### PI(D) regelaars

Een proportionele regelaar alleen is niet in staat om een systeem precies terug te brengen naar de streefwaarde. De proportionele regelaar kan worden uitgebreid met een integraal- en eventueel een differentiaalcomponent.

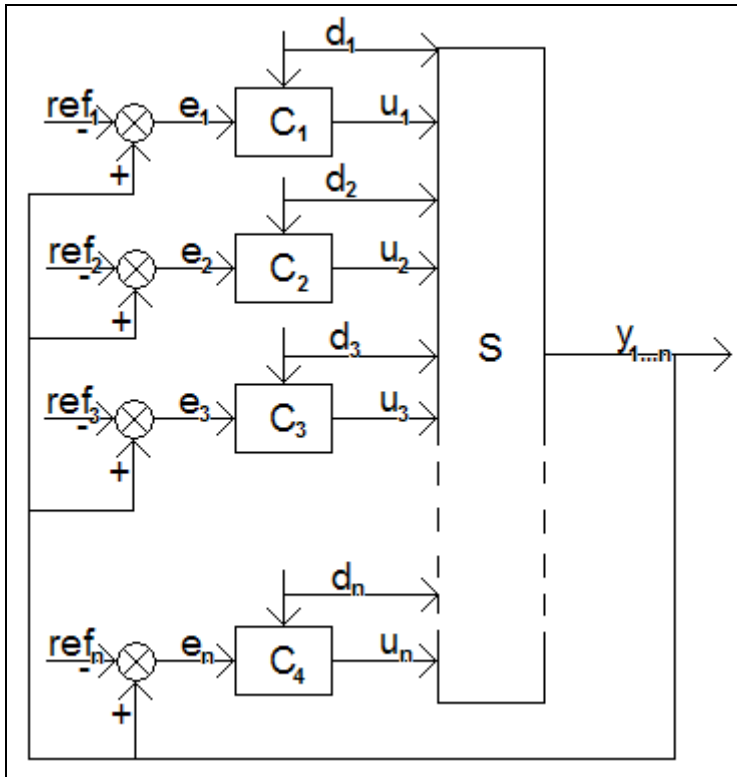
$$u = K_p e + K_i \int e \cdot dt + K_d \frac{de}{dt}$$

De integraalcomponent sommeert alle fouten gedurende de periode waarin de regelaar actief is. Het nut van de integraalcomponent is dat er sterker gereageerd wordt op langdurige afwijkingen. Stel dat een systeem niet op de streefwaarde is, maar een afwijking heeft. De sturingsactie van het proportionele deel zorgt voor een correctie. Op het moment dat de verstoring van het systeem even groot is als die actie, zal het systeem niet terugkeren naar de streefwaarde, maar een continue afwijking hebben. De integraalcomponent zal nu reageren en steeds heftiger naar mate de duur van de afwijking groter wordt.

De differentiaalcomponent reageert op de veranderingen van de afwijking. De component wordt vrijwel nooit gebruikt in het waterbeheer.

## Systemen met meerdere regelaars

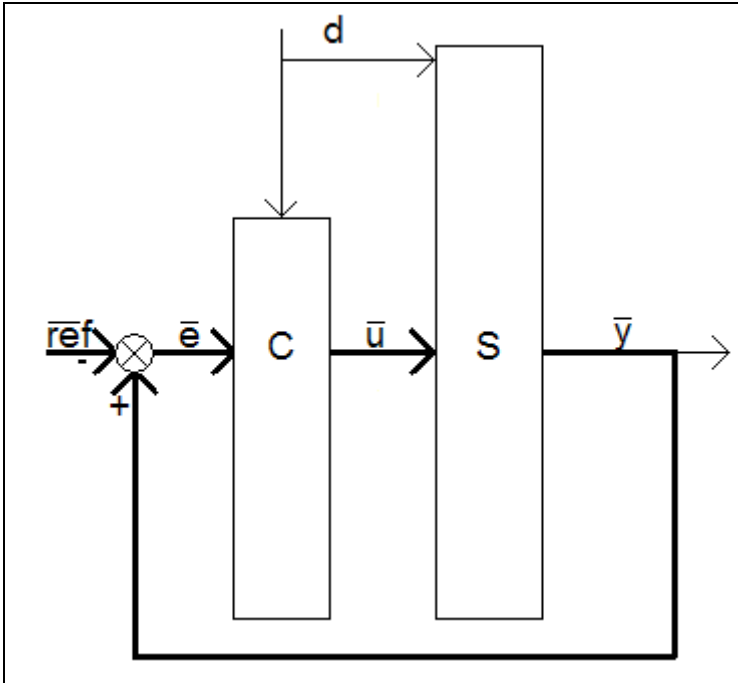
Tot nu toe is er gesproken over typen van sturing en de wijze waarop aan het sturingsblok invulling gegeven kan worden. Dit betrof tot nu toe enkelvoudige regelaars. Watersystemen zoals irrigatiesystemen, maar ook rivieren bevatten veelal meerdere regelaars, zoals in onderstaand blokdiagram is geschetst.



Figuur 2.8. Meerdere SISO regelaars op een systeem.

De figuur geeft een combinatie van meerdere zogenaamde SISO regelingen weer. Dit staat voor *Singel In, Single Out*. Dit betekent dat iedere regelaar zijn eigen input heeft en zijn eigen output. De regelaars zijn afzonderlijk van elkaar ontworpen; er is geen rekening gehouden met de samenhang. De losse regelaars kunnen bijvoorbeeld PI-regelaars zijn.

Als tegenhanger is er een MIMO regeling: *Multiple In, Multiple Out*. Bij dit type regeling heeft iedere regelaar meerder input en output stromen. Anders voorgesteld kan worden gezegd dat er één sturingsblok is om meerdere kunstwerken aan te sturen. Dit blok maakt gebruik van meerdere input signalen en genereert voor ieder kunstwerk output signalen. Dit is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 2.9. MIMO regelaar op hetzelfde systeem.

Deze paragraaf beschrijft een aantal methoden voor het gebruik van meerdere regelaars in een systeem.

### Gedecentraliseerde (lokale) sturing

Een gedecentraliseerde regeling voor meerdere kunstwerken is gebaseerd op het SISO model. Voor ieder kunstwerk wordt een aparte regeling ingezet. Dit kunnen dezelfde regelingen zijn, of per kunstwerk verschillende regelingen.

Gedecentraliseerde sturing wordt name gebruikt wanneer informatie uit verschillende delen van een systeem lastig bijeen te krijgen is. Daarnaast is het een relatief eenvoudig uit te voeren regeling.

### Gecentraliseerde sturing

In een gecentraliseerde sturing wordt er vanuit gegaan dat alle informatie uit een systeem voor ieder te regelen object aanwezig is, de informatie is "gecentraliseerd". Hierdoor is het ook mogelijk om het gehele systeem te koppelen aan een regelaar die meerdere output signalen geeft, dus een MIMO regeling. Het gebruik van alle informatie voor alle regelaars zorgt voor een potentieel hogere performance van de regelaars (Overloop et al., 2005). Hier tegenover staat dat er meer fysieke infrastructuur nodig is voor deze informatie voorziening en een grotere faalkans van het systeem door het falen van die infrastructuur.

## Meet- en regeltechniek in het waterbeheer

In de vorige paragrafen is de algemene meet- en regeltechniek besproken. In deze paragraaf worden nog een aantal hulpmiddelen besproken die nodig zijn voor het toepassen van de meet- en regeltechniek in het waterbeheer. Allereerst wordt er besproken wat er nu eigenlijk geregeld moet worden in het waterbeheer, of meer specifiek, wat de sturingsparameter(s) zijn. Vervolgens wordt aangegeven hoe dit

vertaald moet worden in het sturingsblok. Als laatste worden de hulpmiddelen en methodes gepresenteerd die daarbij nodig zijn.

### **Het beheren van water**

Het waterbeheer spits zich toe op een aantal terreinen. Zo is er grondwaterbeheer, oppervlaktewaterbeheer en waterkwaliteitsbeheer. In deze studie staat het beheer van oppervlaktewater centraal. Oppervlaktewater systemen worden gekenmerkt door een aantal variabelen. De voornaamste zijn de waterstand, het volume water in het systeem en de in- en uitstromende debieten van het systeem. Vaak is het van belang de waterstand te regelen, zodat deze binnen vooraf gesteld marges blijft. Om de waterstand te regelen moet er iets gebeuren met het aanwezige volume in het systeem.

Als voorbeeld kan een reservoir met water worden genomen. Om de waterstand van het reservoir te regelen, kan water in of uit het reservoir gelaten worden. Wat er dus gebeurt, is dat de waterstand wordt geregeld met een debiet. Dit zijn verschillende variabelen die op één of ander wijze zijn gerelateerd. Het beschrijven van deze relatie is nodig om het systeem adequaat te kunnen regelen. In dit voorbeeld moet worden gezocht naar de relatie tussen het in- of uitstromende debiet (en de duur ervan) en de verandering van de waterstand in het reservoir.

### **Lokale debietregelaar**

Bovenstaand voorbeeld geeft al aan dat debieten makkelijker te gebruiken zijn als stuurvariabele dan bijvoorbeeld de schuifstanden. Het principe van de lokale debietregelaar speelt hierop in. Het principe wordt vaak toegepast in een master-slave configuratie. De master regelaar bepaalt vanuit een gewenste waterstand een gewenst debiet. De slave regelaar stelt via de afvoerrelatie van het kunstwerk het lokale debiet in door verandering van de schuifstanden. Deze methode wordt in dit onderzoek ook gebruikt.

### **Bovenstroomse of benedenstroomse sturing**

Veelal is er in watersystemen sprake van een dominante stroomrichting, zeker wanneer het rivieren of kanalen betreft. Wanneer de stroomrichting vast staat (er is slechts één richting), is er bij een kunstwerk sprake van een bovenstroomse en een benedenstroomse zijde. Grofweg kan dan worden gesteld dat een kunstwerk óf bovenstrooms óf benedenstrooms de waterstand regelt. Wanneer dit in de nabijheid van het kunstwerk gebeurt wordt er gesproken van lokale bovenstroomse of benedenstroomse sturing. Welk type gebruikt wordt, is afhankelijk van het doel en de inrichting van het systeem.

### **Het vertalen van de gewenste sturing in het sturingsblok**

Het inrichten van het sturingsblok bestaat uit twee delen. Het eerste is het bepalen van de sturingsactie, het tweede deel is het doorgeven van de sturingsactie. Het bepalen van de sturingsactie is de eigenlijke vertaling van de relaties in het watersysteem tussen de sturingsvariabelen (de waterstand uit het reservoirvoorbeeld) en de sturingsactie (het instellen van het debiet), waarvoor dus de lokale debietregelaar gebruikt kan worden. Vervolgens moet die actie doorgegeven worden aan het kunstwerk, het kunstwerk moet zo worden ingesteld dat het gewenste debiet wordt in- of uitgelaten.

Voor het bepalen van de sturingactie zijn verschillende methoden beschikbaar. Gemeenschappelijk is dat er een voorspelling nodig is van de impact van sturingsacties en eventueel van verstoringen. Deze voorspelling wordt gebaseerd op een model van het watersysteem in het sturingsblok.

Het is natuurlijk ondoenlijk om parallel aan een geregeld systeem realtime complete modelsimulaties te doen. Doorgaans zijn de geregelde systemen veel ingewikkelder dan het aangehaalde voorbeeld van het reservoir en de bijbehorende modelsimulaties, bijvoorbeeld op basis van de St. Venant, bewerkelijk. Het is nog maar de vraag of deze simulaties snel genoeg uitgevoerd kunnen worden. Snel genoeg wil zeggen, dat de tijd voor het doorrekenen van het systeem ruim korter is dan de sturingstijdstap.

Om toch een goede inschatting te maken van de te nemen sturingsacties zijn er vereenvoudigde modellen nodig. Deze modellen zijn in staat (ruim) binnen de sturingstijdstap en met voldoende nauwkeurigheid een sturingsactie bepalen.

### Het Integrator Delay (ID) model

Specifiek voor waterlopen is het Integrator Delay model (ID-model) ontworpen. De afleiding van het model is beschreven door Schuurmans (1997).

Een waterloop kan worden verdeeld in twee delen. In het eerste deel vindt de stroming plaats. Zodoende is er een vertraging voordat een bovenstroomse verstoring het einde van de waterloop bereikt. Dit is het Delay gedeelte van het model. De vertraging wordt bepaald door de lengte van het stromende gedeelte te delen door de snelheid waarmee een verstoring zich verplaatst:

$$\tau = L_D / (U+c)$$

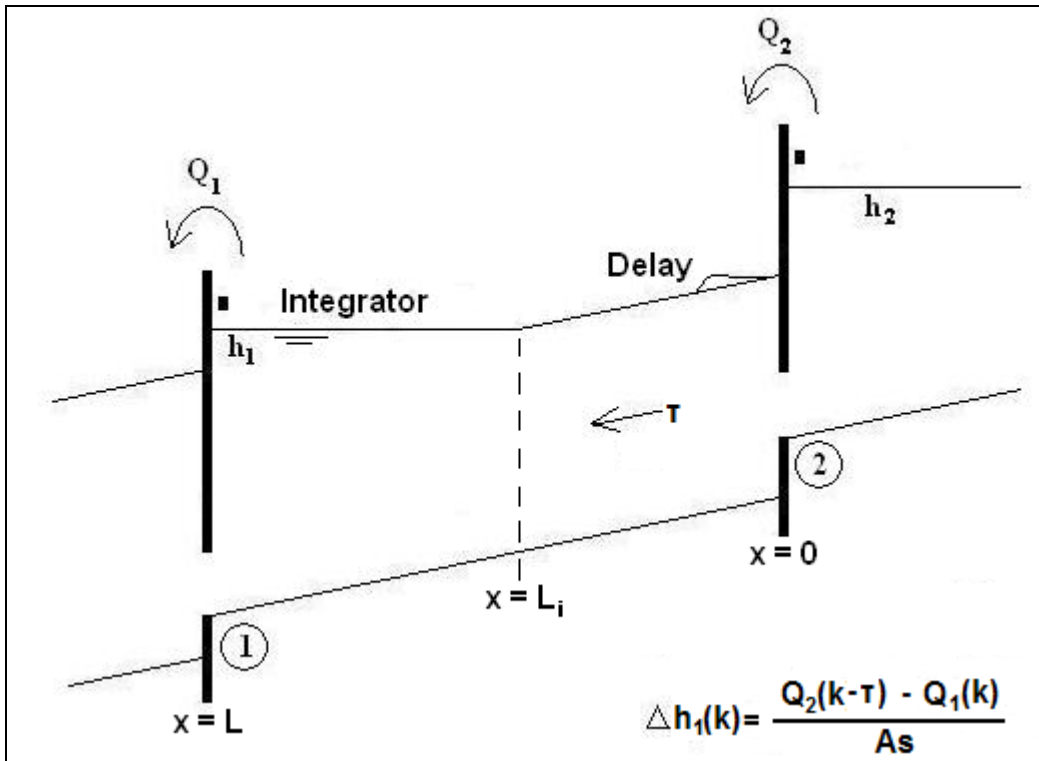
$\tau$  is hierin de vertragingstijd en  $L_D$  de lengte van het stromende deel van de waterloop. De snelheid waarmee de verstoring zich verplaatst bestaat uit de stroomsnelheid van het water  $U$  en de golfsnelheid  $c$ . De vertragingstijd  $\tau$  moet door de sturingstijdstap gedeeld worden als er met discrete systemen gewerkt wordt. De waarde  $\tau$  geeft dan aan hoeveel tijdstappen het duurt voordat een bovenstroomse verstoring merkbaar wordt in het benedenstroomse deel van het pand.

Het tweede deel van het model is het Integrator gedeelte. Hier wordt het water verzameld (geïntegreerd) en is de representatie van het deel van de waterloop, waar het water opgestuwd wordt. Hier wordt verondersteld dat het water zich gedraagt als een reservoir, met bijbehorende relaties tussen waterstand en in- en uitstromend debiet:

$$dh(k) = (Q_{in}(k) - Q_{uit}(k)) / As(k)$$

$dh(k)$  is de verandering van de waterstand op tijdstip  $k$ . De  $Q$ 's zijn de in- en uitstromende debieten op datzelfde tijdstip.  $As$  kan eenvoudig bepaald worden door de lengte van het reservoir deel  $L_1$  te vermenigvuldigen met de gemiddelde breedte (van het reservoirgedeelte) van de waterloop. De term  $As$  wordt vaak constant in de tijd genomen. Door een vertraging op de instroom van de formule te zetten ontstaat het totale model in discrete tijd en plaats (zie ook figuur 2.10):

$$dh_1(k) = (Q_2(k-\tau) - Q_1(k)) / As$$

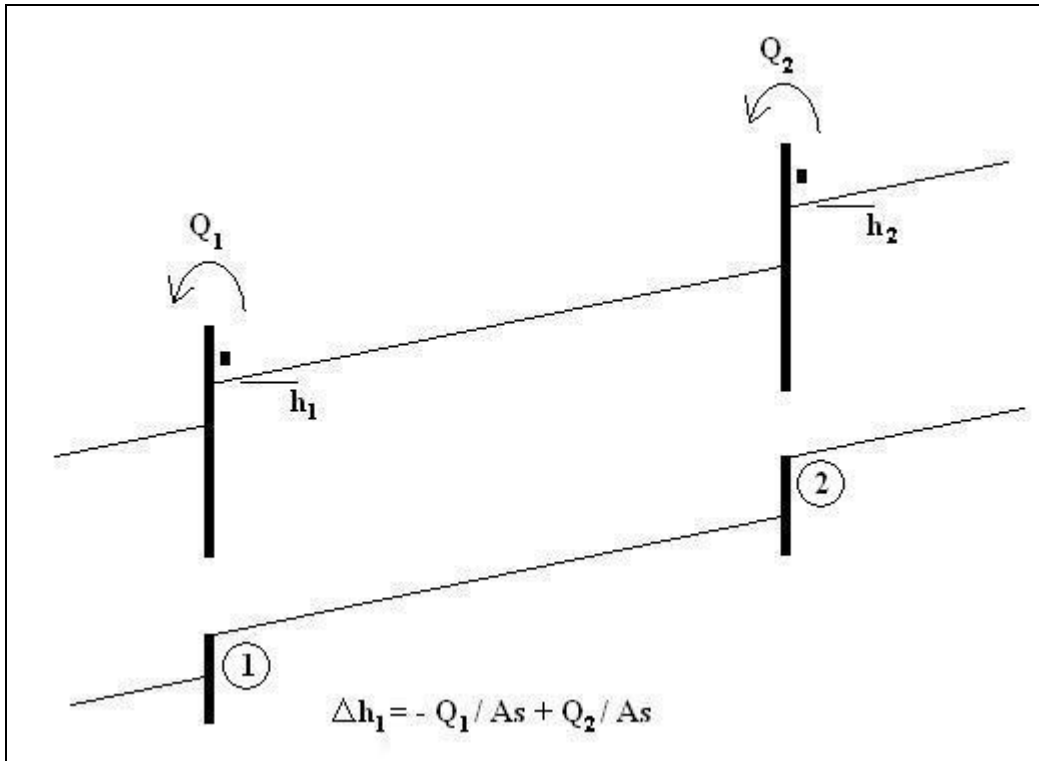


Figuur 2.10. Het Integrator Delay model.

Met dit model is op snelle wijze te bepalen wat de invloed is van verstoringen (in de vorm van bovenstrooms of lateraal debiet) en sturingsacties (uitstromend debiet) op de gestuurde waterstand. Dit kan ook andersom worden bekeken. Wanneer een gewenst debiet uitgelaten moet worden, dat afhankelijk is van de waterstand in het reservoirgedeelte.

### Samenhang van regelaars in watersystemen

Er is sprake van samenhang als de sturingactie bij kunstwerk 1 de actie bij kunstwerk 2 beïnvloedt en de reactie van kunstwerk 2 op zijn beurt weer een actie bij kunstwerk 1 teweeg brengt. Dit wordt ook wel onderlinge beïnvloeding genoemd en is omschreven in Schuurmans (1997). In onderstaand figuur is een dergelijke opstelling gegeven.



Figuur 2.11. Onderlinge beïnvloeding van regelaars.

In de figuur zijn twee kunstwerken in een waterloop geschetst met als doel direct bovenstrooms de waterstand te controleren. Er is sprake van beïnvloeding: een actie bij kunstwerk 1 beïnvloedt de waterstand direct beneden kunstwerk 2. Daardoor verandert het debiet over dat kunstwerk en dus de wijze waarop de waterstand direct boven kunstwerk 2 wordt gehandhaafd. Kunstwerk 2 zal hierdoor reageren wat een verandering in het debiet oplevert. Hierdoor wordt de waterstand direct boven kunstwerk 1 beïnvloed en dus een reactie bij kunstwerk 1 tot gevolg hebben.

Een andere vorm van beïnvloeding is het groeien van afwijkingen in een systeem doordat de doorgegeven fout wordt versterkt (*Eng: disturbance amplification*). In een systeem van meerdere in serie geschakelde gestuurde kunstwerken kan het voorkomen dat een fout in het meest bovenstroomse kunstwerk wordt doorgegeven naar het volgende. Wanneer het tweede kunstwerk daarop reageert door een grotere aanpassing te doen wordt de fout versterkt doorgegeven. Dit kan de gehele serie doorlopen. Een van de manieren om dit te voorkomen is het gebruik van ontkoppeling. Hierbij worden de sturingsacties van kunstwerken aan elkaar doorgegeven en meegenomen in de acties van andere kunstwerken.

### Het State Space (SS) model

De samenhang van regelaars en waterlopen in een systeem is vooral van belang wanneer gebruik wordt gemaakt van een centrale regeling. De onderlinge invloeden van regelingen moet dan op een of andere wijze kenbaar worden. Een van de middelen hiervoor is het State Space model (SS model). Een SS model is een algemene schrijfwijze van de toestanden (states) van een systeem en de veranderingen daarvan. De wijze waarop toestanden beïnvloed worden en elkaar beïnvloeden wordt daarin meegenomen. Toestanden kunnen waterstanden te zijn,

afwijkingen ( $e$ ) of debieten. De typische schrijfwijze is in matrixvorm en is de volgende:

$$\begin{aligned}x'(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

Hierin is  $x$  de state vector, waarin de toestand van het systeem is opgeslagen. De verandering van de toestanden is  $x'$  ( $dx/dt$ ). Deze is afhankelijk van de systeemmatrix ( $A$ ) en van de toegepaste sturing ( $u(t)$ ), gekoppeld via de matrix ( $B$ ) die bepaalt welk effect de toegepaste sturing heeft. De voorspelling van het werkelijke systeem, weergegeven met  $y(t)$ , wordt bepaald door de toestand ( $x$ ), al dan niet vervormd door de matrix  $C$ .

De sturing wordt doorgaans bepaald afhankelijk van de meting van het werkelijke systeem:  $u(t) = K y(t)$ . Daarnaast wordt de volgende vereenvoudiging gedaan:  $C = I$  (de states beschrijven onvervormd het systeem):

$$\begin{aligned}x'(t) &= Ax(t) + B K y(t) \\ y(t) &= x(t)\end{aligned}$$

Als er nu gesteld wordt dat de nieuwe toestand van een systeem de oude is plus de verandering in een tijdstap dan kan worden herschreven:

$$x(t+1) = x(t) + Ax(t) + B K x(t)$$

Zoals is te zien beschrijft het State Space model de verandering van de toestand van het systeem door sturingsacties (en verstoringen). Iedere tijdstap wordt een nieuwe (gemeten) toestand ingelezen door de controller, waarop vervolgens een verwachte nieuwe toestand (op  $t+1$ ) wordt berekend. Op basis van de deze nieuwe toestand worden de benodigde sturingsacties bepaald middels  $u(t) = K x(t)$ .

Een watersysteem bestaande uit meerdere in serie geschakelde panden kan bij uitstek in een State Space model worden omschreven. Voor ieder pand kan een ID-model worden opgesteld dat wordt omschreven in matrixvorm. De states zijn hier dan de waterstand in het reservoir gedeelte en de in- en uitstromende debieten. De koppeling vindt automatisch plaats, doordat de benedenstroomse uitstroom van een pand de instroom van het volgende pand is. Sturingsacties op de grens van twee panden hebben dus ook gevolgen voor twee panden.

### Optimalisatie: de LQR regelaar

De wijze waarop de regeling met een State Space werkt, wordt bepaald door de waarden in de matrix  $K$ . Dit is de sturingsmatrix, die op basis van alle states een waarde geeft aan de sturingsvector  $u(t)$ . Het ontwerp van de lineair kwadratische regelaar (LQR) is gebaseerd op een optimalisatie van de sturingsacties. De basis van deze regelaar is een functie waarin de afwijking van de gewenste staat en de gedane inspanning om die te bereiken worden afgewogen. De volgende functie wordt geminimaliseerd:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u)$$

Hierin is  $x$  de state vector en  $u$  de sturingsvector. De waarde van  $x^T Q x$  geeft aan hoe een afwijking in het systeem wordt bestraft. Er kan hier ook verschil worden



gemaakt per state, dus de ene afwijking in het systeem kan harder worden bestraft dan de andere. Ook zullen niet alle states nodig om het systeem te beschrijven bestraft worden. De waarde van  $u^T R u$  geeft aan hoeveel moeite het systeem mag doen om terug te komen op streefwaarde. Hierin wordt dus eigenlijk de grote van reactie (zeg maar de waarde van  $K_p$  in een SISO systeem) bepaald. Te grote waarden van deze matrix maken het systeem instabiel. Het gaat niet om de absolute waarde van de matrices, maar de relatieve waarde ten opzichte van elkaar.

De variabele waarmee gespeeld wordt is  $u$  en is afhankelijk van  $K$ , via de relatie  $u(t) = -K y(t)$ . De matrix  $K$  is de optimale sturingsmatrix en wordt bepaald door de volgende vergelijking:

$$K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A$$

$P$  is hierin de enige nog onbekende matrix en wordt gevonden met de discrete Ricatti vergelijking:

$$P = Q + A^T (P - P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P) A$$

De afleiding van deze vergelijkingen zijn algemeen en kunnen in ieder boek over Control Theory worden teruggevonden, bijvoorbeeld Kwakernaak et al. (1972). Voor het oplossen van deze vergelijkingen zijn softwarepakketten beschikbaar. Met de gevonden waarde voor  $K$  kan de kostenfunctie  $J$  worden geminimaliseerd. De afstelling van een LQR wordt dus bepaald door de waarden van  $Q$  en  $R$  te variëren, zodat  $P$  en daarmee  $K$  wordt aangepast.

## **Hoofdstuk 3 - De Linge**

## Inleiding

Dit hoofdstuk omvat de beschrijving van het stroomgebied van de Linge en de Linge zelf, de gebiedskenmerken en de wijze waarop het waterbeheer wordt ingevuld. Vervolgens wordt ingegaan op de manier waarop de Linge wordt gestuurd om de doelstellingen van het waterschap te realiseren. Vervolgens wordt er ingegaan op de problemen en uitdagingen waar het waterschap voor wordt gesteld. Als laatste volgen de conclusies.

## Omschrijving van het studiegebied

Het gebied waar het onderzoek wordt uitgevoerd is het stroomgebied van de Linge. De Linge is een rivier in het midden van Nederland. De Linge ligt tussen twee takken van de Rijn, de *Neder-Rijn* en *Lek* in het noorden en de *Waal* en *Beneden Merwede* in het zuiden. Deze rivieren zijn direct ook de hydrologische scheiding van het gebied. In het oosten wordt het gebied begrensd door het *Pannerdens Kanaal*, in het westen door het *Merwedekanaal*. Die laatste is ook onderdeel van het watersysteem van de Linge.

De stroomrichting van de Linge is net als de grote rivieren van oost naar west. In figuur 3.1 is de ligging van de Linge in Nederland weergegeven. De rode rechthoek geeft de ligging van het gebied weer, dit is uitvergroot in figuur 3.2 (west) en figuur 3.3 (oost).



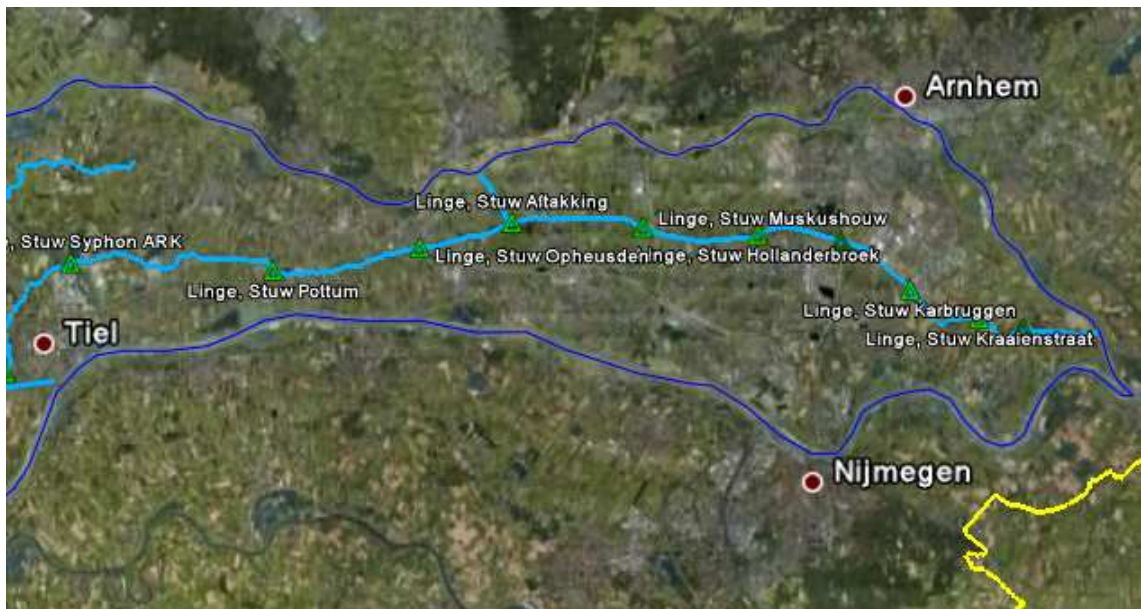
Figuur 3.1. De Linge

Het stroomgebied van de Linge is ongeveer 100 kilometer breed van oost naar west en 30 kilometer hoog van noord naar zuid. De belangrijkste plaatsen in het gebied zijn *Tiel*, *Geldermalsen*, *Leerdam*, *Gorinchem* en *Hardinxveld-Giessendam*. Het overgrote deel van het gebied wordt echter gebruikt voor landbouw, fruitteelt en

veeteelt. Het gebied herbergt dan ook Nederlands bekendste fruitteelt gebied, de Betuwe.



Figuur 3.2. Stroomgebied van de Linge westzijde.

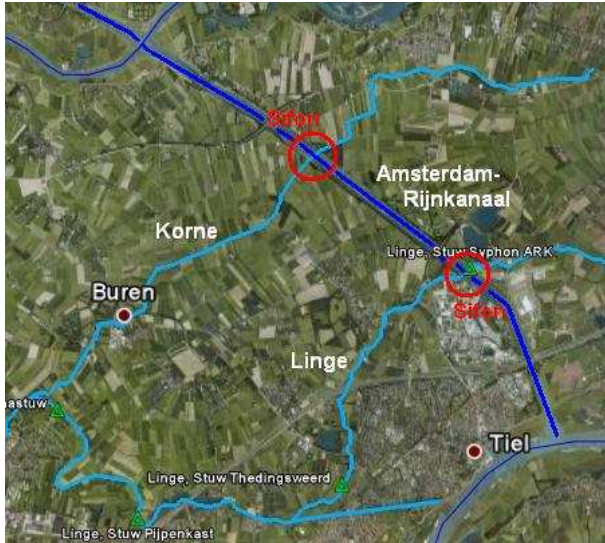


Figuur 3.3. Stroomgebied van de Linge oostzijde.

Het gebied wordt ten oosten van *Tiel* doorsneden door het *Amsterdam-Rijnkanaal*. De Linge wordt hier echter middels een sifon onder het kanaal door geleid. Zo blijft de Linge toch één geheel.

Naast de Linge bestaat het systeem nog uit twee andere takken, de *Korne* en het *Merwedekanaal*. De *Korne* komt ten westen van *Tiel* samen met de Linge en verzorgt de afwatering van het gebied ten noorden van *Tiel*. Ook deze tak kruist het *Amsterdam-Rijnkanaal* met een sifon. Zie figuur 3.4.





Figuur 3.4. Lingetak de Korne en de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal

Tussen de Linge en het *Merwedekanaal* zijn twee verbindingen. De eerste verbinding is de *Arkelse Kanaalsluis (AKS)*. Verderop bij Gorinchem ligt de *Gorinchemse Kanaalsluis (GKS)*. Beide sluisen zijn altijd open. Bij grote uitzondering worden deze sluisen gesloten voor een verbeterde afstroming van het *Merwedekanaal*. Onderstaande figuur geeft een close-up van de Linge rond Gorinchem.



Figuur 3.5. Verbindingen Merwedekanaal en Linge.

### Functie en beheer

De Linge is de hoofdader voor de regionale aanvoer en afvoer van water. Dus eigenlijk is het een zogenaamde boezem. Dit betekent dat polders water afvoeren op of onttrekken van de Linge. De Linge zelf fungeert als transportsysteem voor het omliggende gebied.

Om deze transportfunctie te kunnen uitoefenen wordt het peil van de Linge beheerd. *Waterschap Rivierenland* is de verantwoordelijke voor het beheer. Het gaat hier om zowel kwantitatief als kwalitatief beheer en staat niet op zichzelf maar in samenhang met de omliggende polders.

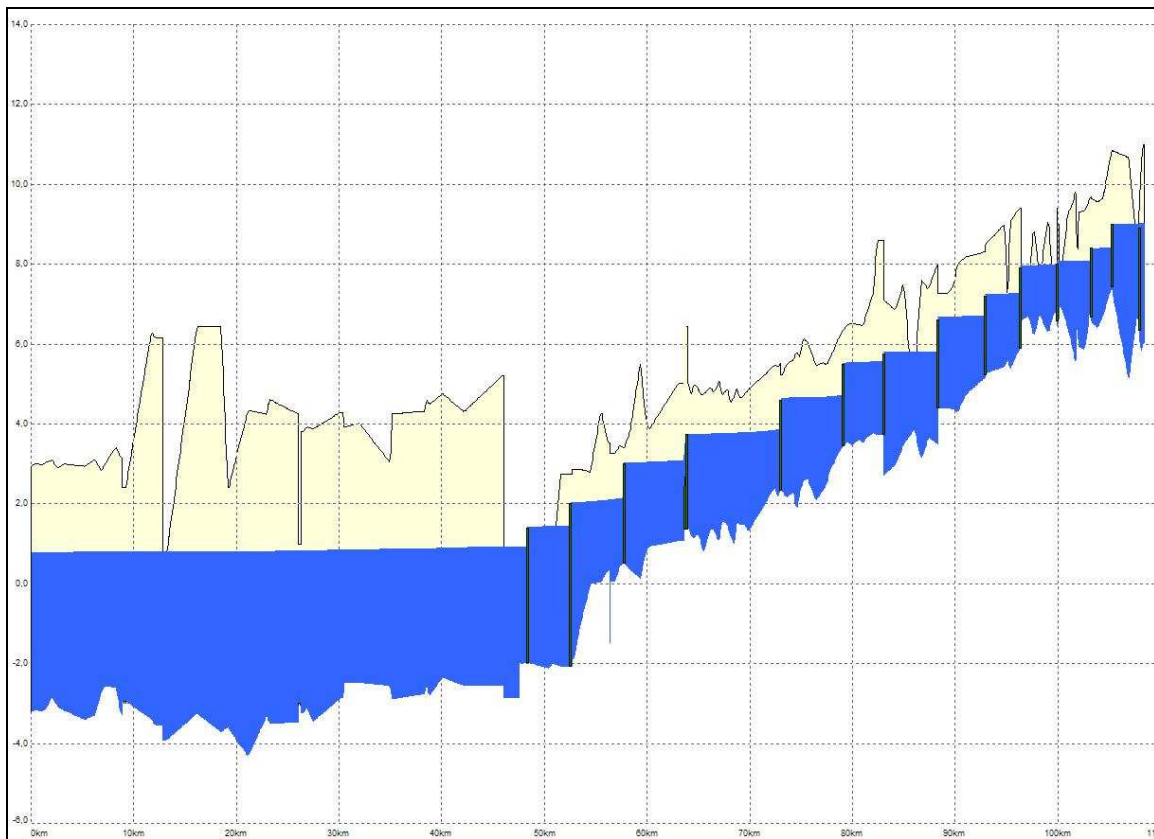
In tijden van droogte kan water worden ingelaten vanaf het *Pannerdensch Kanaal*, de *Neder-Rijn* of de *Waal*. Dit gebeurt frequent in de zomermaanden. In natte tijden wordt water geloosd door middel van spuikokers en pompen.

Door de grote lengte van de rivier en het sterke hoogteverschil in het beheersgebied is de Linge door stuwen verdeelt in panden. Ieder van deze panden heeft een eigen zomer- en winterstreefpeil.

## Panden en stuwen

De Rivier de Linge is een complex watersysteem met daarin vele kunstwerken. Het systeem bevat onder andere 16 beweegbare stuwen, 2 vaste stuwen, 2 sifons, 2 sluizen en 4 gemalen. De kunstwerken zijn in figuur 3.2 en 3.3 op de kaart aangegeven. In de voorgaande paragraaf zijn de sifons en sluizen al aan bod gekomen. In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de kunstwerken waar sturing plaats vindt. Dit zijn de beweegbare stuwen en de gemalen.

De stuwen in de Linge verdelen de rivier in 14 panden waarin afzonderlijk de waterstand wordt geregeld. In figuur 3.6 is een lengteprofiel van de Linge gegeven waarin de 14 panden duidelijk zichtbaar zijn. De gegevens van de panden, zoals de lengte en gemiddeld dwarsprofiel zijn terug te vinden in bijlage 1.



Figuur 3.6. Zijaanzicht van de hoofdtrak van de Linge.

### Beweegbare stuwen

In de hoofdtrak van de Linge liggen 13 beweegbare stuwen. Daarnaast liggen er nog drie stuwen in de zijtak de *Korne*. De stuwen in de *Korne* worden in deze studie niet behandeld.

Bij de beweegbare stuwen is een bedieningspaneel voor handmatige bediening aanwezig, tevens wordt hier ook het sturingsbestand opgeslagen voor de

automatische sturing. Wanneer de sturing geautomatiseerd is, bepaalt een algoritme in het sturingsbestand of de stuw wordt veresteld. Wanneer een verstelling noodzakelijk is, wordt er gedurende een in het sturingsbestand opgegeven tijdsduur een signaal naar de elektromotor gestuurd. De elektromotor drijft een raderwerk aan waarmee de stuw veresteld wordt. In de volgende figuur is een foto van een typische Lingestuw weergegeven.



Figuur 3.7. Lingestuw Thedingsweerd (Tiel).

In de figuur is naast het raderwerk en de elektromotor ook de benedenstroomse peilbuis te zien waarmee de waterstand gemeten wordt. Direct bovenstrooms van de stuw bevindt zich een soortgelijke peilbuis. Het bedieningspaneel is niet zichtbaar in de figuur. De namen en afmetingen van de kunstwerken zijn te vinden in bijlage 2.

### Gemalen

In het watersysteem zijn vier gemalen aanwezig. Drie van de gemalen liggen in de hoofdtak. Stroomafwaarts zijn dit het *Kuijkgemaal*, het van *Beuningengemaal* en het *Kolffgemaal*. Het gemaal in de *Korne* wordt niet behandeld. De gemalen worden ingezet in de nattere periode van het jaar. De drie gemalen markeren scheidingen in het totale systeem waar eerder aparte waterschappen voor het beheer verantwoordelijk waren. In het huidige beheer is dit nog af te lezen, er wordt naar gestreefd om niet af te wentelen naar benedenstroomse gebieden, dus ieder deelgebied wordt geacht een surplus aan water af te malen.

Het eerste gemaal, het *Kuijkgemaal* heeft een totale capaciteit van  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  verdeeld over drie pompen. Een van de drie pompen kan ook water inmalen met  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Naast pompen kan er ook water geloosd worden onder vrij verval door een afsluitbare koker. Dit kan alleen wanneer de buitenwaterstand op de Lek voldoende laag is.



*Figuur 3.8. Het Kuyjkgemaal bij de Lek.*

Het *Amsterdam-Rijnkanaal (ARK)* zorgt voor de tweede scheiding in het systeem. Ook hier is een gemaal aanwezig dat met twee pompen van  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  uitwatert op het *ARK*. Inmalen kan met een van de twee pompen. Tevens kan onder vrij verval water worden geloosd door een afvoerkoker met een vergelijkbare capaciteit als de pompen.



*Figuur 3.9. Van Beuningengemaal bij het Amsterdam-Rijnkanaal.*

Aan het einde van het derde deel van het systeem staat het *Kolffgemaal*. Het overgrote deel van het waterbezwaar wordt hier weggepompt of onder vrij verval op de *Merwede* geloosd. De drie pompen hebben een gezamenlijke capaciteit van  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Onder iedere pomp bevindt zich een lozingskoker, deze kokers worden bij voldoende verval gebruikt voor het uitlaten van water.





*Figuur 3.10. Het Kolffgemaal bij de Merwede.*

De technische gegevens van de gemalen zijn tevens te vinden in bijlage 2. De stuwen en pompen worden gebruikt voor het beheren van de waterstanden in de Linge. In de volgende paragraaf wordt aangegeven hoe de streefpeilen volgens de huidige sturing worden gehandhaafd.

## **Toegepaste sturing**

De toegepaste sturing beperkt zich tot de beweegbare stuwen en de pompen. Per type kunstwerk wordt globaal aangegeven hoe de huidige sturing werkt. In bijlage 3 zijn de sturingsbestanden opgenomen.

### **De stuwen**

De Lingestuwen worden ingezet om de bovenstroomse waterstand te sturen. Hiervoor wordt alleen de lokale bovenstroomse waterstand als input gebruikt voor een feedback regeling. De stuwen zijn geautomatiseerd en worden op afstand aangestuurd. Voor de aansturing van de stuwen is voor iedere stuw een stuurprogramma geschreven. Deze kunnen via de computers op het hoofdkantoor van het waterschap worden aangepast en worden verstuurd naar de bedieningspanelen van de stuwen. Na het inladen van het programma draaien de stuwen autonoom. Indien nodig kunnen de stuwen ook handmatig worden bijgesteld.

In de sturingsprogramma's zijn twee typen regelingen aangetroffen die de lokale bovenstroomse waterstand regelen. De regelingen treden in werking bij een afwijking van het streefpeil van twee centimeter. Wanneer een stuw aangestuurd moet worden, geeft het stuurprogramma aan hoelang de stuw aangestuurd moet worden. De duur van het aansturen gaat met stappen van een seconde.

In de eerste type regeling wordt een vaste aanstuurtijd doorgegeven. Dit betekent dat er een gefixeerde verstelling van de drempelhoogte van de stuw wordt bewerkstelligd. Vervolgens wordt afhankelijk van de afwijking van het streefpeil bepaald wanneer de regeling opnieuw wordt doorlopen. De sturingstijdstap is dus variabel en varieert tussen de 1 en 15 minuten. Des te groter de afwijking, des te sneller zal de regeling opnieuw in werking treden. Hierdoor is de regeling min of meer proportioneel. Bij een grotere afwijking zal de stuw vaker worden versteld en zal er dus een grotere drempelverandering worden gerealiseerd.

De tweede type regeling is zuiver proportioneel. De aanstuurtijd en dus de verstelling wordt berekend op basis van de afwijking ten opzichte van het streefpeil. Dit type

regeling heeft een vaste sturingstijdstap. Deze regeling is toegepast bij de stuwen *Rijksweg A325*, *Muskushouw* en *Pottum*. De overige stuwen worden aangestuurd volgens type 1.

Opvallend is dat de waterstanden die als input voor de regeling gelden, op drie uitzonderingen na, niet worden gefilterd. De waterstanden bij de stuwen *Krakkendel*, *Karbruggen* en *Aftakking* worden wel gefilterd. Hierbij wordt 90% van de oude waterstand meegenomen en 10% van het nieuw gemeten peil.

### De gemalen

De drie gemalen uit het systeem zijn ook geautomatiseerd. Daarnaast is er de mogelijkheid om onder vrij verval te lozen. In de stuurprogramma's zijn routines opgenomen die bepalen of er gepompt of gespuid wordt. Ten tijde van een lokaal wateroverschot in het systeem wordt er in principe gespuid wanneer dat mogelijk is, anders wordt er gepompt. In de regelingen is een routine opgenomen die, door vergelijking van de binnen- en buitenwaterstand, bepaalt of er gespuid kan worden.

Het *Kuijkgemaal* en het *van Beuningengemaal* maken ook gebruik van een lokale bovenstroomse feedback regeling, net als de stuwen. Echter, er kan ook worden overgeschakeld op een debietregeling. De stuwen waar de gemalen bij liggen worden dan zo ingesteld, dat een vast debiet wordt gehandhaafd, het overige water wordt door de pompen afgemalen. Hierdoor worden deze pompen gebruikt om water uit het bovenstroomse gebied af te malen en het benedenstroomse gebied te ontlasten. Dit is de vertaling van het in de vorige paragraaf aangegeven "niet afwentelen".

Het *Kolffgemaal* maakt gebruik van een geavanceerdere regeling. De waterstand in het aanliggende pand wordt op meerdere plaatsen gemeten. Hiermee wordt de totale waterlast in het pand bepaald en de daarmee gepaard gaande af te voeren waterschijf. Door middeling van de gemeten peilen wordt een gemiddeld peil verkregen:

$$H_{\text{gemiddeld}} = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) / 4.$$

Dit gemiddelde peil wordt gerelateerd aan de aanslagpeilen van de drie pompen. De vier meetpunten van deze "gebiedsregeling" liggen bij het *Kolffgemaal*, de *Gorinchemse Kanaalsluis*, de *Arkelse Kanaalsluis* en nabij *Tricht*. In onderstaande figuur zijn de meetpunten weergegeven met de rode stippen.



Figuur 3.11. Meetpunten geavanceerde pompregeling Kolffgemaal.

## **Handmatig ingrijpen**

De wijze waarop de sturing nu invulling krijgt, heeft tot gevolg dat handmatig ingrijpen noodzakelijk is. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de dagelijkse praktijk en calamiteiten. Dat er ingrepen nodig zijn, komt deels doordat de huidige sturing niet voldoende presteert, maar ook de kunstwerken zelf hebben beperkingen die een ingreep soms noodzakelijk maakt.

De tekortkomingen van de sturing zit nu met name in het willen anticiperen op de weerverwachting. Hierin spelen zowel droogte, regenval als wind een rol. Ieder van deze verschijnselen heeft invloed op het systeem. Wind kan opstuwung veroorzaken in delen van het systeem, waardoor reageren op lokaal gemeten waterstanden tekort schiet of de afwatering belemmerd wordt. Lange perioden van regenval of droogte kunnen de beheerders ertoe brengen alvast voor te malen of water in te laten. Dergelijke zaken zijn niet in de huidige sturing opgenomen.

Enkele kunstwerken beperken nu de regelbaarheid van het systeem. De Lingestuw *Muskushouw* heeft bijvoorbeeld een hoge drempel, waardoor het gewenste doorstromende debiet niet wordt gehaald zonder peilverhoging. Om toch voldoende afstroming te krijgen kan de stuw in zijn geheel worden opgetrokken (uit het water gelicht). Dit moet handmatig gebeuren. In de praktijk gebeurt dit alleen bij de *Muskushouw*, maar er zijn meer stuwen met hoge drempels die voor problemen zorgen.

In een uitzonderlijke geval, bij extreme zware regenval loopt het peil op het *Merwedekanaal* zodanig op dat een ingreep noodzakelijk wordt. De kaden langs het kanaal zijn laag, zeker in vergelijking met de Lingedijken. Deze twee takken komen bij elkaar bij *Gorinchem*. Door de verbindingssluisen bij *Arkel* dicht te zetten en de toevoer vanaf de Linge bij *Gorinchem* te knijpen, wordt de afwatering van het *Merwedekanaal* bevorderd. Het dichtzetten van de sluisen is ook een handmatige ingreep en daardoor onwenselijk. In dit geval gaat het wel om een calamiteit met lage frequentie van voorkomen. Investerings in automatisering is hier niet aan de orde. Het verlagen van de frequentie van voorkomen door beter waterbeheer is natuurlijk wel wenselijk.

## **Modellering van het systeem**

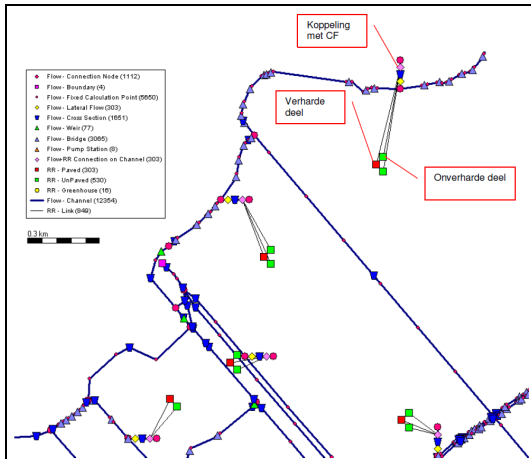
In deze studie wordt gebruik gemaakt van een computermodel van het gehele Lingesysteem. Hierin worden zowel de Linge als de omliggende polders meegenomen. Deze paragraaf geeft een algemene beschrijving van het model en hoe de werkelijkheid wordt gerepresenteerd in het model. In het volgende hoofdstuk wordt gekeken wat de consequenties zijn van het gebruik van een model voor deze studie en de samenhang met de overige software.

### **Het computermodel**

In het neerslag-afvoer proces kunnen twee onderdelen worden onderscheiden, de ontwatering en de afwatering. De ontwatering speelt zich af in polders, de afwatering in de watergangen. Het gebruikte model legt hier ook de scheiding.

In de eerste module, het hydrologische model, wordt regen tot afvoer verwerkt binnen polders. Hier worden verschillende landgebruiktypes onderscheiden met verschillende neerslag-afvoer relaties. Iedere polder in het stroomgebied van de Linge is in dit model opgenomen als een combinatie van reservoirs met

eigenschappen en onderlinge stroomrelaties, zie figuur 3.13. Het water wordt uiteindelijk via stuwen en gemalen geloosd op het boezemsysteem. Het model benadert hiermee de ruimtelijke en temporale verdeling van de afvoer als gevolg van neerslag.



Figuur 3.14. Close-up voorbeeld RR-CF model.

Het boezemsysteem, de Linge en haar zijtakken, is gemodelleerd in een hydraulisch model. In dit model worden, in tegenstelling tot het hydrologische model, details opgenomen van watergangen, zoals het dwarsprofiel en de wandruwheid. In één watergang zitten hier ook veranderingen in, die gemodelleerd worden. Door deze wijze van modellering wordt de stroming van het water gedetailleerd berekend.

Het samengestelde model is gemaakt in *Sobek* door HydroLogic (2009). Zij hebben in de studie "Toetspeilen Linge op vernieuwende wijze bepaald" een model opgesteld om waterpeilen te bepalen in (extreme) afvoersituaties. Het model is hierdoor geschikt voor de doeleinden van deze studie, de afvoersituatie. De geschiktheid zit in de kalibratie van het model. De waarden van de wandruwheid van waterlopen is bijvoorbeeld seizoensafhankelijk. Er wordt geen nader onderzoek gedaan naar het model, maar er wordt aangenomen dat het nauwkeurig genoeg is voor deze studie. Uit eerste berekeningen is indicatief gebleken dat het model de werkelijkheid voldoende benadert. Deze studie gaat vooral om de kwalitatieve verschillen tussen regelingen gaat en niet om een perfecte benadering van de werkelijkheid.

## Kunstwerken

De kunstwerken in de Linge zijn tevens in het model opgenomen. De afmetingen en capaciteiten zijn overgenomen en met het waterschap nagelopen. De aansturing van de kunstwerken wordt via een apart, met het model communicerende module in *Matlab* bewerkstelligd. Alle benodigde gegevens, te vinden bijlage 2, zijn in deze module opgenomen.

De spuimogelijkheden bij het *Kuijkgemaal* en het *van Beuningengemaal* zijn niet gemodelleerd. Dit wordt gerechtvaardigd, doordat gedurende de simulatieperiode geen lozing onder vrij verval mogelijk is; de buitenwaterstanden zijn hiervoor te hoog. Ook hebben de gemalen een gefixeerd debiet, terwijl in werkelijkheid het debiet afhankelijk is van de opvoerhoogte. Er wordt verondersteld dat de variatie in debiet dermate klein is, dat dit een te verwaarlozen effect heeft op de uitkomsten.

## Meteorologische omstandigheden

De regelingen worden getest op een situatie met zowel dagelijkse omstandigheden als extreme afvoer. Voor deze afvoer is gekozen voor januari 2007. Deze maand bevat zowel dagelijkse omstandigheden (0 tot 2 mm/dag) als een piekperiode met extreme afvoer (tot meer dan 20 mm/dag) en is hierdoor uitermate geschikt om de regelingen te testen. De keuze van de periode is vervolgens voorgelegd aan de peilbeheerders van het waterschap. De peilbeheerders hebben aangegeven dat deze periode spannend is geweest, vanwege de grote neerslaghoeveelheden halverwege de maand. Zij zijn dan ook zeer geïnteresseerd in de uitkomsten van deze studie en de mogelijke verbeteringen die gevonden kunnen worden.

De maand januari 2007 is relatief natte januarimaand, zie onderstaande tabel. Met name de natte periode van de 17<sup>de</sup> tot de 22<sup>ste</sup> maken dat de totale regenval aan de hoge kant ligt. Buiten deze periode is er geen verschil met de andere januarimaanden vanaf 2000.

*Tabel 3.1. Vergelijking regenval in januari.*

Jaar	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	<b>Gem</b>
Regenval (mm)	42.5	49.6	65.2	109.6	17.6	58.9	117.8	66.0	71.5	76.8	42.9	<b>65.3</b>

## Regen

Voor de invoer van regen en wind in het model is er per tijdstap slechts één waarde voor het gehele gebied mogelijk. De opgegeven waarden gelden dus voor het gehele gebied en dienen dus ongeveer gelijk te zijn aan het gebiedsgemiddelde, zodat de totale belasting op het systeem gelijk is aan de werkelijk opgetreden belasting.

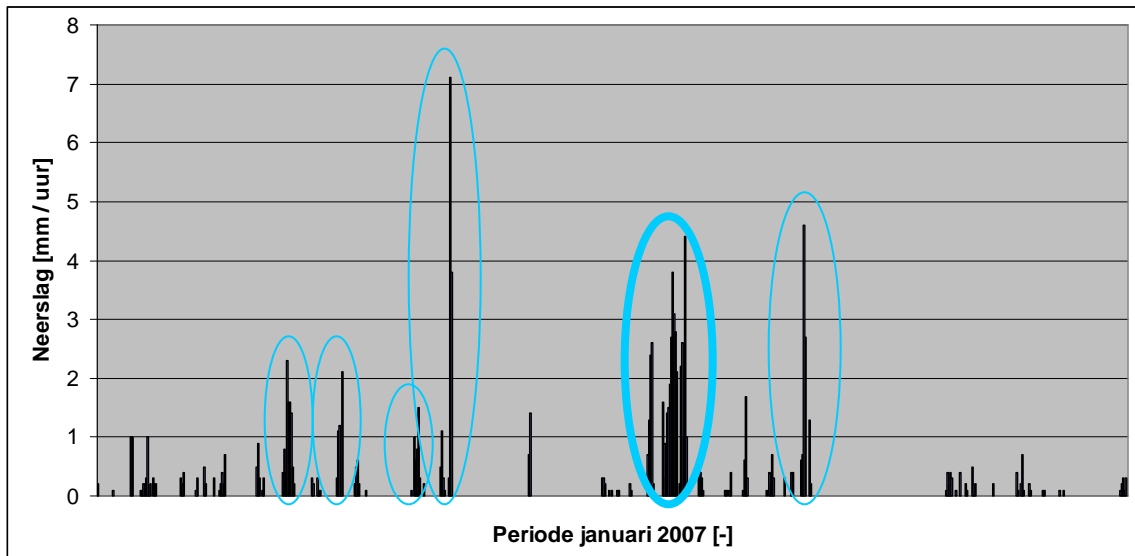
De regendata is beschikbaar van meetstation Herwijnen (gelegen in westen van het studiegebied) en van vier omliggende weerstations. Het studiegebied is langgerekt. Regen is een ruimtelijk zeer verdeeld fenomeen en er kan dus niet zomaar voor het ene of andere regenstation gekozen worden. Hoewel regenval in de wintermaanden uniformer is dan in de zomer, wordt gecontroleerd of de beschikbare waarden van de verschillende meetstations voor januari 2007 niet te veel verschillen.

Allereerst is er bepaald of de verschillen tussen de weerstations groot zijn. Dit is niet het geval, zowel de maandtotalen als dagsommen van de stations komen redelijk overeen. Tevens is geconcludeerd dat de waarden van meetstation Herwijnen goed overeen komen met de gemiddelde waarden van alle stations verspreid rond het gebied. Er is daarom gekozen om de regendata van meetstation Herwijnen voor het gehele gebied te gebruiken.

Het is ook mogelijk om de effecten van gespreide regenval te onderzoeken en de wijze waarop het Lingesysteem deze regenval verwerkt. Hiertoe moet het model worden aangepast met de invoermogelijkheid van meerdere regenstations. In deze studie wordt dit niet gedaan, vanwege de geruime hoeveelheid extra werk dit zou kosten. Het is echter wel een zeer waardevolle aanvulling op het onderzoek.

De volgende figuur geeft het neerslagverloop in de periode januari 2007, zoals gebruikt in de simulaties.





Figuur 3.15. Verdeling neerslag januari 2007.

In januari 2007 zijn een zestal neerslag gebeurtenissen van belang. Deze zijn omcirkelt in de figuur. De extra aangezette cirkel geeft de bui van 18 januari weer en is een extreme bui van 40 mm in een dag.

### Wind

Wind is een fenomeen dat ruimtelijk veel minder spreiding vertoont. De ruimtelijke schaal waarop het zich afspeelt is veel groter. Daarom zijn de beschikbare uurwaarden voor windrichting en windkracht van KNMI-metstation Schiphol direct overgenomen.

De gevolgde wijze voor de invoergegevens wordt voldoende nauwkeurig geacht voor de modelsimulaties en is conform de beroepspraktijk (Nederpel 2009). De regendata zijn bekend bij de beheerder, waterschap Rivierenland en de winddata zijn beschikbaar via de website van het KNMI.

### Beginvoorwaarden

Bij aanvang van de simulatie moeten beginvoorwaarden gegeven worden, dit geldt voor waterstanden, stuwstanden, spuidebieten en dergelijke. Voor het bereiken van deze beginvoorwaarden is het systeem doorgerekend met een langdurige stationaire belasting van 3 mm/dag. Hierdoor is er voor de winterperiode een ruime hoeveelheid water in het systeem aanwezig.

Een tweede effect van deze langdurige voorberekening is dat alle stuwen ingeregeld zijn. Dat wil zeggen, de stuwen staan zo ingesteld dat het streefpeil wordt gehandhaafd, ongeacht welke regeling er op dat moment geldt. Alle volgende simulaties starten vanaf dit punt met dezelfde beginvoorwaarden, zodat vanaf de start van de berekeningen de verschillen in de regelingen zichtbaar zijn. In werkelijkheid zou iedere regeling op een andere wijze de voorgaande periode hebben doorlopen, er is voor deze aanpak gekozen om bij gelijke omstandigheden, dus ook beginvoorwaarden, de verschillen tussen de regelingen te kunnen bekijken.

## **Hoofdstuk 4 - Control Scenario's**

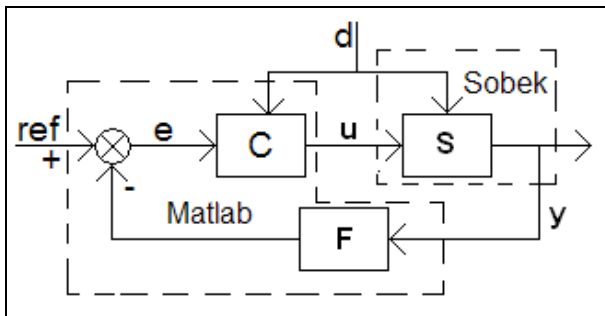
## Inleiding

Dit hoofdstuk combineert de theoretische basis gelegd in hoofdstuk 2 en het onderzoeksgebied zoals weergegeven in hoofdstuk 3. Het geeft de uiteindelijke praktische uitwerking van dit onderzoek. Daartoe wordt eerst de werking van het instrumentarium besproken aan de hand de sturingslus. Daarna wordt een nadere toelichting van keuzes voor dit instrumentarium gegeven.

Daarnaast wordt ingegaan op de verschillende typen regelingen. Van iedere regeling wordt aangegeven waarom deze is geprogrammeerd. Achter iedere regeling zit een filosofie of bedoeling en daarmee een verwachting van het presteren van de regeling. Naast een algemene classificatie van de regeling op basis van de meet- en regeltechniek wordt ook ingegaan op werking van de regeling. Als laatste wordt ook het verwachte gedrag (of prestatie) beschreven.

## Het instrumentarium

In hoofdstuk 2 zijn aan de hand van de sturingslus de basisprincipes van de meet- en regeltechniek besproken. Voor het modelleren van de testomgeving moet die sturingslus worden ingevuld. Het studiegebied, de Linge en haar stroomgebied zijn geprogrammeerd in het modelpakket *SOBEK Rural* (Deltares, 2006). De aansturing van de kunstwerken in het gebied is in *Matlab* (*MathWorks 2003*) geprogrammeerd. Dit betekent dat *Sobek* het *S* blok uit het blokkendiagram voor zijn rekening neemt en *Matlab* het *C* (en *F*) blok. Dit is in het onderstaande blokkendiagram weergegeven. De stippellijnen geven weer waar de grenzen liggen van de onderdelen die de verschillende software modules voor hun rekening nemen.



Figuur 4.1. Verdeling Softwarepakketten over de sturingsketen.

Te zien is dat het modelpakket *Sobek* alleen het systeemblok *S* omvat. *Sobek* heeft als input de sturingsacties  $u$  en de verstoringen  $d$ . De output van *Sobek* is de toestand van het systeem,  $y$ .

Het sturingsblok *C* omvat de filtering (*F*), het bepalen de afwijkingen ( $e$ ) en de aanstuuracties ( $u$ ). Als input heeft het blok een referentie, het streefpeil opgelegd door het waterschap (Tauw 2006), eventueel de verstoring (bij gebruik van feedforward) en de systeemtoestand  $y$ . Als output heeft het blok de sturingsacties  $u$ .

De koppeling van de beide systemen vindt dus plaats bij de pijlen  $u$  en  $y$ . Aan het einde van iedere rekentijdstep van het model geeft *Sobek* de huidige systeemtoestand  $y$  door aan *Matlab*, die op basis daarvan de sturingsacties  $u$  bepaalt en deze terug geeft aan *Sobek*. De volgende tijdstep worden deze acties meegenomen en een nieuwe toestand berekend, waarna de cyclus opnieuw begint.



### **Consequenties van de Sobek modellering**

Het gebruik van een model leidt tot versimpeling in de weergave van de stromingsdynamiek die kenmerkend is voor rivieren. Uit de vergelijking van de resultaten van eerste simulaties met meetdata is gebleken dat het model voldoende nauwkeurig is om de toestand van het systeem te beschrijven. Voor deze vergelijking zijn de gemeten waterstanden bovenstrooms van de stuwen optisch vergeleken met de gesimuleerde waterstanden. Het gedrag van de stuwen van de huidige regeling is door medewerkers van het waterschap gecontroleerd.

Waar het wel om gaat is dat parameters die worden gebruikt voor het afstellen van de regelingen afhankelijk zijn van de geometrie van de waterlopen. In tegenstelling tot de sterk uniforme geometrie van kunstmatige waterlopen is de geometrie van rivieren lastiger te bepalen. Er moet worden uitgegaan van gemiddelde waarden. De vraag is, of dat dit leidt tot onacceptabele afwijkingen in het eerste ontwerp van de regelingen. De resultaten van dit eerste ontwerp zullen de doorslag geven in de keuze voor het toepassen van het type regeling. De verfijnde afstelling zal toch altijd in de praktijk gebeuren op basis van ervaring.

Om deze reden wordt het gebruik van een model, hoewel het de dynamiek versimpelt, gerechtvaardigd. Belangrijk hierbij is dat de verhouding in detail van het interne model van de regelaar (die zorgt voor de voorspelling van sturingsacties) ten opzichte van het model in dezelfde orde ligt als die van het interne model en de werkelijkheid.

### **De Matlab programmeringen**

De verschillende regelaars in dit onderzoek zijn geprogrammeerd in *Matlab*. Dit is een krachtig rekenprogramma waarin allerhande wiskundige faciliteiten aanwezig zijn. Mede vanwege de Real Time Control (RTC) functionaliteiten, zoals het opstellen van een state space en het berekenen van de LQR optimalisatie, is gekozen voor dit pakket.

Een andere reden is dat het programma de regelaarimplementatie goed benaderd. In het programma kunnen tekstbestanden worden geschreven in *M-code* die worden gelezen door een verwerker. Zo kan een hele serie rekenopdrachten worden uitgevoerd en worden variabele en constanten in het geheugen opslagen. De waarden kunnen ook buiten het programma beschikbaar gemaakt worden door ze te exporteren. De bestanden in *M-code* zijn dus stuurbestanden die in een andere vorm ook bij het *Waterschap Rivierenland* aanwezig zijn voor de aansturing van de kunstwerken.

Voor ieder type regeling is een stuurbestand (en enkele hulpbestanden) gemaakt die in bijlage 3 zijn weergegeven.

### **Simulaties in cases**

In totaal zijn er zeven regelingen geprogrammeerd en vervolgens gebruikt in de simulaties. Voor iedere regeling is een zogenaamde *Case* aangemaakt. Grofweg neemt de hoeveelheid informatie (statische én dynamische) waarop de regeling is gebaseerd, toe per case.

De eerste case bevat de regeling zoals die nu wordt toegepast op de Linge door *Waterschap Rivierenland*. Dit is de referentiecasse voor andere regelingen. Ook wordt

met deze case beoordeeld of het model de werkelijkheid voldoende nauwkeurig benaderd.

De huidige regeling maakt alleen gebruik van de lokale bovenstroomse waterstand van de stuwen. Op verzoek van het waterschap is een soortgelijke regeling geprogrammeerd, met als enige verschil dat in plaats van alleen de lokale bovenstroomse waterstand ook een tweede waterstand aan de bovenstroomse zijde van het pand wordt meegenomen. Deze twee waterstanden worden gemiddeld met als doel te sturen op de pandgemiddelde bovenstroomse waterstand en vormt de tweede case.

In de derde case is het concept lokale bovenstroomse sturing wederom toegepast. Deze keer echter geprogrammeerd op basis van het gedecentraliseerde sturingsprincipe met kennis van de meet- en regeltechniek. Hierin wordt informatie meegenomen van de geometrie van het systeem, in de bepaling hoe de regeling is afgesteld.

Daarna wordt de stap gemaakt naar een centrale regeling, de vierde case. Deze regeling maakt gebruik van zowel de geometrische eigenschappen (statische informatie) van het systeem als van alle peilmetingen (dynamische informatie) in het systeem.

Als laatste zijn er drie regelingen gemaakt waarbij de gemalen van de Linge worden aangestuurd met een voorspellende module. Cases vijf, zes en zeven. Het systeem bleek al tijdens de eerste simulaties gevoelig voor de aansturing van de gemalen, wat het noodzakelijk maakte te rekenen met drie varianten.

In de volgende paragrafen worden de verschillende regelingen nader toegelicht. Iedere paragraaf is opgebouwd uit een korte introductie die het hoe en waarom van de regeling verduidelijkt. Vervolgens wordt de regeling gespecificeerd. Als derde wordt aangegeven hoe de regelingen afgesteld zijn en als laatste wordt het verwachte gedrag toegelicht.

## Case 1 – Huidige sturing

De huidige sturing is de regeling zoals die nu wordt toegepast in het watersysteem van de Linge. De regeling omvat de aansturing van alle geautomatiseerde kunstwerken in het systeem. Dit zijn dertien stuwen en drie gemalen in de hoofdtak, en drie stuwen en éénemaal in de zijtak de *Korne*. In de overige cases worden de kunstwerken in de *Korne* niet aangepast. Het onderzoek richt zich op de aansturing van de Lingestuwen. De uitstroom van de *Korne* wordt gezien als een externe belasting, waar geen verandering in optreedt.

De huidige regeling is zo goed als mogelijk overgenomen in Matlab. Hiertoe is de programmeercode van de regeling uit het systeem van *Waterschap Rivierenland* gehaald. Deze code is geanalyseerd en zo goed mogelijk vertaald naar de taal van Matlab, zodat de eigenschappen van de regeling behouden blijven. Daarbij dient gezegd te worden dat er niet wordt gestreefd naar een één op één gelijkheid met de werkelijkheid, slechts of deze bij benadering overeenkomt. Het gaat in deze studie om het vergelijken van regelingen met elkaar en een inschatting van de impact op het werkelijke systeem, niet om een zo waarheidsgetrouw mogelijk model te maken.

### **Type regeling**

De sturing van de dertien Lingestuwen bestaat uit dertien aparte lokale bovenstroomse regelingen. De stuwen opereren onafhankelijk van elkaar, dus iedere stuw "lost zijn eigen probleem op". In hoofdstuk 3 is de huidige regeling al nader beschreven. Daar is gesteld dat de sturing niet zuiver proportioneel is en dat waterstanden nauwelijks gefilterd worden. Het Kuijkgemaal en het van Beuningengemaal hebben eveneens een lokale bovenstroomse regeling. Het Kolffgemaal maakt gebruik van de in hoofdstuk 3 beschreven regeling.

In het modelinstrumentarium moeten absolute verstellingen van de stuwen worden opgegeven vanuit Matlab aan het Sobekmodel. In de originele regeling wordt echter de duur van een verstelling doorgegeven. Om er achter te komen wat de verstelling is die daar bij hoort zijn voor alle stuwen de verstelsnelheden opgemeten in het veld. Deze zijn in bijlage 2 te vinden. Tevens is zo ook te bepalen wat de minimale en maximale verstelling per sturingstijdstap is.

### **Werking**

De huidige regeling bevat twee type stuwregelingen. Beide regelingen starten met een momentopname van de bovenstroomse waterstand, de benedenstroomse waterstand en de stuwstand.

Het TMX systeem van het waterschap werkt met lopende timers, die in MatLAB niet over te nemen zijn. Het instrumentarium rekent per minuut, waardoor timers in het instrumentarium met stappen van een minuut aftellen, in plaats van per seconde. Voor de belangrijkste timers is echter een minimale stap van 1 minuut gedefinieerd in de huidige regeling, waardoor geen problemen ontstaan in de vertaling. Voor processen die korter duren dan één minuut, wordt aangehouden dat ze worden uitgevoerd in diezelfde rekenstap.

De eerste timer die gecontroleerd wordt is de systeemtimer. Deze bepaalt of de regeling in werking treedt, wanneer deze afloopt op waarde nul. Bij het eerste type wordt na het aflopen van de systeemtimer gekeken of er ingegrepen moet worden. Is dit het geval, dan wordt de huidige bovenstroomse waterstand vergeleken met het streefpeil. Is de afwijking groter dan twee centimeter, dan wordt de stuw met een vaste tijd bijgesteld, maar pas nadat er controles zijn uitgevoerd. Deze controles houden in of de stuw niet al zijn minimale of maximale stand heeft bereikt en of de stuw niet al boven het waterpeil staat (bij een te laag peil). Dit gebeurt met "als-dan" semantiek. Vervolgens wordt op basis van de afwijking een wachttijd berekend en toegevoegd aan de systeemtimer, die daarna weer naar nul terugloopt. Bij nul wordt er weer ingegrepen.

Ook het tweede type regeling heeft een systeemtimer die afloopt naar nul. Op basis van de afwijking wordt een aanstuurtijd (en dus een stuwverstelling) berekend. Deze is begrensd op de rekentijdstap van het model. Een stuw kan per rekenstap immers niet langer aangestuurd worden dan die rekentijdstap. Bij een afwijking van meer dan twee centimeter wordt de aanstuurtijd daadwerkelijk toegepast en de stuw verستeld. De systeemtimer wordt vervolgens ingesteld op een wachttijd, de sturingstijdstap van de regeling, plus de bepaalde aanstuurtijd.

Voorbeelden van een regeling volgens type 1 en 2 staan in tabel 4.1.

## Hoofdrapport

Tabel 4.1. Voorbeeld stuwregeling type 1 en 2.

Type 1	Type 2
<pre> % Variabels S2CL=SobekCL_id_023232; S2UL=SobekH_C_9_1_78; %S2DL=SobekH_C_9_1_80;  % Control rules  S2Timer=S2Timer-60; if S2Timer&lt;0     S2Timer=0; end  S2EL=S2UL-S2TL; S2WT=900-abs(S2EL-0.02)*20000; if S2WT&lt;60     S2WT=60; end  if S2Timer==0     if S2EL&gt;0.02         if S2CL&gt;7.75             S2CL=S2CL-S2Vweir*5;             SobekS_id_023232=S2CL;             S2Timer=S2WT;         end         elseif S2EL&lt;-0.02             if S2CL&lt;S2UL                 if S2CL&lt;8.80                     S2CL=S2CL+S2Vweir*5;                     SobekS_id_023232=S2CL;                     S2Timer=S2WT;                 end             end         end     end end end </pre>	<pre> % Variabels S4CL=SobekCL_id_023249; S4UL=SobekH_C_10_1_2; %S4DL=SobekH_C_10_1_4;  % Control rules  S4Timer=S4Timer-60; if S4Timer&lt;0     S4Timer=0; end  S4EL=S4UL-S4TL; S4AT=abs(S4Vweir*S4EL*100); if S4AT&gt;60     S4AT=60; end  if S4Timer==0     if S4EL&lt;-0.02         if S4CL&lt;(S4UL+0.05)             if S4CL&lt;8.40                 S4CL=S4CL+(S4AT/S4Vweir*0.01);                 SobekS_id_023249=S4CL;                 S4Timer=S4AT+S4WT;             end         end         elseif S4EL&gt;0.02             if S4CL&gt;7.41                 S4CL=S4CL-(S4AT/S4Vweir*0.01);                 SobekS_id_023249=S4CL;                 S4Timer=S4AT+S4WT;             end         end     end end end </pre>

### Gebruikte informatie

De regeling maakt voor de aansturing van zowel de stuwen als de gemalen uitsluitend gebruik van lokale waterstanden. In tabel 4.1 is dit te zien bij het kopje "variables" in de code. Wel wordt lokaal het debiet berekend en opgeslagen. De debieten worden berekend met een afvoerformule en de geometrie van de kunstwerken. Deze worden echter niet gebruikt voor de aansturing van de kunstwerken (en zijn dus niet opgenomen in de MatLAB uitwerking).

### Afstelling

De constanten in de regeling zijn afgesteld op ervaring. Af te stellen zijn de duur van de aansturing en de wachttijd. Hoewel in beide type hierin anders wordt voorzien (ofwel de aanstuurtijd, ofwel de wachttijd is constant), zijn dit de enige constanten die kunnen worden aangepast.

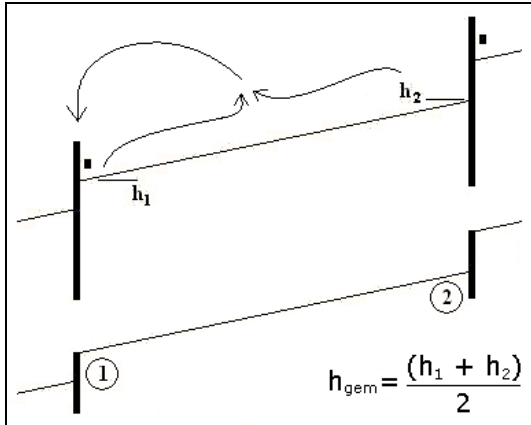
### Verwacht gedrag

De regelingen zijn al ruim 10 jaar in gebruik en hebben door de jaren heen revisies gehad. Uit de softwarecode van de regelingen is niet duidelijk waarop de waarden van constanten zijn gebaseerd. Verwacht wordt dat de regeling goed zal presteren, vooral omdat deze door de jaren heen is bijgesteld.

Pieken zullen snel worden doorgegeven naar benedenstrooms, omdat de regeling erop gemaakt is om snel water af te voeren. Hierdoor kunnen problemen ontstaan in benedenstroomse delen waardoor handmatige ingrepen zoals beschreven in hoofdstuk 3 nodig zullen zijn.

## Case 2 – Pandgemiddelde regeling

De huidige sturing is aangepast naar een pandgemiddelde regeling. Hiervoor wordt een extra variabele gebruikt, de waterstand bovenstrooms in het pand. Deze waterstand wordt al gemeten bij alle Lingestuwen, namelijk direct benedenstrooms van de bovenstrooms gelegen stuw in het systeem. Door de lokale en de bovenstroomse waterstand te middelen ontstaat er een pandgemiddeld peil waarop gestuurd wordt, zie figuur 1. De gemalen worden volgens de huidige regeling aangestuurd.



Figuur 4.1. Pandgemiddelde sturing.

### Type regeling

De dertien Lingestuwen worden voorzien van deze regeling, die het midden houdt tussen een lokale en centrale regeling. Er is nog geen samenhang tussen de stuwen onderling, wel wordt er gebruik gemaakt van informatie die bij andere stuwen gemeten wordt. Er is nog steeds sprake van bovenstroomse sturing.

### Werking

De regeling heeft exact dezelfde karakteristieken als de huidige regeling heeft, zoals in vorige paragraaf beschreven. In tabel 4.2 is een voorbeeld van de regeling gegeven.

Tabel 4.2. Voorbeeld stuwregeling met pandgemiddelde sturing.

**Type 1**

```

% Variabels
S2CL=SobekCL_id_023232;
S2UL=SobekH_C_9_1_78;
S2DL=SobekH_C_9_1_80;

% Control rules

S2Timer=S2Timer-60;
if S2Timer<0
    S2Timer=0;
end

S2PL=(S2UL+S1DL)/2;
S2EL=S2PL-S2TL;
S2WT=900-abs(S2EL-0.02)*20000;
if S2WT<60
    S2WT=60;
end

if S2Timer==0
    if S2EL>0.02
        if S2CL>7.75
            S2CL=S2CL-S2Vweir*5;
            SobekS_id_023232=S2CL;
            S2Timer=S2WT;
        end
    elseif S2EL<-0.02
        if S2CL<S2UL
            if S2CL<8.80
                S2CL=S2CL+S2Vweir*5;
                SobekS_id_023232=S2CL;
                S2Timer=S2WT;
            end
        end
    end
end
end
end

```

**Gebruikte informatie**

De regeling maakt voor de aansturing van de stuwen gebruik van lokale bovenstroomse waterstanden en benedenstrooms gelegen waterstanden van bovenstroomse stuwen. Deze worden al gemeten, waardoor aanleg van nieuwe meetpunten niet nodig is. Er zal echter wel geïnvesteerd moeten worden in infrastructuur die zorgt dat de niet lokale data bij de stuwen beschikbaar komt. De gemalen worden wel lokaal aangestuurd.

**Afstelling**

Er is ten opzichte van de huidige regeling een extra constante beschikbaar die kan worden afgesteld. Dit is de verhouding tussen de twee gemeten waterstanden. In deze regeling is uitgegaan van het gemiddelde; beide waterstanden wegen even zwaar. De gedachte is, dat een pand gemiddeld op streefpeil moet zitten in plaats van aan de benedenstroomse zijde.

**Verwacht gedrag**

Er worden geen grote veranderingen verwacht ten opzichte van de huidige sturing. Dit komt doordat het tweede peil met het eerste mee zal bewegen, zodat er gestuurd wordt op een gemiddeld hoger peil. Dit komt ongeveer overeen met het verlagen van het streefpeil waarop in de huidige regeling gestuurd wordt. De karakteristieken van de regeling zijn dezelfde als van de huidige regeling.

## Case 3 – Gedecentraliseerde sturing

De decentrale regeling is geprogrammeerd om de huidige regeling softwarematig te vervangen. Dat wil zeggen dat de huidige infrastructuur niet vervangen hoeft te worden om deze regeling te implementeren. Het doel van deze regeling is om aan te tonen dat de meet- en regeltechniek deze regeling beter presteert dan de huidige regeling.

### Type regeling

Er is net als de huidige regeling sprake van een lokale bovenstroomse sturing en zijn er wederom 13 aparte stuwregelingen nodig. Het betreft dus 13 SISO regelaars die onafhankelijk van elkaar opereren. Er wordt gebruik gemaakt van PI-regelaars, zodat een proportionele regeling ontstaat. Tevens wordt iedere meetwaarde gefilterd.

Het Kuijkgemaal en het van Beuningengemaal worden op dezelfde wijze aangestuurd als in de huidige sturing. Het Kolffgemaal is meegenomen in dezelfde PI-regeling als de stuwen, zo wordt de lijn van lokale bovenstroomse regeling tot aan het einde van de Linge doorgetrokken.

### Werking

Allereerst wordt de statische informatie ingelezen. Dit gebeurt eenmalig. De eigenlijke regeling begint met het opvragen van de huidige bovenstroomse én benedenstroomse waterstand. Tevens wordt de stuwstand opgevraagd. De bovenstroomse en benedenstroomse waterstanden worden gefilterd en vervolgens wordt het huidige debiet over de stuw bepaald met deze drie variabelen in een hulpprogramma.

In het volgende deel wordt de PI-regelaar toegepast, die op basis van de verandering in de afwijking van streefpeil een verandering in gewenst debiet berekent. Deze verandering wordt toegevoegd aan het eerder berekende debiet, zodat het nieuwe gewenste debiet ontstaat. Dit debiet wordt via een tweede hulpprogramma vertaald in een gewenste stuwstand. Dit is het master-slave principe, waarin de bepaling van het gewenste debiet de slave-regeling is en de stuwinstelling de master-regeling (Schuurmans 1997). Een voorbeeld van de regeling is te vinden in tabel 4.3.

*Tabel 4.3. Voorbeeld gedecentraliseerde sturing.*

#### Sturingsbestand

```
% Read SOBEEK variabels
S2CLm=SobekCL_id_023232;
S2ULm=SobekH_C_9_1_78;
S2DLm=SobekH_C_9_1_80;

% Control Rules
S2ULf=S2Kf*S2ULf+(1-S2Kf)*S2ULm;
S2DLf=S2Kf*S2DLf+(1-S2Kf)*S2DLm;

S2Q=QOvershotGate(S2ULf, S2DLf, S2CLm, S2CW);

S2EL=S2ULf-S2TL;
S2DeltaQ=S2Kp*(S2EL-S2ELold)+S2Ki*S2ELold;
S2ELold=S2EL;
S2Qn=S2Q+S2DeltaQ;
[S2CLn, S2CLMemory]=LevelOvershotGate(S2Qn, S2ULf, S2DLf, S2CLm, S2MinCL, S2MaxCL, S2CW, S2MinDeltaCL, S2MaxDeltaCL, S2CLMemory);

Sobek_id_023232=min(max(S2CLn, S2MinCL), S2MaxCL);
```

De regeling is ook voorzien van een minimum verstelling. Indien een stuwverstelling gedaan moet worden die kleiner is dan de minimum verstelling, wordt deze onthouden en opgeteld totdat de verstelling groter is dan de minimum verstelling.

### **Gebruikte informatie en afstelling**

Deze regeling maakt gebruik van zowel statische als dynamische informatie. De dynamische informatie zijn de lokale bovenstroomse en benedenstroomse waterstanden en de stuwstand. De regeling wordt op basis van deze informatie aangestuurd.

De statische informatie is nodig voor de afstelling van de regeling en het herleiden van het debiet over de stuw. De stuwafmetingen worden gebruikt voor de relatie tussen de waterstand en het debiet over de stuw. De afmetingen van het pand, zoals de lengte, bodembreedte en het verhang worden gebruikt voor de afstelling van de regeling. Deze informatie is uit het model gedestilleerd (deze waarden op hun beurt komen weer uit metingen van het waterschap en zijn dus dezelfde als die bij de werkelijke implementatie zouden worden gebruikt). Een overzicht van al de gebruikte variabelen is te vinden in bijlage 1 (panden) en in bijlage 2 (kunstwerken).

De afstelling van de regeling gebeurt via drie constanten, de proportionele constante, de integraalconstante en een filterconstante. Er wordt gebruik gemaakt van het Integrator Delay model (Schuurmans 1997), beschreven in hoofdstuk 2. Met de geometrie van het systeem worden de karakteristieken bepaald, zoals de vertragingstijd van het Delay gedeelte en het bergend oppervlak van het Integrator gedeelte. Normaliter worden de waarden per regeling bepaald met standaard tuningregels zoals beschreven in Schuurmans (1997). Deze instellingen zijn optimaal voor de individuele regelaars. Er is echter sprake van 14 in serie geschakelde regelaars, die allen onafhankelijk van elkaar opereren. De regelaars zullen elkaar gaan beïnvloeden. Omdat dit bij voorbaat bekend is, kan hier rekening mee worden gehouden. In plaats van de 14 regelaars individueel optimaal af te stellen worden de waarden aangepast naar een voor het gehele systeem optimale instelling. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de optimalisatietechniek beschreven door Overloop (2005). Voor ieder afgeleid ID-model van de 14 panden wordt een kostenfunctie gedefinieerd. De som van alle kostenfuncties wordt geminimaliseerd door het veranderen van de afstellingsparameters  $K_p$ ,  $K_i$  en  $K_f$ .

### **Verwacht gedrag**

De regeling is krachtiger dan de huidige regeling. Per sturingstijdstap kan de volledige tijdstap worden gebruikt voor sturing. In de huidige regeling worden kunstwerken een beperkte tijd aangestuurd, wat in de gedecentraliseerde regeling niet het geval is. Verwacht wordt dat de regeling pieken beter kan verwerken en waterstanden dicht bij streefpeil houdt onder alle omstandigheden. Er wordt dus uitgegaan van een verbeterde performance ten opzichte van de huidige sturing.

Het systeem zal nog steeds hetzelfde gedrag vertonen. Zowel deze regeling als de huidige regeling zijn lokaal bovenstrooms gestuurd. Pieken zullen dus snel (of zelfs versnelt) naar benedenstroomse panden worden doorgegeven. De aanpassing van de waarden door de optimalisatie zal dit effect wel tegen gaan.



## Case 4 – Gecentraliseerde sturing

De centrale regeling heeft niet tot doel waterstanden zo snel mogelijk af te voeren, maar om afvoerpieken in het gebied op te vangen en te verdelen en gelijkmatig af te voeren. Ieder pand in het gebied loost zodanig dat het volgende pand daarvan geen hinder ondervindt. Dit betekent dat water bovenstrooms langer vastgehouden wordt, zodat er benedenstrooms in het gebied minder problemen ontstaan. Maar ook dat wanneer bovenstrooms een wateroverschot is, dit geloosd wordt op benedenstrooms gelegen panden, ook al zijn die op streefpeil. De regeling streeft naar een zo laag mogelijke gezamenlijke afwijking van streefpeil.

### Type regeling

De regeling is gecentraliseerd: er is sprake van een MIMO regeling. Alle (statische en dynamische) informatie dient dus samengebracht te worden naar één punt. In de modelomgeving is dit geen probleem, omdat hier automatisch in wordt voorzien. In de praktijk zal hier de nodige infrastructuur voor moeten worden aangelegd. De statische informatie wordt gebruikt om het systeem te beschrijven, zodat de effecten van sturingsacties kunnen worden berekend. De regeling is niet lokaal meer en ook het bovenstroomse gestuurde karakter verdwijnt.

De gemalen worden aangestuurd volgens de bestaande routines. Omdat de gemalen in dit type regeling een cruciale rol hebben, is er een drietal regelingen geprogrammeerd waarin de gemalen anders worden aangestuurd. Deze cases worden in de volgende paragraaf verder beschreven.

### Werking

De regeling start eveneens met het inlezen van statische informatie, die wordt gebruikt voor het opstellen van een intern model. In een apart aan te roepen hulpbestand wordt een state space model (Kwakernaak 1972, Mathworks 2003) geconstrueerd, dit hulpbestand is opgenomen in bijlage 3. Uitgangspunt hiervan is wederom het Integrator Delay model dat voor ieder pand wordt opgesteld en wordt vervolgens gekoppeld. De koppeling ontstaat, doordat de uitstroom van een pand ook de instroom is van het volgende pand. In een matrix is deze koppeling eenvoudig te realiseren. De variabelen in het state space model zijn debieten over de 13 stuwen en de afwijkingen van streefpeil in de 14 panden.

Nadat het state space model is opgesteld (de initialisatie van de regeling), begint de eigenlijke regeling. Deze regeling wordt iedere tijdstap doorlopen. Eerst wordt de dynamische informatie ingelezen. Dit zijn de waterstanden boven- en benedenstrooms van de stuwen en de kruinhoogten van de stuwen. Hiermee worden de debieten en afwijkingen, de benodigde toestanden voor de state space, bepaald. Met deze states wordt een voorspelling gedaan voor de states van de volgende tijdstap en de benodigde sturingsacties (op basis van de minimalisatie van de kostenfunctie) berekend. Sturingsacties hebben de vorm van een gewenste debietverandering, die nog moet worden vertaald in een stuwverstelling. Dus ook hier wordt gebruik gemaakt van het master-slave principe zoals eerder beschreven in hoofdstuk 2. Het sturingsbestand is opgenomen in bijlage 3.

### Gebruikte informatie en afstelling

Voor het opstellen van de relaties tussen stuwstanden en waterstanden is wederom de geometrie van de kunstwerken gebruikt. Tevens is de geometrie van de panden gebruikt voor het opstellen van de relaties tussen waterstand en uitstromend debiet

(het inschatten van de sturingsacties), met behulp van het Integrator Delay model. Ook de vertragingstijd is in het state space model opgenomen. Hiervoor is dezelfde statische informatie gebruikt die is opgenomen in bijlage 1.

De afstelling van de regeling wordt gedaan in de waarden van de Q en R matrices uit de kostenfunctie. De kostenfunctie is in hoofdstuk 2 (pagina 18) besproken. In deze regeling wordt gewogen op zowel afwijkingen van streefpeil (Q matrix, waarde 1) als op relatieve vullingsgraad (Q matrix, waarde 25) en de "kosten van de verstellingen" (R matrix, waarde 0.01). De afwijking van streefpeil wordt daarin minder hard bestraft dan de relatieve vullingsgraad. De regeling krijgt hierdoor het karakter om als een systeem te reageren op verstoring. De relatieve vullingsgraad wordt bepaald door de afwijking van streefpeil te delen door de maximaal toegestane afwijking. Deze maximale afwijking kan vrij worden gekozen, bijvoorbeeld op gronden ter voorkoming van inundatie, behoudt van een gewenste veiligheid of een verschil in schade bij een eventuele overstroming (risicobeperking). Vervolgens wordt de vullingsgraad vergeleken met de vullingsgraad van de omringende panden. De verschillen in vullingsgraad worden meegewogen in de kostenfunctie en moeten dus worden geminimaliseerd. Zo wordt bereikt dat panden zich gelijkmatig vullen, afhankelijk van de toegestane marge.

### **Verwacht gedrag**

De regeling zal pieken afvlakken, omdat water niet direct wordt afgevoerd naar benedenstroomse delen, maar wordt vastgehouden. In de bovenstrooms gelegen panden, waar de pieken over het algemeen kleiner zijn, zullen waterstanden nu wel hoger worden. Er wordt een gelijkmatigere verdeling van hoge waterstanden in de panden verwacht. Tevens zal de afvoer trager verlopen, eveneens omdat water langer vastgehouden wordt. Daarnaast is de straf op de afwijking laag ten opzichte van de moeite die de regeling mag doen (de R matrix). Het systeem hecht dus minder waarde aan de absolute afwijking en veel meer aan de onderlinge afwijking. Dit vertaalt zich in "eerst de piek gezamenlijk opvangen" en dan pas afvoeren.

## **Case 5, 6 en 7 – Gecentraliseerde sturing met anticiperende pompen**

De laatste drie cases zijn gebaseerd op de gecentraliseerde regeling. Omdat deze regeling erop geënt is om het systeem als één geheel te laten reageren, is het raadzaam de gemalen hierop aan te passen. De gemalen hebben een lokale aansturing, terwijl zij het gehele bovenstroomse gebied bedienen. Om dit aan te passen zijn de gemaalregelingen voorzien van een nieuwe regeling. Aan de stuwregelingen, volgens het gecentraliseerde principe, is niets veranderd en worden zodoende niet meer besproken. Hiervoor wordt verwezen naar de vorige paragraaf.

### **Werking**

Voor de aansturing van de gemalen wordt ieder uur bepaald wat de benodigde capaciteit is in het opvolgende uur. De capaciteit wordt bepaald op basis van feedback en een voorspelling van af te voeren neerslag.

De feedbackmodule bekijkt het aanwezige wateroverschot en berekent daaruit een benodigd debiet. Er wordt gesteld dat het wateroverschot in een nader te bepalen periode moet worden afgemalen. Wat die periode is bepaald hoe heftig deze module reageert. Het waterschot wordt bepaald door de afwijking van streefpeil in ieder pand te vermenigvuldigen met het bergende oppervlak van het pand. Zo ontstaat er

een volume water dat moet worden afgevoerd. De benodigde gegevens worden eveneens gebruikt in de stuwregelingen en zijn dus al voor handen.

De anticiperende module sommeert de verwachte afvoer van neerslag voor de komende periode. Voor de berekeningen is 24 uur aangehouden, omdat over deze tijdsspanne neerslaggegevens betrouwbaar zijn. Het nauwkeurig bepalen van de verwachte afvoer is zeer lastig. Hier spelen afvoercharacteristieken een rol die per polder sterk kunnen verschillen. In deze studie is er voor gekozen om te werken met een zogenaamde "perfecte voorspelling" van de afvoer op de Linge, zodat de kracht van de regeling goed duidelijk wordt. Deze perfecte voorspelling is verkregen door de resultaten van eerdere berekeningen te gebruiken. Uit de modelresultaten zijn alle (meetbare) lozingen op de panden van de Linge onttrokken en per uur gesommeerd.

### Afstelling

De afstelling van de gemalen vertaalt zich in het bepalen van de tijdshorizon waarin het wateroverschot en de verwachte extra hoeveelheid water moeten worden afgevoerd. Door het wateroverschot te delen door de tijdshorizon ontstaat een gemiddeld benodigd debiet om het water af te voeren:  $Q_{gem} = V / T$ . Er zijn drie cases doorgerekend met verschillende afvoerperiode voor de feedback en anticiperende modules.

- 1) Afvoer wateroverschot in 24 uur en verwachte neerslag in 24 uur
- 2) Afvoer wateroverschot in 6 uur en verwachte neerslag 24 uur
- 3) Afvoer wateroverschot in 6 uur en verwachte neerslag 48 uur

### Verwacht gedrag

Er wordt verwacht dat het gebruik van de anticiperende module een verbetering oplevert ten opzichte van de huidige gemaalregeling. De anticiperende module versterkt de werking van het centrale principe. Wanneer er wordt voorgemalen, dan wordt niet alleen het pand afgemalen waar het gemaal aan ligt, maar het gehele bovenstroomse gedeelte. De centrale regeling zal immers proberen de verschillen tussen de panden te verkleinen en dus ook in bovenstrooms gelegen panden de waterstand verlagen.

## Samenvatting

De zeven regelingen die zijn geprogrammeerd maken in oplopende volgorde gebruik van steeds meer informatie. De volgende tabel geeft een overzicht van verschillende typen informatie en het gebruik per type regeling.

*Tabel 4.1. Gebruikte informatie in de regelingen.*

Regeling	Lokale waterstanden	Overige waterstanden	Geometrie kunstwerken	Geometrie systeem	Meteorologische voorspelling
Huidige regeling	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee
Pandgemiddelde	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee
Gedecentraliseerd	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Gecentraliseerd	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee
Anticiperend	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

## **Hoofdstuk 5 – Resultaten**

## Inleiding

De resultaten van het onderzoek worden in dit hoofdstuk besproken. De vraag die daarbij in het achterhoofd wordt gehouden is: "Wat heeft dit onderzoek opgeleverd?". Bij het opsommen van de resultaten wordt niet alleen gedacht aan de simulatieresultaten, maar ook het bereiken van die resultaten; de weg er naar toe. De stappen die zijn genomen om tot bruikbare simulatieresultaten te komen zijn minstens zo belangrijk.

Voordat de resultaten besproken worden, wordt een beoordelingskader geschetst. Dit is de bril waarmee naar de resultaten gekeken wordt en geeft aan hoe de resultaten worden geïnterpreteerd. Na de algemene resultaten van het onderzoek worden simulatieresultaten per regeling gepresenteerd. Vervolgens worden enkele vergelijkingen voor de panden gegeven die de essentiële onderdelen van het systeem aanduiden. Niet alle 14 panden zullen hier worden opgenomen. Alle figuren van de resultaten zijn in bijlage 4 opgenomen.

## Afwegingskader

De resultaten van de simulaties worden in principe niet kwantitatief geïnterpreteerd, slechts worden er kwalitatieve vergelijkingen gemaakt. De voornaamste reden om de beschouwing kwalitatief te houden is dat het systeemgedrag met de verschillende regelingen indicatief is. De gebruikte werkwijze geeft aanleiding tot voorzichtig gebruik van de resultaten. Daarbij ligt de nadruk niet op exacte peilafwijkingen, maar op het globaal vertoonde gedrag van de regelingen: lange of korte perioden boven streefpeil, de bandbreedte aan " ruis" rond streefpeil en de benodigde tijd voor het terugkeren naar streefpeil na een piekbelasting. Daarom is er voor gekozen om een tijdrovende kwantitatieve analyse achterwege te laten.

Dan is het nog maar de vraag of een kwantitatieve analyse datgene laat zien, wat van belang is. Regelingen zouden kunnen worden afgeschreven op basis van één enkel getal, geldend voor één locatie op één tijdstip. Terwijl niet zichtbaar is wat er aan de hand is en wat daarvan de oorzaak is. Doordat het systeem wordt beschreven met een model is de juistheid van gedetailleerde uitkomsten bediscussieerbaar. Een getalsmatige afweging is daarom niet gewenst.

Wat er uiteindelijk met de resultaten gedaan wordt, is een keuze van het Waterschap. Zij zullen hun keuze niet baseren op een kwantitatieve analyse, maar op basis van de indicatieve verschillen en wat daaraan ten grondslag ligt. Er dient dus een indicatie gegeven te worden van de prestaties van de regelingen. De regelingen worden daarom vergeleken op de volgende punten:

- Handhaving van het streefpeil onder dagelijkse omstandigheden
- Beheersen van afvoerpieken bij extreme situaties
- Snelheid waarmee de regeling peilen terug brengt naar streefpeil

De tijd voor de uitvoering van dit onderzoek is gelimiteerd. Hierdoor zullen de prestaties van de regelingen suboptimaal zijn. Wetende dat er dus nog ruimte is voor verbeteringen, moeten die wel mogelijk zijn. Daarom wordt ook gekeken naar:

- De potentie die de regeling heeft om nog te verbeteren

De regelingen zijn zo geprogrammeerd dat er een bepaald systeemgedrag wordt verwacht, deze verwachting is in hoofdstuk vier ook omschreven. Er wordt daarom ook getoetst of:

- De regelingen voldoen aan het verwachte gedrag

Deze vijf punten vormen het kwalitatieve beoordelingskader van de regelingen.

## Resultaten

### Algemene resultaten

Er is gebruik gemaakt van een gekoppeld hydrologisch en hydraulisch model met apart een module voor het sturen van de kunstwerken. Het geheel is een werkend modelinstrumentarium waarin de verschillende 7 regelingen zijn doorgerekend. Dit instrumentarium is het eerste resultaat van dit onderzoek.

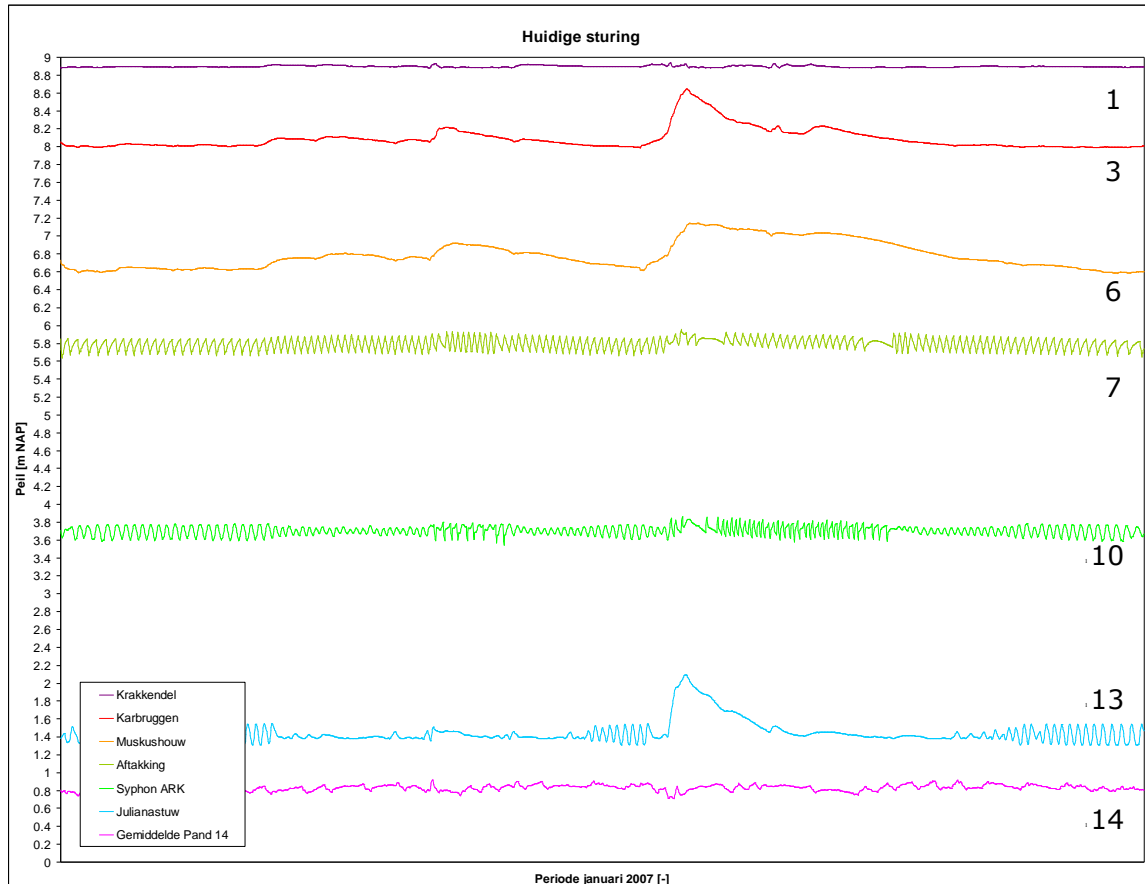
In principe is het instrumentarium eenvoudig aan te passen voor gebruik met andere regelingen. Enige kennis van de software (en de meet- en regeltechniek) is wel noodzakelijk. Het instrumentarium is dus nu al geschikt voor verkennende berekeningen naar nieuw geprogrammeerde regelingen. Ook kan er gekeken worden naar het gedrag van de in dit onderzoek geprogrammeerde regelingen tijdens andere (neerslag)perioden, zolang maar wordt voldaan aan de "eisen" die het instrumentarium stelt aan de invoergegevens. Doordat het systeem een modulair karakter heeft, kan de gebruiker iedere gewenste combinatie van belasting (neerslag, buitenwaterstanden, etc.) en regeling doorrekenen.

In het instrumentarium zijn zeven regelingen opgenomen, die in hoofdstuk vier zijn beschreven. De beschrijving van het model, het gebied en de simulatieperiode zijn opgenomen in hoofdstuk 3. De simulatieresultaten per regeling zijn in de volgende paragrafen beschreven.

### Huidige sturing

In figuur 5.1 zijn de berekende waterstanden in panden 1, 3, 6, 7, 10, 13 en 14 voor de periode van januari 2007 te zien. Er is gerekend met de huidige sturing. Van het laatste pand is het gemiddelde weergegeven van de vier punten waarmee het Kolffgemaal de benodigde pompcapaciteit bepaalt (voor meer uitleg van deze gemaalregeling en de ligging van de punten zie hoofdstuk 3).

## Hoofdrapport



Figuur 5.1. Gesimuleerde waterstanden voor januari 2007 met de huidige sturing.

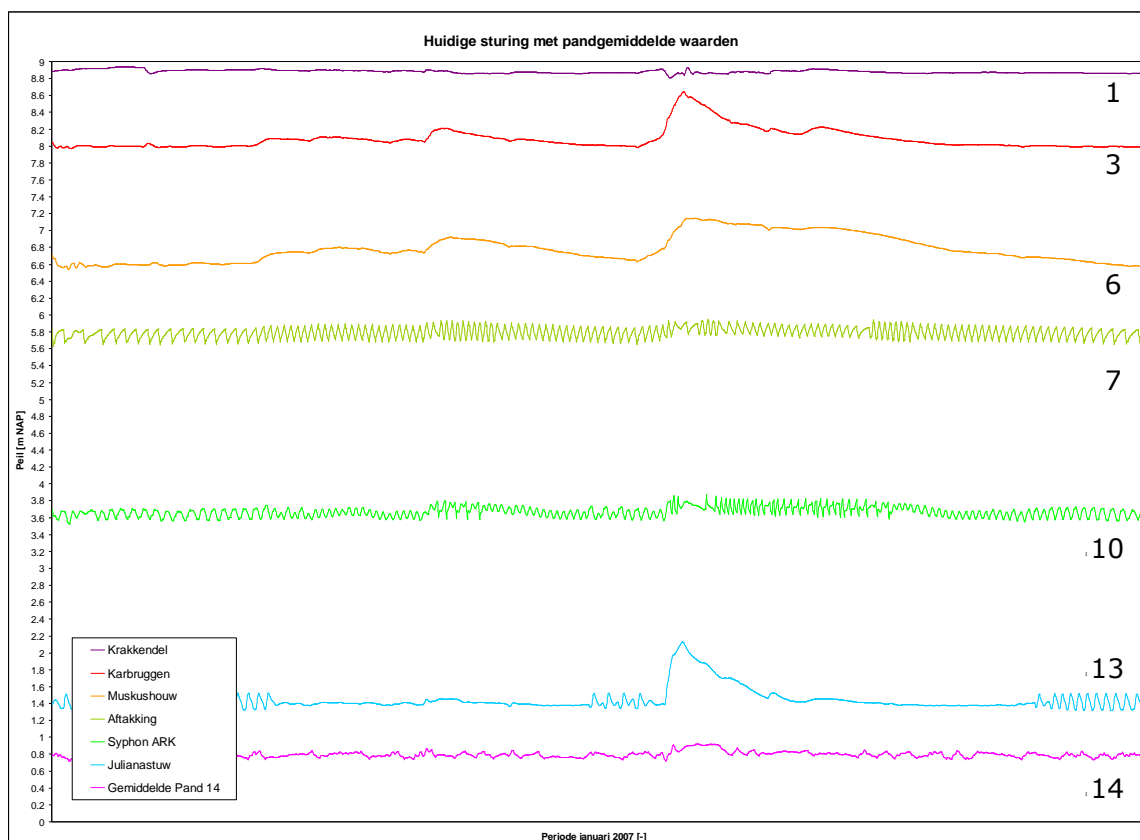
Van bijzondere notie zijn de waterstanden in pand 3 (bovenstrooms stuw Karbruggen) en pand 6 (bovenstrooms stuw Muskushouw). Hier lopen de waterstanden bij kleinere belastingen en tijdens piekbelastingen direct op. Voor ieder pand is in het peilbesluit (Tauw 2006) een marge gedefinieerd. Deze marge wordt in de panden 3 (stuw Karbruggen) en 6 (stuw Muskushouw) ruim overschreden. De stuwen van deze panden hebben een (zeer) beperkte afvoercapaciteit, doordat er een hoge drempel ligt. Zodoende lopen de waterstanden hoger op tijdens alle 6 de buien die in deze periode van belang zijn (zie hoofdstuk 3 voor een beschrijving van de neerslag). De waterstanden zijn vanaf pand 7 vrij vlak, ook tijdens de piekbelasting rond 18 januari. De gemalen hebben een grote invloed op het systeem en zeker op de panden waarvan ze afmalen. Pas vanaf pand 10 (bovenstrooms het sifon en gemaal bij het ARK) is de piekbelasting weer terug te zien. De waterstanden bij de Julianastuw, aan het einde van pand 13, lopen tevens flink op. Ook hier is er maar een beperkte afvoercapaciteit beschikbaar. Dat wil zeggen dat de overstorthoogte van de stuw bij streefpeil gering is en dus ook het debiet dat bij streefpeil geloosd kan worden. Bij grotere debieten loopt het peil dus hoger op. In het laatste pand is tijdens piekbelastingen een sterk verhang zichtbaar. Vooral in het bovenstroomse deel lopen de waterstanden hoog op.

De panden waarin gemalen aanwezig zijn en de panden daar benedenstrooms van, vertonen een zeer grillig peilverloop. Het aan- en afslaan van de gemalen is hier debet aan. Er is hier wel sprake van enige vertekening. De tijdsas omvat een gehele maand, van pendelen is dan ook geen sprake.

Onder normale omstandigheden presteert deze regeling verrassend goed ten opzichte van de overige regelingen. De huidige sturing gebruikt ongeveer 10% van de beschikbare tijd voor sturingsacties, terwijl de andere regelingen . Waterstanden blijven constant gedurende deze perioden. Deze resultaten zijn conform de bevindingen van het waterschap. De extremen worden in die panden opgevangen waar het systeem een knelpunt heeft. Het duurt ruim 5 dagen voordat peilen weer terug zijn op streefpeil na de extreme regenval.

### Huidige sturing met pandgemiddelde peilen

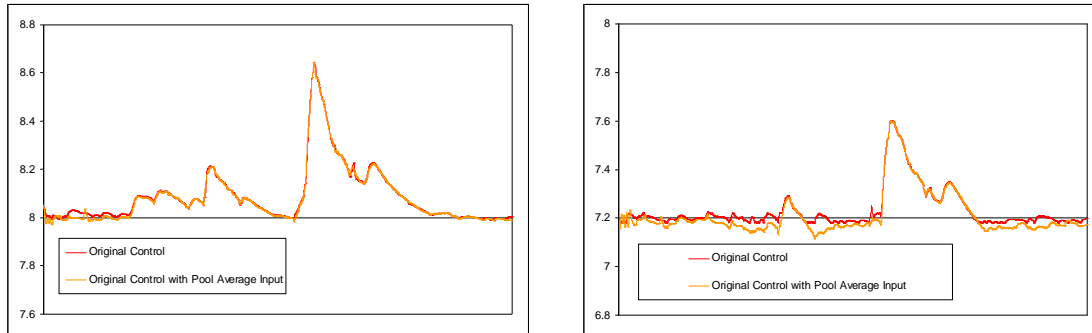
Doordat er weinig verschil in de regeling met pandgemiddelde peilvoer en de huidige regeling is, is de verwachting dat deze regeling niet veel beter zal presteren dan de huidige regeling. Dit beeld wordt bevestigd door de resultaten weergegeven in figuur 5.2.



Figuur 5.2. Gesimuleerde waterstanden voor januari 2007 met pandgemiddelde sturing.

Slechts incidenteel wijken deze resultaten af van die van de huidige regeling. Ook bij deze regeling spitsen de problemen zich toe op de panden 3, 6 en 13. Dit zijn dan ook de knelpunten van het systeem. In de volgende figuur is voor 2 panden de vergelijking met de huidige regeling gemaakt. Alle andere vergelijkingen zijn te vinden in bijlage 4.





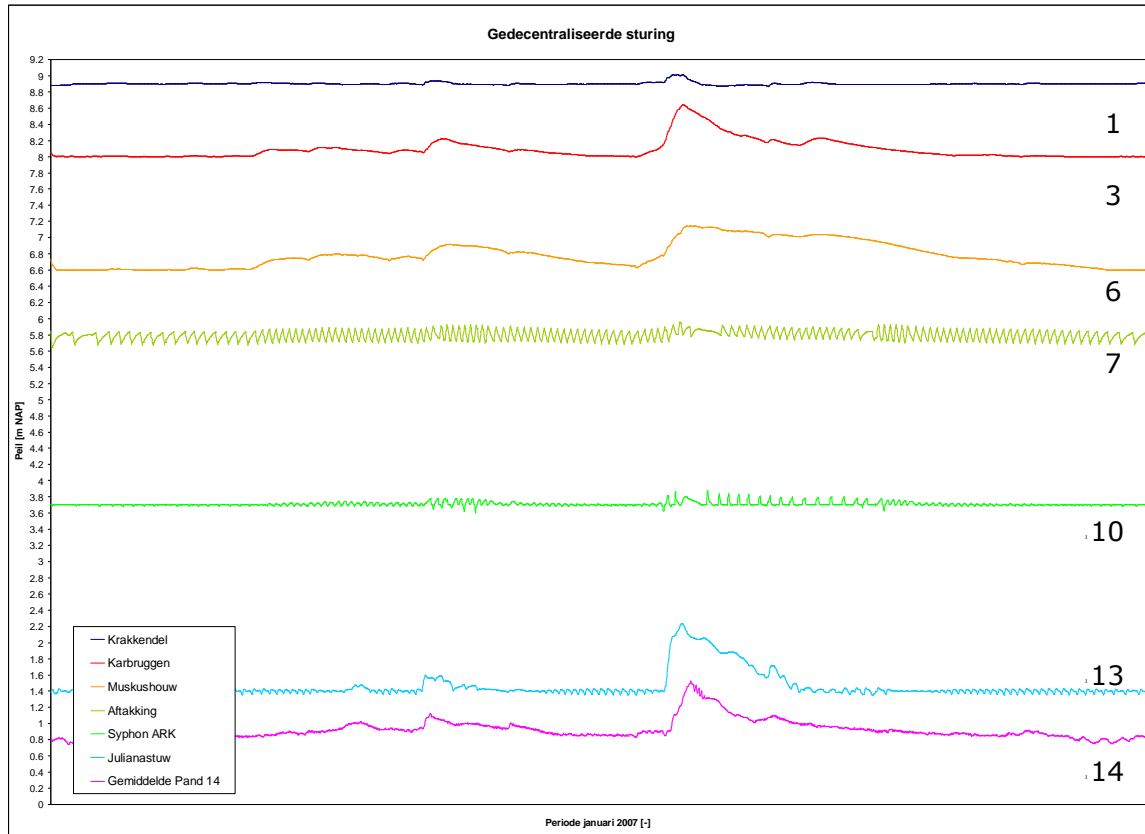
Figuren 5.3 en 5.4. Vergelijking huidige regeling (rood) en pandgemiddelde regeling (oranje) voor de panden 3 en 5.

In de linker figuur is duidelijk te zien dat de peilen bij de stuw Karbruggen elkaar precies volgen. Wat ook te zien is, is dat het streefpeil (zwarte lijn) ook onder normale omstandigheden niet gehaald wordt. De drempel van de stuw ligt te hoog om het systeem goed te kunnen regelen. Dit is bekend bij het Waterschap en zal op termijn worden opgelost door het vervangen van de stuw. In de rechter figuur is een voorbeeld gegeven van de waterstand nabij de vijfde stuw, Hollanderbroek. De pandgemiddelde regeling zorgt voor een iets lager peil onder normale omstandigheden. Bij piekbelastingen is er geen verschil in de regelingen.

### Gedecentraliseerde sturing

Het gebruik van een gedecentraliseerde regeling moet een verbetering van de huidige sturing opleveren. Het principe van de aansturing verschilt niet met die van de huidige sturing. Het systeem wordt nog steeds lokaal en bovenstrooms geregeld en de resultaten moeten daarom hetzelfde beeld opleveren. De resultaten komen ook hier overeen met de verwachtingen, vergelijk figuur 5.5 met 5.1 en zie figuur 5.6 en 5.7. Over het algemeen kan gezegd worden dat de regeling onder dagelijkse omstandigheden goed presteert, beter dan de huidige regeling. De peilen worden beter op streefpeil gehouden en fluctueren minder.

## Hoofdrapport

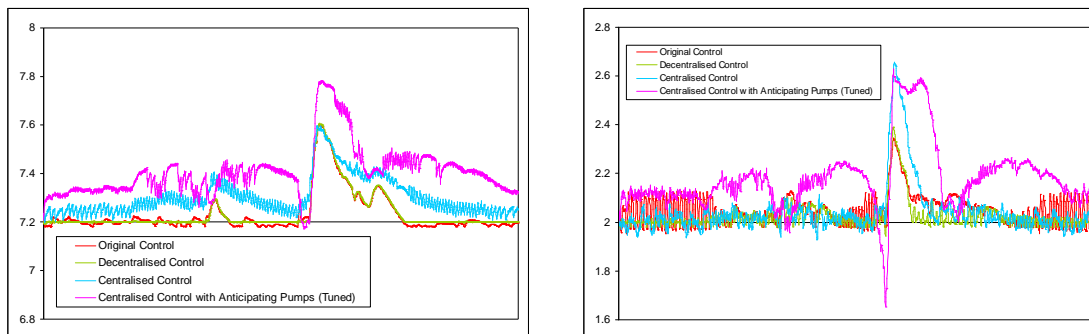


Figuur 5.5. Gesimuleerde waterstanden voor januari 2007 met gedecentraliseerde sturing.

Voor de meeste panden geldt dat het peil tijdens de piekbelasting op een gelijk niveau blijft als die van de huidige sturing. Bij de meer benedenstrooms gelegen panden presteert de gedecentraliseerde regeling echter minder goed tijdens de piekbelasting. De aansturing van het Kolffgemaal is meegenomen in de gedecentraliseerde regeling. Dat wil zeggen dat de systematiek met proportionele integrerende regelaars ook voor het gemaal is toegepast. Zo wordt de lijn van een lokaal bovenstroomse sturing tot aan het gemaal doorgetrokken. Deze gemaalregeling presteert tijdens extreme belastingen minder goed dan de huidige gemaalregeling voor het Kolffgemaal. Hierdoor zijn de peil fluctuaties in pand 13 en de 14 groter.

De regeling bij de stuwen is in staat heftiger te reageren, hetgeen zich vertaalt in een strakkere handhaving van het streefpeil. Dit wordt geïllustreerd door de waterstand in het vijfde en twaalfde pand, te zien in figuren 5.6 en 5.7.

## Hoofdrapport



Figuren 5.6 en 5.7. Vergelijking peilen pand 5 en 12. De gedecentraliseerde regeling (lichtgroen) handhaaft de peilen met beduidend minder fluctuaties dan de overige regelingen.

Dat de gedecentraliseerde regeling heftiger reageert, is ook te zien aan de hoeveelheid verstellingen die deze regeling doet. In tabel 5.1 wordt dit geïllustreerd. De verstellingen zijn bepaald uit de uitvoer van de stuwstanden uit het model. Voor iedere tijdstap is het verschil tussen de stuwstand en de vorige stuwstand bepaald en deze zijn gesommeerd tot de totale verstelling in januari. De tijd om terug op streefpeil te komen is echter wel gelijk aan de huidige regeling.

Tabel 5.1. Totale stuwverstellingen

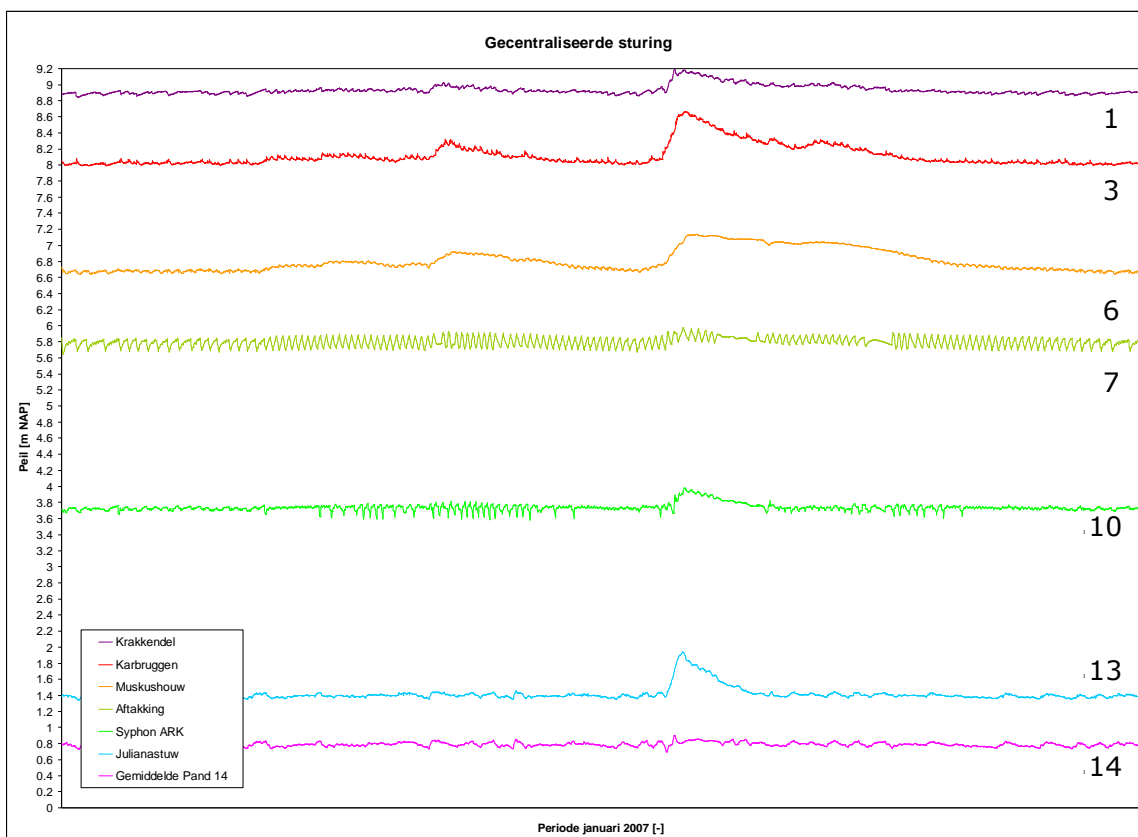
Stuw # Naam	Totale stuw verstelling per regelaar* [m]						
	1	2	3	4	5	6	7
1 Krakkendel	1.03	1.30	0.55	198.16	211.99	201.77	198.07
2 Kraaienstraat	2.17	1.98	2.23	340.92	242.41	366.59	348.08
3 Karbruggen	0.22	0.55	0.63	891.91	2578.29	1931.89	2220.09
4 Rijksweg A325	1.31	1.74	3.76	6091.88	5476.17	5542.49	5642.87
5 Hollanderbroek	1.29	1.91	4.09	3081.94	2985.89	2978.34	3067.41
6 Muskushouw	0.03	0.68	1.68	585.75	2857.94	2217.43	2239.74
7 Aftakking	5.21	0.54	71.29	128.21	84.30	65.60	91.55
8 Opheusden	52.32	71.93	100.82	657.61	374.63	508.32	499.30
9 Pottum	110.17	133.27	124.68	2254.49	3562.86	3397.41	3380.42
10 Syphon ARK	138.84	98.94	248.01	1643.11	2708.17	2477.36	2493.46
11 Thedingsweerd	74.57	39.57	111.16	2919.70	4916.12	4506.44	4585.61
12 Pijpenkast	48.33	32.64	70.17	1190.62	2168.97	2016.61	2124.22
13 Julianastuw	56.38	37.97	72.59	477.76	708.56	633.81	696.41
<b>Totaal</b>	<b>491.86</b>	<b>423.02</b>	<b>811.65</b>	<b>20462.06</b>	<b>28876.31</b>	<b>26844.07</b>	<b>27587.23</b>

\* Genummerd: 1: Originele regeling, 2: Pandgemiddelde regeling, 3: Gedecentraliseerde regeling, 4: Centrale regeling, 5, 6 en 7: Centrale regeling met anticiperende gemalen.

In hoofdstuk 2 is gesproken over handmatige ingrepen in de Linge tijdens extreme perioden van neerslag. De afwatering van het Merwedekanaal krijgt dan voorrang boven die van de Linge. Om dit te realiseren worden enkele sluizen dichtgezet. Doordat het peil in het laatste pand slechter wordt beheerd, is voor deze regeling handmatig ingrijpen nodig. Dit is gelijk ook het enige scenario waar dat nodig is.

### Gecentraliseerde sturing

De gecentraliseerde regeling werkt volgens een ander principe dan de voorgaande regelingen. Lokaal bovenstrooms gestuurde regelingen zoals de voorgaande drie, proberen zo snel mogelijk op streefpeil te komen. De gecentraliseerde regeling probeert piekbelastingen te verdelen over het hele systeem om daarna als geheel systeem terug te gaan naar streefpeil. De verwachting is dat deze regeling daarom lagere pieken vertoont, maar er langer over doet om terug te komen op streefpeil.



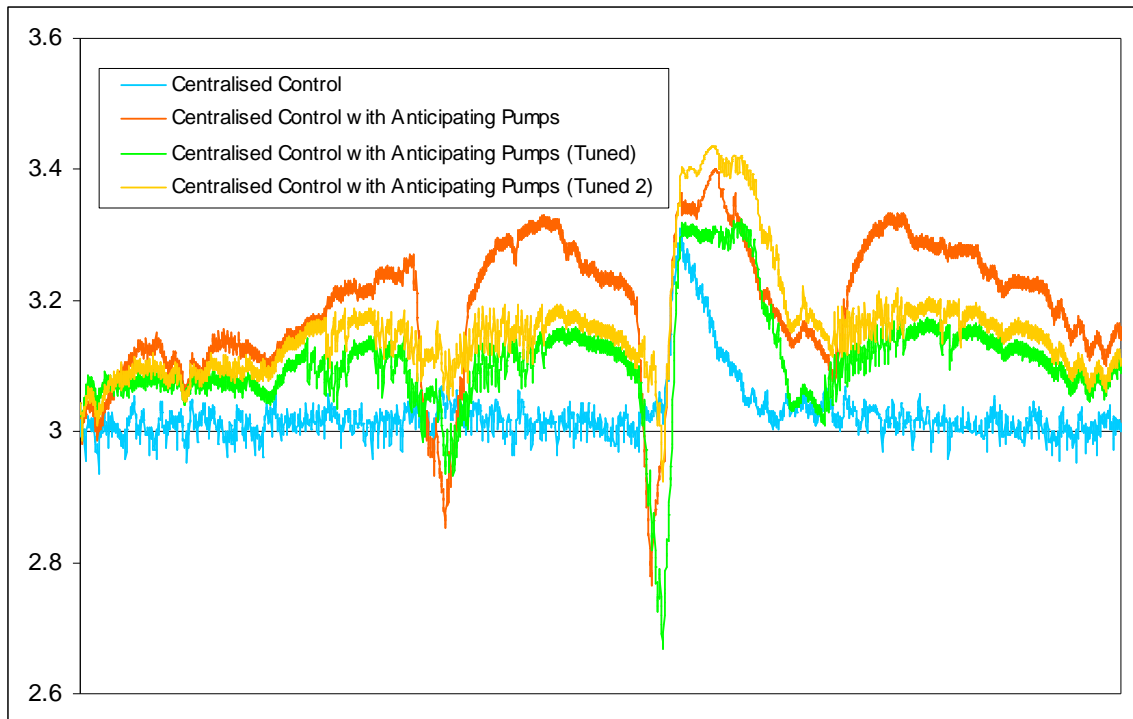
Figuur 5.8. Gesimuleerde waterstanden voor januari 2007 met gecentraliseerde sturing.

Dit blijkt maar ten dele waar. Over het algemeen zijn de pieken gelijk. In de panden die verder weg liggen van de gemalen zijn de pieken zelfs hoger. Dit komt omdat hier water wordt vastgehouden. Dit is intentioneel, met als gevolg dat de panden meer benedenstrooms worden ontzien. Hier zijn de pieken echter gelijk aan die van de huidige regeling. Deels komt dit door beperkingen in de afvoercapaciteit en de regelbaarheid van het systeem. De stuwen Karbruggen en Muskushouw beperken de regeling aanzienlijk.

De panden tussen het Kuijkgemaal en het van Beuningengemaal geven ook geen verbetering, al is hier wel mooi te zien dat de regeling als geheel de piek verdeelt en de peilen als een geheel op en neer bewegen. De laatste panden laten wel een verbetering zien. Nabij de Julianastuw en in het laatste pand zijn de pieken korter en lager.

### Gecentraliseerde sturing met anticiperende gemaalregeling

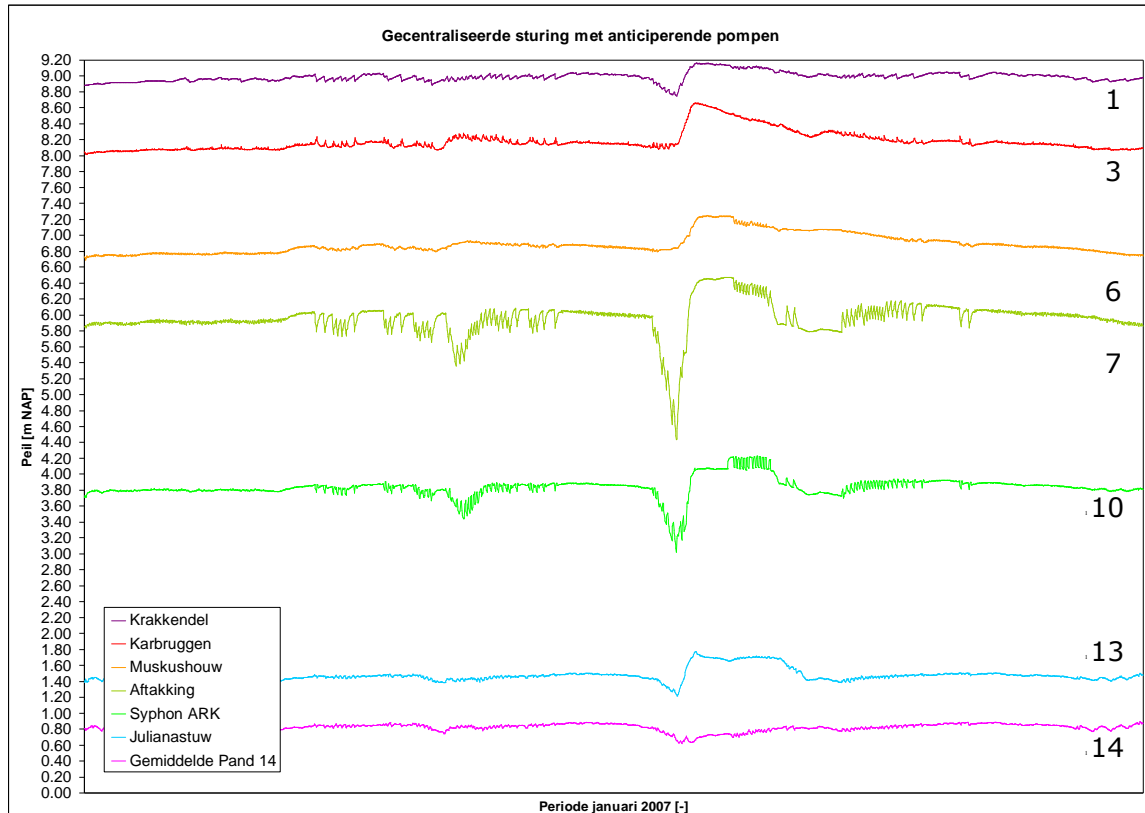
Er zijn drie simulaties gedaan met een andere gemaalregeling. De resultaten van de meest bruikbare simulatie zijn hier opgenomen. De resultaten van de andere twee regelingen en de onderlinge vergelijking zijn opgenomen in bijlage 4. Een voorbeeld van de vergelijking tussen deze regelingen en de centrale regeling met de originele gemaalregeling is te vinden in figuur 5.9. Er is gekozen voor de presentatie van de tweede gemaalregeling (groene lijn). Dit is de gemaalregeling waarvan de feedback regeling het sterkste is. In deze regeling dient het berekende wateroverschot in zes uur te worden afgemalen. De voorspellingshorizon is 24 uur, waarin ook het verwachte waterbezwaar moet worden voorgemalen.



*Figuur 5.9. Vergelijking van de gecentraliseerde regelingen.*

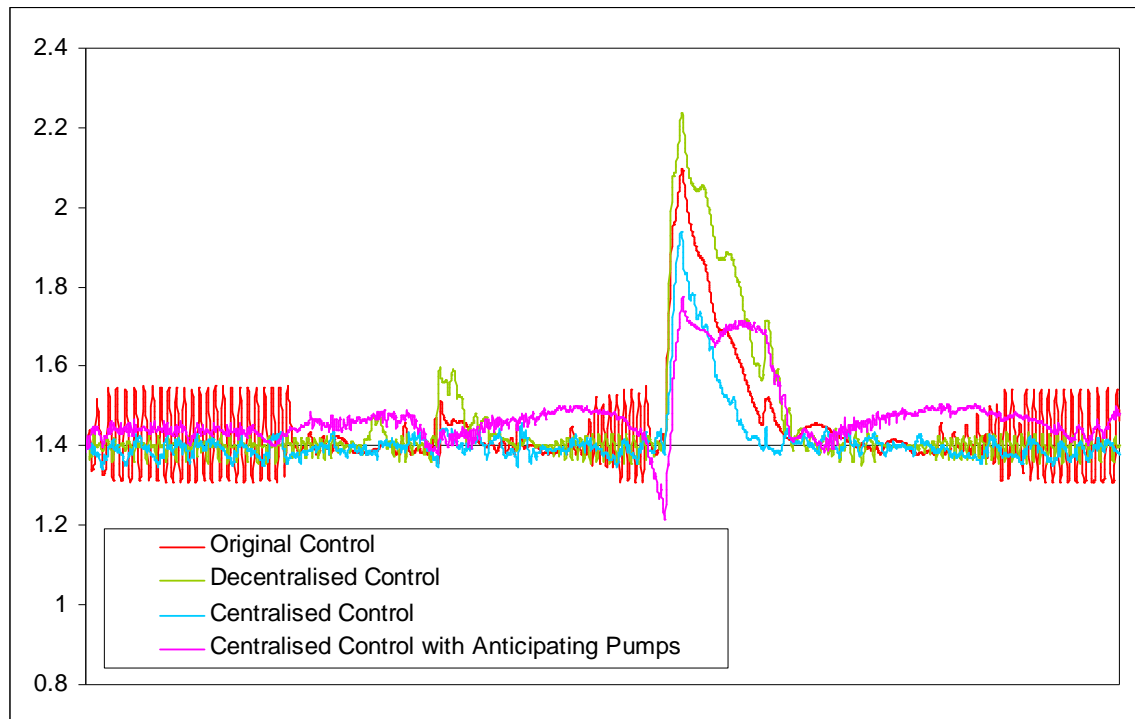
De gedachte achter de centrale regeling, het als één geheel bewegen van de peilen, wordt ondersteund met deze nieuwe pompregeling. Er wordt duidelijk voorgemalen voor de verwachte piek van 18 januari. In het gehele systeem wordt hierdoor berging gecreëerd. Echter, na deze piek schieten de waterstanden weer omhoog. Er wordt niet goed doorgemalen nadat de piek is geweest. Het systeem bleek eerder al gevoelig voor de inzet van de gemalen en dat is hier dan ook duidelijk zichtbaar.

## Hoofdrapport



Figuur 5.10. Gesimuleerde waterstanden voor januari 2007 met gecentraliseerde sturing en een anticiperende gemaalregeling.

De gemaalregeling presteert in de meest bovenstroomse panden (1 tot 6) zeer matig. Ondanks het voormalen zijn de pieken niet lager. Wederom is dit te wijten aan de knelpunten bij de stuwen Karbruggen en Muskushouw. Hier kan het peil niet duidelijk verlaagd worden door de hoge stuwrempels. De peilen in de panden 7 tot en met 10 zijn hoger dan in de andere regelingen. In het stuuralgoritme zijn combinaties van pompcapaciteiten opgenomen die het beste passen bij het berekende totale uitmaaldebiet. Hierdoor slaan het Kuijkgemaal en het van Beuningengemaal sneller af dan in de huidige gemaalregeling, waardoor de peilen hoger oplopen. In de laatste panden presteert de regeling wel zoals is bedoeld. De peilen zijn lager dan in de originele regeling, zie figuur 5.11.



*Figuur 5.11. Vergelijking van de peilen bij de Julianastuw (pand 13). De werking van de anticiperende gemaalregeling (roze lijn) is goed te zien.*

Alle resultaten zijn als figuren opgenomen in bijlage 4. Van ieder pand is daar de vergelijking tussen de originele regeling en de pandgemiddelde regeling te zien, de vergelijking van de gemaalregelingen (bij de gecentraliseerde regeling) en de vergelijking van de 3 typen sturing (huidig, decentraal en centraal).

## **Hoofdstuk 6 – Conclusies en aanbevelingen**



## Inleiding

Het onderzoek heeft zich gericht op verbeteringen in het waterbeheer door de wijze van aansturing van de Lingestuwen te veranderen. Hiervoor zijn een aantal type regelingen in een modelomgeving getest, waarvan de resultaten in het vorige hoofdstuk zijn beschreven.

Het onderzoek is beperkt, wat het trekken van harde conclusies op basis van de resultaten riskant en discutabel maakt. Zo leidt het gebruik van een model tot een versimpelde weergave van de systeemeigenschappen en kunnen deze deels verloren gaan. Daarnaast is er slechts gebruik gemaakt van één weerstation, zodat het gehele gebied dezelfde neerslag te verwerken krijgt. Dit is niet realistisch, sterker nog, dit biedt de mogelijkheid tot een uitgebreider onderzoek. De regelingen zijn niet optimaal afgesteld, er is middels de regels uit de meet- en regeltechniek een goede eerste inschatting gemaakt voor de afstelling van de regelingen. De verfijnde afstelling zal in de praktijk plaats moeten vinden. Ondanks de genoemde kanttekeningen valt er genoeg af te lezen uit de resultaten, maar is dus voorzichtigheid geboden met de interpretatie daarvan.

Eerst worden conclusies getrokken uit de resultaten van de simulaties. Deze worden per regeling beschreven. Vervolgens worden aanvullende conclusies over het systeem en het onderzoek gepresenteerd. De conclusies worden vertaald naar een algemene afweging en vergelijking van de regelingen. Tenslotte worden aanbevelingen gepresenteerd.

## Conclusies

### Huidige regeling

De huidige regeling presteert in vergelijking met de overige regelingen goed. Het streefpeil wordt goed gehandhaafd onder dagelijkse omstandigheden. Wel is er een bepaalde bandbreedte aan ruis waar de regeling nauwelijks op reageert. Dit komt door de insteek van de regeling waar bij kleine afwijkingen zeer weinig wordt ingegrepen.

Extreme situaties worden volgens het afwentelingsprincipe opgelost. Dit zorgt er voor dat er in de bovenstroomse panden weinig problemen ontstaan, het overtollige water kan hier goed worden afgevoerd. Verder benedenstrooms, waar het water wordt verzameld ontstaan wel problemen. Dit is ongewenst.

De regeling heeft, zeker in de benedenstroomse delen langer de tijd nodig om op streefpeil te komen. De hoeveelheden water die hier worden verzameld zijn dermate groot dat er gewoonweg tijd nodig is om deze te lozen. Bij alledaagse omstandigheden is dit in mindere mate ook het geval.

Er zijn weinig verbeteringsmogelijkheden voor de regeling in de huidige vorm. Het is onduidelijk hoe de waarden van de sturingsvariabelen zijn bepaald en hoe deze bijgesteld moeten worden om de regeling nog verder te verbeteren. Verder is het zo dat toekomstige veranderingen in de infrastructuur, zoals uitbreiding van pompcapaciteit, vergroting stuwen of verbreding van panden doorwerkt in het functioneren van de regeling. Het zal dan weer een lange tijd duren voordat alle instellingen weer bijgesteld zijn, omdat er geen regels zijn voor het bepalen van de

instellingen. Dit omdat de huidige regeling, in tegenstelling tot de nieuwe regelingen (anders dan de pandgemiddelde regeling), niet is opgezet vanuit het fundamenteel theoretisch kader van de meet- en regeltechniek.

Het verwachte gedrag komt goed overeen met de resultaten uit de simulaties. De prestaties zijn in vergelijking met de andere regelingen.

### **Pandgemiddelde regeling**

De pandgemiddelde regeling doet exact wat de huidige regeling doet. Het peil komt iets lager te liggen door middeling met een iets hoger, constant peil. Dit zou ook bereikt kunnen worden door het streefpeil van de huidige regeling iets te verlagen. Het gebruik van deze regeling heeft dan ook geen meerwaarde. De regeling scoort wat dat betreft voor zowel de dagelijkse als extreme omstandigheden hetzelfde als de huidige regeling. Ook zijn de peilen gelijktijdig terug op streefpeil na perioden met hevige neerslag.

Het verbeteren van de regeling is net als de huidige regeling niet mogelijk zonder af te wijken van het achterliggende principe.

Zoals verwacht volgen de waterstanden bij de pandgemiddelde regeling die van de huidige regeling. De verwachting was dat de peilen van de pandgemiddelde regeling wel lager zouden liggen. De verschillen zijn echter klein. Op streefpeil zijn de verschillen in de orde van enkele centimeters. Tijdens pieken is er zelfs vrijwel geen verschil. Dit valt te verklaren doordat de hoeveelheid berging die gewonnen wordt onder normale omstandigheden dermate klein is, dat pieken niet kunnen worden opgevangen in die berging.

### **Gedecentraliseerde regeling**

De gecentraliseerde regeling heeft hetzelfde karakter als de huidige regeling, maar presteert wel beter. Peilen worden beter rond streefpeil gehouden. Dit komt doordat de regeling krachtiger is en meer verstellingen doet om dit te bereiken. Dit blijkt ook uit Tabel 5.1 aan het begin van dit hoofdstuk.

Toch is ook deze regeling niet in staat pieken tijdens extreme neerslag af te vlakken. De pieken treden ook hier op in de panden waar de afvoercapaciteit klein is, maar ook in de overige panden stijgen de waterstanden, net als in de huidige regeling. In de meeste panden zijn de waarden zelfs gelijk. Dat wil zeggen dat de potentie van een lokaal bovenstrooms gestuurde regeling volledig benut is. Uiteraard is deze nieuwe regeling nog niet volledige afgesteld, maar dat zal voor het optreden van de pieken geen gevolgen meer hebben. Hiervoor moeten aanpassingen gedaan worden in het systeem of worden overgeschakeld naar een ander type regeling.

Het aanpassen van het Kolffgemaal blijkt geen verstandige keuze, als het om de resultaten gaat. Er wordt minder water verpompt op basis van de PI-regeling die het gemaal gekregen heeft. Hierdoor stijgen de waterstanden in pand 14, maar ook in pand 13, ver boven de andere scenario's uit. Dit heeft tot gevolg dat de waterstanden op het Merwedekanaal te hoog worden, waardoor er handmatig ingegrepen moet worden. De achterliggende redenen zijn in hoofdstuk 3 beschreven. De gemalen hebben dus een grote invloed op de waterstanden in het systeem. Ook is hierdoor een eerlijke vergelijking met de huidige situatie vertroebeld, omdat nu naast een verandering in de stuwregeling ook de gemaalregeling is aangepast.

De gedecentraliseerde regeling krijgt waterstanden wel sneller terug naar streefpeil in vergelijking met de huidige regeling. Hieruit blijkt wederom dat de regeling krachtiger is dan de huidige regeling, ondanks dat er nog geen verfijnde afstelling heeft plaatsgevonden.

De regeling heeft dus nog potentie voor verbetering. Verbeteringen kunnen slechts gezocht worden in de marge waarbinnen de regeling waterstanden controleert (gevoeligheid voor afwijkingen) en de snelheid waarmee dit gebeurt. Het afvlakken van pieken behoort niet meer tot de opties. Bij veranderingen in het systeem kan deze regeling echter eenvoudig worden aangepast, doordat deze is gebaseerd op geometrische parameters van panden en kunstwerken en standaard meet- en regeltechnieken. Dit is een groot voordeel ten opzichte van de huidige regeling.

De regeling voldoet aan de verwachting die is gesteld. Het gedrag komt overeen met die van de huidige regeling, maar is krachtiger. Wel werd verwacht dat de pieken verkleind zouden worden. Dit is niet het geval.

### **Gecentraliseerde regeling**

De regeling is niet bedoeld om waterstanden precies op streefpeil te houden, maar maakt gebruik van de opgegeven acceptabele marges daaromheen. Hierdoor wijken de peilen veelal af van streefpeil, in orde grote van enkele centimeters. De afstelling van de regeling heeft hier ook mee te maken. Er wordt in mindere mate afgerekend op kleine afwijking van streefpeil. De regeling is met opzet minder krachtig gemaakt. In vergelijking met de huidige regeling echter, is er wel sprake van een lichte verbetering.

Het afvlakken van pieken valt in de praktijk tegen. Uit de besproken resultaten blijkt zelfs dat de pieken in bovenstroomse delen groter worden. Dit komt doordat de regeling is gemaakt om water vast te houden bovenstrooms, zodat elders de belasting lager wordt. Dit is ook terug te zien in de resultaten. De pieken in de laatste panden nemen juist af. Er heeft nog geen verfijnde afstelling plaatsgevonden, die er voor zorgt dat peilen beter rond streefpeil worden gehouden zonder in te boeten op het gelijk houden van de relatieve vullingsgraad. In veel panden zijn de pieken echter gelijk aan die van de huidige situatie. De regelbaarheid van het systeem is niet groot genoeg om een centrale regeling ten volste te benutten. Dit geldt in het bijzonder voor de panden met een beperkte afvoercapaciteit. Hier kunnen waterstanden wel gezamenlijk omhoog, maar niet omlaag. De regeling heeft dan de neiging om overal de waterstand hoger te houden en knijpt dus ook de afvoer van de andere panden, waar wel voldoende afvoercapaciteit is.

De waterstanden komen na hevige neerslag ook pas later weer terug tot streefpeil. Dit heeft een tweetal oorzaken. Ten eerste is de regeling minder krachtig, of anders gezegd, er wordt minder zwaar gestraft op een kleine afwijking van streefpeil. Dus de regeling steekt minder moeite in het op streefpeil brengen van de peilen. Ten tweede zorgen de panden met een kleine afvoercapaciteit voor plaatselijk hogere peilen. Deze hogere peilen zijn op hun beurt debet aan hogere peilen in de andere panden. De regeling probeert immers de verschillen in vullingsgraad te minimaliseren, veel sterker dan het terugbrengen van de peilen op streefpeil.

De regeling heeft zeer veel potentie om te verbeteren. De afstelling van de regeling is met een beperkt aantal tests tot stand gekomen. De verhouding tussen de straf op een verschil in relatieve vullingsgraad en de straf op de afwijking tot streefpeil is nog

niet nader onderzocht. Deze is nu tot stand gekomen door proefsommen te draaien in een eenvoudig model in de Matlab omgeving. Ook de waarde van de R-matrix, die aangeeft hoe krachtig de regeling is, kan nog worden verbeterd. Als laatste is er de mogelijkheid om de gemalen aan te passen aan deze regeling. Deze hebben een lokaal sturend karakter, terwijl de stuwen centraal worden geregeld. Dit komt in volgende cases naar voren.

De regeling voldoet aan de verwachtingen en presteert zoals verwacht. Het minimaliseren van de verschillen in vullingsgraad komt duidelijk tot uiting, gezien het verloop van de waterstanden in de verschillende panden. Ook wanneer dat minder gewenst is, namelijk na een neerslagperiode. Dan mogen peilen, ook minder geleidelijk, terug naar streefpeil. De verwachting dat de afvoer trager verloopt, is ook uitgekomen. Hiervoor is wel een extra aanwijsbare reden gevonden, namelijk de beperkte afvoercapaciteit in de panden 3, 6 en 13.

### **Gecentraliseerde regeling met anticiperende gemalen**

Er zijn in totaal drie scenario's uitgerekend met een anticiperende gemaalregeling. Het enige verschil tussen deze drie regelingen is de afstelling van de feedback en anticiperende module van de regeling. De conclusies aangaande de centrale regeling zijn in dit scenario nog steeds geldig en zullen zodoende niet herhaald worden.

De wijze waarop de nieuwe gemaalregeling is geprogrammeerd, is nog onvoldoende om goede resultaten te bereiken. Als eerste is er de wijze waarop de benodigde uitmaalcapaciteit over de pompen wordt verdeeld. Er is vanuit gegaan dat het niet uit maakt waar wordt uitgemalen, omdat de centrale regeling ervoor zorgt dat het systeem nivelleert. Daarom wordt er voor ieder berekend uit te malen debiet de meest passende combinatie van werkende gemalen gekozen, ongeacht waar wordt gepompt. De aanname dat het niet uit maakt waar wordt uitgemalen blijkt niet valide.

Daarnaast is er in de afstelling van de regeling. Twee factoren bepalen de kracht van de regeling: de absolute grootte van de berekende maalcapaciteit en de verhouding tussen de feedback en anticiperende module. Uit de eerste berekening blijkt dat vooral de feedback module krachtiger moet reageren om de waterstanden voldoende laag te houden. Direct daaraan gekoppeld is de verhouding van de modules. Wanneer wordt voorgemalen, wordt opzettelijk van streefpeil afgeweken. Dit wordt tegengewerkt door de feedbackmodule. De anticiperende module dient dus krachtig genoeg te zijn om dit te overtreffen. Een meer fundamentele oplossing is de toepassing van Model Predictive Control zoals beschreven in Overloop (2006). Deze regelmethodiek kan omgaan met conflicterende doelen.

De toepassing van een anticiperende regeling heeft potentie. Uit de resultaten is duidelijk zichtbaar dat de inzet van gemalen extra berging creëert. Wel moet er substantieel veel worden afgemalen voordat deze berging zin heeft. Dit is in de orde van decimeters. De grootste winst valt te halen in het laatste pand, een verlaging van de waterstand hier gaat gepaard met een groot bergend volume. Ook hier geldt dat de winst groter wordt bij toepassing van de centrale regeling, omdat het afmalen dan op alle panden effect heeft.

Het systeem reageert snel op de inzet van de gemalen, mits een centrale regeling is toegepast. Deze regeling zorgt er namelijk voor dat afmalen effect heeft op alle bovenstroomse panden, niet alleen op het aangrenzende pand.

Voor het verbeteren van de aansturing van de gemalen kunnen ook de methodieken uit de meet- en regeltechniek worden ingezet. Dit zal de prestaties van de stuwregelingen ook bevorderen, mits dus wel een centrale regeling is toegepast. Door toepassing van de meet- en regeltechniek garandeert een fundamentele aanpak, waarbij kennis wordt behouden en flexibiliteit gewaarborgd blijft.

### Het systeem

Er bevinden zich in het systeem enkele knelpunten die de regelbaarheid ernstig belemmeren. Dit zorgt ervoor dat de resultaten van dit onderzoek minder bruikbaar zijn. De onderlinge verschillen tussen de regelingen komen minder goed tot uiting. Dit is niet alleen het geval in de aangrenzende panden, maar ook in de bovenstrooms gelegen panden.

De gemalen hebben erg veel invloed op de waterstanden. Er is wellicht veel meer te halen uit een verbeterde aansturing van de gemalen, dan in een wijziging van de aansturing van de stuwen. De aansturing van deze gemalen zal dan met de toepassing van de meet- en regeltechniek verbeterd kunnen worden.

### Afweging

In de inleiding van dit hoofdstuk zijn vijf punten aangegeven waarop de verschillende regelingen op worden beoordeeld. Deze zijn in de resultaten en conclusies van alle scenario's ook teruggekomen. In onderstaande tabel zijn de bevindingen samengevat weergegeven. De beoordeling is op basis van de vergelijking met de huidige regeling.

De beoordeling is tot stand gekomen door middel van *expert judgement*. De resultaten zijn daartoe nauwkeurig bekeken en verklaard. De consequenties van de gekozen periode, de gebruikte modellering en alle andere gemaakte afwegingen zijn hierbij in gedachte gehouden. De tabel geeft een eenvoudige weergave van de getrokken conclusies.

Tabel 5.2. Kwalitatieve vergelijking van de regelingen

Regeling	Normale peilen	Extreme peilen	Snelheid correcties	Potentie tot verbetering	Verwacht gedrag
Huidige regeling	0	0	0	0	0
Pandgemiddelde	0	0	0	0	+
Gedecentraliseerd	++	0	+	+	0
Gecentraliseerd	+	+	-	++	++
Anticiperend	+	0	-	+++	+

De pandgemiddelde regeling heeft geen toegevoegde waarde. Omdat er wel investeringen nodig zijn om deze te implementeren wordt het afgeraden deze regeling toe te passen.

Uit de tabel blijkt dat de decentrale regeling vooral goed presteert onder normale omstandigheden en dat deze regeling snelle correcties bewerkstelligd. De mogelijkheid tot het aanpassen en verbeteren van de regeling maakt dat dit op korte termijn met lage kosten een goede vervanging van de huidige regeling is.

De gecentraliseerde regeling geeft een verbetering in het waterbeheer, ook al is deze nog niet afgesteld. De regeling is ook inzetbaar na veranderingen in het systeem, doordat deze net als de gedecentraliseerde regeling is gebaseerd op de geometrische parameters van het systeem. De potentie van de regeling is zeer groot. Op verschillende gebieden liggen er kansen om de regeling te verbeteren. De afstelling en toevoeging van gemalen met anticiperende mogelijkheden zijn hier voorbeelden van. Wanneer de regelbaarheid van het systeem wordt vergroot (door het oplossen van de genoemde knelpunten) is de winst nog groter. Het wordt dan ook aanbevolen om deze regeling toe te passen.

Uit de resultaten blijkt dat de toepassing van de meet- en regeltechniek een winst is voor het waterbeheer op de Linge. Door een gedegen regeling te construeren kunnen waterstanden tijdens normale en extreme omstandigheden beter worden beheerst.

## Aanbevelingen

### Voor (vervolg)onderzoek

Het opnemen van het Kolffgemaal in de gedecentraliseerde regeling levert een verslechtering op van de resultaten. Om de winst van de gedecentraliseerde regeling voor de stuwen ten opzichte van de huidige regeling beter in beeld te brengen moet het scenario nogmaals worden doorgerekend met de huidige gemaalregeling. Te meer omdat de invloed van de gemalen groot blijkt. Nogmaals doorrekenen geeft meer inzicht in de effecten van de verschillende veranderingen (gemaal én stuwaanpassingen).

In het onderzoek is gebruik gemaakt van één neerslagstation. Dat wil zeggen dat het gehele stroomgebied dezelfde neerslag te verwerken krijgt. In werkelijkheid is neerslag ruimtelijk sterk verdeeld over het gebied. Analyses met gespreide neerslag kunnen de meerwaarde van centrale regeling aantonen.

Nader onderzoek naar de neerslag-afvoer relatie voor het polder-boezemsysteem. In het onderzoek is gebruik gemaakt van de perfecte voorspelling, die in werkelijkheid niet voor handen is. Onderzoek naar de relatie tussen de voorspelde neerslag (beschikbare data) en afvoer (benodigde invoer anticiperende module) is essentieel voor een goede werking van de anticiperende module.

Anticiperende regelmethodeken (waaronder Model Predictive Control) verder uitwerken voor de gemalen, mogelijk in samenhang met minimalisering van het energieverbruik.

### Aan het waterschap

De knelpunten bij de stuwen Karbruggen, de Muskushouw en de Julianastuw oplossen door deze een grotere regelbaarheid te geven. Dit zal een verbetering geven van de resultaten uit deze studie, maar ook voor het waterbeheer van het waterschap. Door middel van een modelstudie kunnen de gevolgen van het oplossen van de knelpunten onderzocht worden, zowel voor de huidige situatie als voor nieuwe regelingen.

Het herprogrammeren van de stuwregelingen tot een gedecentraliseerde regeling met PI-regelaars levert met een relatief kleine inspanning al verbeteringen op. Er hoeven geen aanpassingen aan de stuwen en infrastructuur worden gedaan, zodat

dit ook op korte termijn realiseerbaar is. Het maakt de sturing van de stuwen krachtiger, zodat peilen strakker gehandhaafd kunnen worden. Het omzetten van de huidige regeling naar deze regeling wordt geadviseerd.

Op de langere termijn wordt geadviseerd om de mogelijkheden van een gecentraliseerde regeling in combinatie met een nieuwe gemaalregeling te onderzoeken. Deze regeling heeft veel potentie om het waterbeheer op de Linge te verbeteren. Er zijn echter nog te veel onzekerheden om dit type regeling nu al toe te passen. Een deel van deze onzekerheden zijn in voorgaande aanbevelingen (voor vervolgonderzoek) al weergegeven.

## Referenties

Brouwer (2005)

R. Brouwer. "Operational Water Management". College Dictaat TU Delft, september 2005.

Deltares 2006

Uitgever van softwarepakket Sobek Rural.

Website Deltares: [www.deltares.nl].

Sobek Rural v 2.11, simulatie software voor hydrologische en hydraulische systemen.

HydroLogic (2009).

HydroLogic, "Toetspeilen Linge op vernieuwende wijze bepaald". Onderzoeksrapport (in uitvoering), 2009.

Kwakernaak et al. (1972)

Kwakernaak, H. en Sivan, R., "Lineair Optimal Control Systems". Wiley-Interscience, 1972. ISBN: 0-471-511102

MathWorks 2003

Uitgever van softwarepakket MATLAB (MATrix LABoratory).

Website The MathWorks: [www.mathworks.com].

Matlab v 6.5.1 (R13SP1), Softwarepakket voor wiskundige toepassingen.

Nederpel et al. (2009)

Nederdel, A., Kolen, B., Hofman, P.J. en Fraiklin, S., "Probabilistisch model voor het toetsen van regionale keringen". H<sub>2</sub>O nr. 19, oktober 2009, pag. 20-22.

Overloop (2005)

P.J. van Overloop, J. Schuurmans, R. Brouwer en C.M. Burt. "Multiple-Model optimisation of Proportional Integral Controllers on Canals". Journal of irrigation and drainage engineering. April 2005.

Overloop (2006)

P.J. van Overloop, "Model Predictive Control on Open Water Systems". Proefschrift TU Delft, juni 2006. ISBN 1-58603-638-6

Schuurmans (1997)

J. Schuurmans, "Control of Water Levels in Open-Channels". Proefschrift TU Delft, oktober 1997. ISBN 90-9010995-1

Tauw 2006

Terpstra, W., "Toelichting peilbesluit de Linge – ontwerp". Rapport behorende bij het peilbesluit van de Linge. Tauw, augustus 2006.

Website KNMI.

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. Bevat gedetailleerde weersinformatie, onderzoeksverslagen en historische meetreeksen van klimatologische parameters.

Adres: [www.knmi.nl]



## **Bijlagen**