

KU LEUVEN

 **FACULTEIT
INGENIEURSWETENSCHAPPEN**

Intelligente sturing ter beheersing van overstromingen langs de Demer

Bert Van den Zegel
Evert Vermuyten

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor:
Prof. dr. ir. P. Willems

Academiejaar 2012 – 2013

Master of Science in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Intelligente sturing ter beheersing van overstromingen langs de Demer

Bert Van den Zegel
Evert Vermuyten

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor:

Prof. dr. ir. P. Willems

Assessoren:

Prof. dr. ir. J. Berlamont

Ir. J. Dewelde

Begeleider:

Ir. V. Wolfs

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteurs is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Jaren zijn voorbijgevlogen en vele broeken zijn gesleten, vooral op de banken in ons geliefkoosde boku-gebouw. Daarbij werden vele cursussen en slides opgeslagen in onze denkbeeldige rugzak van kennis die ons de komende jaren waar nodig zal bijstaan. Als afsluiter en hoogtepunt van onze studententijd zijn wij trots u deze masterproef te kunnen voorleggen die na vele, al dan niet terechte, eureka-momenten tot stand is gekomen. Zo'n masterproef komt echter niet alleen tot stand, zelfs niet met twee.

Daarom willen we in de eerste plaats prof. dr. ir. Patrick Willems bedanken voor het aanbieden van dit boeiende onderwerp en voor het bijstaan met nuttige suggesties. Hierbij was zijn ervaring op het vlak van de overstromingsproblematiek een grote hulp.

Daarnaast verdient onze begeleider ir. Vincent Wolfs ook veel lof. Wanneer we met een probleem zaten, sprong hij meteen in de bres om mee naar een oplossing te zoeken. We zijn hem dan ook zeer dankbaar voor de goede begeleiding.

Ook ir. Pieter Meert willen we bedanken voor het maken van het conceptuele model en het bijstaan met raad en daad tijdens deze masterproef. We would also like to thank Po-Kuan Chiang to introduce us in the world of MPC-GA with a lot of enthusiasm. He taught us the fundamentals of MPC-GA where we could build on. Vervolgens willen wij ook prof. dr. ir. Jean Berlamont bedanken die ons onderdompelde in de wondere wereld van de hydraulica.

Veel dank gaat ook uit naar onze ouders die onze studies mogelijk maakten. Daarbij zorgden zij niet alleen op financieel vlak voor de nodige steun, maar boden ze gedurende deze hele periode een helpende hand. Ook de rest van de familie mag niet worden vergeten.

Zoals het meestal gaat, staat achter elke sterke man een sterke vrouw en dat is in dit geval niet anders. We zijn dan ook veel dank verschuldigd aan onze vriendinnen Joke en Lauren die voor de nodige ontspanning zorgden. Hoewel hun interessedomein niet in dezelfde lijn ligt, toonden ze toch belangstelling voor ons werk en stonden ze steeds voor ons klaar. Bedankt!

Een speciaal bedankje gaat ook uit naar Rutger die ons de voorbije zomer vergezelde op de weg naar Rome, zodat we een onvergetelijke teambuilding beleefden. Ook een dikke merci aan onze andere bouwkundecollega's voor alle memorabele momenten die we door de jaren heen samen hebben meegemaakt.

Wij willen ook nog Innovyze® bedanken voor het ter beschikking stellen van een licentie voor de InfoWorks™-RS software en de Vlaamse Milieu Maatschappij voor het gebruikte InfoWorks™-RS model van de Demer.

Tot slot danken wij ook elkaar voor de samenwerking het afgelopen jaar. De tegenslagen die we kenden, werden ruimschoots gecompenseerd door de vele leuke en grappige momenten.

Bedankt allemaal!

*Bert en Evert
Leuven, 2013*

“De kracht van twee jonge mannen met een gemeenschappelijk doel kan bergen verzetten.”
L. Vrijdaghs

Inhoud

VOORWOORD	III
INHOUD	V
ABSTRACT	VIII
ABSTRACT	IX
FIGURENLIJST	X
TABELLENLIJST	XVI
LIJST VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN	XIX
HOOFDSTUK 1: INLEIDING	1
1.1 SITUERING EN BELANG VAN HET ONDERZOEK	1
1.2 DOELSTELLINGEN	3
1.3 UITEENZETTING VAN DE MASTERPROEF	4
HOOFDSTUK 2: STUDIEGEBIED	6
2.1 HET DEMERBEKKEN EN DE DEMER	6
2.1.1 <i>Het Demerbekken</i>	6
2.1.2 <i>De Demer</i>	8
2.2 OVERSTROMINGSPROBLEMATIEK	8
2.3 GEBIED ROND HET SCHULENSMEER EN DE WEBBEKOM	9
2.3.1 <i>Hoofdstromen</i>	10
2.3.2 <i>Wachtbekkens en bijhorende kleine waterlopen</i>	11
2.3.3 <i>Regelbare stuwen</i>	12
HOOFDSTUK 3: VOORGAAND ONDERZOEK	13
3.1 MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC)	13
3.1.1 <i>Algemeen</i>	13
3.1.2 <i>Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer</i> ...	15
3.1.3 <i>MPC-GA-techniek in het doctoraatsonderzoek van Chiang</i>	21
3.2 BESTAANDE MODELLEN VAN DE DEMER	25
3.2.1 <i>Het OBM-Demer</i>	25
3.2.2 <i>Conceptueel model in Simulink®</i>	26
3.3 CONCLUSIE	30
HOOFDSTUK 4: GEÏNTEGREERD MODEL	31
4.1 OPBOUW VAN HET MODEL	31
4.2 HOOFDMODEL DEMER	33
4.2.1 <i>Extra bak Begijnenbeek</i>	34
4.2.2 <i>Vergroting bak Velp</i>	34
4.2.3 <i>Hypsometrische curves</i>	34
4.3 MPC&GA	36
4.3.1 <i>Genereren van een reeks semi-random klepstanden</i>	36
4.3.2 <i>Overnemen van een reeks klepstanden</i>	41
4.4 VOORSPELLINGSMODEL DEMER	43
4.5 KOSTBEREKENING	43
4.5.1 <i>Waakpeilen en kostfuncties</i>	44
4.5.2 <i>Gewichten</i>	46
4.5.3 <i>Operatiekost</i>	47
4.6 ANALYSE VOORSPELLINGEN	48
4.7 EVALUATIE VAN HET MODEL	48
4.8 CONCLUSIE	50

HOOFDSTUK 5: VALIDATIE VAN HET MODEL.....	51
5.1	HISTORISCHE GEBEURTENIS SEPTEMBER 1998 51
5.2	VALIDATIE CONCEPTUEEL MODEL VOOR DE VASTE REGELING 52
5.3	VALIDATIE GEÏNTEGREERD MODEL..... 52
5.3.1	<i>Waterbalans</i> 54
5.3.2	<i>Maximale volumeverandering in het conceptueel model</i> 55
5.3.3	<i>Instabiliteiten</i> 56
5.4	VALIDATIE FINAAL GEÏNTEGREERD MODEL..... 58
5.5	CONCLUSIE 59
HOOFDSTUK 6: ANALYSE HET MPC-GA-ALGORITME.....	60
6.1	PARAMETERSTUDIE..... 61
6.1.1	<i>Aantal beschouwde gevallen</i> 61
6.1.2	<i>Regelstap</i> 63
6.1.3	<i>Aantal bijgehouden beste gevallen</i> 64
6.1.4	<i>Controlehorizon</i> 66
6.1.5	<i>Onzekerheid op de neerslagvoorspelling</i> 67
6.1.6	<i>Samenvatting van de resultaten uit de parameterstudie</i> 69
6.2	DIEPGAANDE ANALYSE VAN EEN SIMULATIERESULTAAT 70
6.3	EVALUATIE EFFICIËNTIE VAN HET MPC-GA-ALGORITME..... 79
6.4	AANBEVELINGEN TER VERBETERING VAN DE VASTE REGELS 84
6.4.1	<i>Omgeving Schulensmeer</i> 84
6.4.2	<i>Omgeving Webbekom</i> 90
6.4.3	<i>Conclusie</i> 91
6.5	HISTORISCHE GEBEURTENIS JANUARI 2002 92
6.5.1	<i>Analyse van de resultaten</i> 93
6.5.2	<i>Validatie van het model voor de historische gebeurtenis van januari 2002</i> 94
6.6	OPEENVOLGING VAN TWEE GROTE NEERSLAGPIEKEN 95
6.7	CONCLUSIE 97
HOOFDSTUK 7: EXTRA REGELBARE STUWEN	100
7.1	BERGINGSAPACITEIT VAN HET BUITENBEKKEN VAN HET SCHULENSMEER 100
7.2	RESULTATEN 101
7.3	DIEPGAANDE ANALYSE VAN EEN SIMULATIERESULTAAT 102
7.4	EVALUATIE EFFICIËNTIE VAN HET MODEL MET EXTRA STUWEN 111
7.5	WERKING VAN DE EXTRA STUWEN 115
7.6	VALIDATIE VAN HET MODEL MET EXTRA REGELBARE STUWEN 116
7.7	CONCLUSIE 117
HOOFDSTUK 8: VERBETERINGEN EN ALTERNATIEVEN VOOR HET GENETISCH ALGORITME	118
8.1	VASTE TRENDS 118
8.2	VASTE TRENDS AANGEVULD MET EXTRA REGELS 119
8.3	CORRELATIE VAN DE STUWEN 119
8.4	GROEPERING VAN DE STUWEN 120
8.5	STELSELMATIGE VERKLEINING VAN HET ONDERZOEKSGBIED..... 127
8.6	PERMUTATIES OP HET VERLOOP VAN EEN KLEPSTAND 128
8.7	CONCLUSIE 128
HOOFDSTUK 9: CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK.....	130
9.1	MAATSCHAPPELIJK BELANG..... 130
9.2	IMPLEMENTATIE VAN DE MPC-GA-TECHNIEK 130
9.3	EVALUATIE VAN HET GEÏNTEGREERD MODEL 131
9.4	AANVULLENDE VERBETERINGEN 132
9.5	AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK..... 133

REFERENTIES.....	134
BIJLAGEN	138
BIJLAGE A: HYPOMETRISCHE CURVE BAK BEGIJNENBEEK.....	139
BIJLAGE B: UITERSTE KLEPSTANDEN	140
BIJLAGE C: OVERZICHT VAN DE WAAKPEILEN	141
BIJLAGE D: GEWICHTEN VAN DE KOSTFUNCTIES.....	142
BIJLAGE E: VASTE REGELS VOOR STUWEN K7BG, K7LG, K19, K18, K24W, K24L EN K30.....	143
BIJLAGE F: DIEPGAANDE ANALYSE VAN EEN SIMULATIERESULTAAT: MPC-GA-REGELING MET EXTRA STUWEN VERSUS VASTE REGELING	145
BIJLAGE G: EVALUATIE EFFICIËNTIE: MPC-GA-STURING MET EXTRA STUWEN VERSUS VASTE REGELING.....	149

Abstract

Tijdens periodes van hevige regenval kunnen overstromingen optreden waarvan de schade vaak niet te overzien valt. Er dient actie te worden ondernomen. Deze masterproef kadert binnen het onderzoek naar het beheersen van overstromingen door middel van intelligente sturing van hydraulische structuren. De studie beperkt zich tot de bovenloop van de Demer, maar de kennis en methodiek zijn overdraagbaar naar andere stromingsgebieden.

De bovenloop van de Demer bevat regelbare stuwen en wachtbekkens die gestuurd worden op basis van een aantal op voorhand vastgelegde regels. Gezien de complexiteit van het systeem leiden deze vaste regels tot suboptimale resultaten. Een verbetering dringt zich op. Gedetailleerde hydrodynamische modellen kunnen in combinatie met neerslagvoorspellingen de verwachte toestand van het bekken bepalen. Real-time sturing is echter niet uitvoerbaar met dergelijke modellen, aangezien de rekentijd dit niet toelaat. Het gebruik van vereenvoudigde conceptuele modellen met een veel kortere rekentijd verhelpt dit probleem. Het in dit onderzoek gebruikte conceptueel model van het Demerbekken werd geprogrammeerd in Simulink®.

Op basis van voorgaand onderzoek wordt in deze thesis een techniek voorgesteld die Model Predictive Control (MPC) in combinatie met een Genetisch Algoritme (GA) toepast op het Demerbekken. Het ontwikkelen en uitgebreid testen van deze techniek is het hoofddoel van deze thesis. De MPC-techniek zal de verwachte toestand in het bekken bepalen in functie van de stand van de twaalf regelbare stuwen die het systeem telt. Het genetisch algoritme legt daarbij vast welke reeksen klepstanden worden doorgerekend. De beste combinatie van klepstanden uit de verschillende reeksen wordt bepaald met behulp van kostfuncties op basis van verkregen waterpeilen op twintig geselecteerde locaties. Het toepassen van parallel computing technieken en een efficiënte programmering zorgen er verder voor dat de rekentijd zoveel mogelijk beperkt blijft. Daarnaast is de correcte werking van het conceptueel model gegarandeerd door enkele noodzakelijke aanpassingen en uitbreidingen.

Het toegepaste MPC-GA-algoritme slaagt er in de gestelde doelen te bereiken en het overstromd volume met 46% te beperken ten opzichte van de huidige sturingstechnieken voor de historische was van september 1998. Daarbij benut de voorgestelde techniek de capaciteit van de wachtbekkens quasi perfect. Na validatie met het gedetailleerde hydrodynamisch model in InfoWorksTM-RS volgt een parameterstudie waarin de belangrijkste parameters van de techniek geoptimaliseerd worden. Uitgaande van de resultaten met het MPC-GA-model zijn een aantal aanbevelingen ter verbetering van de huidige sturing opgesteld.

In een laatste fase zijn enkele aanvullende verbeteringen van het riviernetwerk en het MPC-GA-algoritme onderzocht. Het invoegen van twee strategisch geplaatste regelbare stuwen blijkt een belangrijke maatregel te zijn om overstromingen nog beter te beheersen. Het overstromd volume is hierbij herleid tot slechts 3% ten opzichte van de huidige sturing. Tot slot werden enkele mogelijkheden ontwikkeld om de intelligentie van het genetisch algoritme te verhogen. Het groeperen van stuwen en optimaliseren op verschillende niveaus lijkt een techniek met veel potentieel.

Abstract

Periods of extreme rainfall may cause flooding with huge environmental, economical and human damage. Theories predict that current climate change will further increase the risk of flooding, also in our region. This study fits in the investigation of real-time control of floods by adjusting weirs. The methodology was developed for the specific study area of the river Demer in Belgium, but is generally applicable.

To control flood, adjustable weirs and retention reservoirs are situated along the Demer River. Today the setting of the weirs is controlled according to fixed rules. However, because of the complexity of the system, only suboptimal results are achieved. By making use of precipitation forecasts, the state of the network can be predicted by hydrodynamic models. Due to the extensive calculation time, real time control is currently not possible using this method. To fasten the calculation speed, simplified, so called conceptual models are developed. For the Demer basin, a conceptual model of the Demer basin was developed in Simulink®.

In this master thesis, this conceptual model is combined with Model Predictive Control (MPC) and a genetic algorithm (GA). The MPC-technique predicts the state of the network depending on the position of the twelve adjustable weirs in the Demer basin. The genetic algorithm generates these positions in a semi-random way.

Cost functions, based on twenty selected water levels were introduced to be able to determine the optimal combination of valve positions to minimize flood damage. The computational effort was strongly reduced by applying parallel computing and efficient programming. The conceptual model was fine-tuned to correctly predict the flows in the system.

After validating the model in InfoworksTM-RS, the influence of the most important variables is investigated by means of a parameter study. The results show that the MPC-GA-algorithm manages to reduce floods during the historical event of September 1998 by 46% in comparison with the fixed rules methodology. Based on the results some recommendations could be formulated to improve the fixed rules methodology which is currently in use.

In the final part of this research some supplementary improvements are investigated. By implementing two additional adjustable weirs, the simulated flood damage of September 1998 was further decreased to 3% of the flood damage achieved with the fixed rules method and the original network. Because of the significant influence of this adaptation, further investigation of this is strongly advised. Finally, several methods to increase the intelligence of the MPC-GA-algorithm were developed. Especially the technique of grouping weirs looks very promising to further speed-up and improve the calculations and reduce flood damage.

Figurenlijst

Figuur 1: Onderverdeling van het Demerbekken in veertien deelbekkens [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2006].....	7
Figuur 2: Reliëf in het Demerbekken [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008 - 2013].....	7
Figuur 3: Overzicht van het model van de Demer rond Schulensmeer en Webbekom [OBM-Demer, 2003].....	12
Figuur 4: Werkingsprincipe van een gated weir (links) en een radial sluice (rechts) [Innovyze [®] , 2012].....	12
Figuur 5: Principe Model Predictive Control [Behrendt, 2009]	13
Figuur 6: Schematische weergave van het conceptueel model van het gebied Schulensmeer-Webbekom met bijhorende modelvariabelen [Barjas-Blanco et al., 2009]	16
Figuur 7: Bepalen van de grenzen voor semirandom klepstanden	22
Figuur 8: Verschillende waakpeilen: Referentiepeil, waarschuwingspeil, alarmpeil en overstromingspeil.....	24
Figuur 9: Schadekost bij stijgend waterpeil met foutieve kostfunctie	24
Figuur 10: Lineair reservoir model [Meert, 2012].....	28
Figuur 11: Werkingsprincipe van het conceptuele model in Simulink [®]	29
Figuur 12: Schematische weergave van het geïntegreerd model.....	32
Figuur 13: Schematische weergave van het extern model uit Figuur 12.....	32
Figuur 14: Schematische weergave van het gemodelleerde Demergebied	35
Figuur 15: Semi-random reeks klepstanden voor een randomstap van 15min (blauw), 2u (rood) en 6u (groen).....	37
Figuur 16: Semi-random gegenereerde reeks klepstanden (Links). Gefilterde reeks (groen) samen met de oorspronkelijk gegenereerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Rechts).....	38
Figuur 17: Gefilterde reeks met overgang (groen) samen met de oorspronkelijk gegenereerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Links). Uiteindelijke reeks klepstanden (rood) samen met de gefilterde reeks met overgang (groen) en de oorspronkelijke gegenereerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Rechts).	40
Figuur 18: Overnemen van een reeks klepstanden van het beste geval van de vorige regelstap.....	41

Figuur 19: Doorschuiven van een reeks klepstanden indien het beste geval behouden blijft: Voorbeeld van een klepstand in drie opeenvolgende regelstappen.	41
Figuur 20: Overnemen van een reeks klepstanden van één van de andere beste gevallen van de vorige regelstap.....	42
Figuur 21: Overgang (groen) van het beste geval (blauw) naar één van de andere 40 beste gevallen (rood)	43
Figuur 22: Geselecteerde waterpeilen om de kost te berekenen	44
Figuur 23: Vergelijking van het verloop van de kostfuncties in het originele model van Chiang (links) en in dit onderzoek (rechts)	45
Figuur 24: Inkomend debiet opwaarts in de Demer voor de historische gebeurtenis van september 1998.	51
Figuur 25: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de vaste regeling.....	52
Figuur 26: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling.....	53
Figuur 27: Fout op de waterbalans gesommeerd over alle bakken.....	54
Figuur 28: Modelling bak Vlootgracht	55
Figuur 29: Voorbeeld van een configuratie met kleine en grote bak die mogelijk leidt tot instabiliteiten.....	56
Figuur 30: Waterpeil tijdens een instabiliteit.....	57
Figuur 31: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het finaal geïntegreerd model.....	59
Figuur 32: Spreiding van de kost in functie van het aantal beschouwde gevallen (regelstap 15 minuten, 40 bijgehouden besten, controlehorizon 48 uur)	61
Figuur 33: Spreiding van de kost voor verschillende regelstappen (200 gevallen, 40 bijgehouden besten, controlehorizon 48 uur)	63
Figuur 34: Positie van gevallen die als beste voorkomen	64
Figuur 35: Vergelijking van de spreiding van de kost voor het bijhouden van 4 en 40 beste gevallen (regelstap 6 uur, 200 gevallen, controlehorizon 48 uur).....	66
Figuur 36: Spreiding van de kost voor verschillende controlehorizon (regelstap van 6u (links) en 15min (rechts), 200 beschouwde gevallen, 40 bijgehouden besten).....	66
Figuur 37: Onzekerheid op de waterstanden in de Demer te Zichem voor de ontwerpbeurt van november 2010 [Van Steenberghe, 2012]	68

Figuur 38: Vergelijking van het verloop van het waterpeil afwaarts in de Demer voor de twee groepen van simulatieresultaten (regelstap 15min, 200 gevallen)	70
Figuur 39: Vergelijking van de resultaten met MPC-GA-regeling en vaste sturing voor de was van september 1998: Verhouding van het verschil tussen de cumulatieve debieten van beide regelmethodes tot de cumulatieve debieten in de vaste regeling na de eerste 18 dagen.	72
Figuur 40: Debieten [m^3/s] opwaarts in de Demer voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.	76
Figuur 41: Debieten [m^3/s] aan het binnenbekken van het Schulensmeer voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.....	77
Figuur 42: Debieten [m^3/s] aan de Vlootgracht voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.....	78
Figuur 43: Debieten [m^3/s] opwaarts in de Begijnenbeek voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.....	79
Figuur 44: Vergelijking van de berging in het systeem bij toepassing van MPC-GA-sturing (rood) en vaste sturing (blauw) voor de was van september 1998: Cumulatieve debieten na de eerste 18 dagen uitgedrukt in 10^3m^3	82
Figuur 45: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens de historische was van september 1998.	83
Figuur 46: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de historische was van september 1998.....	83
Figuur 47: Detail van de omgeving van het Schulensmeer	84
Figuur 48: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de stuwen A en K7 opwaarts in de Demer tijdens de historische was van september 1998.	85
Figuur 49: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de stuwen D en Egw aan de Vlootgracht tijdens de historische was van september 1998.	87
Figuur 50: Detail van de omgeving van de Webbekom	90
Figuur 51: Inkomend debiet opwaarts in de Demer (links) en opwaarts in de Gete (rechts) voor de historische gebeurtenis van januari 2002.....	92
Figuur 52: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens de historische was van januari 2002.....	93

Figuur 53: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de historische was van januari 2002.....	93
Figuur 54: Verloop van de belangrijkste stuwen aan het Schulensmeer (A, K7, D en Egw) tijdens de historische was van januari 2002.	94
Figuur 55: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling.....	95
Figuur 56: Inkomend debiet opwaarts in de Demer (links) en opwaarts in de Gete (rechts) tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998.	95
Figuur 57: Verloop van de waterpeilen in het binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-sturing.	96
Figuur 58: Verloop van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-sturing.....	96
Figuur 59: Vergelijking van het originele model (links) en het model met extra stuwen (rechts)	101
Figuur 60: Vergelijking van de totale kost voor simulaties met het originele model en het model met extra stuwen (regelstap 15 minuten, 200 gevallen, 40 bijgehouden besten)	101
Figuur 61: Vergelijking tussen de resultaten via MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen voor de was van september 1998: Verschil in cumulatieve debieten ten opzichte van de cumulatieve debieten bij het originele MPC-GA-model na de eerste 18 dagen.....	103
Figuur 62: Debieten [m^3/s] aan de Vlootgracht voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).	107
Figuur 63: Debieten [m^3/s] opwaarts in de Demer voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).	108
Figuur 64: Debieten [m^3/s] aan het binnenbekken van het Schulensmeer voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).	109

Figuur 65: Debieten [m^3/s] aan de Houwersbeek voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).....	110
Figuur 66: Vergelijking van de berging in het systeem voor het originele model (blauw) en het model met extra stuwen (rood) na toepassing van MPC-GA voor de was van september 1998: Cumulatieve debieten na de eerste 18 dagen uitgedrukt in 10^3m^3	113
Figuur 67: Vergelijking van de berging in het systeem voor het originele model met de vaste regeling (blauw) en voor het model met extra stuwen na toepassing van MPC-GA (rood) voor de was van september 1998: Cumulatieve debieten na de eerste 18 dagen uitgedrukt in 10^3m^3	113
Figuur 68: Vergelijking van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens de was van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen.....	114
Figuur 69: Vergelijking van de waterpeilen aan de overgang Houwersbeek-Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de was van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen.	114
Figuur 70: Verloop van de extra stuwen KVlo-res3 (links) en KZww-res3 (rechts) voor het model met extra stuwen tijdens de historische was van september 1998.	115
Figuur 71: Vergelijking van de simulatieresultaten in de buitenbekkens van het Schulensmeer voor het conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het model met extra regelbare stuwen.....	116
Figuur 72: Vergelijking van de simulatieresultaten voor het conceptueel model (blauw) en het IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het model met extra regelbare stuwen	116
Figuur 73: Modellerings van het gereduceerde gebied aan het Schulensmeer [Barjas-Blanco et al., 2009].....	119
Figuur 74: Verdeling van de stuwen in groepen en subgroepen	121
Figuur 75: Vergelijking van de spreiding van de kost voor simulaties met het originele MPC-GA-model, het intelligent model en een aangepast intelligent model dat alleen uit fase drie bestaat (regelstap 6 uur, 200 beschouwde gevallen)	123
Figuur 76: Vergelijking van de spreiding van de kost voor simulaties met het intelligent model en het originele MPC-GA-model met 100 en 200 beschouwde gevallen voor een regelstap van 15 minuten	124
Figuur 77: Voorbeeld van een optimalisatieproces in de industrie: Bepaling van de mengverhouding van vijf producten	127
Figuur 78: Hypsometrische curve van de bak Begijnenbeek	139

Figuur 79: Vergelijking van de resultaten met MPC-GA-regeling met extra stuwen en de vaste sturing voor de was van 1998: Verschil in cumulatieve debieten ten opzichte van de cumulatieve debieten bij de vaste sturing na de eerste 18 dagen 145

Tabellenlijst

Tabel 1: Overstroomde oppervlakte en uitbetaalde schade voor een aantal recente overstromingen langs de Demer [HIC, 2003].....	8
Tabel 2: Samenvatting decoderen van een gen bij de bepaling van semirandom klepstanden	23
Tabel 3: Algemene kostfuncties afhankelijk van de positie van het waterpeil.....	46
Tabel 4: Gewichten voor het waterpeil boven het overstromingspeil	46
Tabel 5: Overzicht van de rekentijd per taak in het MPC&GA-blok.....	49
Tabel 6: Aangenomen parameters in het geïntegreerd model	52
Tabel 7: Vergelijking van de rekentijd in functie van het aantal beschouwde gevallen voor het simuleren van 12,5 dagen (300 uren) met toepassing van MPC-GA.	62
Tabel 8: Resultaten van de parameterstudie	69
Tabel 9: Vergelijking tussen de resultaten met vaste sturing en met MPC-GA-regeling voor de was van 1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen.	73
Tabel 10: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen voor de vaste regels en de MPC-GA-regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur.....	80
Tabel 11: Analyse van de procentuele verhouding van de MPC-GA-regeling ten opzicht van de vaste regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur.....	81
Tabel 12: Vaste regels voor stuw A	85
Tabel 13: Vaste regels voor stuw K7	85
Tabel 14: Verbeterde vaste regels voor stuw A	86
Tabel 15: Verbeterde vaste regels voor stuw K7	87
Tabel 16: Vaste regels voor stuw D.....	88
Tabel 17: Vaste regels voor stuw E _{gw}	88
Tabel 18: Vaste regels voor stuw E _{rs}	88

Tabel 19: Verbeterde vaste regels voor stuw D	89
Tabel 20: Verbeterde vaste regels voor stuw Egw.....	90
Tabel 21: Aanbevelingen ter verbetering van de vaste sturing voor de omgeving van de Webbekom.....	91
Tabel 22: Vergelijking tussen de resultaten via MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen voor de was van september1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen...	104
Tabel 23: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de MPC-GA-regeling in het originele model en in het model met extra stuwen voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur.	111
Tabel 24: Analyse van de procentuele verhouding van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen ten opzicht van de MPC-GA-regeling in het originele model en ten opzichte van de vaste regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur.	112
Tabel 25: Samenvatting principe groepering van de stuwen	122
Tabel 26: Hypsometrische curve bak Begijnenbeek	139
Tabel 27: Overzicht van de uiterste klepstanden (relatief t.o.v. de laagste klepstand)	140
Tabel 28: Overzicht van de verschillende waakpeilen	141
Tabel 29: Gewichten voor de waterpeilen onder referentiepeil en tussen referentiepeil en waarschuwingspeil	142
Tabel 30: Gewichten voor de waterpeilen tussen waarschuwingspeil en overstromingspeil	142
Tabel 31: Gewichten voor de waterpeilen boven het overstromingspeil	142
Tabel 32: Vaste regels voor stuw K7bg	143
Tabel 33: Vaste regels voor stuw K7lg	143
Tabel 34: Vaste regels voor stuw K19	143
Tabel 35: Vaste regels voor stuw K18	144
Tabel 36: Vaste regels voor stuw K24w	144
Tabel 37: Vaste regels voor stuw K24l	144
Tabel 38: Vaste regels voor stuw K30	144

Tabel 39: Vergelijking tussen de resultaten met vaste regeling en met MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen voor de was van 1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen. 146

Tabel 40: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de vaste regels en van de MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur. 149

Lijst van afkortingen en symbolen

CMD-tool	Conceptual Model Developer tool. Software tool ontwikkeld aan de KU Leuven die hulp biedt bij het opstellen van conceptuele riviermodellen.
GA	Genetisch algoritme. Een algoritme gebaseerd op het principe van natuurlijke selectie dat gebruikt wordt om oplossingen te vinden voor optimalisatie- en zoekproblemen.
Geval	Groep van reeksen klepstanden, één reeks voor elke regelbare stuw.
IWRS	InfoWorks TM River Systems. Hydrodynamische riviermodelleringssoftware, ontwikkeld door Innovyze.
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut. Federaal Belgisch instituut dat wetenschappelijk onderzoek verricht naar het weer en het klimaat en hierover informatie verleent.
MATLAB [®]	MATrix LABoratory. Technische softwareomgeving, uitgegeven door The Mathworks, die gebruikt kan worden voor wiskundige toepassingen.
MIMO	Multi-input-multi-output. Een systeem met meerdere ingangen en uitgangen.
MPC	Model Predictive Control. Wiskundige optimalisatie techniek die de ingangen van een systeem voorspelt om zo snel mogelijk een bepaalde uitgangswaarde te bereiken.
OBM	Operationeel Bekken Model. Onderdeel van overstromingsvoorspeller van de Vlaamse Milieu Maatschappij.
Oneigenlijk water	Water dat verdwijnt of wordt bijgemaakt.
QH-verband	Functioneel verband tussen het debiet en de waterhoogte.
Randomstap	De regelmaat waarmee een nieuwe semi-random klepstand wordt aangemaakt door het genetisch algoritme.
Regelstap	Het tijdsinterval waarmee de stuwen bijgeregeld kunnen worden.
SIMULINK [®]	Technische softwareomgeving, uitgegeven door The Mathworks, die gebruikt kan worden voor modelleren, simuleren en analyseren van dynamische systemen.

TAW	Tweede Algemene Waterpassing. Referentiehoogte voor hoogtemetingen in België. Het nulniveau komt overeen met gemiddeld waterpeil bij laagwater in Oostende.
VMM	Vlaamse Milieu Maatschappij. Intern zelfstandig agentschap binnen het beleidsdomein Leefmilieu, Natuur en energie van de Vlaamse overheid. De VMM is beheerder van de waterlopen in het Demerbekken.

Hoofdstuk 1: Inleiding

1.1 Situering en belang van het onderzoek

Rivieren hebben een grote invloed op het landschap waar ze doorheen stromen. Ze snijden niet alleen het landschap uit, maar bepalen ook in belangrijke mate de leefbaarheid in hun stromingsbekken. De beïnvloeding van de stroming van rivieren is dan ook overal ter wereld al eeuwenlang een belangrijke bezigheid. Rivieren dragen ook een verwoestende kracht in zich. Tijdens periodes van hevige regenval kunnen overstromingen optreden waarvan de schade vaak niet te overzien valt.

Overstromingen komen ook in Vlaanderen nog steeds regelmatig voor. Hiervoor bestaan verschillende oorzaken. Zo toont het Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC, 2007] aan dat de frequentie waarmee stormen met extreme regenval voorkomen wereldwijd is toegenomen op het einde van de 20e eeuw. Uitgaande van simulaties met verschillende klimaatmodellen en scenario's, werd geconcludeerd dat deze trend zich met een waarschijnlijkheid van meer dan 90% zal voortzetten in de 21e eeuw. Daarnaast zijn er verscheidene andere aanleidingen voor de wateroverlast in Vlaanderen die bijna allemaal geclassificeerd kunnen worden onder de titel 'menselijke ingrepen'.

De meeste historische steden zijn langs een waterloop ontstaan, aangezien deze drinkwater konden leveren en als riool konden fungeren. Daarnaast waren rivieren lange tijd de enige transportweg voor massagoederen en zware voorwerpen. Rivieren hebben echter een veranderend bed ten gevolge van de variabiliteit van de neerslag. In Vlaanderen heeft een rivier typisch een winter- en een zomerbed. Normaal gezien zijn overstromingen van het winterbed eerder voordelig dan nadelig. Het zorgt namelijk voor bijkomende berging van de hoogste debieten en afzetting van vruchtbaar slib. In een groot aantal steden is echter gebouwd in het winterbed waardoor wateroverlast bij hevige regenval moeilijk te vermijden is. Om de veiligheid van de bevolking te garanderen werd het zomerbed van de rivier vaak ingedijkt. Op het platteland werden de dorpen oorspronkelijk nog wel buiten het winterbed gebouwd, maar wanneer meer mensen er zich gingen vestigen kwam daar verandering in. Recenter werden op deze waterzieke gronden zelfs industrieterreinen en sociale woonwijken gebouwd omwille van de lage grondprijzen. Wanneer deze gronden niet voldoende opgehoogd werden, traden frequent overstromingen op die als rampzalig en catastrofaal werden ervaren. Het was meestal slechts een kwestie van tijd vooraleer dit gebeurde, aangezien de rivier gewoon zijn natuurlijke bedding innam. De schade bij overstromingen is dus niet alleen het gevolg van toegenomen regenval, maar mogelijks ook van een verkeerd ruimtelijk ordeningsbeleid. Rott stelde dan ook terecht: *"In de plaats van het water weg te houden van de mensen zouden we de mensen moeten weghouden van het water"*. [Berlamont, 2001]

Het huidige beleid houdt rekening met de impact van beslissingen op het watersysteem. Het instrument dat de overheid hiervoor gebruikt is de watertoets. [Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2013] Ook de tijden van de 'end-of-pipe' methodologie, waarbij slechts de gevolgen van slechte hydrologische maatregelen worden bestreden, liggen ondertussen achter ons. Bij het doorvoeren van maatregelen zal in de toekomst meer en meer voor een brongerichte aanpak worden gekozen, ook wel gekend als 'source control'. Het ideale oplossingsscenario voor de overstromingsproblematiek van rivieren bestaat er in om de rivieren hun winterbed terug te geven, men spreekt van 'restauratie'. Hierbij vindt een herstel van het meanderend verloop en de natuurlijke overstromingsgebieden van de rivier plaats. Dit moet zorgen voor een vertraging van de waterafvoer en een herstel van de biodiversiteit.

Om nu in de huidige omstandigheden overstromingen zo veel mogelijk te beperken, kan in het Demerbekken gebruik worden gemaakt van beweegbare stuwen. Deze kunnen immers ingezet worden om de debieten in de waterlopen bij te sturen en zo het gewenste watervolume te bufferen of af te voeren. Vandaag de dag worden de meeste beweegbare stuwen langs de Vlaamse waterlopen geregeld via vooraf opgestelde regels. Afhankelijk van het huidige stromingsregime wordt bepaald of de klepstanden van de stuwen aangepast dienen te worden of niet. Indien nodig, wanneer er bijvoorbeeld kans is op overstroming, worden de stuwen manueel bijgestuurd. Er zijn verschillende redenen waarom deze werkwijze niet steeds de optimale regeling zal geven. De methode heeft als groot nadeel dat geen rekening wordt gehouden met toekomstige, voorspelde neerslag. Uit onderzoek [Willems et al., 2008] is gebleken dat met een betere sturing van de wachtbekken langs de Demer overstromingen in het verleden beheerst of zelfs vermeden hadden kunnen worden. Daarnaast houden de vaste regels ook geen rekening met andere karakteristieken van de bui zoals richtingsafhankelijkheid. Wanneer de regenval bijvoorbeeld eerst voorkomt in het afwaarts gedeelte van het bekken vereist dit een andere sturing dan wanneer de bui zich van opwaarts naar afwaarts verplaatst. Om een verbeterde sturing te bekomen wordt onderzoek gedaan naar intelligente methodes om de regeling van stuwen te optimaliseren en zo de overstromingsproblematiek aan te pakken. [Barjas-Blanco et al., 2009]

Om tot een effectief en duurzaam waterbeleid te komen zou men de infrastructuur in Vlaanderen helemaal moeten hernieuwen. Algemeen kan men echter stellen dat het zeer grote (financiële) inspanningen zal vergen om de fouten uit het verleden volledig uit te wissen. Zo is het bijvoorbeeld zeer moeilijk om de bebouwde winterbedden ten gevolge van het slechte ruimtelijke ordeningsbeleid te herstellen. De kostprijs voor de onteigening van alle gebouwen in het winterbed zou immers enorm oplopen. Daarnaast kunnen rioleringen en buffers niet economisch en praktisch ontworpen worden opdat zij in alle, zelfs extreme, omstandigheden wateroverlast zouden voorkomen. Intelligente sturing is in dat opzicht een interessante manier om optimaal gebruik te maken van de beschikbare bergingscapaciteit van het netwerk. Wanneer het echter gaat om uitzonderlijke wassen zijn overstromingen tot op zekere hoogte niet te vermijden. Als men de overstromingsproblematiek van rivieren wil aanpakken spreekt men dus beter van maatregelen ter "beheersing" van overstromingen dan van "preventie". Wateroverlast zal zelfs in de toekomst nooit volledig vermeden kunnen worden waardoor een systeem van compensatiemaatregelen en schadeloosstelling moet worden uitgewerkt. [Berlamont, 2001]

1.2 Doelstellingen

Deze masterproef is een voortzetting van het onderzoek van Barjas-Blanco et al. [2009]. Het hoofddoel bestaat er in om de toepassing van intelligente sturing, meer bepaald van de Model Predictive Control-techniek (MPC) aangevuld met een genetisch algoritme (GA), langs de Demer te onderzoeken met het oog op de beheersing van overstromingen. Meer specifiek gaat het hier over de sturing van twaalf stuwen in het Demerbekken, in de omgeving van de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom.

Het eerste deel van dit onderzoek richt zich op de analyse van bestaande hydrodynamische modellen en technieken voor de toepassing van MPC. Een belangrijk document voor het onderzoek naar de toepassing van MPC is het *'Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer'* [Barjas-Blanco et al., 2009]. Dit werd uitgevoerd aan de Afdeling Hydraulica en de Afdeling SISTA van de KU Leuven in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM). Onderwerp van dit onderzoek was de bruikbaarheid van MPC voor de real-time sturing van hydraulische regelstructuren. Met deze techniek werd een zo efficiënt mogelijke regeling ter beheersing van overstromingen beoogd. Daarnaast vormt het doctoraatsonderzoek van Chiang [2013] een belangrijke informatiebron voor de toepassing van MPC in combinatie met een genetisch algoritme. Voor real-time sturingstoepassingen zijn, zoals duidelijk zal worden uit voorliggend onderzoek, hydrodynamische modellen nodig die een geringe rekentijd hebben. Daarom worden in deze studie zogenaamde conceptuele modellen aangewend, die de stroming in de rivier op vereenvoudigde wijze beschrijven. Er zijn twee conceptuele modellen van de Demer en diens belangrijkste zijrivieren beschikbaar gesteld. Beide zijn gebaseerd op het gedetailleerde volledig hydrodynamische Operationeel Bekken Model van de Demer, het OBM-Demer: één in Simulink® [Meert, 2012] en één in MATLAB/C [Chiang, 2013]. Aangezien dergelijke modellen een cruciale component zullen vormen van het onderzoek, worden deze eerst met bijzondere aandacht onderzocht.

Het doel van het tweede deel van dit onderzoek bestaat er vervolgens in om de MPC-techniek in combinatie met het genetisch algoritme toe te passen op het Simulink®-model [Meert, 2012]. Dit houdt een belangrijke uitbreiding van het bestaande model in, omdat overgegaan wordt van een model met een geïmplementeerde vaste regeling van de stuwen naar een model waarbij de optimale klepstanden via het MPC-GA-algoritme worden bepaald. Het model zal de kost berekenen die een bepaalde configuratie van klepstanden in de toekomst veroorzaakt. Doordat gestuurd wordt naar een zo laag mogelijke kost is de kostberekening van cruciaal belang om een goede werking van de MPC-GA-techniek te bekomen. Daarom zal een nieuw kostberekeningsmodel opgesteld worden op basis van enerzijds de regelobjectieven en -prioriteiten [Barjas-Blanco et al., 2009] en anderzijds de uitbetaalde schadevergoeding na de overstromingen van september 1998. Het doel hierbij is om een realistische verhouding van de overstromingsgevoeligheid en gevolgen bij overstromen van de verschillende gebieden te bekomen. Bij de implementatie worden ook oplossingen gezocht om de rekentijd zo veel mogelijk te beperken en het model zo te ontwerpen dat het eenvoudig aanpasbaar blijft. Zodoende kan het effect van de verschillende parameters in een latere fase eenvoudig onderzocht worden.

Het uitvoeren van een grondige analyse van de werking van het opgestelde model is een derde doel van deze masterproef. Hierbij wordt eerst gekeken naar de invloed van de

parameters van het algoritme op de resultaten. Vervolgens is het belangrijk om de resultaten bekomen met de intelligente sturing en de vaste regeling grondig te vergelijken. Daartoe is een onderzoek naar de debietsverdeling in het netwerk en een evaluatie van de efficiëntie van het algoritme uitgevoerd, waarbij nagegaan wordt of de bekomen sturing effectief beter is en overstromingen meer beheerst worden bij toepassing van de MPC-GA-techniek. Op het einde van dit hoofdstuk zal ook gekeken worden naar enkele mogelijkheden om de vaste regels te verbeteren.

Een laatste doel van dit onderzoek bestaat uit het uitwerken van een aantal manieren waarop de overstromingsproblematiek verder aangepakt kan worden. Hierbij wordt in eerste instantie gekeken naar mogelijke aanpassingen aan het bestaande netwerk om de beschikbare berging optimaal te benutten. Daarnaast wordt ook gekeken naar technieken om het GA-algoritme intelligenter te maken en zo meer doelgericht te zoeken naar de optimale klepstanden.

1.3 Uiteenzetting van de masterproef

Deze paragraaf geeft een overzicht van de hierna volgende hoofdstukken. De opbouw komt ongeveer overeen met de gevolgde werkwijze in dit onderzoek.

De in deze masterproef ontwikkelde techniek is op ieder bekken toepasbaar. Hier is het algoritme echter toegepast op een specifiek onderzoeksgebied: het Demerbekken. Hoofdstuk 2 begint dan ook met een bespreking van dit bekken en van de Demer. Daarna volgt een overzicht van de overstromingsproblematiek specifiek voor dit bekken. In het laatste deel van dit hoofdstuk wordt het gemodelleerde deel van het riviernetwerk nader bekeken. Daarbij is ook aandacht voor de stuwen die zullen gebruikt worden bij de intelligente sturing.

Hoofdstuk 3 bevat een overzicht van de belangrijkste onderzoeken over de Demer en MPC waar deze studie op voortbouwt. Er wordt van start gegaan met een algemene bespreking van MPC. Daarna volgt het *'Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer'* [Barjas-Blanco et al., 2009] dat aan de KU Leuven werd uitgevoerd. Hierop verder bouwend is er het doctoraatsonderzoek van Chiang [2013] waarin een ander type MPC-techniek gebruikt wordt, gebaseerd op een genetisch algoritme. Een soortgelijke techniek zal verder in dit onderzoek toegepast worden. Daarna volgt een korte uiteenzetting over het OBM-Demer. Dit is het basismodel waar alle andere modellen op gebaseerd zijn. Ook verder bouwend op het onderzoek van Barjas-Blanco et al. is de masterproef van Meert [2012] waarin een semi-automatische methode ontwikkeld is om een conceptueel riviermodel op te stellen. Het model dat hiermee gegenereerd is, zal als basis dienen voor dit onderzoek.

Hoofdstuk 4 begint met een bespreking van de algemene opbouw van het geïntegreerd model. Dit is het model dat bekomen is na uitbreiding van het conceptueel model van Meert [2012] met de MPC-GA-techniek. Daarna volgt dan een meer diepgaande bespreking van de verschillende onderdelen van dit model. Hierbij is vooral aandacht voor de noodzakelijke aanpassingen aan het originele model, de toegepaste technieken en de kostberekening. Deze laatste is immers van cruciaal belang om een goede sturing te bekomen. Tot slot volgt

ook nog een evaluatie van het uitgebreide model met een bespreking van de belangrijkste kenmerken ervan.

Ter controle van de correcte werking dient het geïntegreerde model gevalideerd te worden aan de hand van het programma InfoWorks[®]-RS (IWRS). Dit rekenprogramma zal de de Saint-Venant vergelijkingen immers volledig oplossen, waardoor correctere resultaten bekomen worden. Deze validatie gebeurt in Hoofdstuk 5. Hiervoor wordt beroep gedaan op de historische gebeurtenis van september 1998 die in het in begin van dit hoofdstuk kort toegelicht wordt. Verder worden ook een aantal noodzakelijke verbeteringen aan het model aangebracht.

In het eerste deel van Hoofdstuk 6 wordt een parameterstudie uitgevoerd naar de belangrijkste parameters van het model. Daarna volgt een diepgaande analyse van een van de simulatieresultaten waarbij de bekomen debietsverdeling vergeleken wordt met die bij toepassing van de vaste regels. Vervolgens wordt nagegaan dat de bekomen regeling wel degelijk een verbetering met zich meebrengt. Op basis van de resultaten worden enkele aanbevelingen ter verbetering van de vaste regels geformuleerd. Tot slot wordt ook gekeken naar hoe het algoritme reageert bij een andere historische gebeurtenis, die van januari 2002, en bij het aanleggen van twee extreme neerslagpieken achter elkaar.

In hoofdstuk 7 wordt nagegaan hoe de bergingscapaciteit van de wachtbekkens beter kan worden benut. Daartoe wordt een uitbreiding van het netwerk met twee extra regelbare stuwen voorgesteld. De invloed van deze uitbreiding wordt aan de hand van enkele simulaties onderzocht en afgewogen ten opzichte van het originele model met MPC-GA-sturing en ditzelfde model met toepassing van de vaste regeling. Daartoe is de debietsverdeling in het netwerk, de efficiëntie van de sturing en de werking van de stuwen onderzocht.

Hoofdstuk 8 gaat vervolgens na of het MPC-GA-algoritme nog verder verbeterd kan worden en of er interessante alternatieven bestaan. Hierbij zullen enkele ideeën besproken worden, waarvan één uitgewerkt wordt tot een model. De simulatieresultaten met dit model komen eveneens in dit hoofdstuk aan bod en worden vergeleken met de resultaten bekomen met het originele MPC-GA-algoritme.

Tot slot formuleert Hoofdstuk 9 de conclusies die uit deze studie volgen. Daarnaast worden nog enkele aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek.

Hoofdstuk 2: Studiegebied

Het studiegebied van deze masterproef is het gedeelte van het Demerbekken opwaarts van Diest. In dit gebied zijn een groot aantal rivieren terug te vinden zoals de Mangelbeek, de Herk, de Velpe, de Gete en de Zwartebeek, die allen in de Demer uitmonden ter hoogte van het gemodelleerde gebied. Het eerste gedeelte van dit hoofdstuk bespreekt het Demerbekken en de Demer. Daarna volgt een overzicht van de overstromingsproblematiek in deze regio en een bespreking van het gebruikte model.

2.1 Het Demerbekken en de Demer

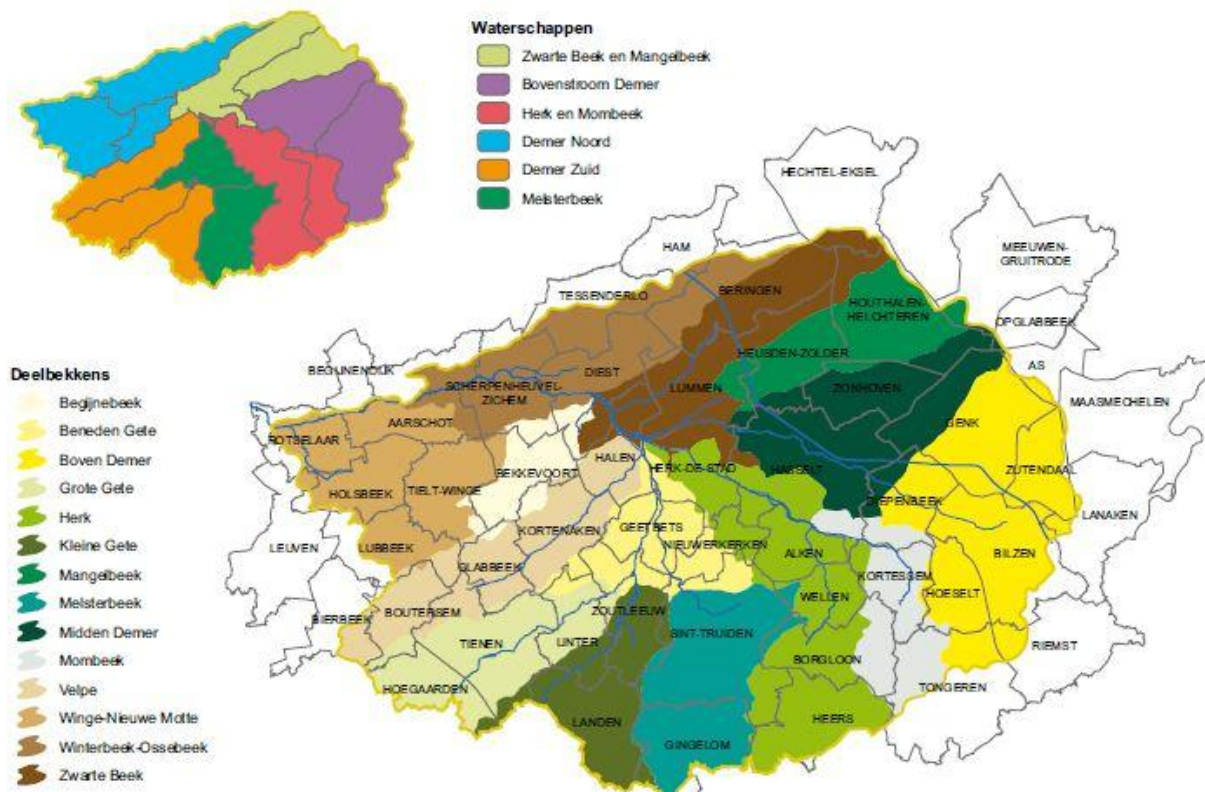
2.1.1 Het Demerbekken

Het Demerbekken is één van de elf Vlaamse bekkens en bevindt zich in het zuidoostelijke deel van Vlaanderen. Het volledige hydrografische bekken beslaat een oppervlakte van 2334km² waarvan 1922km² in het Vlaamse Gewest gelegen is. [Integraal Waterbeleid Demerbekken, 2008-2013] Een aantal waterlopen, zoals de Kleine en Grote Gete, ontspringen in Wallonië waardoor een beperkt deel van het bekken zich in het zuidelijke landsdeel bevindt. Het zuidwestelijke deel van het bekken in Vlaanderen behoort tot de provincie Vlaams-Brabant terwijl het grootste deel zich in de provincie Limburg uitstrekt. Langs de westelijke, noordelijke en oostelijke zijde is het Demerbekken begrensd door respectievelijk het Dijle- en Zennebekken, het Netebekken en het Maasbekken. In het zuiden wordt de grens gevormd door het Waals Gewest.

Het Demerbekken is verder onderverdeeld in veertien deelbekkens, zie Figuur 1. De provincie Vlaams-Brabant coördineert de deelbekkens van de Begijnenbeek, Motte, Kleine Gete, Grote Gete, Winge, Velpe, Winterbeek en Ossebeek. De andere deelbekkens worden door de provincie Limburg beheerd.

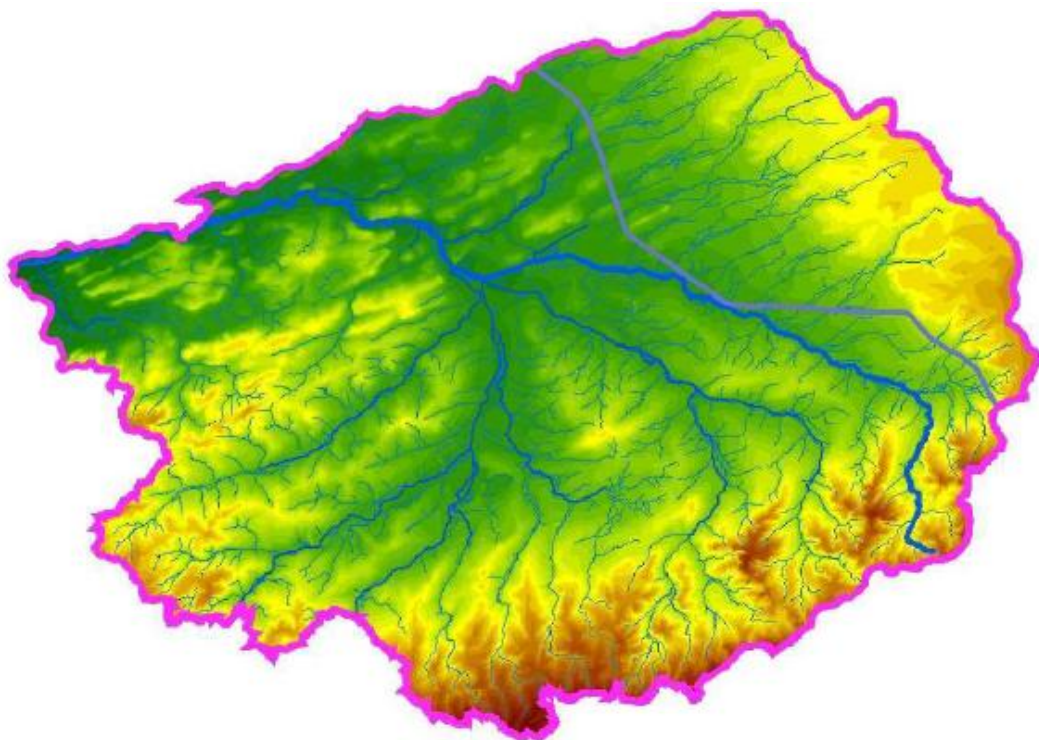
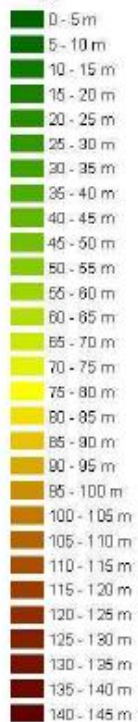
Het Demerbekken is onderverdeeld in drie fundamenteel verschillende gebieden: het Hageland, Haspengouw en het Kempisch Plateau. Het Kempisch Plateau is gelegen ten noorden van de Demer en heeft een gemiddelde hoogte van 80m. De bodem bestaat er uit zandgrond. Het Hageland is gelegen in het westelijke deel van het bekken en bestaat uit een aantal parallelle heuvels met een ZW-NO-oriëntatie. In de bodem treft men hier voornamelijk zandleemgronden aan. Haspengouw vervolgens ligt in het zuidelijke deel van het Demerbekken. Dit gebied kan op basis van de topografie, zie Figuur 2, en de bodem nog verder worden opgedeeld in twee subgebieden. Het betreft Vochtig Haspengouw, met een vrij vlak reliëf en Droog Haspengouw met een sterk golvend landschap en hoogteverschillen tot 100m. In het zuiden bestaat de bodem uit leem. Gevolg is dat de belangrijkste zijrivieren van de Demer uit het zuiden komen. Door de leemgrond zal de indringing in de bodem daar

immers veel lager zijn dan in de Kempen. Ook het grote hoogteverschil zal er voor zorgen dat water uit het zuiden sneller naar de Demer zal worden afgevoerd. [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008- 2013]



Figuur 1: Onderverdeling van het Demerbekken in veertien deelbekkens [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2006]

Legend



Figuur 2: Reliëf in het Demerbekken [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008 - 2013]

2.1.2 De Demer

Zoals de naam al doet vermoeden is de Demer de hoofdrivier van het Demerbekken. De rivier ontspringt in het dorp Ketsingen, gelegen ten oosten van Tongeren op een hoogte van 89m TAW en mondt 85km verder te Werchter uit in de Dijle op een hoogte van 10m TAW [Cant, 2013]. Ondanks het feit dat een groot aantal bijrivieren van de Demer bronrivieren zijn, kan de Demer worden aanzien als een regenrivier. Er stroomt immers een groot debiet tijdens periodes van regenval en een laag debiet tijdens droge periodes. Het gemiddelde debiet in augustus bedraagt 6,4m³/s terwijl dat in december 33,9m³/s is. Daarnaast blijft de hoofdfunctie van nagenoeg alle waterlopen de afvoer van hemelwater. [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008- 2013]

Waar de rivier vroeger een sterk meanderend verloop kende is deze op dit moment bijna over de volledige lengte rechtgetrokken en ingedijkt. Vanaf de zeventiende eeuw zijn reeds dijken op de Demer aangelegd om de scheepvaart te bevorderen. Sinds de grote dijkbreuken van 1965 en 1966 in Werchter besliste de Belgische overheid de Demer stroomafwaarts van Diest geheel te normaliseren. Tijdens de werken werden de resterende meanders rechtgetrokken en de dijken opgehoogd en versterkt en werd de bedding verdiept zodat de Demer nu zeer grote debieten kan afvoeren zonder uit zijn oevers te treden. Deze normalisatie is tussen Werchter en Aarschot volledig doorgevoerd, maar tussen Aarschot en Diest slechts gedeeltelijk. Bovendien werden twee wachtbekkens op de Demer aangelegd, een eerste te Schulen en een tweede in Webbekom. [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008- 2013]

2.2 Overstromingsproblematiek

Ondanks alle getroffen maatregelen bleef de Demer voor ellende zorgen. De extreemste overstroming van de laatste decennia vond plaats in 1998. Ten gevolge van een enorme hoeveelheid neerslag steeg het waterpeil in de Demer razendsnel. In de buurt van de monding werd het hoogste debiet sinds het begin van de metingen bereikt, 70m³/s. De overstromde oppervlakte en uitbetaalde schade van deze en een aantal andere, recente overstromingen staan in Tabel 1 samengevat. [HIC, 2003]

Tabel 1: Overstroomde oppervlakte en uitbetaalde schade voor een aantal recente overstromingen langs de Demer [HIC, 2003]

Periode	Geschatte overstroomde oppervlakte (km ²)	Uitbetaalde schade door het rampenfonds (€)
December 1993 – Januari 1994	23,5	47.000
Januari 1995 – Februari 1995	22,9	11.000
September 1998	32,6	16.169.000
Januari 2002 – Februari 2002	15,7	Onbekend
December 2002 – Januari 2003	18	Onbekend

Het feit dat er recentelijk nog zulke zware overstromingen hebben kunnen plaatsvinden is voor een deel te wijten aan fouten in het beheer in het verleden. Zo heeft de zware indijking van de Demer een grote invloed op het hydraulisch regime in het bekken. Door de indijking zal de Demer niet meer of slechts uitzonderlijk overstroomd worden. Dit heeft echter negatieve gevolgen voor de andere rivieren in het bekken. Op die manier ontstaat immers een hoog

waterpeil waardoor veel zijrivieren tijdens periodes van grote regenval niet meer in de Demer kunnen lozen. Het opstuwingseffect dat hierdoor in deze zijrivieren opgewekt wordt, zal er dan voor zorgen dat deze wel uit hun oevers zullen treden met de gekende gevolgen.

Het probleem is echter niet alleen te wijten aan de indijking van de Demer. Om tot een goed waterbeleid te komen moet namelijk voldaan zijn aan drie criteria. Dit zijn het vasthouden van water aan de bron, het bergen van water in het netwerk en de afvoer van water zo veel mogelijk vertragen. In het verleden is hier te weinig rekening mee gehouden. De sterke toename van verharde oppervlakte, die de berging en indringing sterk beperkt, is hierin een belangrijke factor. Daarnaast leidt bouwen in het winterbed van een rivier vroeg of laat tot schade. In het Demerbekken zijn een aantal specifieke problemen tegen deze drie basisprincipes vastgesteld.

In het Demerbekken blijkt dat de toenemende verharde oppervlakte (12% van het bekken), ten gevolge van extra bebouwing, de infiltratiecapaciteit sterk vermindert. Verder zijn er ook een aantal gebieden minder geschikt voor infiltratie. Zo is in het oostelijke deel van het bekken een mijnverzakkingsgebied terug te vinden. De densiteit van de grond is er in die mate verhoogd dat indringing er bemoeilijkt wordt. Daarnaast is de grondwaterstand in de valleigebieden vaak te hoog om voldoende infiltratie te kunnen garanderen. De natuurlijke bergingscapaciteit is eveneens sterk afgenomen. De oorzaak hiervoor is de inname van de valleien door industrie, recreatiestructuren, etc. Een andere belangrijke factor is de toegenomen aansluiting van regenwater afkomstig van daken, parkings, wegen, enz. op het rioleringsnetwerk wat de afvoer sterk zal versnellen. [Integraal Waterbeleid Demerbekken 2008- 2013].

Daarnaast speelt ook het probleem van de ligging van de verschillende waterlopen. De monding van drie belangrijke zijrivieren in de Demer, zijnde de Velpe, de Herk en de Gete, zijn vlak bij elkaar gelegen. Plaatselijk zal het debiet dus sterk toenemen wat een verhoogd overstromingsgevaar met zich meebrengt.

Uit deze argumentatie blijkt dat het Demerbekken zowel van nature als door menselijk toedoen vatbaar is voor overstromingen. Een doorgedreven onderzoek en modellering van het gebied moeten er voor zorgen dat wateroverlast in de toekomst beperkt kan worden.

2.3 Gebied rond het Schulensmeer en de Webbekom

In deze paragraaf wordt het gemodelleerde gebied besproken. Voor deze studie is uitgegaan van een reeds bestaand model in het programma IWRS Het betreft het OBM-Demer, dat de Vlaamse Milieu Maatschappij gebruikt in de overstromingsvoorspeller¹. De modellering zal hier echter slechts gebeuren voor een deel van het model, namelijk het opwaarts van Diest gelegen gedeelte van het Demerbekken. In dit gebied zijn de twee wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom gelegen, welke belangrijk zullen zijn voor de sturing. De belangrijkste rivieren zijn de Demer, de Herk, de Gete, de Velpe, de Begijnenbeek, de Zwartebeek en de Mangelbeek. Hieronder volgt een gedetailleerde bespreking van het netwerk, gaande van Kermt, opwaarts in de Demer, tot het meest afwaartse punt te Diest.

¹ <http://www.overstromingsvoorspeller.be>

Daarbij worden eerst de hoofdstromen besproken en vervolgens de overige beken die in het model zijn opgenomen. In Figuur 3 wordt dit alles samengevat.

2.3.1 Hoofdstromen

Het meest opwaarts gemodelleerde punt in de Demer is gelegen in Kermt, een deelgemeente van Hasselt. Daar staat een debietmeter (AMWA 514/13) die het inkomend debiet in de Demer registreert. De eerste constructies bevinden zich ter hoogte van de inlaat van het Schulensmeer. Daar zijn twee stuwen geïnstalleerd die de debietverdeling zullen bepalen. Het gaat om stuw A tussen de Demer en het Schulensmeer en stuw K7 op de Demer. Via de Vlootgracht en stuw E kan het water uit het Schulensmeer verderop opnieuw in de Demer stromen.

Hierna volgt de monding van de Herk en de Gete in de Demer. De Herk ontspringt te Heers, nabij de grens tussen de provincies Limburg en Luik. De rivier is gemodelleerd vanaf de brug van de N2 in Herk-de-Stad. Hier is echter geen debietstation aanwezig. Het inkomende debiet is bepaald via een hydrologisch model. Aan de grens tussen Herk-de-Stad en Halen stroomt de Herk samen met de Gete in de Demer. De Gete ontstaat na de samenvloeiing van de Kleine Gete en de Grote Gete in Budingen. De rivier is slechts gedeeltelijk in het model geïmplementeerd en begint aan het debietstation GET032B. Na de samenvloeiing van de Gete en de Herk monden beide rivieren 200 meter verder ten noorden van Halen uit in de Demer.

De volgende rivier die in de Demer uitmondt is de Velp. Deze ontspringt in het broek van Opvelk, deelgemeente van Bierbeek en mondt in Zerk uit in de Demer, net voorbij de kruising met de E314. Net voor de monding zijn twee regelstuwen voorzien om de debietverdeling naar de Demer en het overstromingsbekken Webbekom te sturen. Stuw K19 regelt de verbinding tussen de Velp en de Demer, terwijl K18 de inlaat voor de Webbekom vormt. De Velp is hier geïmplementeerd vanaf Halen.

Verder stroomafwaarts in de Demer ligt stuw K31. Hier kan water bij overvloedige regenval uit de Demer naar de Zwartebeek stromen.

De laatste waterlopen die binnen het gemodelleerde gebied uitmonden in de Demer zijn de Begijnenbeek en de Zwartebeek. Het meest opwaartse punt van de Begijnenbeek dat in het netwerk beschouwd wordt, situeert zich net opwaarts van het stuwcomplex K7. Dit laat een deel van het water door naar de Leugebeek, terwijl het overgebleven water zich via de Begijnenbeek verder een weg baant naar de Demer. De Begijnenbeek mondt vervolgens ter hoogte van de citadel van Diest uit in de Demer. Deze plaats wordt in de volksmond 'de Grote Steunbeer' genoemd. De Zwartebeek ontspringt in Hechtel-Eksel. Deze beek stroomt gedurende verscheidene kilometers evenwijdig met de Demer en mondt hier in uit nabij het station van Diest.

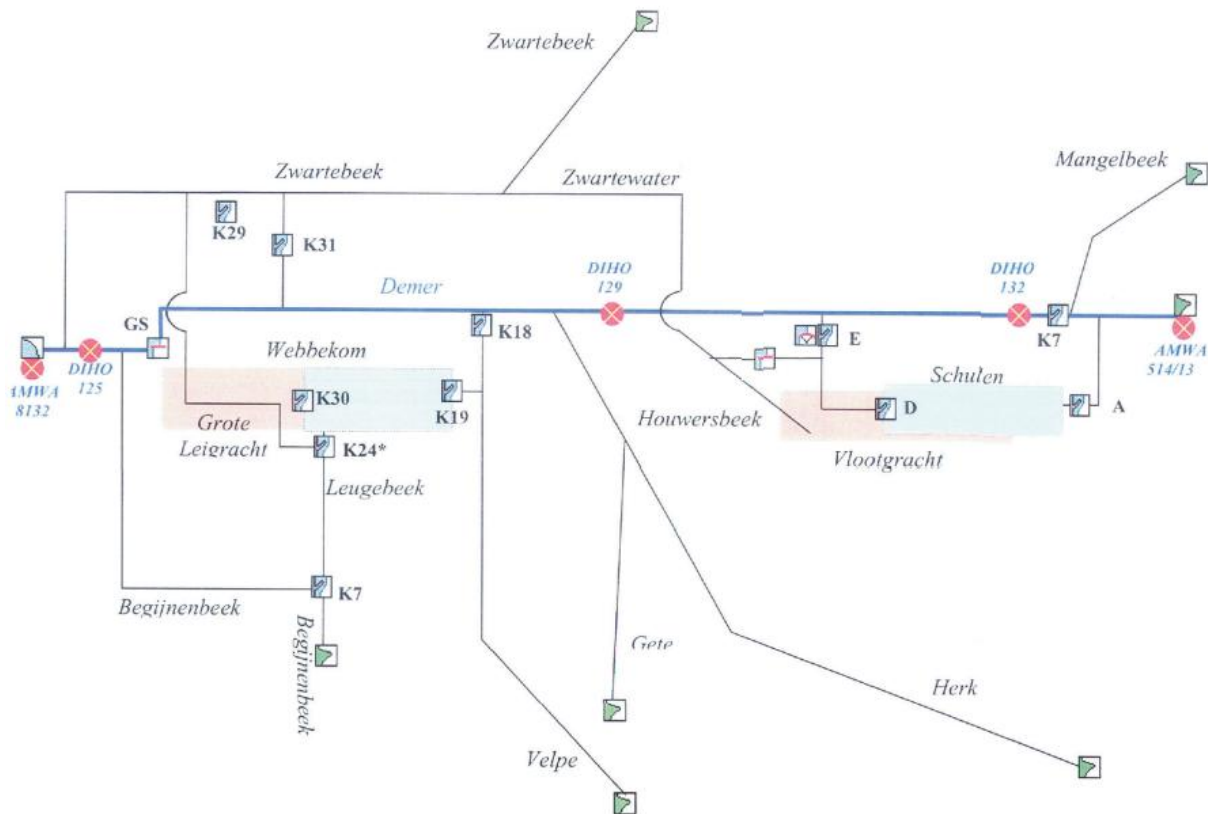
De Demer is afwaarts gemodelleerd tot aan de rioolwaterzuiveringsinstallatie van Diest, waar een debietmeter gesitueerd is. Zowel het uitgaande als een aantal inkomende debieten van de Demer zijn in het gemodelleerde gebied dus exact gekend. Zoals hierboven aangehaald zijn een aantal inkomende debieten uit zijrivieren niet bepaald met een permanent debietstation. Deze gegevens zijn afkomstig van de VMM.

2.3.2 Wachtbekkens en bijhorende kleine waterlopen

Naast de besproken hoofdstromen in het model zijn aanvullend nog enkele kleinere waterlopen gemodelleerd in het IWRS-model. Deze situeren zich rond de wachtbekkens en zijn in het model opgenomen aangezien ze de aan- en afvoer van water rond beide wachtbekkens verzorgen. Deze wachtbekkens zullen in tijden van overvloedige regenval gevuld worden ter beperking van overstromingen en zijn dus heel belangrijk in de modellering. In deze paragraaf volgt dan ook een afzonderlijke bespreking van beide bekken met hun bijhorende beken.

Het eerste wachtbekken is het Schulensmeer. Dit bekken kan worden opgedeeld in een binnen- en een buitenbekken, respectievelijk in groen en rood weergegeven in Figuur 3. Deze delen worden gescheiden door een binnendijk. Daarnaast is rond het buitenbekken eveneens een dijk gebouwd, de buitendijk. De totale oppervlakte van dit bekken bedraagt 6,47km², wat overeenkomt met een capaciteit van 10,5 miljoen m³. Er valt een verschil te bemerken tussen de manier waarop water afgevoerd wordt uit het binnenbekken en uit de verschillende delen van het buitenbekken. Lediging van het binnenbekken zal gebeuren via stuw D. Via deze stuw kan het water uit het binnenbekken in de Vlootgracht stromen. Het water kan van hieruit ofwel rechtstreeks in de Demer geloosd worden via regelstuw E ofwel via de Houwersbeek afgevoerd worden. Water uit de Houwersbeek zal via een duiker onder de Demer in de Zwartewater belanden. De Zwartewater stroomt vervolgens eerst evenwijdig met de Demer en mondt enkele kilometers verder uit in de Zwartebeek. Het oostelijke gedeelte van het buitenbekken van het Schulensmeer loost het water in een vijver aan de ingang van het Schulensmeer. Daar zal het via pompinstallaties opnieuw in het Schulensmeer of in de Demer gepompt worden. Het water uit het westelijke deel van het buitenbekken zal net als een gedeelte van het water uit het binnenbekken via de Houwersbeek wegstromen.

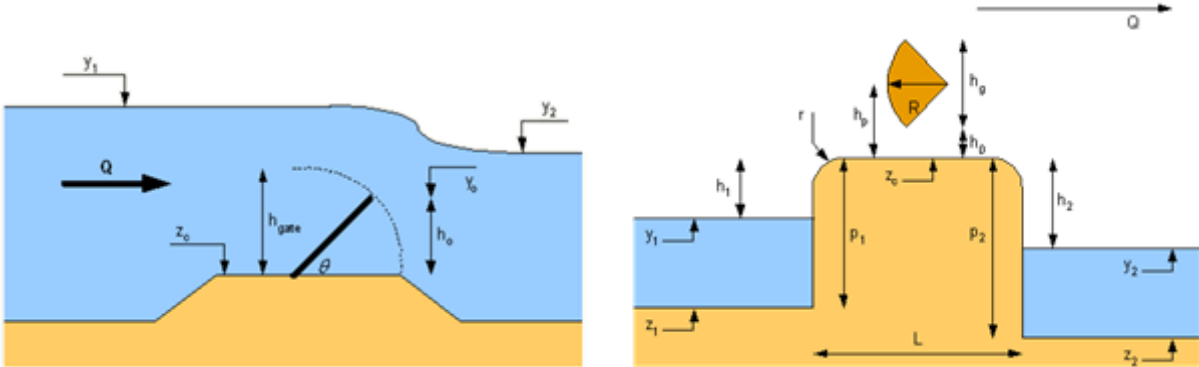
Het tweede wachtbekken is de Webbekom. Deze is ook opgedeeld in een binnen- en buitenbekken. De totale oppervlakte bedraagt 1,86km² en de capaciteit is 2,7 miljoen m³. Ook hier is een dijk aanwezig tussen beide delen van het bekken. Het binnenbekken kan op twee manieren worden gevuld. Ten eerste vanuit de Velp via regelstructuur K19 en ten tweede vanuit de Leugebeek via regelstructuur K24. De Leugebeek kan m.b.v. regelstructuur K7 water uit de Begijnenbeek onttrekken en richting het wachtbekken voeren. Ter hoogte van K24 zal dit water ofwel naar het binnenbekken van de Webbekom stromen ofwel meteen via de Grote Leigracht worden afgevoerd. Deze gracht is gelegen in het buitenbekken van de Webbekom en is tevens de enige manier om het binnenbekken te ledigen. Water kan immers alleen uit het binnenbekken wegstromen via de regelbare stuw K30 en daardoor in het buitenbekken terecht komen. Het water zal vervolgens vanuit het buitenbekken via de Grote Leigracht worden afgevoerd. Deze gracht mondt via een duiker onder de Demer uit in de Zwartebeek. Figuur 3 vat bovenstaande bespreking samen. De binnen- en buitenbekkens worden zoals gesteld respectievelijk weergegeven als groene en rode rechthoeken. Daarnaast zijn ook de verschillende regelstructuren weergegeven. Deze worden in de volgende paragraaf verder worden besproken. Tot slot zijn met behulp van rode bolletjes de debietmeters op de Demer aangegeven. [Integraal Waterbeleid Demerbekken, 2008-2013]



Figuur 3: Overzicht van het model van de Demer rond Scholensmeer en Webbekom [OBM-Demer, 2003]

2.3.3 Regelbare stuwen

Elf regelbare stuwen in het gemodelleerde gebied zijn zogenaamde ‘gated weirs’. Enkel stuw Ers is van een ander type, namelijk ‘radial sluice’. De werking van deze stuwen is schematisch weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Werkingsprincipe van een gated weir (links) en een radial sluice (rechts) [Innovyze®, 2012]

Links op deze figuur staat de gated weir afgebeeld. Indien de relatieve klepstand h_0 van de stuw gelijk is aan nul, zal deze zijn laagste stand bereiken en stroomt al het water er over. De stuw werkt dus steeds met overstroming. De radial sluice, rechts op de figuur, zal zich in gesloten toestand bevinden bij een relatieve klepstand gelijk aan nul. Bij deze stuw kan zowel onder- als overstroming optreden. Door het voorkomen van onderstroming wordt verwacht dat de radial sluice minder stabiel zal reageren ten opzicht van de gated weir, waar enkel overstroming voorkomt. Meer informatie over deze hydraulische regelstructuren kan teruggevonden worden in de Manual van Infoworks [Innovyze®, 2012].

Hoofdstuk 3: Voorgaand onderzoek

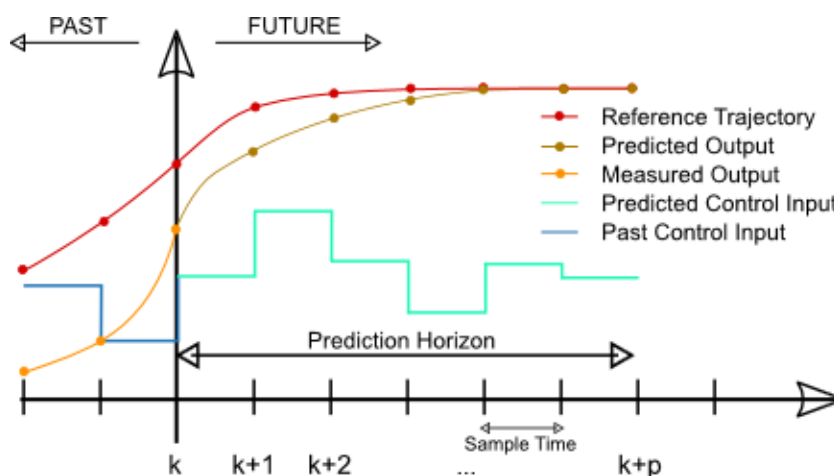
In het verleden is reeds onderzoek gedaan naar intelligente sturingstechnieken ter beheersing van overstromingen. De voor dit onderzoek belangrijke studies zullen hier kort toegelicht worden. Na een algemene uitleg over Model Predictive Control wordt een overzicht gegeven van het 'Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer' aan de KU Leuven dat de bruikbaarheid van MPC voor de real-time sturing van hydraulische regelstructuren nagaat. Daarna volgt het doctoraatsonderzoek van Chiang [2013] waar de MPC-techniek wordt toegepast in combinatie met een genetisch algoritme.

Daarnaast is reeds onderzoek gedaan naar computermodellen van de Demer. De basis van deze modellen is het OBM-Demer. De VMM (Afdeling Operationeel Waterbeheer) ontwikkelde dit model voor real-time overstromingsvoorspellingen in het Demerbekken. Dit is echter een hydrodynamisch rekenmodel met een lange rekentijd. Daarom werd in het kader van een masterproef [Meert, 2012] onderzoek uitgevoerd om op basis van het OBM-Demer een conceptueel model te ontwikkelen dat veel sneller was. Resultaat hiervan is het conceptueel model in Simulink[®] dat op het eind van dit hoofdstuk besproken wordt.

3.1 Model Predictive Control (MPC)

3.1.1 Algemeen

MPC is een optimalisatietechniek waarbij de ingangen van een systeem zo bepaald worden dat de voorspelde uitgangen naar een gewenste referentiewaarde evolueren. Onderstaande figuur geeft dit schematisch weer.



Figuur 5: Principe Model Predictive Control [Behrendt, 2009]

Deze figuur schetst de situatie op tijdstip k voor een systeem met één ingang en één uitgang. De gewenste uitgangen en de uitgangen van het verleden worden respectievelijk door de rode en groene lijn weergegeven. De uitgangen van het verleden zijn tot stand gekomen door het aanleggen van de ingangen van het verleden, in het blauw weergegeven. Om een optimale benadering van de gewenste uitgangen in de toekomst te bekomen dienen de toekomstige ingangen, weergegeven met de zwarte curve, gevonden te worden. Hiertoe zal het MPC-algoritme over de gekozen voorspellingshorizon de optimale ingangen berekenen waarvoor de voorspelde uitgangen in de toekomst zo snel mogelijk naar de gewenste referentiewaarde evolueren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de kennis over de huidige toestand van het systeem en van een model van het systeem. De eerste ingang van deze optimale ingangssequentie zal dan de volgende tijdstap aangelegd worden aan het systeem.

Omwille van modelonzekerheden en storingen zullen de voorspellingen in het model niet exact overeenkomen met de werkelijke toestand die in het systeem zal optreden. Daarom wordt op het volgende tijdstip, $k+1$, het MPC-algoritme opnieuw doorlopen, uitgaande van de werkelijke toestand van het systeem op tijdstip $k+1$. Deze waarde kan gemeten of geschat worden. Er wordt met andere woorden opnieuw een optimale ingangssequentie gezocht waarvan de eerste aan het model wordt aangelegd. Op deze manier komt er elke tijdstap feedback in het systeem en kunnen afwijkingen ten gevolge van storingen en onzekerheden opgevangen worden. Zodoende kan er ook steeds een tijdstap verder gekeken worden en geanticipeerd worden op toekomstige buien. Het komt er dus op neer dat er op iedere tijdstap een wiskundig optimalisatieprobleem opgelost wordt. [Barjas-Blanco et al., 2009]

Vertaald naar het Demerbekken komen de ingangen van het systeem overeen met de klepstanden van de stuwen. Als referentiewaarden kunnen dan waterpeilen op bepaalde punten opgelegd worden, zodat er steeds getracht wordt de waterpeilen in de waterlopen naar deze referentiewaarden te sturen om zo overstromingen te vermijden. In dit opzicht lijkt de MPC-techniek dus zeer geschikt voor de intelligente sturing van stuwen ter beheersing van overstromingen. Toepassing van de MPC-techniek gaat echter gepaard met een groot aantal iteraties en dus met een grote rekentijd. Het is dan ook niet mogelijk om de MPC-techniek toe te passen op een volledig hydrodynamisch model, zoals het OBM-Demer in InfoWorks RS. Om dit probleem op te lossen kan beroep worden gedaan op conceptuele riviermodellen, zoals in [Barjas-Blanco et al., 2009], waarbij via de MPC-techniek getracht werd overstromingen te beheersen. Andere onderzoeken waarbij deze techniek is toegepast zijn: [Rutz et al., 1998] waarbij men tracht een waterpeil in de rivierpanden te behouden, [Negenborn et al., 2009] waarbij MPC gebruikt wordt om irrigatiekanalen te controleren en [van Overloop et al., 2008] waarbij de MPC-techniek geïmplementeerd werd op een draineersysteem in Nederland waar opnieuw een waterpeil diende behouden te blijven.

Er zijn nog andere technieken om riviernetwerken te controleren. Voor een overzicht wordt verwezen naar [Malaterre et al., 1998]. In [Barjas-Blanco et al., 2010] worden echter een aantal redenen gegeven waarom de MPC-techniek uitermate geschikt is voor het regelen van de hydraulische structuren langs de Demer ter beheersing van overstromingen.

Ten eerste laat MPC toe om rekening te houden met beperkingen. Deze beperkingen houden bijvoorbeeld de minimale en maximale klepstanden van de stuwen in alsook hun maximale bewegingssnelheid. Daarnaast is het ook van groot belang om rekening te houden met de grenswaarden voor de waterhoogtes waarbij overstromingen optreden.

Doordat het mogelijk is om bij de voorspellingen van de toekomstige waterpeilen en debieten ook rekening te houden met neerslagvoorspellingen kunnen betere beslissingen genomen worden om overstromingen te voorkomen of te beheersen.

De meeste andere controletechnieken zijn gebaseerd op lineaire modellen en komen dus in de problemen bij niet-lineair gedrag. Dit is voor deze toepassing een struikelpunt aangezien het systeemmodel van de Demer een niet-lineair model is, en rivieren zich bij overstromingen sterk niet-lineair gedragen. In [Barjas-Blanco et al., 2009] werden reeds twee methoden uitgetest om rekening te kunnen houden met de niet-lineariteiten van het systeem en de MPC-techniek te kunnen toepassen.

Rivernetwerken zijn typisch zeer interactieve multi-input-multi-output systemen (MIMO). Traditionele controletechnieken, gebaseerd op transferfuncties zijn moeilijk te gebruiken voor dit soort van systemen, omdat ze slechts over relatief weinig informatie van het systeem gebruik maken. Voor MPC is dit echter geen probleem.

Zoals hierboven reeds aangehaald wordt elke stap een optimalisatieprobleem opgelost. MPC kan bijgevolg enkel toegepast worden als de vereiste rekentijd om het optimalisatieprobleem op te lossen kleiner is dan de tijdstap. Aangezien rivieren een relatief trage dynamiek hebben, ligt de nodige tijdstap typisch tussen de 15 en 60 minuten. Voor relatief eenvoudige modellen met een niet al te grote voorspellingshorizon is dit niet echt een probleem. Bij zeer gedetailleerde modellen of bij een lange voorspellingshorizon kan dit wel voor problemen zorgen.

Omwille van dit laatste punt zal in dit onderzoek gebruik worden gemaakt van het conceptuele model in Simulink[®] dat door Meert [Meert, 2012] werd opgesteld. Door de lage uitvoeringstijd van dit model is het mogelijk om real-time berekeningen te gaan uitvoeren met de MPC-techniek. Het simuleren van een maand duurt op dit moment immers slechts enkele seconden.

3.1.2 Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer

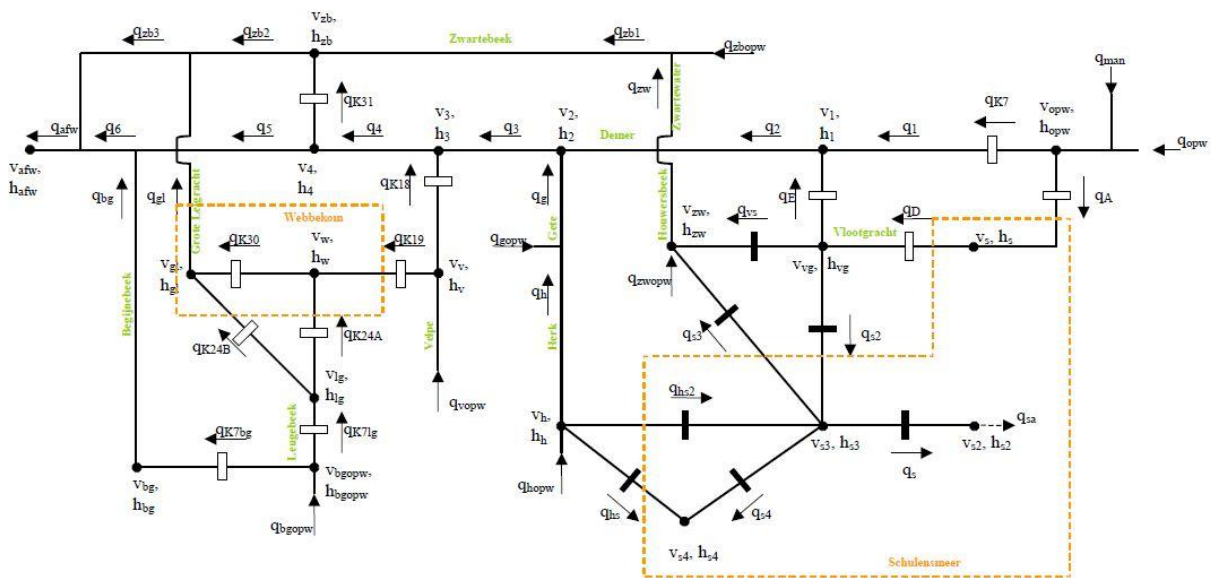
Het *'Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer'* aan de KU Leuven [Barjas-Blanco et al., 2009] had als doel om de bruikbaarheid van MPC voor de real-time sturing van hydraulische regelstructuren na te gaan. Het doel was om zo de meest efficiënte regeling ter beheersing van overstromingen te bekomen. Dit onderzoek zal in de paragrafen hieronder besproken worden. Eerst wordt een overzicht gegeven van de opbouw van het onderzoek, waarna de gebruikte MPC-techniek wordt toegelicht. De bekomen resultaten na toepassing van deze techniek zullen worden vergeleken met de huidige regeling. Daarom wordt eerst de huidige regeling besproken, gevolgd door de regelobjectieven waarnaar de MPC-regelaar zal sturen. Tot slot volgt een samenvatting van de belangrijkste resultaten en conclusies.

Opbouw onderzoek

Het onderzoek [Barjas-Blanco et al., 2009] bestaat uit twee grote delen. In een eerste deel werd de MPC-techniek getest voor een beperkt en vereenvoudigd studiegebied en een voorlopige MPC-regeling. Hiervoor werd een conceptueel model opgesteld, aangezien het hydrodynamische IWRS-model een relatief grote rekentijd heeft en er geen softwareverbinding mogelijk was tussen de IWRS-software en de MATLAB-omgeving waarin

de MPC-techniek was geïmplementeerd. Reeds bij de eerste opzet van dit beperkte model traden enkele problemen op waarvoor in het eerste deel oplossingen werden gezocht (sprongsgewijze toestandsveranderingen mogelijk maken voor toekomstig voorspelde waarden, de afgeleiden van de systeemvergelijkingen (Jacobianen) automatisch laten berekenen en voorkomen dat deze onstabiel worden, de snelheid van de MPC-regelaar verhogen en gecombineerde regelstrategieën mogelijk maken). Daarna werd de MPC-techniek verder geanalyseerd en verfijnd. Hierbij kwam een bijkomend probleem van oncontroleerbare modes bij de stuwen aan het licht dat opgelost werd door gebruik te maken van een 'fuzzy control' methode.

In het tweede deel van het onderzoek werd het beperkte studiegebied vervangen door het volledige gebied Schulensmeer-Webbekom. Ook voor dit gebied werd een conceptueel model opgesteld, om dezelfde redenen als voorheen. Een overzicht van dit model is hieronder terug te vinden.



Figuur 6: Schematische weergave van het conceptueel model van het gebied Schulensmeer-Webbekom met bijhorende modelvariabelen [Barjas-Blanco et al., 2009]

Op deze figuur zijn de riviertakken weergegeven door lijnstukken. De pijlen geven de positieve stromingsrichting weer. De regelstuwen zijn verder aangeduid met holle rechthoeken en de vaste overlaten met volle rechthoeken. De volle knopen duiden op de modeldelen waarin de berging en de gemiddelde waterhoogte worden berekend. De debietvariabelen worden aangeduid met 'q', de waterhoogten met 'h' en de volumes met 'v'.

Voor de ijking van deze conceptuele modellen werd beroep gedaan op simulatieresultaten van het OBM-Demer in IWRS (zie 3.2.1). Tijdens de toepassing van de MPC-regeling werd gebruik gemaakt van historische gebeurtenissen. Men ging dus uit van volmaakte modelvoorspellingen.

MPC-techniek

De basisprincipes van MPC werden reeds in het begin van dit hoofdstuk uitgelegd. Deze vertrekken van het concept van een lineair toestandsruimte-model, hier in volgende vorm:

$$x(k+1) = A x(k) + B u(k) + F d(k) \quad (3.1)$$

$$y(k) = C x(k) + D u(k) \quad (3.2)$$

Hierbij geeft de eerste vergelijking weer hoe de toestand op tijdstip $k+1$ bekomen kan worden, uitgaande van de toestand x , de ingangen u en de storingen d op tijdstip k . Met de tweede vergelijking kan de uitgang op tijdstip k bepaald worden op basis van de toestand x en de ingangen u op tijdstip k . De matrices A , B , F , C en D stellen hierbij de systeemmatrices van het model voor. Op basis van gemeten of geschatte waarden voor de werkelijke toestand op $k+1$ wordt dan een nieuwe voorspelling gemaakt voor tijdstap $k+2$. Op deze manier worden afwijkingen t.g.v. storingen en modelonzekerheden opgevangen. Het op ieder tijdstip op te lossen wiskundig optimalisatieprobleem ziet er als volgt uit:

$$\min \sum_{i=0}^{N_c-1} (y(k+i) - y_{ref})^2 \quad (3.3)$$

$$A x(k+i) < a \quad (3.4)$$

$$B y(k+i) < b \quad (3.5)$$

$$C u(k+i) < c \quad (3.6)$$

De eerste vergelijking (3.3) is de kostfunctie die aangeeft dat het verschil tussen de uitgangen en de referentiewaarde zo klein mogelijk gehouden moet worden en met andere woorden de uitgangen naar de referentiewaarde moeten worden gestuurd. Hierin is N de voorspellingshorizon.

De ongelijkheden (3.4) tot (3.6) zijn beperkingen die aan het systeem verbonden zijn of opgelegd kunnen worden. Voorbeelden zijn de uiterste standen van de kleppen, maximaal toelaatbare beweging van de kleppen, overstromingsgrenzen, ...

Aangezien de kostfunctie kwadratisch is en de beperkingen lineair is dit een kwadratisch programmeerprobleem dat efficiënt kan opgelost worden m.b.v. de 'interior point' methode of met de 'active set' methode. Het Demer-model is echter niet-lineair, waardoor de standaard MPC-techniek niet kan toegepast worden. Daarom zijn er in dit onderzoek twee methoden onderzocht om rekening te houden met deze niet-lineariteiten. Hier wordt verder niet op ingegaan, aangezien deze niet belangrijk zijn voor het begrijpen van het vervolg van deze tekst. Voor verdere informatie wordt verwezen naar [Barjas-Blanco et al., 2009].

Huidige regeling van de Demer

Tot op de dag van vandaag worden de klepstanden van de stuwen langs de Demer bepaald aan de hand van een beperkt aantal eenvoudige regels. Deze regels zijn afhankelijk van de situatie in het netwerk en worden hieronder opgelijst. Deze zijn overgenomen uit [Barjas-Blanco et al., 2009].

In eerste instantie wordt er gebruik gemaakt van een aantal waakpeilen, waarvan de locatie op Figuur 6 duidelijk wordt. De waakpeilen staan hieronder opgelijst in volgorde van toenemende prioriteit:

1. $h_{opw} < 23,00\text{m TAW}$
2. waterhoogten op de Demer te Zichem $< 18,50\text{m TAW}$; te Testelt $< 17,40\text{m TAW}$; te Aarschot $< 13,70\text{m TAW}$ en op de Winge te Hellicht $< 10,40\text{m TAW}$
3. $h_{bg} < 21,70\text{m TAW}$
4. $h_{lg} < 21,80\text{m TAW}$

Indien deze waakpeilen overschreden worden, wordt overgegaan tot het vullen van de wachtbekkens, stapsgewijs tot de volgende peilen:

1. $h_s < 22,75\text{m TAW}$
2. $h_w < 22,00\text{m TAW}$
3. $h_{s2} < 22,75\text{m TAW}$; $h_{s3} < 22,75\text{m TAW}$; $h_{s4} < 22,75\text{m TAW}$
4. $h_{gl} < 21,50\text{m TAW}$

Dit betekent dat eerst het binnenbekken van Schulensmeer wordt gevuld, dan het binnenbekken van Webbekom, dan het buitenbekken van Schulensmeer en tenslotte het buitenbekken van Webbekom.

Nadat alle wachtbekkens deze vulpeilen bereikt hebben, laat men de waterpeilen in de waterlopen toenemen tot de volgende alarmpeilen:

1. $h_{opw} < 23,20\text{m TAW}$
2. waterhoogten op de Demer te Zichem $< 18,75\text{m TAW}$; te Testelt $< 17,80\text{m TAW}$; te Aarschot $< 14,10\text{m TAW}$ en op de Winge te Hellicht $< 11,20\text{m TAW}$
3. $h_{bg} < 22,10\text{m TAW}$
4. $h_{lg} < 22,10\text{m TAW}$

Wanneer deze alarmpeilen bereikt zijn, worden de wachtbekkens verder gevuld:

1. $h_s < 23,20\text{m TAW}$
2. $h_{s2} < 22,80\text{m TAW}$; $h_{s3} < 22,80\text{m TAW}$; $h_{s4} < 22,80\text{m TAW}$
3. $h_w < 22,40\text{m TAW}$
4. $h_{gl} < 22,00\text{m TAW}$

Voor de regelstuwen opwaarts van de Begijnenbeek, K7lg en K7bg, hangt de regeling af van het toekomstige debiet. Indien het debiet kleiner blijft dan $3\text{m}^3/\text{s}$ wordt alles doorgelaten via de Begijnenbeek. Als het debiet boven de $3\text{m}^3/\text{s}$ stijgt wordt $3\text{m}^3/\text{s}$ afgevoerd via de Begijnenbeek en de rest via de Leugebeek. Wanneer het debiet vervolgens boven de $6\text{m}^3/\text{s}$ gaat, wordt het extra debiet ($>6\text{m}^3/\text{s}$) eveneens afgevoerd via de Begijnenbeek.

Regelobjectieven, -prioriteiten en –beperkingen

Om een MPC-regeling te kunnen opstellen dienen regelobjectieven gedefinieerd te worden. Deze werden in overleg met de VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer vastgelegd en

worden hieronder opgelijst in volgorde van toenemend prioriteit, overgenomen uit [Barjas-Blanco et al., 2009]:

1. $h_{opw} = 21,50\text{m TAW}$
2. $h_{bgopw} = 23,80\text{m TAW}$
3. q_{K7lg} minimaal
4. $h_s = 19,90\text{m TAW}$
5. $h_{s2} = 19,40\text{m TAW}$ (minimaal)
6. $h_{s3} = 20,10\text{m TAW}$ (minimaal)
7. $h_{s4} = 20,40\text{m TAW}$ (minimaal)
8. $h_w = 19,40\text{m TAW}$ (minimaal)
9. $h_{gl} = 19,40\text{m TAW}$ (minimaal)

Dit komt op het volgende neer: Indien er nergens gevaar is voor overstroming worden beide wachtbekkens eerst geleidigd met voorrang voor Webbekom. Daarbij begint men met de buitenbekkens alvorens de binnenbekkens te ledigen. Als de wachtbekkens leeg zijn, probeert men de opwaartse waterhoogte in de Demer en in de Begijnenbeek naar een constant niveau te regelen. Daarbij wordt een minimaal debiet via de Leugebeek nagestreefd.

Uiteraard dient hierbij steeds rekening te worden gehouden met de minimale en maximale klepstanden van de regelstuwen.

De regeling die in de MPC-techniek werd toegepast maakt gebruik van de hierboven beschreven regelobjectieven. Op bepaalde plaatsen zal de waterhoogte dus naar referentiepeilen gestuurd worden (h_{opw} , h_{bgopw} en h_s) en op andere plaatsen naar een minimale waarde (h_{s2} , h_{s3} , h_{s4} , h_w en h_{gl}). Hierbij wordt ook rekening gehouden met de volgorde van de wachtbekkens en de waakpeilen, alarmpeilen, maximale vulpeilen en overstromingshoogten. Dit zijn de regelprioriteiten.

Met de gekozen strategie worden volgende doelen beoogd uit [Barjas-Blanco et al., 2009]):

1. Indien er geen gevaar is voor overstroming moet $h_s > 19,9\text{m TAW}$ en zo dicht mogelijk bij $21,5\text{m TAW}$. Alle waterhoogten moeten lager zijn dan $23,2\text{m TAW}$.
2. Als $h_{opw} > 23\text{m TAW}$ of $h_{afw} > 22,75\text{m TAW}$ is het waakpeil bereikt. Dan mag h_s gevuld worden tot $22,75\text{m TAW}$ en moeten h_{opw} en h_{afw} onder hun waakpeil gestuurd worden. Hierbij heeft h_{afw} de grootste prioriteit.
3. Op het moment dat $h_{opw} > 23,2\text{m}$ of $h_{afw} > 23,2\text{m}$ is het alarmpeil bereikt. Vanaf dan mag het Schulensmeer gevuld worden tot $23,2\text{m TAW}$. Daarnaast moet geprobeerd worden h_{opw} en h_{afw} beneden dit alarmpeil te houden, opnieuw met een hogere prioriteit voor h_{afw} .

De regelprioriteiten worden ingebouwd aan de hand van beperkingen. Indien er geen gevaar is voor overstromingen gelden volgende beperkingen:

1. $h_s > 19,9\text{m TAW}$
2. $h_{opw} < 23\text{m TAW}$
3. $h_{afw} < 22,75\text{m TAW}$
4. referentiewaarde $h_s = 19,5\text{m TAW}$

5. referentiewaarde $h_{opw} = 21,5\text{m TAW}$
6. $h_{afw} \Rightarrow$ geen referentiewaarde

Wanneer er nu één of meerdere van deze beperkingen geschonden worden, dan zal de minst relevante verwijderd worden. Als eerste zal dit beperking 2 zijn, gevolgd door beperking 3. Indien beperking 3 verwijderd wordt, wordt deze vervangen door $h_{afw} = h_{afw} - 0,5\text{m TAW}$. Hierdoor wordt vermeden dat h_{afw} onnodig zou oplopen.

Deze beperkingen worden vervangen door de volgende wanneer de waakpeilen bereikt worden:

1. $h_{opw} < 23\text{m TAW}$
2. $h_{afw} < 22,75\text{m TAW}$
3. $h_s < 22,75\text{m TAW}$
4. referentiewaarde $h_{opw} = 21,5\text{m TAW}$
5. h_{afw} en $h_s \Rightarrow$ geen referentiewaarde

Opnieuw worden beperkingen verwijderd als één of meerdere van deze beperkingen geschonden worden. In eerste instantie zal dit beperking 1 zijn en daarna beperking 2. In dit laatste geval wordt deze beperking opnieuw vervangen door $h_{afw} = h_{afw} - 0,5\text{m TAW}$. Wanneer de alarmpeilen bereikt worden, zal een gelijkaardige strategie gehanteerd worden.

Om na te gaan welk van deze drie gevallen van toepassing is, wordt er een simulatie uitgevoerd met als input de ingangen die in de vorige tijdstap bepaald zijn. Zo kunnen de toekomstige waterhoogtes bepaald worden en kan de juiste regelactie ondernomen worden.

Algemene resultaten en conclusies

Uit de resultaten van simulaties in het beperkte conceptueel model met de historische was van 1998 kon besloten worden dat de MPC-regelaar de gewenste objectieven kan bekomen. Meer nog, uit statistische analyse van de overschrijdingen van de overstromingspeilen in deze simulaties bleek dat de efficiëntie van de regeling sterk verhoogd wordt door de MPC-regeling. Ook bij het simuleren met twee kort na elkaar optredende wassen kwamen deze conclusies naar boven. Daarnaast blijkt het ook mogelijk om met de MPC-regelaar gecombineerde regelstrategieën (verschillende locaties en variabelen, volgorde van prioriteiten, vulvolgorden,...) toe te passen.

Bij de implementatie van de MPC-regeling in het uitgebreide conceptueel model werden nog enkele problemen tegengekomen die stapsgewijs werden opgelost. Uit de simulaties met dat MPC-geregelde model volgden opnieuw dezelfde conclusies als uit het beperkte model.

Uit analyse van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstromd volume en de overstromingsduur bleek dat de MPC-regeling op de meeste plaatsen voor een significante reductie van deze waarden zorgde.

3.1.3 MPC-GA-techniek in het doctoraatsonderzoek van Chiang

Voor zijn doctoraatsonderzoek aan de KU Leuven heeft Chiang [2013], net zoals in het hierboven besproken onderzoek waar hij aan mee werkte, een conceptueel model van de Demer gemaakt. Hierbij is hij echter uitgegaan van het nieuwe en uitgebreide hydrodynamische model in IWRS (zie 3.2.1). Hij past in zijn doctoraat een andere methode toe om de regeling van de stuwen te bepalen, namelijk met behulp van een genetisch algoritme. Hierbij maakte hij gebruik van de rekenprogramma's MATLAB[®] en C. De gebruikte methodologie zal hieronder worden toegelicht. Aangezien dit doctoraatsonderzoek nog lopende is, zijn een aantal van de hieronder besproken technieken mogelijk in een latere fase nog aangepast.

Methodologie

In de techniek die hier gebruikt wordt zijn twee modellen in elkaar verweven. Enerzijds is er het hoofdmodel en anderzijds het voorspellingsmodel. Het hoofdmodel komt overeen met de realiteit en heeft een tijdstap van 5 minuten. Telkens wanneer de stuwen kunnen bijgesteld worden zal het hoofdmodel even gepauzeerd worden. Op deze momenten worden telkens 200 gevallen gegenereerd. Eén geval bevat voor elke regelbare stuw een door een genetisch algoritme gegenereerde reeks semi-random klepstanden over een gekozen tijdsinterval van 48 uur. Voor elk van deze gevallen wordt dan in het voorspellingsmodel een simulatie uitgevoerd op basis van neerslagvoorspellingen voor de komende 48 uur. Tijdens deze simulatie wordt de kost die dat geval veroorzaakt berekend. Als alle gevallen zijn gemodelleerd wordt gekeken welk geval de laagste kost veroorzaakt. De eerste klepstand voor elk van de 12 stuwen die hier geregeld worden, wordt dan in de volgende tijdstap aangelegd aan het hoofdmodel. In het hoofdmodel wordt dan opnieuw een stap gesimuleerd waarna het proces zich herhaalt. Daarbij zullen de beste 40 gevallen uit de vorige stap ook worden doorgegeven naar de volgende stap in het hoofdmodel. Deze gevallen gaven immers goede resultaten voor de huidige voorspelling en als de randvoorwaarden niet al te veel veranderen zullen deze wellicht ook goede resultaten geven in de volgende voorspelling.

Hoe goed het resultaat zal zijn hangt sterk af van het aantal uitgevoerde simulaties. Immers, hoe meer gevallen beschouwd worden, hoe groter de kans op een zeer goed resultaat. In real-time simulaties zullen in elke tijdstap dan ook zo veel mogelijk gevallen beschouwd worden. Hiertoe wordt het algoritme voor de 200 gevallen steeds opnieuw doorlopen tot de 5 minuten voorbij zijn. Uit al die gevallen wordt dan het beste geval aangelegd, waarna in de volgende tijdstap opnieuw de gehele 5 minuten wordt doorgerekend. Samenvattend kan men dus stellen dat iedere 5 minuten zo veel mogelijk keer 200 voorspellingssimulaties van elk 48 uur worden uitgevoerd.

Genetisch algoritme

Het doel van het genetisch algoritme is om een reeks klepstanden van 48 uur te genereren. Het algoritme bestaat erin om op basis van de huidige klepstand die voor de volgende 5 minuten te bepalen. Hiertoe worden eerst de grenzen voor deze toekomstige klepstand bepaald. Daarna wordt een semi-random klepstand aangemaakt zodanig dat deze binnen de vooropgestelde grenzen blijft. Vervolgens wordt de volgende klepstand bepaald op basis van

de zonet bepaalde klepstand en de bijhorende nieuwe grenzen. Dit gaat door tot een reeks van 48 uur is gekomen.

In een eerste fase van het algoritme worden dus de grenzen bepaald waarbinnen iedere klep zich kan verplaatsen in de volgende tijdstap. Deze grenzen zijn bepaald op basis van twee criteria. Enerzijds zijn er de minimale en maximale klepstanden van de regelstuw en anderzijds is er de maximale verplaatsingssnelheid waarmee de klep kan bewegen. Uiteraard wordt steeds het minimum van de verplaatsingsmogelijkheden genomen als grens. Dit wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.



Figuur 7: Bepalen van de grenzen voor semirandom klepstanden

Op deze figuur is $u(k)$ de klepstand op tijdstip k . De grenzen van de maximale en minimale klepstand van de regelstuw worden op de figuur weergegeven als een dikke zwarte lijn. De klepstanden die mogelijk zijn op tijdstip $k+1$ ten gevolge van de maximale verplaatsingssnelheid zijn in het lichtblauw gearceerd. De uiteindelijke grenzen worden weergegeven in het rood. In het linkse geval is de grens t.g.v. de verplaatsingssnelheid kritiek, terwijl rechts de maximale klepstand van de stuw bepalend is.

Eens de grenswaarden gekend zijn, kan de klepstand op het volgende tijdstip bepaald worden. Voor de berekening van een klepstand op een bepaald tijdstip wordt uitgegaan van een gen. Een gen bestaat uit acht bits die elk nul of één zijn en random gegenereerd worden. Elke bit heeft zijn eigen functie en dient gedecodeerd te worden. De eerste bit legt de richting van de verplaatsing vast. Een waarde één betekent een verplaatsing naar boven terwijl een waarde nul een verplaatsing naar onder inhoudt. De tweede bit bepaalt of er al dan niet beweging zal optreden. Wanneer deze waarde nul is, zal de klepstand van het vorige tijdstip behouden blijven. Bij een waarde gelijk aan één zal er een nieuwe klepstand bepaald worden. De kans dat een klep beweegt, is elke stap dus gelijk aan 50%. De zes resterende bits bepalen, op voorwaarde dat er een verplaatsing zal optreden, hoe groot de verplaatsing zal zijn. Door dit binaire getal om te zetten naar een decimaal getal wordt een waarde tussen nul en 63 bekomen. Deze waarde wordt herschaald door te delen door de maximale waarde waardoor een getal tussen nul en één wordt bekomen. De nieuwe klepstand volgt dan uit volgende formules:

$$u(k + 1) = u(k) + a \Delta_{max+} \quad (3.7)$$

$$u(k + 1) = u(k) - a \Delta_{max-} \quad (3.8)$$

Daarin is u de klepstand, a het gegenereerde getal tussen nul en één en Δ_{max+} en Δ_{max-} de boven-, respectievelijk ondergrens van de klep op tijdstip $k+1$ is. Dit alles wordt samengevat in volgende tabel.

Tabel 2: Samenvatting decoderen van een gen bij de bepaling van semirandom klepstanden

Gen	bit = 0	bit = 1
1	Verplaatsing naar boven	Verplaatsing naar onder
2	Geen verplaatsing	Nieuwe klepstand
3	= 0	= 32
4	= 0	= 16
5	= 0	= 8
6	= 0	= 4
7	= 0	= 2
8	= 0	= 1

Kostberekening

Om te kunnen bepalen welke van de 200 reeksen klepstanden de beste is, wordt gebruik gemaakt van een kostberekening. Dit is een belangrijk onderdeel in de toepassing van de MPC-GA-techniek, aangezien de regeling volledig door de kost volledig bepaald wordt. Het objectief van deze regeling is namelijk om de totale kost zo laag mogelijk te houden. Deze kost bestaat uit drie delen die hierna worden toegelicht.

De eerste kost J_1 kan omschreven worden als de schadekost en betreft de waterschade die kan optreden.

$$J_1 = \sum_{i=1}^m w_{1i} \sum_{j=1}^{N_c} [\hat{y}_i(k+j) - r_i(k+j)]^2 \quad (3.9)$$

De tweede kost J_2 is de exploitatiekost van de stuwen en wordt ingevoerd zodat deze geen fluctuaties zouden ondergaan.

$$J_2 = \sum_{i=1}^n w_{2i} \sum_{j=1}^{N_c} [u_i(k+j) - u_i(k+j-1)]^2 \quad (3.10)$$

Hierin is m het aantal geselecteerde waterpeilen die geobserveerd worden, w_{1i} de gewichtscoefficiënt van elk geselecteerd waterpeil, N_c de voorspellingshorizon, \hat{y}_i het toekomstige waterpeil, r_i het gewenste waterpeil, k de tijdstap, n het aantal stuwen in het systeem, w_{2i} de gewichtscoefficiënt voor elke stuw en u_i de klepstand van elke stuw.

De derde kost is een strafkost die ingevoerd is om de resultaten te verbeteren wanneer de klepstanden of waterhoogtes meer veranderen dan toegelaten. Hiertoe werd de maximale verandering van de klepstanden $\Delta u_{\text{system_max}}$ en de maximale verandering van het waterpeil $\Delta y_{\text{system_max}}$ bepaald. Indien een klep of een geselecteerd waterpeil de maximale verandering overschrijdt, dan wordt een hoge waarde toegekend aan de bijhorende kostenterm, in het andere geval bedraagt deze waarde nul. Hiermee zorgt het algoritme er voor dat voldaan wordt aan de randvoorwaarden. Wiskundig kan deze strafkost worden uitgedrukt met volgende formule. Hierin is p_3 de strafwaarde en y_i het waterpeil.

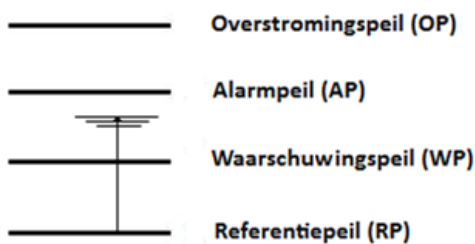
$$\begin{aligned}
J_3 = & \sum_{i=1}^m p_3 \sum_{j=1}^{N_c} [|u_i(k+j) - u_i(k+j-1)| - \Delta u_{\text{system_max}}]^2 \\
& + \sum_{i=1}^n p_3 \sum_{j=1}^{N_c} [|y_i(k+j) - y_i(k+j-1)| - \Delta y_{\text{system_max}}]^2
\end{aligned} \tag{3.11}$$

De totale kost bedraagt dan de som van deze drie kosten.

$$J = J_1 + J_2 + J_3 \tag{3.12}$$

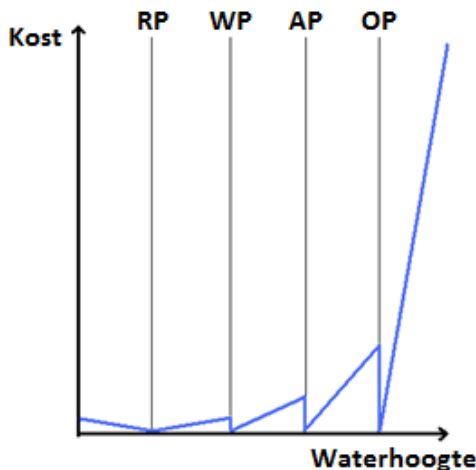
De wegingsfactoren w_{1i} en w_{2i} hangen af van de toestand waarin het systeem zich bevindt en van de verschillende geselecteerde waterpeilen. Bijgevolg zijn er heel veel verschillende wegingsfactoren, waardoor het overzicht minder duidelijk aanwezig is.

Daarnaast was er bij het ingaan van dit thesisonderzoek een probleem met de schadekost J_1 uit vergelijking 3.9. Voor deze kost werd immers steeds het verschil genomen tussen het toekomstige waterpeil en het gewenste waterpeil. Afhankelijk van de toestand van het systeem kon dit laatste gelijk zijn aan het referentiepeil, het waarschuwingspeil, het alarmpeil of het overstromingspeil. Als het waterpeil zich bijvoorbeeld tussen het waarschuwingspeil en het alarmpeil bevindt, zoals in onderstaande figuur, zal het gewenste waterpeil gelijk zijn aan het waarschuwingspeil.



Figuur 8: Verschillende waakpeilen: Referentiepeil, waarschuwingspeil, alarmpeil en overstromingspeil

Hierdoor kan het verloop van de kost bij een stijgend waterpeil volgens de gebruikte modellering een onlogisch verloop krijgen wat er mogelijk uitziet zoals weergegeven op Figuur 9.



Figuur 9: Schadekost bij stijgend waterpeil met foutieve kostfunctie

Op deze figuur is te zien dat bijvoorbeeld 1cm overstroming een lagere kost zou betekenen dan wanneer het waterpeil 1cm onder het overstromingspeil blijft. Dit is natuurlijk absurd. Omwille van deze fout in de schadekost en om redenen van transparantie zal de beschreven kostberekening niet overgenomen worden in dit thesisonderzoek. In paragraaf 4.5 van deze tekst zal een alternatieve kostfunctie worden ontwikkeld die beter aanleunt bij wat men in de praktijk zou verwachten en die toelaat beter inzicht te verwerven in de oorsprong van de kost.

3.2 Bestaande modellen van de Demer

3.2.1 Het OBM-Demer

In de strijd tegen overstromingen hanteert de VMM een viertrapsstrategie [VMM, 2012]. De eerste stap is gericht op source control en betreft allemaal kleine maatregelen om het water te laten infiltreren in de bodem en regenwater af te koppelen van de riolering. Daarnaast is er ook de watertoets die er voor probeert te zorgen dat de fouten uit het verleden met betrekking tot ruimtelijke ordening niet opnieuw worden gemaakt en men dus niet in waterzieke gebieden gaat bouwen. Hiermee tracht men de kost bij overstromingen in te perken. De tweede trap bestaat er in om het water maximaal op te houden in de vallei. Dit kan bijvoorbeeld door het aanleggen van gecontroleerde overstromingsgebieden. Er wordt met andere woorden ruimte aan de rivier teruggegeven. Bij de derde trap staat het aanleggen van nieuwe infrastructuur centraal. Het kan bijvoorbeeld nodig zijn om extra beveiliging te creëren door ringdijkjes, wachtbekkens of pompstations aan te leggen. De laatste trap houdt het voorspellen van en waarschuwen voor aankomende wateroverlast in.

Het is niet mogelijk om alle overstromingen tegen te houden of te voorzien. Vroeg of laat zal er zich immers een extreme neerslag voordoen waarbij alle wachtbekkens en valleien hun maximale vulcapaciteit zullen bereiken terwijl er nog water overblijft dat niet geborgen kan worden. Het is daarom belangrijk dat zowel de burgers, de waterbeheerders als de hulp- en crisisdiensten tijdig en nauwkeurig geïnformeerd kunnen worden over aankomende overstromingen om zo de kost te minimaliseren. Hiertoe werd de overstromingsvoorspeller [VMM, 2013] opgericht om zo inlichtingen te verstrekken over de actuele en voorspelde toestand op de onbevaarbare waterlopen in Vlaanderen.

De informatie voor deze overstromingsvoorspeller wordt gegenereerd door real-time voorspellingsystemen. Met betrekking tot de onbevaarbare waterlopen kan er onderscheid gemaakt worden tussen het vereenvoudigde voorspellingsstelsel OBM-Centrale en de gedetailleerde voorspellingsstelsels zoals OBM-Demer dat in 2003 het eerste was in zijn soort en in 2009 geactualiseerd en aangepast werd. In deze beide voorspellingsstelsels staat OBM voor 'Operationeel BekkenModel' en zijn de voorspellingsresultaten gebaseerd op hydrologische en/of hydraulische modellen.

De OBM-Centrale gebruikt uitsluitend hydrologische modellen. Hierbij worden elk kwartier de gebiedsneerslagen herberekend en de debieten voorspeld. Deze debieten worden dan via een functioneel verband tussen het debiet en de waterhoogte (QH-verband) omgezet naar voorspellingen van de waterstand. Als bron voor deze neerslaggegevens wordt gebruik gemaakt van neerslagdata afkomstig van radars van het KMI. Indien deze data niet beschikbaar zijn wordt overgeschakeld naar een berekende gebiedsneerslag uitgaande van

de metingen van referentiepluviografen. Naast meetgegevens worden ook neerslagvoorspellingen gebruikt. Naargelang de voorspellingshorizon past men andere voorspellingen toe. Zo wordt er tot 2 uur in de toekomst gebruik gemaakt van de neerslagvoorspellingen van de VMM zelf. Deze worden opgesteld op basis van de neerslagradardata. Voor voorspellingen van 2 uur tot 2 dagen in de toekomst worden de resultaten van het numerieke Alaro-model van het KMI gebruikt. Bij afwezigheid van voorgaande beelden worden de Britse neerslagvoorspellingen van het NAE-model gebruikt. Voor een periode van 2 tot 10 dagen vooruit gebruikt men 50 variante neerslagvoorspellingen die worden toegeleverd door het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) te Reading.

Daarnaast zijn er ook de meer gedetailleerde voorspellers, zoals OBM-Demer. Deze modellen werden door de VMM (Afdeling Operationeel Waterbeheer) ontwikkeld voor real-time overstromingsvoorspellingen, bijvoorbeeld voor het Vlaamse Demerbekken. [Barjas-Blanco et al., 2009] Deze gedetailleerde voorspellers gebruiken ook alle informatie die de OBM-Centrale gebruikt. De omrekening van de debieten naar waterstanden gebeurt hier echter op een groot aantal locaties met behulp van een hydraulisch model. In dit model zitten onder andere om de 50 meter dwarsprofielen van de bedding van de waterloop, de oeverhoogte, de topografie van de vallei, wachtbekkens en andere infrastructuur met hun regeling. Doordat de waterstand berekend wordt op al deze locaties kan het OBM-Demer verwachte overstromingskaarten berekenen langs 250 km waterlopen. De berekeningen duren echter heel lang ten gevolge van de grotere complexiteit van deze hydrodynamische modellen. Zo duurt het 40 minuten om de historische gebeurtenis van januari 2002 van 35 dagen door te rekenen in het vereenvoudigde IWRS-model [Meert, 2012].

Met het oog op de toepassing van MPC is het IWRS-model dus niet ideaal gezien de hoge rekentijd. Daarom werd reeds onderzoek gevoerd naar conceptuele modellen die het OBM-Demer voldoende kunnen benaderen maar een veel lagere rekenkost hebben. Het OBM-Demer speelt echter een belangrijke rol bij de validatie van deze conceptuele modellen. Ook in deze studie zullen de bekomen resultaten voor de regeling van de stuwen gevalideerd worden in het OBM-Demer, zoals het geïmplementeerd is in het softwarepakket IWRS. Zoals reeds eerder gezegd wordt hier toegespitst op de omgeving van Schulensmeer en Webbekom, opwaarts van Diest. [Barjas-Blanco et al., 2009] Een overzicht van dit model werd reeds op het einde van Hoofdstuk 2 gegeven.

3.2.2 Conceptueel model in Simulink®

Om antwoord te kunnen bieden aan de eis van rekentijd voor de toepassing van de MPC-techniek werd aan de KU Leuven een onderzoek gestart door de Afdeling Hydraulica naar de bruikbaarheid van conceptuele riviermodellering voor de toepassing van MPC. In dit kader werd een masterproef uitgevoerd met als doel het ontwikkelen van een semi-automatische methode om een conceptueel riviermodel op te stellen. Het verkregen model [Meert, 2012] werkt in de Simulink®-omgeving, een onderdeel van MATLAB®. Het is dit model dat in dit onderzoek gebruikt zal worden als basis voor de toepassing van MPC. Daarom wordt eerst een korte bespreking van Simulink® gegeven met de daaraan verbonden voor- en nadelen. Daarna volgt een bespreking van het model zelf.

Simulink®

Simulink® is een technische softwareomgeving van The Mathworks. Het is meerbepaald een blokdiagramomgeving dat voor simulaties en model-based design in verschillende domeinen gebruikt wordt. Simulink® voorziet in een grafische interface, aanpasbare blokbibliotheken en is geschikt voor het oplossen, modelleren en simuleren van dynamische systemen. Het is geïntegreerd met MATLAB®, wat toelaat om MATLAB®-algoritmes te gebruiken in Simulink®-modellen en simulatieresultaten te exporteren naar MATLAB® voor verdere analyse. [MathWorks, 2013]

Uit bovenstaande beschrijving volgen al meteen een aantal voordelen. Zo zorgt de blokdiagramomgeving voor een visuele weergave van het model, waardoor dit makkelijker te begrijpen valt en meteen duidelijk is hoe de verschillende delen van het model met elkaar interageren. Daarnaast heeft het programma ook een groot adaptief vermogen, zodat aanpassingen aan parameters eenvoudig doorgevoerd kunnen worden. Daartegenover staan echter ook wat nadelen. Ondanks het feit dat dit model vele malen sneller is dan een hydrodynamisch model is het model traag in vergelijking met een conceptueel model in C-code. De programmeeromgeving is op zichzelf weinig flexibel. Aanpassen van waardes van variabelen gaat snel, behalve wanneer deze tussen verschillende blokken moeten worden doorgegeven. In dat opzicht heeft het programma een lage flexibiliteit. Daarnaast kunnen er ook moeilijkheden voorkomen bij het koppelen met andere software. Tot slot kunnen ook de licentieverplichtingen als hinderlijk worden ervaren.

Vooraf omwille van de visuele weergave is ervoor gekozen om in de Simulink®-omgeving te werken bij de ontwikkeling van het model. Eventueel kan in een verder onderzoek een omzetting naar het rekenkrachtigere C worden doorgevoerd.

Conceptueel model

De rivier wordt gemodelleerd als een aaneenschakeling van reservoirs en is dus een bakkenmodel of reservoirmodel. Een reservoir werkt hierbij als bergingselement waar verschillende grootheden aan gekoppeld kunnen worden, zoals een waterpeil en een uitstromend debiet. Belangrijk om op te merken is dat in het model, naast de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom, geen overstromingsgebieden gemodelleerd zijn, aangezien het gebaseerd is op het bestaande vereenvoudigde hydrodynamische model in IWRS. [Meert, 2012]

Om tot een model te komen werd de bestaande Conceptual Model Developer Tool (CMD-tool) verder ontwikkeld. Deze is een prototype MATLAB®-tool die aan de KU Leuven ontwikkeld is voor het opstellen van conceptuele modellen om stromingen in rivieren te simuleren. [Villazón, 2011] Om dit mogelijk te maken werd een nieuwe aanpak van conceptueel modelleren en simuleren ontwikkeld. Dit moest toelaten beweegbare structuren en hun regeling expliciet in rekening te brengen. De CMD-tool genereert automatisch de verschillende elementen van het model. De gebruiker dient deze dan nog met elkaar te verbinden. Deze tool werd uiteindelijk toegepast op het gebied van de Demer ter hoogte van Schulensmeer en Webbekom, opwaarts van Diest. Zodoende werd het hier besproken conceptueel model bekomen. [Meert, 2012]

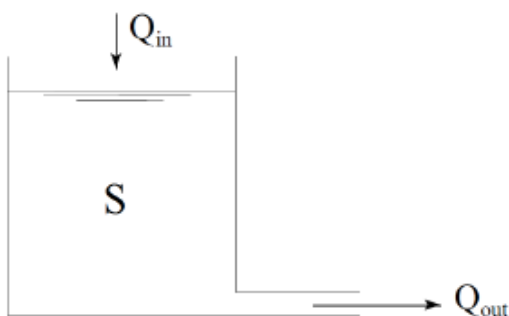
Berekeningen in het model gebeuren op discrete tijdstappen. De manier waarop het uitgaand debiet van een reservoir bepaald wordt, legt de structuur van de bak vast. Hierbij zijn twee methodes te onderscheiden voor het begroten van het uitgaand debiet: (i) de transferfunctie (TF) methode, en (ii) de debietsvergelijkingen.

In panden waar weinig artificiële en variabele invloeden voorkomen wordt de (altijd stabiele) TF methode gebruikt. In dat geval wordt het volume niet expliciet berekend, en wordt de waterhoogte bepaald uitgaande van een rating curve (QH-verband). De TF zelf kan daarbij een hoge orde aannemen. Hierbij wordt het inkomend debiet van verschillende tijdstippen in rekening gebracht, eventueel na een niet-lineaire transformatie om dynamische effecten van overstromingen en variabel backwater te beschouwen,. Eventueel kan de TF ook autoregressief werken. Hierbij kan worden opgemerkt dat één TF veelal een aaneenschakeling van meerdere lineaire reservoirs voorstelt.

In panden waar regelstructuren voorkomen, kan niet gewerkt worden met de TF methode. In de plaats wordt gebruik gemaakt van debietsvergelijkingen. Deze zijn opgesteld voor de verschillende structuren en komen perfect overeen met de vergelijkingen zoals geïmplementeerd in het hydrodynamische programma InfoWorksTM-RS [Innovyze, 2012]. Het debiet over deze structuren wordt begroot op basis van de op- en afwaartse waterhoogte, de geometrische en debietskarakteristieken van de structuur en de klepstand in het geval het om een regelbare stuw gaat. Hierbij wordt de continuïteitsvergelijking opgelost, dewelke de volumebalans van het beschouwde riviersegment garandeert:

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.13)$$

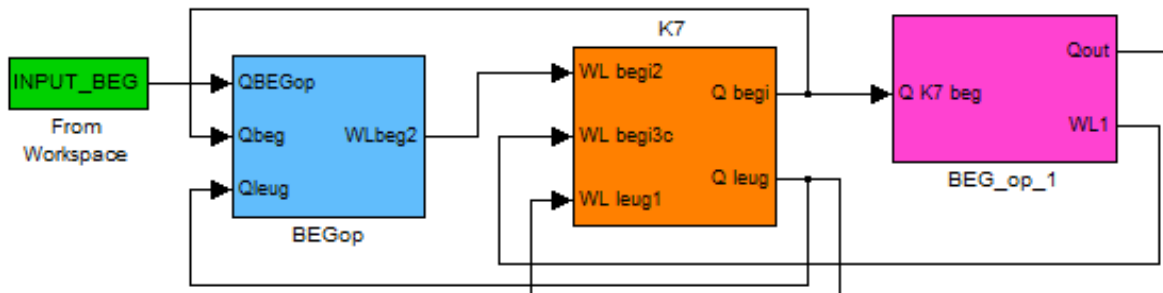
Hierin is S de berging in het reservoir, t de tijd, Q_{in} het inkomende debiet en Q_{uit} het uitgaande debiet. Dit wordt verduidelijkt in onderstaande figuur.



Figuur 10: Lineair reservoir model [Meert, 2012]

Om de waterhoogte te bepalen wordt vervolgens een hypsometrische curve gebruikt, die het verband levert tussen de waterhoogte en het volume in het pand.

De werking van het model wordt verduidelijkt aan de hand van volgende figuur die een deel van het model afbeeldt.



Figuur 11: Werkingsprincipe van het conceptuele model in Simulink®

De groene blok is een opgemeten opwaarts debiet in de Begijnenbeek. Dit debiet wordt samen met de uitgaande debieten over het verdeelwerk K7 aangelegd als input aan de blauwe blok die een bak voorstelt. In deze bak worden elke tijdstap de hierboven besproken continuïteitsvergelijking opgelost. Dit resulteert in een verandering in volume, waaruit het nieuwe volume in de bak volgt. Dit volume wordt door middel van een hypsometrische curve omgezet naar de bijhorende waterhoogte in de rivier. Deze curves geven immers een verband tussen het volume in een reservoir en het waterpeil. Ze worden opgesteld door voor elke tijdstap het verloop van het volume in het reservoir met dat van het waterniveau te vergelijken. De bekomen waterhoogte, dit is de opwaartse waterhoogte van K7, wordt dan als input aangelegd aan de oranje blok die de regelstructuur voorstelt. Uitgaande van de debietsvergelijkingen worden de debieten over en/of onder de stuwen K7 bepaald op basis van het op- en afwaartse peil worden. Deze debieten vormen een ingang voor de volumebalans in de volgende tijdstap en worden tevens doorgegeven naar de afwaartse riviersegmenten. In de parse blok wordt met behulp van een TF en een rating curve het afwaarts debiet in de Begijnenbeek en het waterpeil afwaarts van K7 bepaald. Dit waterpeil wordt dan in de volgende tijdstap gebruikt om het debiet over K7 te berekenen.

Er dient echter opgelet te worden bij het gebruik van hypsometrische curves, aangezien dit geen robuuste techniek is. Indien deze gebruikt worden om het opwaarts waterpeil te bepalen kan dit leiden tot instabiliteiten, vooral wanneer het op- en afwaarts peil in elkaars buurt liggen. Een kleine overschatting van het debiet gaat gepaard met een daling van het waterpeil opwaarts en een stijging afwaarts. Dit wordt gevolgd door een onderschatting van het debiet in de volgende tijdstap, waardoor het waterpeil opwaarts zal stijgen en afwaarts zakken. Nog een tijdstap later zal er dan opnieuw een nieuwe (grotere) overschatting worden gemaakt. Dit kan uit de hand lopen, waardoor er na verloop van tijd grote oscillaties kunnen ontstaan op het debiet en de waterpeilen.

Om dit te vermijden zijn er drie opties. Een eerste oplossing bestaat er in om de bergingsreservoirs zo groot mogelijk te maken. Hierbij moet wel een duidelijk verband tussen volume en waterpeil blijven bestaan. De mate waarin dit mogelijk is hangt af van de systeemkenmerken. Een tweede mogelijkheid is om de tijdstap in de continuïteitsvergelijking te verkleinen. Dit zal wel nadelig zijn voor de rekentijd. Tot slot kan er ook gekozen worden om numerieke demping op basis van de debieten uit de vorige tijdstap toe te voegen. Hierdoor zal het ontstaan van uitschieters beperkt worden. [Meert, 2012]

Voor de kalibratie van het conceptueel model werd gebruik gemaakt van de historische gebeurtenissen van januari 1995 en september 1998. Vervolgens werd het gevalideerd voor de historische gebeurtenis van januari 2002. Hierbij werden de inkomende debieten en

regeling van de stuwen overgenomen uit het IWRS-model. Na vergelijking van de resultaten van het conceptueel model met die uit IWRS kan besloten worden dat het conceptueel model het volledig hydrodynamisch model goed benadert. Wat betreft de wachtbekkens komt vooral de vulling goed overeen, terwijl de lediging iets minder goed overeenkomt. Dit komt omdat de afwateringsgrachten ten gevolge van hun complexiteit zeer moeilijk te modelleren zijn. Voor de toepassing van real-time sturing stelt dit echter niet meteen een probleem, aangezien hier vooral de nauwkeurige modellering van de maximale waterhoogten tijdens een overstromingsgebeurtenis van belang is. [Meert, 2012]

In vergelijking met het IWRS model dat 40 minuten nodig heeft om de historische gebeurtenis van januari 2002 van 35 dagen door te rekenen, had het conceptuele model in [Meert, 2012] 15 minuten nodig. Ondertussen werd verder onderzoek uitgevoerd om de rekentijd te beperken zodat de nieuwe rekentijd voor de historische gebeurtenis van januari 2002 nu enkele seconden bedraagt. In dit onderzoek is gewerkt met dit vernieuwde en snellere model. De principes waarop dit gebaseerd is, zijn nog steeds dezelfde als hierboven besproken.

3.3 Conclusie

Zoals reeds in de doelstellingen werd aangehaald is het de bedoeling om de MPC-techniek in combinatie met een genetisch algoritme toe te passen voor de sturing van de kleppen langs de Demer ter beheersing van overstromingen. Hiertoe zal gebruik worden gemaakt van het conceptueel model dat door Meert werd opgesteld in Simulink® omwille van de voordelen besproken in voorgaande paragraaf. De MPC-GA-techniek die in dit onderzoek wordt toegepast, is geïnspireerd op het onderzoek van Chiang. Hoe deze techniek juist geïmplementeerd wordt in het Simulink®-model wordt in volgend hoofdstuk besproken.

Hoofdstuk 4: Geïntegreerd model

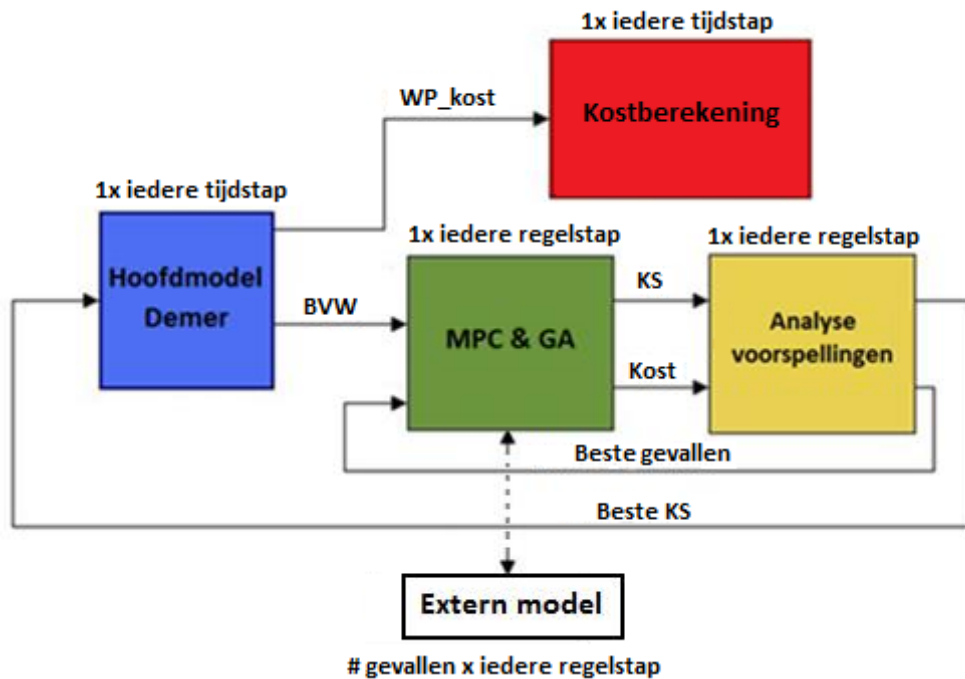
Het hoofddoel van deze masterproef is om het conceptueel Demermodel in Simulink[®], zoals dit werd opgesteld door Meert, uit te breiden met intelligente sturing via de MPC-GA-techniek. Naar dit uitgebreide model zal verder als ‘geïntegreerd model’ gerefereerd worden. Hoe het is opgesteld wordt in dit hoofdstuk beschreven. Er wordt van start gegaan met een overzicht van het model, waarna de verschillende onderdelen meer in detail besproken zullen worden. Tot slot volgt een korte conclusie over het bekomen model.

4.1 Opbouw van het model

Voor de implementatie van de MPC-GA-techniek is gekozen om gebruik te maken van het softwareprogramma Simulink[®]. De voor- en nadelen hiervan werden reeds in paragraaf 3.2.2 besproken. Verder is het Demermodel van Meert reeds in Simulink[®] geïmplementeerd, zodat een goede interactie met de MPC-GA-uitbreiding gegarandeerd is.

De tijdstap van het model bedraagt vijf minuten. Dit wil zeggen dat één tijdstap in het model overeenkomt met vijf minuten in de werkelijkheid. Een andere belangrijke stap is de regelstap. Dit is de tijdstap waarmee de stuwen bijgeregeld kunnen worden en dus ook de tijd tussen twee optimalisatieberekeningen met het MPC-GA-algoritme. Deze moet steeds een veelvoud van de tijdstap bedragen of dezelfde waarde aannemen. De minimale waarde hiervoor is vastgelegd op 15 minuten, dus drie tijdstappen in het model. Deze waarde is zo gekozen omdat de hydraulische structuren in de praktijk om de 15 minuten zullen worden bijgestuurd. De reden hiervoor is dat iedere 15 minuten nieuwe waarden voor de opgemeten debieten beschikbaar worden gesteld die kleine verschillen zullen vertonen met de berekende waarden in het model. Rekening houdend met deze feedback wordt vervolgens een nieuwe optimalisatieberekening uitgevoerd. Deze berekening al eerder uitvoeren zou nutteloos zijn aangezien nog geen nieuwe informatie ter beschikking is. De neerslagvoorspellingen wijzigen slechts om de 6 uur. Dit zorgt eveneens voor feedback in het systeem.

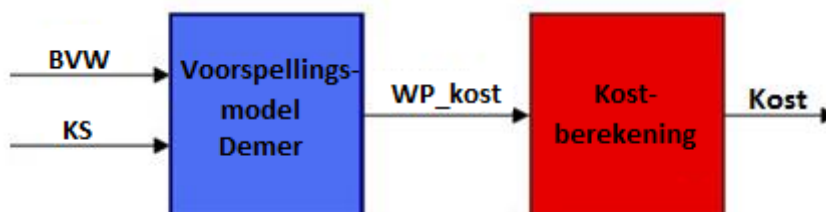
Figuur 12 geeft een schematisch overzicht van het geïntegreerd model. Daarin stelt BVW de door te geven beginvoorwaarden voor, KS de klepstanden en WP_kost de waterpeilen die nodig zijn voor het berekenen van de kost.



Figuur 12: Schematische weergave van het geïntegreerd model

Zoals op bovenstaande figuur te zien is, bestaat het geïntegreerd model zelf uit vier onderdelen. Vanuit het MPC-GA-blok wordt daarnaast nog een extern model opgeroepen. De simulatie van de Demer gebeurt in het blauwe blok ‘Hoofdmodel Demer’. Naar dit blok wordt verder gerefereerd als ‘hoofdmodel’. Tijdens een simulatie stelt het de werkelijke toestand in het riviernetwerk voor. Het is de bedoeling dat dit blok later in real-time zal draaien. Tijdens de simulaties in dit onderzoek is de snelheid echter gevoelig verhoogd. Op basis van twintig in het hoofdmodel berekende waterpeilen wordt in het rode blok ‘Kostberekening’ op elke tijdstap een kostberekening gemaakt.

Na een aantal tijdstappen in het hoofdmodel, gelijk aan de gekozen regelstap, wordt het MPC-GA-algoritme opgeroepen. Dit gebeurt in het groene blok ‘MPC&GA’. Hier wordt hetzelfde proces een aantal keer doorlopen. Het genetisch algoritme creëert twaalf reeksen semi-random klepstanden KS, één voor elke te regelen stuw, voor de gekozen controlehorizon. De manier waarop dit gebeurt wordt uitgelegd in paragraaf 4.3.1. Deze verzameling van twaalf reeksen klepstanden wordt verder “een geval” genoemd. Vervolgens wordt door het MPC-GA-blok een extern model, waarvan de inhoud wordt weergegeven in Figuur 13, opgeroepen waarin het gegenereerde geval wordt doorgerekend.



Figuur 13: Schematische weergave van het extern model uit Figuur 12.

Het hoofdmodel geeft enkele beginvoorwaarden BVW door zodat de begintoestand in het extern model overeenkomt met die in het hoofdmodel. Deze initialisatie vindt slechts eenmaal plaats per regelstap. Daarnaast geeft het algoritme de gecreëerde reeksen klepstanden door die in het extern model zullen worden aangelegd. Het aantal door te rekenen gevallen bepaalt hoe vaak dit proces wordt doorlopen en dus hoe vaak het extern model wordt opgeroepen. Het doorrekenen van deze gevallen staat in voor het grootste deel van de rekentijd van het model. Het is dus belangrijk dat deze berekening zo efficiënt mogelijk gebeurt. Door in de modellering gebruik te maken van een extern model kunnen de verschillende gevallen onafhankelijk en simultaan worden doorgerekend. Dit heeft als grote voordeel dat daardoor gebruik kan worden gemaakt van parallel computing, wat een enorme winst in rekentijd oplevert. De verschillende processorkernen van de computer zullen tegelijkertijd elk een ander geval doorrekenen. Door de computer optimaal gebruik te laten maken van zijn vier virtuele en vier reële kernen is de rekentijd ongeveer met een factor vijf verlaagd. Dit was dan ook een belangrijke verwezenlijking bij het opstellen van het model.

De inhoud van het extern model wordt zoals gesteld weergegeven in Figuur 13. Het blauwe blok 'Voorspellingsmodel Demer' bevat, net als het hoofdmodel, het conceptuele model van de Demer. In dit blok wordt telkens een geval aangelegd en op basis van de beschikbare neerslagvoorspellingen een simulatie uitgevoerd. Hieruit volgt dan het verwachte verloop van twintig waterpeilen in de toekomst en dit over een interval gelijk aan de controlehorizon. Op basis van deze waterpeilen kan dan in het rode blok 'Kostberekening' de kost voor het geval berekend worden. Deze kost wordt vervolgens terug uitgeschreven naar het MPC-GA-blok.

De doorgerekende gevallen met hun bijhorende kost worden dan doorgegeven naar het gele blok 'Analyse voorspellingen' uit Figuur 12. Daar worden deze gesorteerd op basis van hun kost zodat het mogelijk is om na te gaan welk het beste geval is en dus de kleinste kost zal veroorzaken. Van dit geval wordt dan de eerste klepstand van elk van de twaalf reeksen aangelegd in het hoofdmodel gedurende de volgende regelstap. Daarnaast worden ook de beste gevallen opnieuw doorgegeven naar het groene blok, zodat deze in de volgende regelstap opnieuw doorgerekend kunnen worden. Deze gevallen gaven immers in de huidige regelstap goede resultaten en zullen dus waarschijnlijk in de volgende regelstap ook goede resultaten opleveren.

In volgende paragrafen wordt meer in detail ingegaan op de inhoud van de verschillende blokken.

4.2 Hoofdmodel Demer

De input van dit blok zijn de klepstanden van de verschillende regelstuwen, afkomstig uit het blok 'Analyse voorspellingen'. Hier zal uitgaande van deze klepstanden en neerslaggegevens een simulatie van het Demermodel worden uitgevoerd gedurende één regelstap. Iedere tijdstap in het model, zijnde om de vijf minuten, geeft het hoofdmodel twintig waterhoogtes door naar 'Kostberekening'. Na iedere regelstap worden ook een aantal toestandsvariabelen doorgegeven naar het blok 'MPC-GA'. Deze zullen dienst doen als beginvoorwaarden voor het voorspellingsmodel.

Zoals reeds vermeld maakt dit onderzoek gebruik van het vernieuwde en snellere Simulink Demermodel. Om dit model te kunnen gebruiken voor de toepassing van MPC-GA drongen zich echter enkele aanpassingen op. Dit model was immers opgebouwd om goed te functioneren bij het aanleggen van de vaste regels. Bij MPC-GA-sturing kunnen er zich echter andere situaties voordoen dan bij deze vaste sturing. De doorgevoerde aanpassingen worden hieronder kort besproken. Een schematisch overzicht van het model van het Demerbekken volgt in Figuur 14.

4.2.1 Extra bak Begijnenbeek

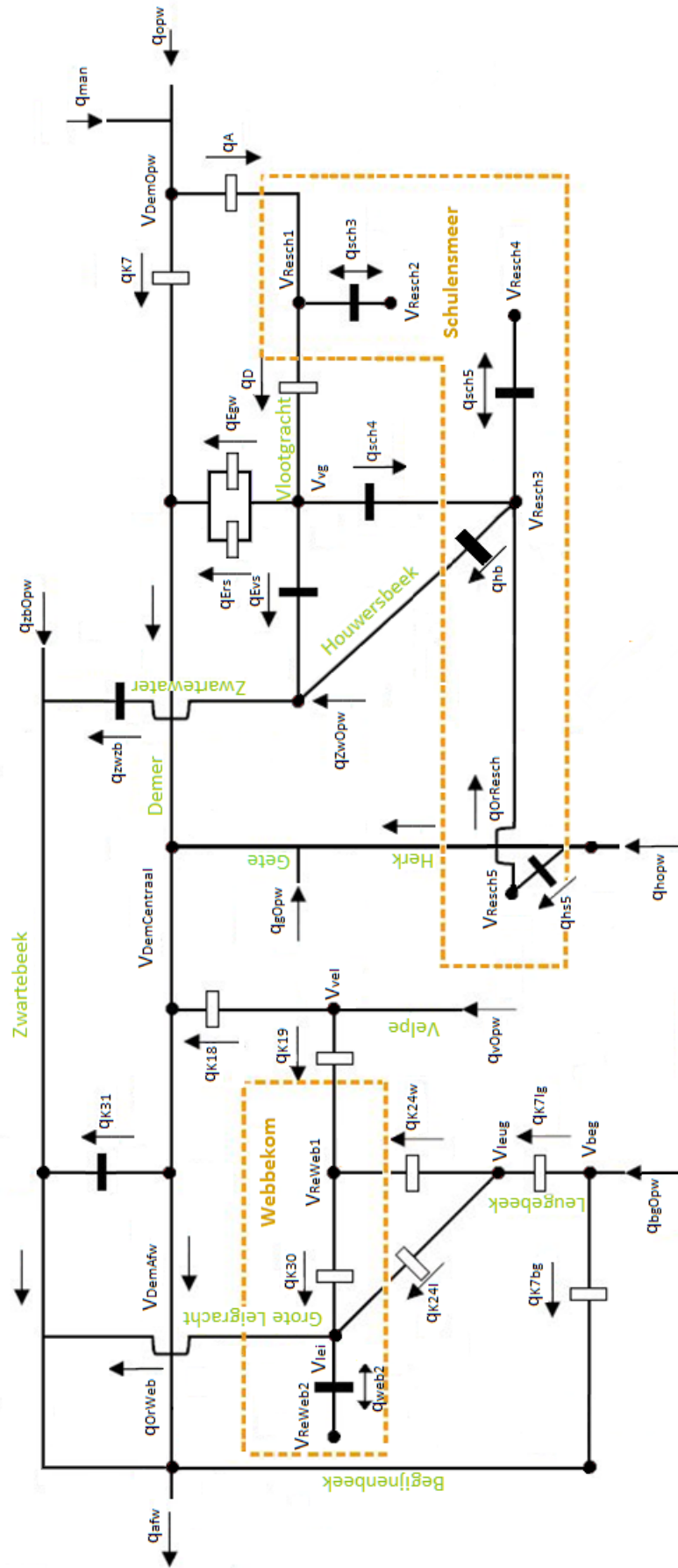
In het oorspronkelijke Demermodel werd de waterhoogte opwaarts van het stuwcomplex K7 aan de Begijnenbeek opgelegd als een reeks waterpeilen. Deze reeks komt overeen met de waterpeilen voor de historische gebeurtenis van september 1998 indien de vaste regels worden aangelegd. Dit waterpeil is echter afhankelijk van de klepstanden van de stuwen in het stuwencomplex K7 afwaarts. Bijgevolg zal het waterpeil anders zijn wanneer hier andere klepstanden worden aangelegd. Aangezien de MPC-GA-regeling zal afwijken van de vaste regeling moeten deze waterpeilen kunnen variëren in functie van de klepstanden. Daartoe is manueel de extra bak 'Begijnenbeek' toegevoegd. De bijhorende hypsometrische curve werd opgesteld aan de hand van simulaties in het IWRS-model en is terug te vinden in Bijlage A.

4.2.2 Vergroting bak Velpe

In paragraaf 3.2.2 werd reeds melding gemaakt van het feit dat het gebruik van hypsometrische curves kan leiden tot instabiliteiten. Een mogelijke oplossing bestaat er in om de bakken zo groot mogelijk te maken. Opwaarts van stuw K18 en stuw K19 bevond zich een kleine bak die slechts een deel van de Velpe karakteriseerde. Deze bak kon echter makkelijk uitgebreid worden naar opwaarts toe. Om op deze locatie problemen met instabiliteiten te vermijden werd dit dan ook gedaan.

4.2.3 Hypsometrische curves

De hypsometrische curves waren slechts bepaald tot de waterhoogte die maximaal voorkomt bij de vaste regeling. Bij toepassing van de MPC-GA-techniek kan het echter zijn dat de waterhoogte op bepaalde plaatsen boven deze maximale peilen gaat. Indien de hypsometrische curves niet naar boven zouden worden doorgetrokken wordt de grootste waterhoogte op deze curve genomen, terwijl het waterpeil eigenlijk veel hoger zou moeten liggen. Bijgevolg zou deze fout uitgebuit worden door het MPC-GA-algoritme aangezien er hier oneindig veel water boven het maximale peil zou kunnen gestockeerd worden, zonder dat daarvoor extra kosten worden aangerekend. Om dit probleem op te lossen zijn de hypsometrische curves lineair naar boven geëxtrapoleerd.



Figuur 14: Schematische weergave van het gemodelleerde Demergebied

4.3 MPC&GA

Het 'MPC&GA'-blok vormt de kern van de intelligente sturing en wordt iedere regelstap uitgevoerd. Het hoofdmodel levert daarbij de beginvoorwaarden voor het voorspellingsmodel. Deze worden dan ook als input aan het 'MPC&GA'-blok aangelegd, net als een aantal bijgehouden beste gevallen uit de vorige regelstap. De beginvoorwaarden worden ingesteld in het voorspellingsmodel waarna het MPC-GA-algoritme wordt doorlopen. Om de rekentijd zo veel mogelijk te beperken gebeurt dit zoals eerder aangehaald voor een aantal gevallen tegelijkertijd via parallel computing.

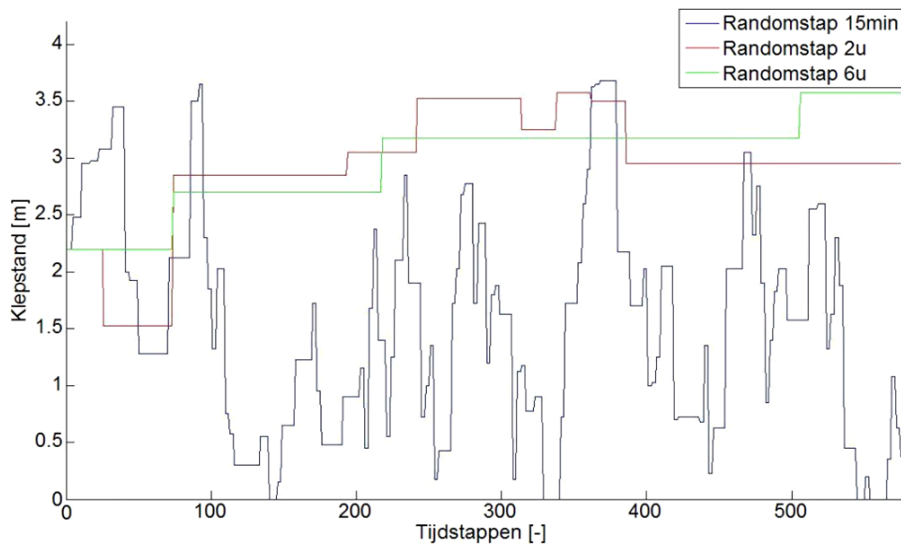
In een eerste deel van het algoritme wordt voor elke stuw een reeks klepstanden gegenereerd voor de beschouwde controlehorizon. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe, semi-random reeksen klepstanden of reeksen overgenomen van de beste gevallen uit de vorige regelstap. Volgende paragraaf licht dit proces verder toe. De verschillende reeksen worden vervolgens aangelegd in het extern opgeroepen voorspellingsmodel uit Figuur 13. Op basis van (perfecte) neerslagvoorspellingen wordt dan een simulatie uitgevoerd voor de controlehorizon. Als resultaat ontvangt het 'MPC&GA'-blok de kost horende bij iedere gesimuleerde tijdstap. De som hiervan levert de totale kost voor dat geval over de volledige controlehorizon. Deze kost wordt samen met de bijhorende reeksen klepstanden gestockeerd. Nadat alle gevallen gesimuleerd zijn, worden deze doorgegeven naar het blok 'Analyse voorspellingen'.

4.3.1 Genereren van een reeks semi-random klepstanden

De gevolgde methode voor het aanmaken van een nieuwe reeks klepstanden is gebaseerd op het genetisch algoritme van Chiang [2013], zoals in paragraaf 3.1.3 beschreven. Hiervan werd enkel de code voor het genereren van een nieuwe klepstand overgenomen. De rest van de werkwijze verschilt immers gevoelig.

Grootte van de randomstap

Het belangrijkste verschil tussen beide methodes is de regelmaat waarmee een nieuwe semi-random klepstand wordt aangemaakt, verder de randomstap genoemd. De randomstap moet hierbij groter of gelijk zijn aan de regelstap in het geïntegreerd model opdat de klepstanden effectief zouden kunnen worden aangelegd. Origineel werd iedere regelstap een nieuwe klepstand gegenereerd. De randomstap was met andere woorden even groot als de regelstap. De theorie hierachter was dat de stuw daardoor fijner bijgeregeld zou kunnen worden. Wanneer de randomstap klein is, zullen in een reeks immers veel meer semi-random klepstanden gegenereerd worden dan wanneer de randomstap groot is. Bijgevolg zal een gedetailleerder verloop bekomen worden. In Figuur 15 is een voorbeeld gegeven van een gegenereerde reeks klepstanden voor een randomstap van 15 minuten, van 2 uur en van 6 uur voor een controlehorizon van 48 uur (576 tijdstappen van 5 minuten).



Figuur 15: Semi-random reeks klepstandstappen voor een randomstap van 15min (blauw), 2u (rood) en 6u (groen)

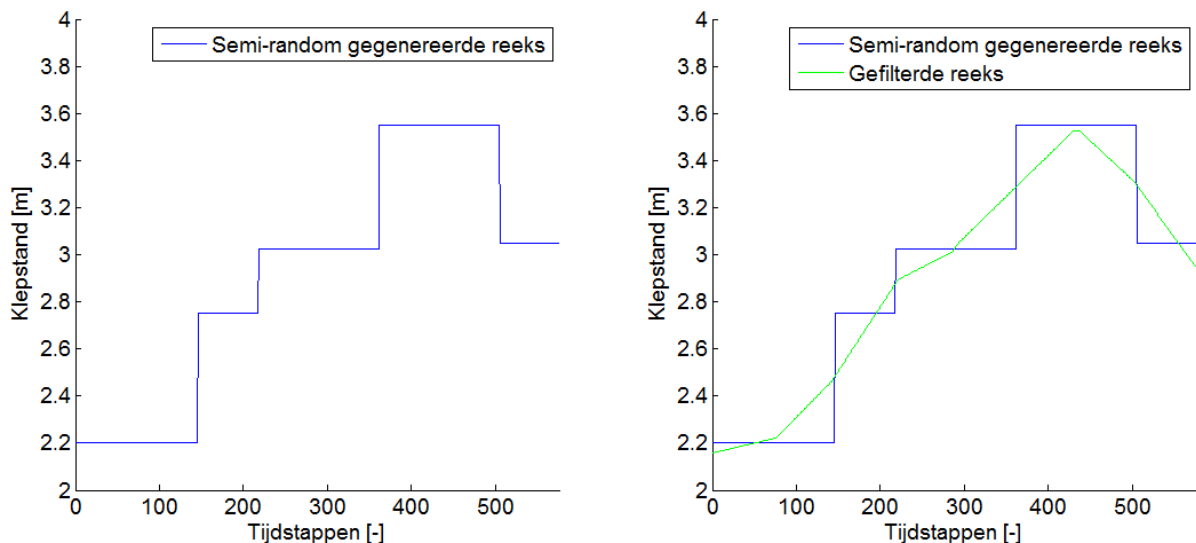
Bij een randomstap van 15 minuten (blauwe curve) zal de stand van de klep iedere drie tijdstappen kunnen wijzigen. Doordat dit semi-random gebeurt zal het moeilijker zijn om een trend in de klepstanden te bekomen. Ook kunnen op deze manier heel veel verschillende reeksen gegenereerd worden. Rekening houdend met het feit dat dit voor 12 stuwen tegelijk gebeurt, resulteert dit in heel wat combinatiemogelijkheden. Bijgevolg zullen zeer veel gevallen beschouwd moeten worden om tot de optimale configuratie van de klepstanden te komen. Met het oog op het beperken van de rekentijd is het daarom interessanter om de reeksen klepstanden op een intelligentere manier aan te maken. Er zijn bij een kleine randomstap zoals 15 minuten immers te veel momenten waarop de klepstanden kunnen veranderen (48u x 4 keer/uur). Daarbij komt nog dat de sprongen telkens vrij groot kunnen zijn (tot 1,5m). Bij een randomstap van 2u (rode curve) blijkt het verloop van de curve een duidelijkere trend te volgen. Hierbij zal de klepstand over de controlehorizon van 48u maximaal 24 keer veranderen. Doordat het al dan niet veranderen van een klepstand afhangt van één random gegenereerde bit, zal deze gemiddeld slechts twaalf keer wijzigen. Wanneer de randomstap nog verder verhoogd wordt tot 6u (groene curve) zal de klepstand nog minder vaak wijzigen, gemiddeld slechts vier keer gedurende 48u. Op deze manier ontstaat een zeer duidelijke trend. In het voorbeeld in Figuur 15 neemt de klepstand over de controlehorizon geleidelijk toe.

Door te werken met een grote regelstap wordt het aantal combinatiemogelijkheden sterk gereduceerd. Dit is interessant met het oog op het beperken van de rekentijd, maar dit brengt ook een nadeel met zich mee. Zo kunnen niet langer alle mogelijke combinaties voorkomen, wat net een sterkte is van het MPC-GA-algoritme. Toch is er hier voor gekozen om met een grotere randomstap te werk te gaan. De sterke toename van de rekentijd weegt immers niet op tegen de iets ruwere benadering. Er zullen in dit onderzoek immers veel simulaties moeten gebeuren. Bovendien is het om een goede sturing te bekomen vooral belangrijk om te weten wat de globale trend van de stuw moet zijn gedurende de volgende 48 uur. Dit is bijvoorbeeld stijgen, dalen, eerst een beetje stijgen alvorens constant te blijven, de eerste dag een lage klepstand en de volgende een hoge, ... De kans dat een dergelijke regeling bekomen wordt, is veel groter wanneer de klepstanden met een grote randomstap worden gegenereerd. Daarom is besloten om telkens om de 6 uur (72

tijdstappen) een nieuwe, semi-random klepstand te genereren, ongeacht de regelstap. Zodoende zullen duidelijke trends bekomen worden voor het verloop van de klepstanden.

Filteren van de semi-random gegenereerde reeks

Hiervoor werd de randomstap bij het aanmaken van de klepstanden bepaald. Figuur 16 geeft links een mogelijk verloop van een op die manier gegenereerde reeks klepstanden weer. Hierna zal het verloop met een aantal maatregelen verder verbeterd worden. In het huidige verloop zijn namelijk vrij grote sprongen waarneembaar. Deze zouden gevolgen kunnen hebben voor de stabiliteit van het rekenprogramma en zullen in realiteit het ontstaan van plotse veranderingen van de waterpeilen veroorzaken.



Figuur 16: Semi-random gegenereerde reeks klepstanden (Links). Gefilterde reeks (groen) samen met de oorspronkelijk gegenereerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Rechts).

Om een meer geleidelijk verloop van de klepstanden en bijgevolg ook van het waterpeil in de rivier te bekomen wordt deze reeks gefilterd met een Savitzky-Golayfilter [Schafer, 2011]. Hierbij wordt een veelterm gefit door een aantal punten rond een centraal punt. De bekomen veelterm wordt dan gebruikt om de waarde in het centrale punt te bepalen. Op deze manier kan ruis uit een signaal worden gehaald. Dit specifieke type filter werd gekozen omwille van een aantal voordelen. Vooreerst is het mogelijk om de graad van de benaderende veelterm te kiezen. Daarnaast kan door het aantal beschouwde punten bij het bepalen van de veelterm te verhogen of te verlagen de demping op eenvoudige wijze respectievelijk verhoogd of verlaagd worden. Bij het bepalen van de benaderende veelterm maakt de filter gebruik van de kleinste kwadratenbenadering. Meer info over deze filter is te vinden in Schafer [2011].

Het aantal punten waardoor de veelterm gefit wordt, dient met de nodige zorg bepaald te worden. De keuze voor te veel punten zou immers leiden tot het afvlakken van het verloop terwijl het selecteren van te weinig punten zou leiden tot het gewoon volgen van de gegenereerde reeks. Om de graad van de veelterm en het aantal beschouwde punten vast te leggen zijn verschillende combinaties van beide parameters onderzocht. Hierbij bleek dat de rekentijd sterk verhoogde wanneer meer punten beschouwd werden. De waarden zijn daarom zodanig vastgelegd dat het aantal punten zo laag mogelijk blijft, maar dat het

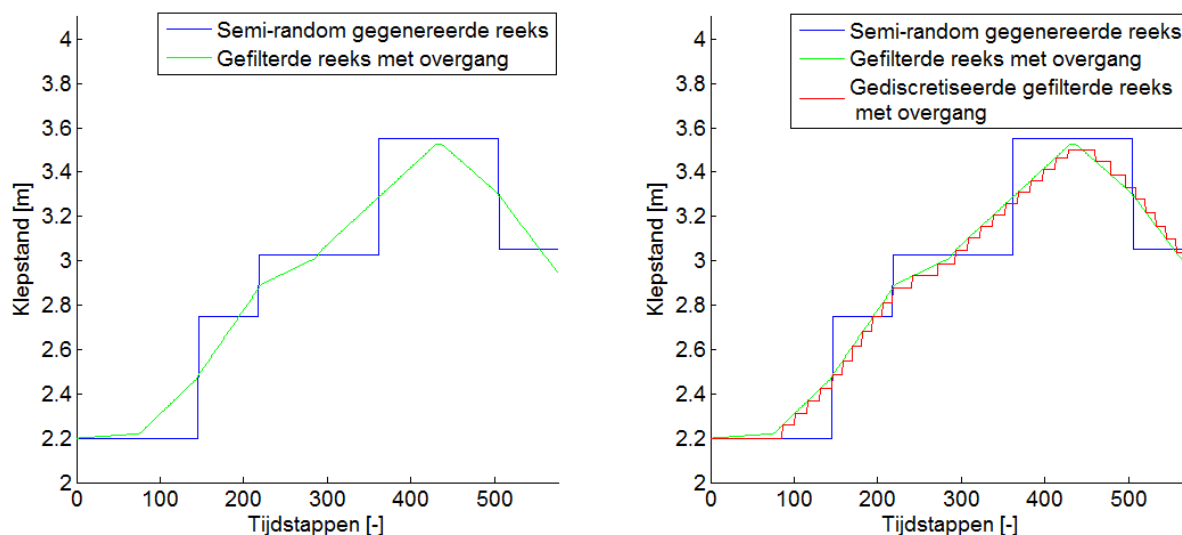
verloop van de gefilterde reeks toch zo veel mogelijk voldoet aan het gewenste verloop. Er is gekozen voor een veelterm van de eerste graad met 151 punten. Het resultaat van deze filtering is rechts op Figuur 16 weergegeven.

Overgang naar de gefilterde reeks en aanpassen van de uiterste klepstanden

De tot hiertoe vastgelegde werkwijze heeft echter enkele kleine nadelen. Wanneer een klep bijvoorbeeld in een zeer korte periode van de laagste naar de hoogste stand moet verplaatsen zal dit niet mogelijk zijn voor de gefilterde reeks. De kans dat dit echter in praktijk nodig is, is vrij klein, aangezien het algoritme kan anticiperen dankzij de controlehorizon. Bovendien zal in een dergelijke situatie vaak naar een andere geval worden overgeschakeld, dat betere resultaten geeft. Hierdoor kan de stuw toch zeer snel stijgen. De manier waarop naar een andere beste wordt overgeschakeld wordt uitgelegd in paragraaf 4.3.2.

Bij het filteren van de reeks stelt zich echter ook een probleem aan het begin van de reeks. Op het rechtse deel van Figuur 16 is op tijdstap nul te zien dat de gefilterde reeks niet perfect aansluit op de huidige klepstand. Dit wordt veroorzaakt doordat de filter de waarde voor het huidige moment berekent uitgaande van de voorgaande 75 en de volgende 75 punten. De centrale waarde van deze benaderende veelterm zal de eerste waarde van de gefitste veelterm vormen, waardoor deze niet noodzakelijk aansluit op de huidige klepstand. Om te voldoen aan deze tekortkoming is gekozen om een lineaire interpolatie tussen de huidige klepstand en de klepstand van de gefitste reeks na de eerste randomstap (72 tijdstappen) door te voeren. Links op Figuur 17 is de gefilterde reeks met overgang weergegeven.

De laatste verbetering heeft betrekking op de uiterste klepstanden van de stuwen. Wanneer de semi-random gegenereerde reeks de maximale klepstand bereikt, blijkt de gefilterde reeks het moeilijk te hebben om deze hoge stand eveneens te bereiken. De gefilterde reeks blijft, zoals te zien is op het rechtse deel van Figuur 16, iets onder het maximum van de semi-random gegenereerde reeks. Dit hangt samen met de keuze van de parameters van de filter. Om er voor te zorgen dat de extreme standen van de klep eenvoudiger kunnen worden bereikt is de maximale en minimale waarde bij het aanmaken van de klepstanden kunstmatig verhoogd, respectievelijk verlaagd. Indien deze aanpassing te klein is, zal de gefilterde reeks nog steeds niet goed tot aan de extreme standen geraken, terwijl een te grote aanpassing tot gevolg zal hebben dat de klepstanden te makkelijk naar de uiterste standen gaan. Uit onderzoek blijkt dat goede resultaten bekomen worden wanneer een klep tijdens het aanmaken van de semi-random gegenereerde klepstanden 5% van zijn range verder kan bewegen dan de uiterste stand. Op die manier zal de gefilterde reeks de uiterste klepstand makkelijker kunnen bereiken. In de uiteindelijke reeks mogen de minimale en maximale klepstand, die in dit voorbeeld 0 en 3,5m bedragen, uiteraard niet worden overschreden. Dit wordt in rekening gebracht door de waarden die buiten het toegelaten interval vallen, te herleiden tot deze uiterste waarden. Dit gebeurt tijdens de discretisatiestap.



Figuur 17: Gefilterde reeks met overgang (groen) samen met de oorspronkelijk gegeneerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Links). Uiteindelijke reeks klepstanden (rood) samen met de gefilterde reeks met overgang (groen) en de oorspronkelijke gegeneerde reeks semi-random klepstanden (blauw) (Rechts).

Discretisatie van de gefilterde reeks met overgang

Om de uiteindelijke reeks te bekomen is tot slot nog een discretisatie vereist die er voor zorgt dat de klepstanden alleen kunnen veranderen tijdens een regelstap. Hierbij is een minimum verplaatsing van 5cm opgelegd om schommelingen te vermijden. Indien de berekende wijziging van een klepstand kleiner is dan deze 5cm zal gewoon de vorige klepstand aangehouden blijven. Figuur 17 geeft rechts een voorbeeld van een uiteindelijke reeks klepstanden, zoals die in het voorspellingsmodel zal worden aangelegd. Hierop is duidelijk te zien dat de reeks de uiterste waarden van 0 en 3,5m respecteert. Een overzicht van de maximale klepstanden van de twaalf regelbare stuwen staat in Bijlage B. De minimale klepstand bedraagt voor elke stuw 0, aangezien er gewerkt wordt met relatieve klepstanden ten opzichte van de laagste stand.

Conclusie

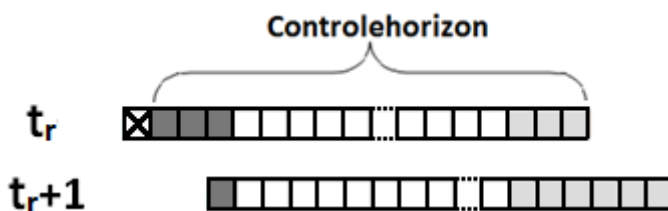
Het uiteindelijke verloop voldoet dus aan alle vereisten. Door de randomstap voldoende laag te houden wordt er voor gezorgd dat de klepstand een bepaalde trend volgt. Om daarbij een geleidelijk verloop van de klepstand te bekomen wordt hier een filter op toegepast. Om een goede aansluiting met de huidige klepstand te bekomen wordt het eerste deel, gelijk aan één randomstap, vervangen door een lineaire interpolatie tussen de huidige en de eerste semi-random gegeneerde klepstand. Daarnaast wordt bij het genereren van de semi-random klepstanden ook een kunstmatige aanpassing van de uiterste klepstanden doorgevoerd zodat de gefilterde reeks de werkelijke uiterste klepstanden makkelijker kan bereiken. De op die manier bekomen curve wordt tenslotte gediscretiseerd, rekening houdend met de regelstap en de uiterste grenzen van de stuw.

4.3.2 Overnemen van een reeks klepstanden

Zoals eerder vermeld wordt telkens een lijst met enkele beste gevallen uit de vorige regelstap doorgegeven naar de volgende regelstap. Deze worden dan opnieuw doorgerekend. Hoe dit in zijn werk gaat kan opgesplitst worden in het overnemen van het beste geval uit vorige tijdstap, dus het geval waarvan de eerste klepstanden van elke reeks in de vorige tijdstap werden aangelegd in het hoofdmodel, en het overnemen van een reeks klepstanden van één van de andere gevallen uit de lijst.

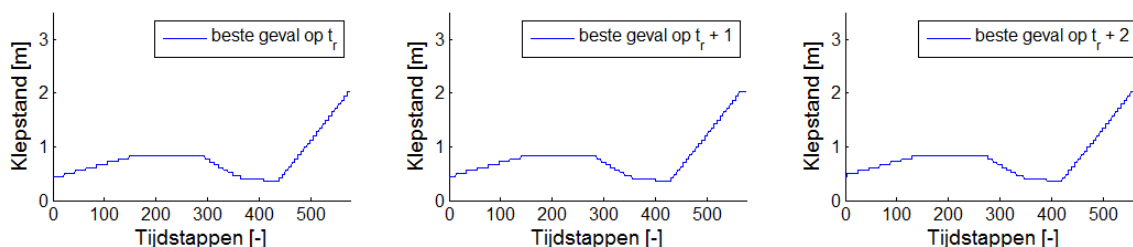
Overnemen van het beste geval

Bij het overnemen van een reeks klepstanden van het beste geval dienen geen speciale voorzieningen getroffen te worden wat betreft de overgang van de huidige klepstand naar de eerste klepstand van de reeks. Deze behoorden in de vorige regelstap immers tot dezelfde reeks. Enkel achteraan dient er een nieuwe klepstand gegeneerd te worden dewelke aangelegd zal worden tijdens de laatste regelstap van de voorspelling. Deze werd immers in de vorige regelstap nog niet beschouwd. De meest voor de hand liggende keuze is het overnemen van de laatst beschikbare klepstand. Figuur 18 verduidelijkt dit, uitgaande van een regelstap van 15 minuten (3 tijdstappen in het model). Op deze figuur duidt een kruis de huidige klepstand aan. Deze ligt vast en kan dus niet meer veranderen. De reeks klepstanden is weergegeven voor de huidige regelstap t_r en de volgende regelstap t_{r+1} .



Figuur 18: Overnemen van een reeks klepstanden van het beste geval van de vorige regelstap

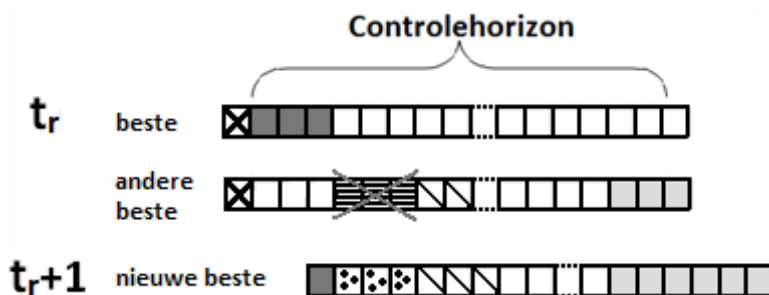
Indien dit geval een aantal keer behouden blijft, zal het laatste deel van de reeks een constante worden. Figuur 19 toont een dergelijke doorgeschoven reeks in de volgende regelstap. Als de kost voor het aanleggen van deze reeks laag blijft en de reeks dus lang behouden blijft, kan de lengte van de platte staart sterk toenemen. Indien dit na verloop van tijd tot een hoge kost zou leiden, zal een reeks met een lagere kost in de plaats van deze reeks komen. Wanneer de kost dus sterk oploopt, zal de reeks automatisch uit het systeem verdwijnen.



Figuur 19: Doorschuiven van een reeks klepstanden indien het beste geval behouden blijft: Voorbeeld van een klepstand in drie opeenvolgende regelstappen.

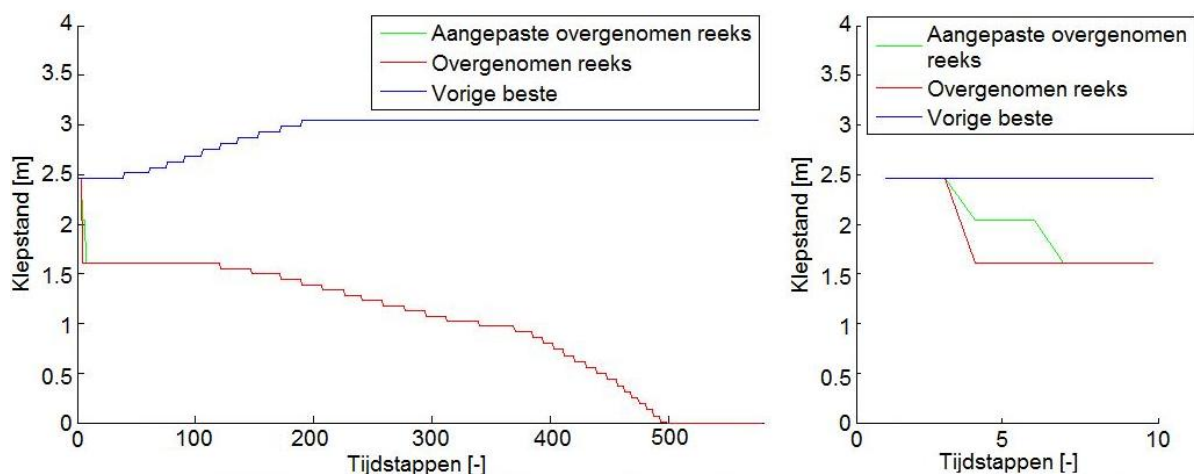
Overnemen van één van de andere beste gevallen

De andere gevallen die uit vorige regelstap behouden zijn, worden in de huidige regelstap opnieuw doorgerekend. Daarbij is het belangrijk om aandacht te besteden aan de overgang van de huidige klepstand naar de overgenomen reeks. Het kan immers voorkomen dat de huidige klepstand en de eerste klepstand van de reeks fel uit elkaar liggen. Beide reeksen zijn in het verleden nochtans ontstaan uit dezelfde klepstand, maar dit kan al veel vroeger in de simulatie gebeurd zijn, waardoor ze nu mogelijks ver uit elkaar liggen. Doordat de kleppen een maximale afstand hebben waarover ze gedurende één tijdstap kunnen bewegen, kan de verplaatsing in de praktijk onmogelijk uitvoerbaar worden indien de reeks zonder maatregelen achter de huidige klepstand wordt aangelegd. Daarnaast kunnen grote sprongen van de klepstand zorgen voor sterke schommelingen in het waterpeil en zelfs tot het voorkomen van een watersprong in de rivier. Bovendien is het mogelijk dat in de volgende regelstap opnieuw een ander geval, waarvan de klepstand dicht bij de eerste klepstand ligt, het beste wordt. Een dergelijke situatie kan leiden tot grote fluctuaties in het verloop van de klepstanden. Om deze problemen te beperken werd geopteerd om de reeks aan te sluiten op de huidige klepstand met een tussenstap waar het gemiddelde van de huidige en de tweede klepstand van de reeks wordt aangelegd. Op die manier worden de sprongen gehalveerd en is het hiervoor vermelde probleem van de praktische uitvoerbaarheid van de baan. Op het einde van de reeks dient opnieuw een extra klepstand te worden toegevoegd. Er wordt wederom gekozen om de laatst beschikbare klepstand aan te houden. De methode wordt verduidelijkt in Figuur 20 voor een regelstap t_r van 15 minuten. Hierbij stelt ieder blokje een tijdstap van vijf minuten in het hoofdmodel voor. Deze vormen per drie een groep, aangezien zij dezelfde klepstand bevatten.



Figuur 20: Overnemen van een reeks klepstanden van één van de andere beste gevallen van de vorige regelstap

De overgang naar een nieuwe beste reeks gebeurt zoals hiervoor uitgelegd. De doorkruiste groep klepstanden wordt verwijderd en vervangen door het gemiddelde van de groep meteen rechts ervan (diagonaal doorstreept op de figuur) en de huidige klepstand. Op die manier wordt de nieuwe groep (met drie stippen in de figuur) bekomen. Figuur 21 geeft een overgang volgens dit principe weer. Links in deze figuur is het verloop van de vorige beste in het blauw weergegeven en het verloop van de overgenomen reeks uit de vorige tijdstap in het rood. De groene curve geeft de overgang tussen beide reeksen weer. Een meer gedetailleerd beeld van deze overgang is terug te vinden rechts in de figuur.



Figuur 21: Overgang (groen) van het beste geval (blauw) naar één van de andere 40 beste gevallen (rood)

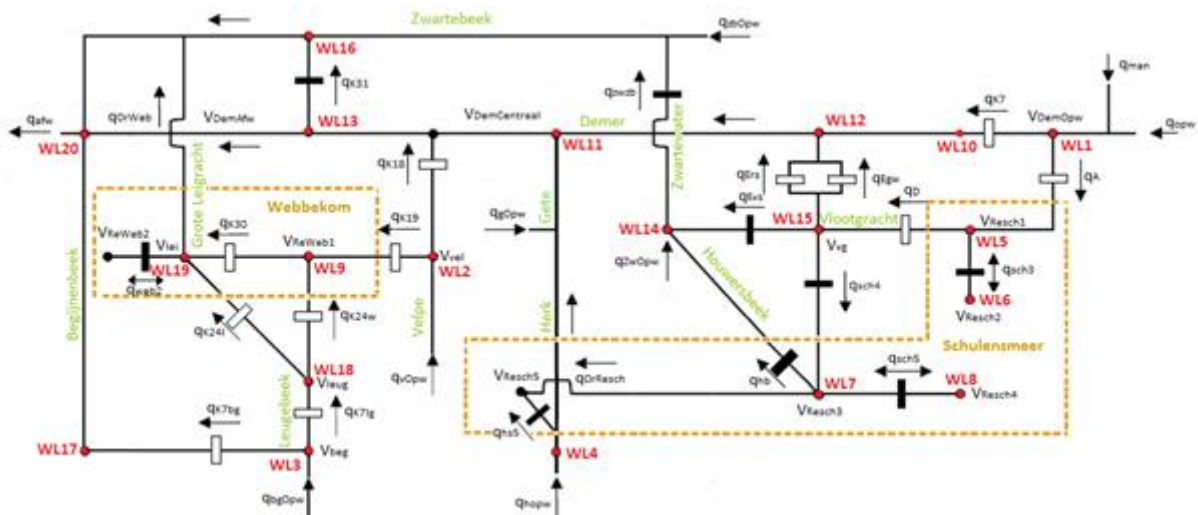
4.4 Voorspellingsmodel Demer

In het voorspellingsmodel van de Demer is opnieuw het aangepaste conceptuele model van Meert terug te vinden. De beginvoorwaarden van dit model werden in 'MPC&GA' ingesteld zodat dit model op elk tijdstip overeenkomt met de te verwachte toestand in het hoofdmodel.

Als input worden de gegeneerde reeksen klepstanden aangelegd. Om de toekomstige waterpeilen en andere variabelen over de tijdshorizon te bekomen zou bij real-time sturing beroep worden gedaan op, onzekere, neerslagvoorspellingen. In deze studie zijn de neerslagvoorspellingen echter perfect gekend. Hierdoor zal de voorspelde toestand exact overeenkomen met de toestand in het hoofdmodel indien het doorgerekende geval zou worden aangelegd. In realiteit zal hier wegens onzekerheden in de neerslagvoorspellingen van afgeweken worden. Dit effect is in deze studie echter niet beschouwd. De output bestaat uit de waterpeilen op dezelfde twintig locaties als in het hoofdmodel en wordt naar 'Kostberekening' doorgegeven.

4.5 Kostberekening

De kostberekening is een belangrijk onderdeel van de MPC-GA-techniek. Deze zal immers bepalen welk geval het beste is en zal worden aangelegd in het hoofdmodel. Het MPC-GA-algoritme stuurt op deze kost en probeert deze zo laag mogelijk te houden. Daartoe is het belangrijk dat de kostberekening realistisch is en representatief voor de werkelijke situatie. Indien bijvoorbeeld een lage kost wordt toegekend voor overstromingen ter hoogte van Diest centrum en een hoge kost ergens bij een weiland zal het algoritme eerst Diest laten overstromen en dan pas het weiland. Het algoritme werkt hierbij goed, maar geeft niet de gewenste regeling. Daarom dienen de kostenfuncties met de nodige zorg bepaald te worden. De input van deze kostenfuncties bestaat elke tijdstap uit twintig geselecteerde waterpeilen (WL). Deze zijn in rood aangeduid op Figuur 22. Uitgaande van deze waterpeilen volgt dan de kost voor elke tijdstap. Deze berekening gebeurt op een vrij eenvoudige manier die toelaat inzicht te verwerven in de oorsprong van de kost, maar die toch een waarheidsgetrouw beeld geeft. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een aantal waakpeilen en kostenfuncties. Hoe deze functies zijn opgesteld en hoe de kostberekening in zijn werk gaat wordt hierna besproken.



Figuur 22: Geselecteerde waterpeilen om de kost te berekenen

Het dient echter nog opgemerkt te worden dat de hier berekende kost, een fictieve kost is die moet toelaten een vergelijking te maken tussen de verschillende gevallen. Er wordt dus geen geldwaarde bepaald. Hiermee bestaat echter wel een correlatie, aangezien bij een hogere waarde voor de berekende kost hogere waterpeilen en dus een grotere overschrijding van het overstromingsniveau zullen horen waardoor de financiële kost in de praktijk ook hoger zal zijn.

Daarnaast wordt niet alleen een kost toegekend aan de situaties met overstroming, maar ook de situaties waarin de waterpeilen nog onder het overstromingsniveau liggen krijgen een kost. Op deze manier kunnen regelprioriteiten worden vastgelegd, zoals later zal worden verduidelijkt. Bij het bepalen van de financiële schade zou met deze situaties geen rekening worden gehouden, aangezien hierbij alleen gekeken wordt naar de geleden schade.

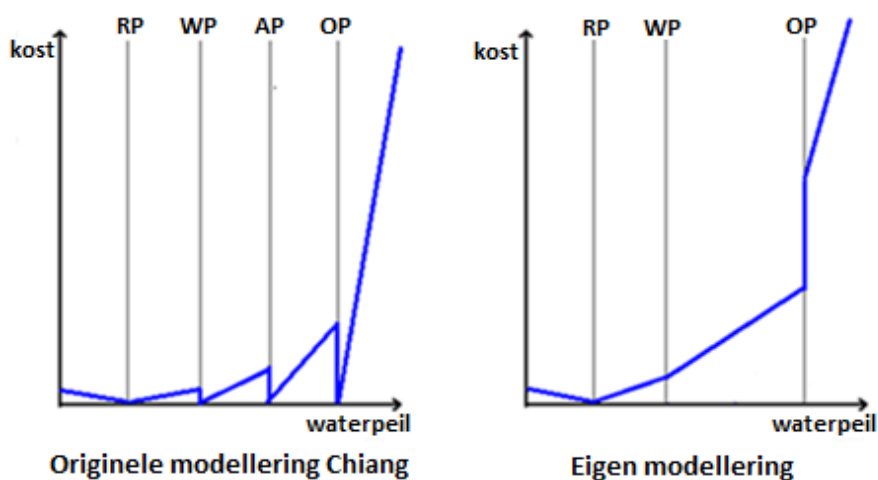
4.5.1 Waakpeilen en kostfuncties

Zoals hiervoor reeds gesteld zal de kost bepaald worden uitgaande van de waterpeilen (WL) op twintig locaties in het netwerk. Daarbij worden een aantal waakpeilen gebruikt. Er is een onderscheid gemaakt tussen drie niveaus. Deze zijn het referentiepeil (RP), het waarschuwingspeil (WP) en het overstromingspeil (OP). Het referentieniveau is het laagst gelegen peil waar naar gestreefd wordt in normaal regime. Wanneer het waterpeil toeneemt zal op een bepaald moment het waarschuwingspeil bereikt worden. Dit zal in realiteit een aanduiding zijn dat de rivier stilaan naar zijn maximale peil gaat en waakzaamheid geboden is. Stijgt het waterpeil nog verder, dan zal het overstromingspeil bereikt worden. Bij overschrijding van dit peil zal de rivier uit zijn oevers treden en op die manier financiële schade veroorzaken. In de modellering van [Chiang, 2013] werd verder ook nog gebruik gemaakt van het alarmpeil (AP) wat gelegen is tussen het waarschuwingspeil en het overstromingspeil. In deze modellering is dit echter niet beschouwd aangezien dit peil op veel locaties overeenkwam met het waarschuwingspeil en getracht werd de kostberekening zo eenvoudig en transparant mogelijk te houden. De waarden voor de verschillende waakpeilen zijn terug te vinden in Bijlage C.

Bij het opstellen van de kostfuncties is gekozen voor een monotoon stijgend lineair verloop tussen het referentiepeil en het overstromingspeil. Dit is een logische keuze aangezien in de

praktijk ook geen plotse toename in de kost te verwachten is zolang de rivier niet buiten haar oevers treedt. Wanneer het overstromingsniveau echter overschreden wordt, voelt men intuïtief aan dat de kost sterk zal toenemen. In het model is dan ook een sprong in de kostfunctie voorzien bij overschrijding van het overstromingspeil. De kost veroorzaakt door het water tot net onder het overstromingspeil zal op dat moment vermenigvuldigd worden met een factor twee. Als de waterhoogte nog verder blijft stijgen, zal de kost opnieuw lineair toenemen.

Het feit dat de kostfuncties in het originele model van Chiang geen monotoon stijgend verloop kenden, was naast de complexiteit van de berekeningsmethode één van de voornaamste redenen om dit eigen kostenmodel te ontwikkelen. Figuur 23 vergelijkt het verloop van de kost in functie van het waterpeil in het originele model van Chiang (links) en in de modellering in dit onderzoek (rechts).



Figuur 23: Vergelijking van het verloop van de kostfuncties in het originele model van Chiang (links) en in dit onderzoek (rechts)

Het is zeer onwenselijk dat de dijken rond de wachtbekkens zouden overstromen. Dijken zijn immers zeer gevoelig voor overtopping. Dit is dan ook de meest voorkomende oorzaak van dijkfaling. Daarom wordt er voor de waterpeilen ter plaatse van de wachtbekkens een extra strafkost opgelegd voor het overschrijden van het overstromingspeil. Deze strafkost is zodanig vastgelegd dat deze zeer hoog is ten opzichte van de andere kosten waardoor deze een uiterst belangrijke invloed heeft. Voor de andere locaties is de strafkost gelijk aan nul.

Om regelprioriteiten te kunnen opleggen moet het verloop van de kostfunctie voor elk van de twintig geselecteerde waterpeilen verder gespecificeerd worden. Op sommige van deze plaatsen zullen overstromingen immers tot meer schade leiden dan op andere plaatsen. Dit wordt gedaan door gewichtsfactoren op te stellen die de helling van de curve tussen de verschillen referentieniveau's bepalen, zie paragraaf 4.5.2.

Om de kosten op verschillende locaties op een correcte manier tegen elkaar te kunnen afwegen zijn de kostfuncties telkens relatief uitgedrukt ten opzichte van het verschil tussen de waakpeilen die net onder en boven het huidige waterpeil gelegen zijn. Deze herschaling vindt plaats om de relatieve belangen van ieder punt tot de totale kost via de gewichten overzichtelijk te kunnen modelleren en bijsturen. Tabel 3 geeft de algemene kostfuncties weer, afhankelijk van de positie van het waterpeil. Hierbij valt nog op te merken dat dezelfde

gewichten gebruikt worden net onder en net boven het referentiepeil. Onder het referentiepeil worden deze echter nog vermenigvuldigd met een factor 0,8.

Tabel 3: Algemene kostfuncties afhankelijk van de positie van het waterpeil

Positie waterpeil (WL)	Kostfunctie
Boven overstromingspeil (OP)	$(\text{Gewicht_RP} + \text{Gewicht_WP}) * 2 + (\text{WL} - \text{OP}) * \text{Gewicht_OP} + \text{Strafkost}$
Tussen waarschuwingspeil (WP) en overstromingspeil (OP)	$(\text{WL} - \text{WP}) / (\text{OP} - \text{WP}) * \text{Gewicht_WP} + \text{Gewicht_RP}$
Tussen referentiepeil (RP) en waarschuwingspeil (WP)	$(\text{WL} - \text{RP}) / (\text{WP} - \text{RP}) * \text{Gewicht_RP}$
Onder referentiepeil (RP)	$ \text{WL} - \text{RP} * \text{Gewicht_RP} * 0,8$

4.5.2 Gewichten

Voor de bepaling van de gewichten in bovenstaande kostfuncties is uitgegaan van enkele principes. Zo geldt op iedere locatie: $\text{Gewicht_OP} > \text{Gewicht_WP} > \text{Gewicht_RP}$. Een kleine stijging van het waterpeil zal dus een grotere stijging in de kost veroorzaken wanneer het waterpeil reeds hoog is dan wanneer het waterpeil nog laag is. De helling van de curve zal dus telkens toenemen wanneer één van de waakpeilen wordt overschreden.

De gewichten Gewicht_OP zijn zodanig vastgelegd dat de meest overstromingsgevoelige gebieden in het model de grootste kost zullen veroorzaken indien ze overstroomd worden. Deze gewichten zijn bepaald uitgaande van cijfers van de uitbetaalde schade na de overstroming van 1998. Verder werd ook gekeken naar locaties waar in 1998 geen overstromingen hebben plaatsgevonden maar waar toch een grote schade zou ontstaan indien er een overstroming zou plaatsvinden. Deze gewichten worden weergegeven in Tabel 4. Hierbij kan opgemerkt worden dat vooral de gewichten van de wachtbekkens (WL5, WL6, WL7, WL8, WL9, WL19) zeer hoog zijn, omdat deze absoluut niet mogen overstromen. Daarnaast is ook het gewicht helemaal afwaarts in Diest (WL20) hoog ten opzichte van de andere waterpeilen die geen wachtbekken voorstellen, omdat overstromingen in een stad gepaard gaan met veel waterschade.

Tabel 4: Gewichten voor het waterpeil boven het overstromingspeil

Waterpeil	Locatie	Gewicht_OP	Waterpeil	Locatie	Gewicht_OP
WL1	DemOpw	260	WL11	MondGete	300
WL2	Velpe	260	WL12	MondVI	300
WL3	BegOpw	200	WL13	K31Opw	350
WL4	HerkOpw	300	WL14	ZwaOpw	320
WL5	Resch1	10000	WL15	Vlootgr	250
WL6	Resch2	10000	WL16	K31Afw	280
WL7	Resch3	10000	WL17	Begijnenb	200
WL8	Resch4	10000	WL18	Leugeb	300
WL9	ReWeb1	10000	WL19	Leigracht	10000
WL10	K7afw	300	WL20	DemAfw	600

Op basis van voorgaande gewichten zijn ook de andere gewichten bepaald. Deze zijn terug te vinden in Bijlage D.

Hierbij is rekening gehouden met de regelobjectieven zoals die in paragraaf 3.1.2 zijn geformuleerd. Indien er veel neerslag valt, is het wenselijk om de rivierpanden te laten vollopen tot aan hun waarschuwingspeil. Het is immers niet nodig om bij de minste regen steeds gebruik te maken van de wachtbekkens. Indien de waarschuwingspeilen bereikt worden, mogen de wachtbekkens gevuld worden. Daartoe moeten de gewichten Gewicht_RP van de wachtbekkens dus groter zijn dan die van de gewone rivierpanden, maar kleiner dan de gewichten Gewicht_WP van de rivierpanden. Ook de gewichten Gewicht_WP van de wachtbekkens moeten kleiner zijn dan die van de rivierpanden, zodat eerst de wachtbekkens verder gevuld worden tot hun overstromingspeil en dan pas de rivierpanden. Daarnaast zijn deze gewichten eveneens opgesteld met als doel eerst het Schulensmeer te vullen en dan pas de Webbekom. Het vullen van het binnenbekken gaat ook telkens voor op het vullen van het buitenbekken.

Wanneer de bui echter voorbij is en het water overal opnieuw voldoende laag staat, is het belangrijk dat zowel het Schulensmeer als de Webbekom zo snel mogelijk leeg geraken om een eventuele volgende bui te kunnen opvangen. Eerst moeten de waterpeilen in de rivierpanden echter weer zakken tot onder hun waarschuwingspeil. Daarna moeten de wachtbekkens helemaal geledigd worden tot aan hun referentiepeil. Daarom moeten de gewichten Gewicht_WP en Gewicht_RP die horen bij de waterpeilen van de wachtbekkens relatief hoog zijn ten opzichte van de gewichten Gewicht_RP horend bij de rivierpanden. Hierbij wordt de Webbekom eerst geledigd en dan pas het Schulensmeer. Daarnaast worden de buitenbekkens voor de binnenbekkens geledigd. Tot slot moeten de waterpeilen in de rivierpanden zakken naar hun referentiepeil. De gewichten moeten zich bij het ledigen dus hetzelfde verhouden als bij het vullen om aan de regelprioriteiten te voldoen.

Kalibratie en optimalisatie van de gewichten is gebeurd gebruik makend van de historische gebeurtenis van september 1998.

4.5.3 Operatiekost

Naast een kostfunctie voor de waterpeilen wordt er vaak, zo ook in het onderzoek van Chiang, een kost toegekend aan het bewegen van de kleppen, de operatiekost genaamd. Doel hiervan is om het bewegen van de kleppen binnen de perken te houden. Het is immers wenselijk om weinig schommeling te krijgen in de klepstanden, zeker wanneer er weinig schade verwacht wordt. Daartoe wordt een vaste kost ingerekend wanneer het niveau van een stuw verandert ten opzichte van de vorige stap. Deze kost zal relatief hoog zijn wanneer alle waterpeilen laag staan, wat er toe zal leiden dat de stuwen in die situatie weinig worden versteld. De sturing is op dat moment toch minder belangrijk. Wanneer de waterpeilen echter hoog staan, is het minder belangrijk dat de stuwen vaak moeten worden versteld als op die manier overstromingen vermeden of beperkt kunnen worden. Op die momenten zal er dus een lagere operatiekost worden aangerekend.

In dit onderzoek zijn bij het genereren van de reeksen klepstanden echter al verscheidene maatregelen genomen om het fluctueren van de klepstanden te beperken. Een aantal van deze maatregelen zijn terug te vinden bij het aanmaken van de reeksen klepstanden. Zo

wordt hierbij een grote randomstap gebruikt zodat duidelijke trends bekomen worden in plaats van schommelende verlopen, is een filtering toegepast en is een minimale verandering van de klepstand van 5cm opgelegd. Daarnaast is bij een overgang voorzien bij de overgang naar een ander beste geval en moet een nieuw beste geval 2% beter zijn dan het vorige beste geval, zodat het continu afwisselen tussen de twee evenwaardige gevallen voorkomen wordt. Daarom is er voor gekozen om deze operatiekost hier niet in rekening te brengen en het kostenmodel zo eenvoudig mogelijk te houden. Deze operatiekost werd wel geprogrammeerd, maar niet geactiveerd, zodat indien gewenst deze kost in verder onderzoek eenvoudig in rekening kan gebracht worden.

4.6 Analyse voorspellingen

In het blok 'Analyse voorspellingen' wordt nagegaan welk van de beschouwde gevallen tot de laagste kost leidt. De input bestaat uit de aangelegde reeksen klepstanden en de totale kost voor elk geval. Deze worden dan aan elkaar gekoppeld en gesorteerd volgens toenemende kost. De eerste klepstand van elke reeks van het beste geval wordt dan als output doorgegeven om deze de volgende regelstap in het hoofdmodel aan te leggen. Daarnaast worden ook de reeksen klepstanden van de 40 beste gevallen doorgegeven naar 'MPC&GA' om de volgende regelstap opnieuw te worden doorerekend.

Om het steeds afwisselen tussen twee beste gevallen te vermijden wordt vóór het sorteren van alle gevallen de totale kost van het beste geval van de vorige regelstap vermenigvuldigd met een factor 0,98. Hierdoor moet een ander geval 2% procent beter zijn dan het vorige beste geval vooraleer er wordt overgeschakeld naar de nieuwe beste. Deze waarde is arbitrair vastgelegd uitgaande van een aantal simulatieresultaten en voorziet in een evenwicht tussen het bekomen van een goede benadering en het verkrijgen van een geleidelijk verloop van de klepstanden.

4.7 Evaluatie van het model

Bij het programmeren van het model werd heel wat aandacht besteed aan de rekentijd. De grootste winst werd hierbij behaald door het toepassen van parallel computing zodat verschillende gevallen tegelijkertijd konden worden doorerekend. Daarnaast werd ook met behulp van efficiënt programmeren, zoals het vrijmaken van het geheugen en preallocatie van matrices, geprobeerd het model sneller te maken. Zo werd de rekentijd om één keer het MPC-GA-algoritme met 200 gevallen uit te voeren gereduceerd van 6 minuten naar 28 seconden (PC: Quadcore i7, 64bit, 3,4GHz). Tabel 5 geeft een overzicht van de rekentijd per taak. Hieruit blijkt dat het leeuwendeel (79%) van de rekentijd van het doorrekenen van een geval bij de simulatie in het Demermodel ligt. Vervolgens gaat ook een belangrijk deel naar de kostberekening (18%). De resterende 3% wordt gebruikt voor het genereren van de reeksen klepstanden en het sluiten van het MPC-model. Dit laatste lijkt een kost die makkelijk vermeden kan worden, doch deze sluiting is noodzakelijk voor de goede werking van het algoritme. Bij het genereren van de reeksen klepstanden kan onderscheid gemaakt worden tussen het genereren van een nieuw, semi-random geval en het overnemen van een beste geval uit de vorige regelstap. Dit tweede neemt minder rekentijd in beslag dan het eerste, maar het verschil ten opzichte van de totale rekentijd is slechts een peulenschil. Tot slot kan nog worden opgemerkt dat de totale rekentijd per regelstap 133,2s zou bedragen wanneer de 200 gevallen achter elkaar worden uitgerekend. Door het toepassen van parallel

computing zullen de vier kernen tegelijkertijd kunnen werken. Hierdoor reduceert de rekentijd met een factor 5. Samen met de eenmalige rekentijd van 0,16s om de beginvoorwaarden in het MPC-model in te stellen leidt dit tot een totale rekentijd van iets meer dan 28 seconden.

Tabel 5: Overzicht van de rekentijd per taak in het MPC&GA-blok

Taak	Rekentijd [s]	
Instellen beginvoorwaarden in MPC-model	0,16	
Parallel MPC-GA-algoritme (200 gevallen)	28,07	
	Semi-random geval	Geval overnemen
1 geval	0,67	0,65
1. Reeks klepstanden genereren	0,019	0,0016
2. Simulatie in MPC-model	0,52	
3. MPC-model sluiten	0,012	
4. Kostberekening	0,12	

Ondanks deze serieuze verbetering bleef de rekentijd echter een probleem. Het nam immers nog steeds veel tijd in beslag om lange simulaties met veel gevallen door te rekenen. Om dit probleem te beperken werd het model uitgebreid met de mogelijkheid om in het begin van de simulatie de vaste regels aan te leggen. Voor het begin van de piek van de regenbui zal het verschil in kost tussen de vaste regels en de intelligente sturing immers beperkt zijn. Zodoende kan een deel van de gebeurtenis doorgerekend worden met de vaste regels wat een enorme besparing van de rekentijd met zich meebrengt. Daarnaast worden op die manier correcte beginvoorwaarden bekomen. De MPC-GA-sturing is geactiveerd op een moment dat het begin van de bui zich nog verder in de toekomst dan de controlehorizon bevindt. Dit laat het model toe om te anticiperen op de toekomstige neerslag.

Tijdens het programmeren is geprobeerd om het model zo transparant en adaptief mogelijk te maken. Zo werd heel de code parametrisch geschreven waardoor eenvoudig van regelstap kan veranderd worden. Daarnaast kan ook vlot gespeeld worden met het aantal beschouwde gevallen, het aantal bijgehouden beste gevallen, de controlehorizon, ...

Gedurende de programmeerfase van dit onderzoek is het model van de Demer een aantal keer vernieuwd. De implementatie hiervan duurde echter nooit lang, aangezien dit model in aparte blokken zit. De nodige variabelen dienden gewoon op de juiste plaats ingeladen en uitgeschreven te worden. De implementatie van een ander riviernetwerk dan de Demer is hiermee vergelijkbaar. Deze implementatie zou echter iets meer werk zijn, maar zou toch relatief beperkt blijven. De hele structuur van het model kan immers universeel gebruikt worden. Aanpassingen die niet te vermijden zijn bij het implementeren van een nieuw netwerk zijn de dimensies van de matrices die afhangen van de karakteristieken van het netwerk en de kostberekening. Wellicht zal de kalibratie van dit laatste het meeste tijd vergen. De hoofdstructuur en de kern van het model kunnen dus blijvend ingezet worden, voor elk riviernetwerk.

4.8 Conclusie

In dit hoofdstuk is de opbouw en werking van het geïntegreerd model beschreven. Hierbij is uitgegaan van het conceptueel model van Meert [2012], waarop een aantal aanpassingen zijn doorgevoerd. Deze bestonden uit het aanmaken van een extra bak voor de Begijnenbeek om een correcte sturing van de stuwen te garanderen, het vergroten van de bak van de Velpse om instabiliteiten tegen te gaan en het doortrekken van de hypsometrische curven zodat het waterpeil bij toenemend volume steeds blijft toenemen en niet afgeknot wordt.

Vervolgens is dit model uitgebreid met de MPC-techniek in combinatie met een genetisch algoritme. De inspiratie hiervoor werd gehaald uit het doctoraatsonderzoek van Chiang [2013]. Het genetisch algoritme staat in voor het genereren van het verloop van de klepstanden. De regelmaat waarmee een nieuwe semi-random klepstand wordt aangemaakt is daarbij zodanig geoptimaliseerd dat de gegenereerde klepstand een bepaalde trend volgt. Om een geleidelijk verloop te bekomen worden achtereenvolgens een filtering en een discretisatie toegepast. Tot slot wordt een goede aansluiting met de huidige klepstand gegarandeerd.

Om de resultaten van de voorspellingen tijdens het MPC-GA-algoritme te kunnen vergelijken diende een kostberekening te worden opgesteld. Hiervoor werd een eigen eenvoudig en transparant systeem ontwikkeld, gebaseerd op twintig waterpeilen en bijhorende waakpeilen.

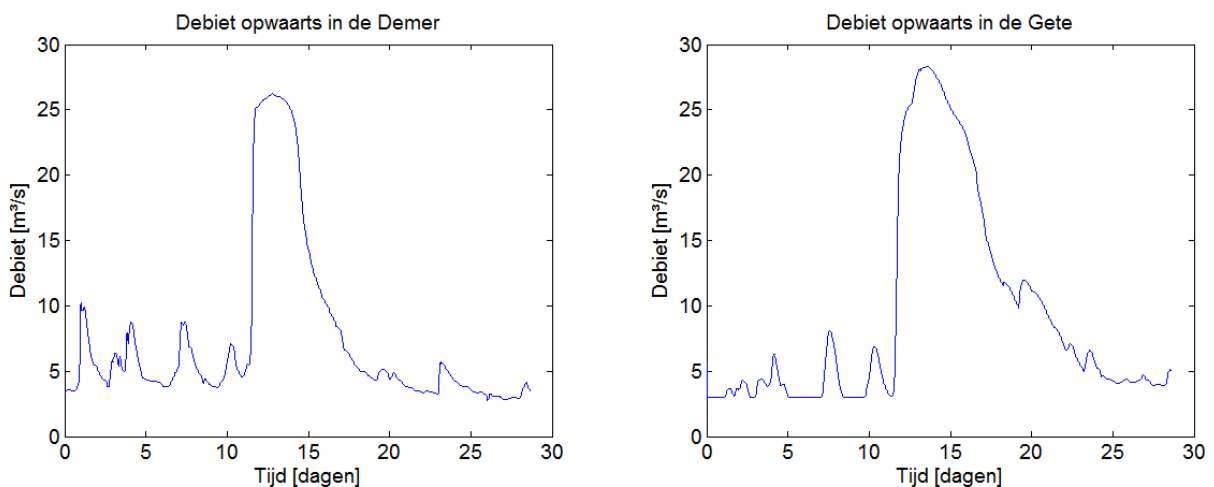
Tijdens de modellering is steeds gepoogd het model zo transparant en adaptief mogelijk te houden. Daarnaast werd ook aandacht besteed aan het verbeteren van de rekentijd. Hierdoor kan het model ook als basis dienen voor de toepassing van intelligente sturing op andere riviernetwerken.

Hoofdstuk 5: Validatie van het model

De correcte werking van het model zoals in voorgaand hoofdstuk besproken, kan nu gecontroleerd worden aan de hand van simulaties van de historische gebeurtenis van september 1998. De resultaten zijn zowel voor de vaste regeling als voor de MPC-GA-regeling vergeleken met de resultaten uit IWRS. De problemen die hierbij aan het licht komen zullen worden opgelost.

5.1 Historische gebeurtenis september 1998

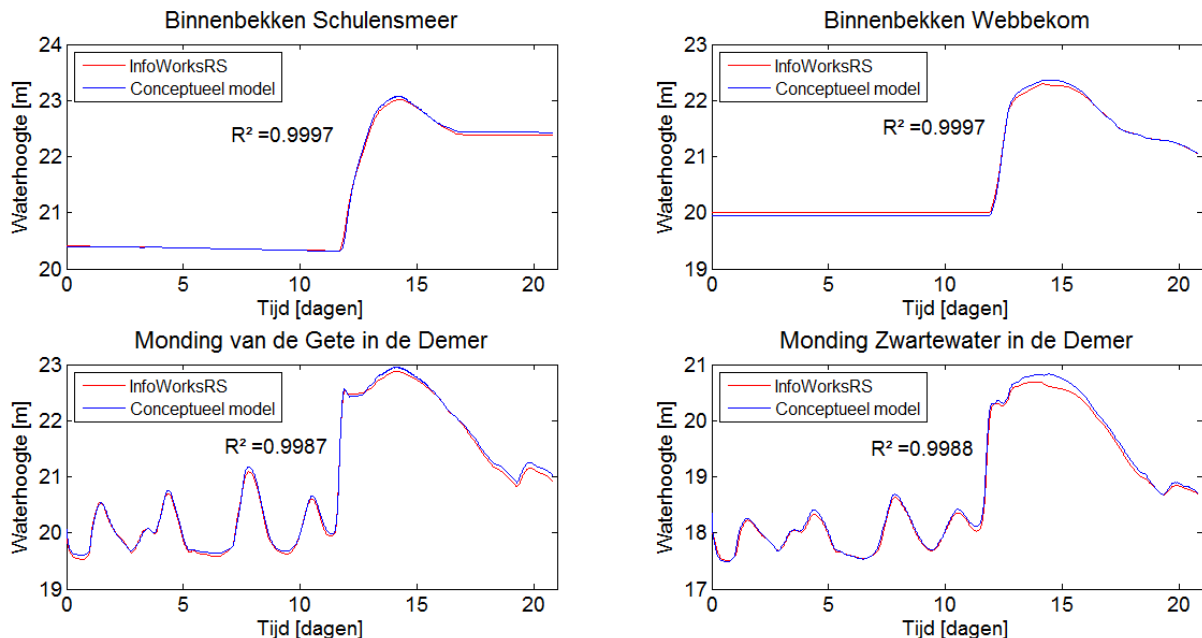
Bij de simulaties is gebruik gemaakt van de historische gebeurtenis van september 1998. Zoals in Hoofdstuk 2 reeds aangehaald is dit de enige bui van de beschikbare historische reeksen die grote overstromingen met zich meebracht. Ter herinnering: de uitbetaalde schade bedroeg 16,2 miljoen euro. Het is dus interessant om het onderzoek voor deze bui uit te voeren. De uitzonderlijkheid van deze bui blijkt uit informatie op de website van het KMI [KMI, 2013]. Zo viel tussen 1981 en 2010 in de gemiddelde septembermaand 68,9mm neerslag. Op de piek van de historische bui, op 13 september 1998, werd in negen Belgische weerstations meer dan 100mm neerslag op 24 uur tijd genoteerd, met een maximum van 147mm in Wijnegem. Ook op 14 september werden op verschillende plaatsen nog neerslaghoeveelheden van meer dan 40mm waargenomen. Het hoeft dus geen verder betoog dat het hier gaat om een zeer hevige bui. De modellering gebeurt aan de hand van de inkomende debieten in het systeem, verkregen uit InfoWorksTM-RS. Ter illustratie geeft Figuur 24 het inkomende debiet weer in het meest opwaartse punt van de Demer en de Gete in het model. Gedurende meer dan twee dagen komt een inkomend debiet van meer dan 25m³/s voor terwijl dit debiet in normale omstandigheden schommelt rond 5m³/s.



Figuur 24: Inkomend debiet opwaarts in de Demer voor de historische gebeurtenis van september 1998.

5.2 Validatie conceptueel model voor de vaste regeling

Vooraleer het geïntegreerd model wordt doorgerekend, dient te worden nagegaan hoe goed de overeenkomst is tussen het conceptuele model en het IWRS-model. Hierbij wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van de vaste regeling voor de stuwen. De resultaten voor de waterhoogte op vier locaties zijn in Figuur 25 weergegeven.



Figuur 25: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de vaste regeling

In deze figuur zijn de resultaten van het IWRS-model en het conceptueel model respectievelijk in rood en blauw weergegeven. Het is duidelijk dat beide modellen quasi perfect overeenkomen. Dit is een logische uitkomst aangezien het model onder andere aan deze gebeurtenis gekalibreerd is [Meert, 2012]. Dit volgt ook uit de waarden bekomen voor de R^2 -factor, weergegeven in de figuur. Na veertien dagen, wanneer de waterhoogten hun maximum bereiken, maakt het conceptueel model echter wel een systematische, kleine overschatting van de waterhoogte. Dit betekent dat het conceptueel model hier aan de veilige kant reageert en een overstroming in werkelijkheid waarschijnlijk minder groot zal zijn dan werd berekend.

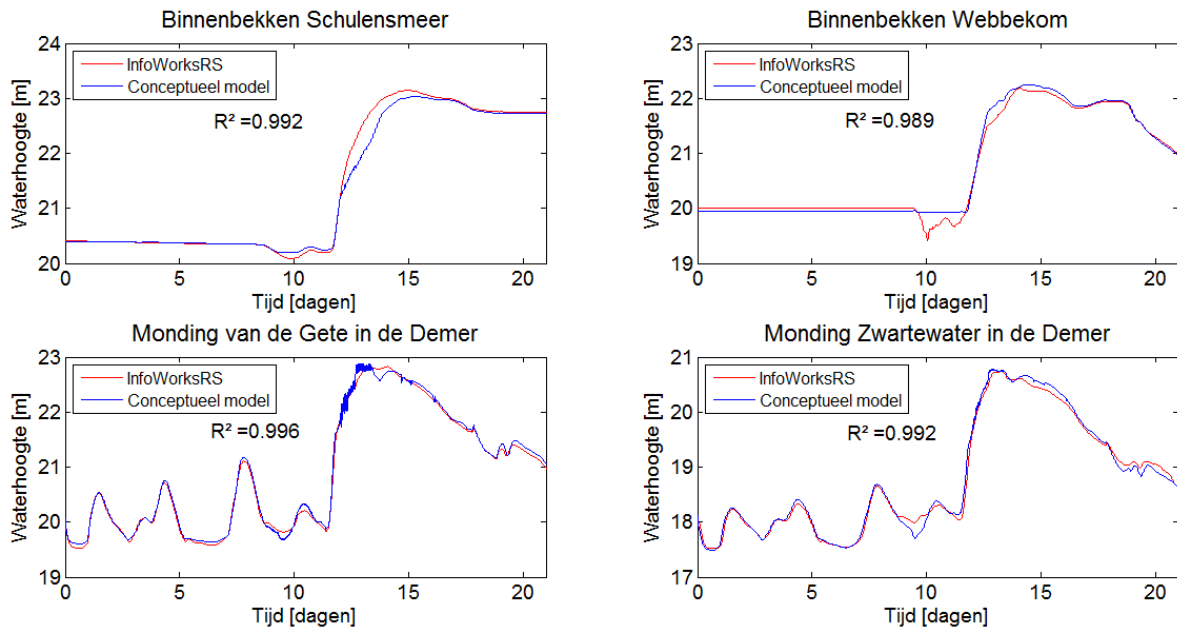
5.3 Validatie geïntegreerd model

Nu aangetoond is dat het conceptueel model goede resultaten levert voor de vaste regeling, kan de modellering met het geïntegreerd model starten. Een aantal parameters zijn hiervoor vastgelegd. Deze staan opgelijst in Tabel 6.

Tabel 6: Aangenomen parameters in het geïntegreerd model

Parameter	Waarde
Regelstap	15 minuten
Aantal bijgehouden beste gevallen	40
Totaal aantal doorgerekende gevallen per regelstap	200
Controlehorizon	48u

Bij het doorrekenen van het geïntegreerd model is het opnieuw belangrijk om na te gaan of de bekomen resultaten realistisch zijn. Daarom zijn de klepstanden die voortkwamen uit een simulatie met het geïntegreerd model eveneens aangelegd in IWRS. De waterpeilen zijn voor beide modellen voor dezelfde locaties als in voorgaande paragraaf weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 26: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling

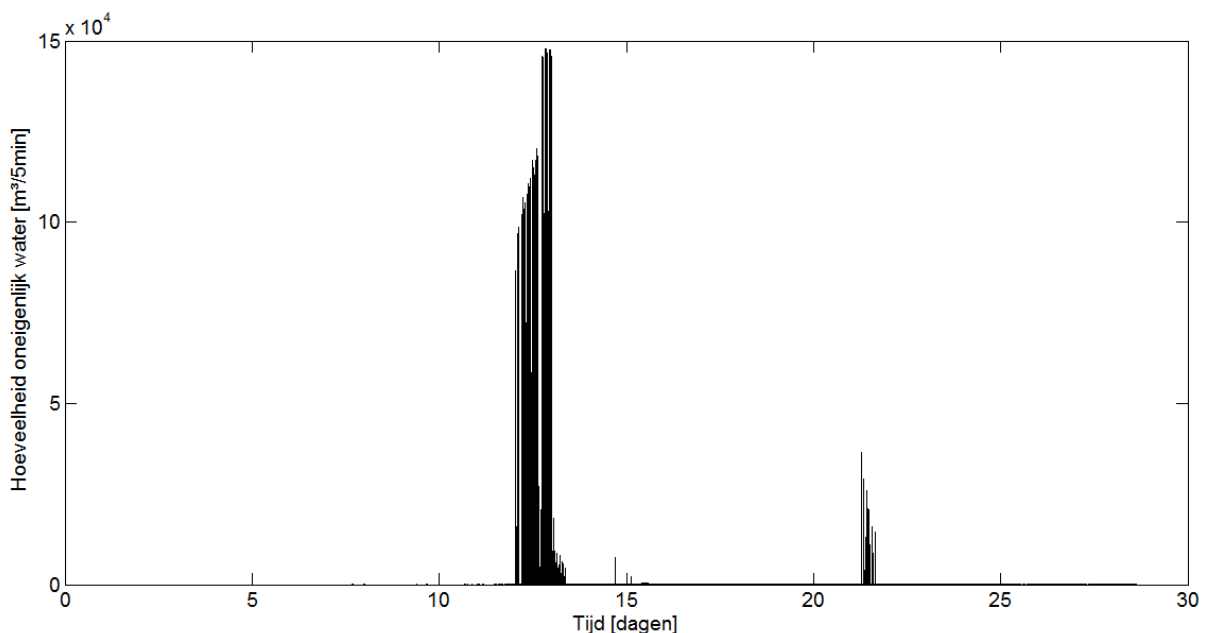
Uit voorgaande grafieken blijkt dat de benadering met het conceptueel model goed is, maar dat de verschillen toch iets groter zijn dan bij het doorrekenen van de was met de vaste regels. Dit volgt ook uit de waarden voor R^2 die wat lager liggen. Een belangrijk deel van dit verschil is te wijten aan de manier waarop de kalibratie van het conceptueel model is gebeurd. Bij het bepalen van de hypsometrische curves werden een aantal extreme gebeurtenissen beschouwd waarvoor verbanden tussen de volumes van de bakken en waterhoogtes werden afgeleid. Hierbij is echter alleen gefocust op gebeurtenissen met extreme neerslag. De hypsometrische curves zijn daardoor zeer goed bepaald voor grote waterhoogtes, maar wanneer de waterhoogte lager wordt dan tijdens de kalibratie is waargenomen stelt zich een probleem. Het laagste peil is namelijk in elke bak vastgelegd op het laagste peil dat tijdens de kalibratie daar voorkwam.

Uit voorgaande figuur blijkt dat dit een invloed kan hebben op de kwaliteit van de benadering van het waterpeil, zie de grafiek voor het binnenbekken van de Webbekom. Het waterpeil kan hier in het conceptueel model niet onder zijn initiële waarde dalen, terwijl dit in IWRS wel mogelijk is. Om zulke inconsistenties te voorkomen zou het conceptueel model ook moeten worden gekalibreerd aan periodes van extreme droogte. Dit is echter moeilijk uit te voeren in IWRS, omdat dit vaak leidt tot het vastlopen van de simulatie doordat de waterstromen te klein worden. In deze studie is hier geen verder onderzoek naar gevoerd, wat verklaart waarom dit verschil ook in latere kalibratieresultaten blijft bestaan.

Dit is echter niet het enige probleem met het conceptueel model. Het blijkt in tegenstelling tot bij de vaste regels ook geen systematische overschatting van de waterhoogte meer te maken. Om deze verschillen te verklaren en de correcte werking van het model na te gaan, is het aan een grondige controle onderworpen.

5.3.1 Waterbalans

Een eerste belangrijke controle die werd doorgevoerd is een controle van de waterbalans van het systeem. In Figuur 27 is voor iedere tijdstap de fout op de waterbalans weergegeven [$\text{m}^3/5\text{min}$]. Hieruit blijkt dat er duidelijk een probleem is aangezien op verschillende momenten in het geïntegreerd model veel water verdwijnt of wordt bijgemaakt. Dit water wordt verder benoemd als 'oneigenlijk water'. De verhouding van de totale hoeveelheid oneigenlijk water tot het totaal inkomend volume in het bekken over de volledige maand bedraagt voor dit resultaat 5,32%. In andere simulatieresultaten met het geïntegreerd model zijn gelijkaardige waarden voor dit volume oneigenlijk water te vinden. Hierbij valt op te merken dat het vooral fout gaat op het meest cruciale moment van de bui, namelijk wanneer de waterstanden het hoogst zijn. De waterbalans is eveneens gecontroleerd voor de simulatie met vaste sturing die in vorige paragraaf werd doorgerekend. Daarbij blijkt de totale hoeveelheid oneigenlijk water $1,8 \cdot 10^6 \text{m}^3$ te zijn. Dit komt overeen met 2,28% van het totaal inkomend watervolume gedurende de volledige maand. Waar de fout in de waterbalans dus eerder beperkt blijft bij toepassing van de vaste sturing, zal deze toenemen bij toepassing van de MPC-GA-sturing.



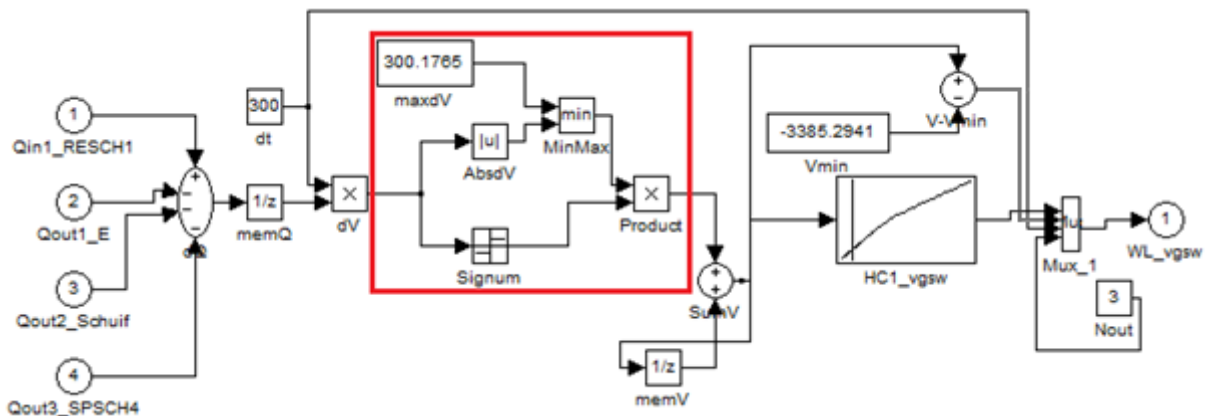
Figuur 27: Fout op de waterbalans gesommeerd over alle bakken

Uit voorgaande resultaten volgen een aantal conclusies. Vooreerst blijkt dat het geïntegreerde model in deze modellering geen correcte resultaten kan leveren door de grote fouten in de waterbalans. De oorzaak van deze afwijkingen wordt in volgende paragraaf verder onderzocht en zal in het conceptueel model blijken te liggen. Uit het verschil in de hoeveelheid oneigenlijk water in beide modellen kan verder ook nog geconcludeerd worden dat de kern van het geïntegreerd model, het MPC-GA-algoritme, waarschijnlijk wel correct werkt. Wanneer men in het achterhoofd houdt dat de fout gebeurt in het conceptueel

model blijkt voorgaand resultaat een logische uitkomst te zijn. Het algoritme zal de kost immers zo veel mogelijk beperken. Daar het conceptueel model toelaat dat water onder bepaalde omstandigheden verdwijnt, zal het algoritme zodanig sturen dat dit zo vaak mogelijk voorkomt aangezien de schade op die manier zeer laag blijft. Om er nu voor te zorgen dat met het geïntegreerd model wel goede resultaten worden bekomen, zijn de incorrectheden in de waterbalans in volgende paragraaf onderzocht en opgelost.

5.3.2 Maximale volumeverandering in het conceptueel model

De oorzaak van het probleem van waterverlies ligt zoals gesteld in de modellering van het conceptueel model. De probleemzone die de waterverliezen veroorzaakt, situeert zich bij de modellering van de bakken, de ‘blauwe blokken’ zoals gedefinieerd in Figuur 11 in Hoofdstuk 3. Een voorbeeld van de inhoud van zo’n bak wordt in Figuur 28 getoond. Het rode kader duidt de probleemzone aan.



Figuur 28: Modellering bak Vlootgracht

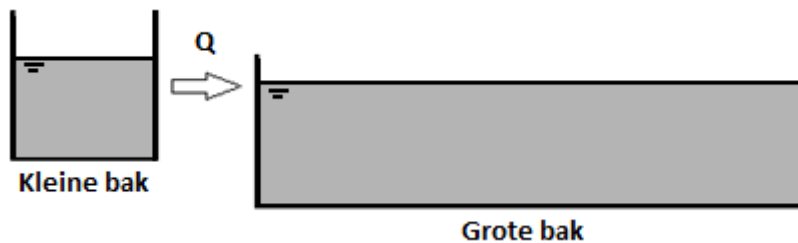
Deze omkaderde zone werd oorspronkelijk in het model ingebouwd om instabiliteiten te vermijden. Hiertoe wordt in iedere tijdstap een maximale volumeverandering aan de bak opgelegd. Op die manier kan het volume, en dus ook het waterpeil, maar in beperkte mate veranderen waardoor de bak stabiel blijft. Wanneer de berekende volumeverandering voor de bak in een bepaalde tijdstap echter groter is dan de maximale volumeverandering doet zich een probleem voor. Het totaal bijkomend volume wordt namelijk beperkt tot de maximale volumeverandering en het extra water wordt verwaarloosd. Kort samengevat zal dit als gevolg hebben dat op bepaalde ogenblikken water in het model kan verdwijnen. Dit gebeurt wanneer het verschil tussen het inkomend volume en het uitgaande volume groter is dan de maximale volumeverandering ($V_{in} - V_{uit} > maxdV$). Op andere momenten ($V_{uit} - V_{in} > maxdV$) zal dan weer water worden bijgemaakt. Zulke ingrepen zijn niet te verantwoorden tenzij dit de enige manier is om het model stabiel te krijgen en de impact op de uiteindelijke resultaten niet significant is.

Uit bovenstaande uiteenzetting blijkt dat de gevolgen van het vastleggen van een maximale volumeverandering niet te verwaarlozen zijn en een aanpassing aan het model zich opdringt. Een eerste oplossing bestaat uit het verkleinen van de tijdstap. Wanneer de stap namelijk voldoende klein wordt gekozen, zal de volumeverandering beperkt blijven en zal bovenstaand probleem opgelost zijn. Dit is voor dit onderzoek echter geen optie aangezien het een belangrijke toename van de rekentijd zou inhouden. Op lange termijn is dit wel de te

volgen piste, mits hiervoor voldoende rekenkracht beschikbaar is of de software geïmplementeerd kan worden in een efficiënter rekenprogramma zoals bijvoorbeeld C. Een tweede oplossing, dewelke in dit onderzoek gevolgd werd, is om geen rekening te houden met de maximale volumeverandering. Dit zal echter leiden tot instabiliteiten, wat in de volgende paragraaf besproken wordt.

5.3.3 Instabiliteiten

Wanneer geen rekening gehouden wordt met de maximale volumeverandering zal dit als gevolg hebben dat instabiliteiten op verschillende manieren kunnen ontstaan en in belangrijke mate zullen voorkomen bij bakken met een klein volume, verder 'kleine bak' genoemd. Volgend voorbeeld verduidelijkt hoe dergelijke instabiliteiten kunnen ontstaan. In de configuratie in Figuur 29 is een systeem met twee bakken weergegeven: een kleine bak opwaarts en een bak met een groot volume, een 'grote bak', afwaarts.

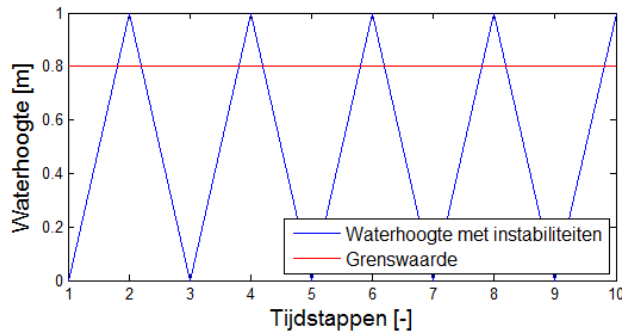


Figuur 29: Voorbeeld van een configuratie met kleine en grote bak die mogelijk leidt tot instabiliteiten

Iedere tijdstap wordt het debiet dat van de kleine naar de grote bak stroomt berekend uitgaande van de waterhoogtes in de bakken. Vervolgens kan daaruit de volumeverandering worden bepaald. De tijdstap in het model bedraagt 5 minuten en dus is het volume [m^3] gelijk aan het debiet [m^3/s] vermenigvuldigd met 300 seconden. Deze volumeverandering zal er nu voor zorgen dat het waterniveau in de kleine bak daalt en in de grote bak stijgt. De kleine bak heeft echter een veel kleiner volume dan de grote bak. Als gevolg daarvan kan het waterpeil in de kleine bak sterk afnemen terwijl de stijging in de grote bak beperkt blijft. Wanneer de daling van het waterpeil in de kleine bak zodanig groot is dat het waterpeil er lager wordt dan in de grote bak zal in de volgende stap water van de grote naar de kleine bak terugstromen. Dit proces kan zich blijven herhalen en zo een instabiliteit in het systeem veroorzaken. Het probleem kan zich overal stellen waar een kleine bak in het systeem voorkomt doordat een beperkte volumeverandering er een grote verandering in het waterpeil kan veroorzaken. De grootte van de bakken bepaalt echter de eigenheid van het systeem en kan dus niet zomaar gewijzigd worden. Zoals reeds gesteld kan ook de tijdstap niet verkleind worden om de rekentijd binnen de perken te houden.

Daarom wordt eerst gekeken naar de gevolgen indien er voor gekozen zou worden om de maximale volumeverandering weg te laten en gewoon door te rekenen met instabiliteiten. Hierbij zullen zowel in het hoofdmodel als in het voorspellingsmodel exact dezelfde schommelingen voorkomen en het programma kan hier dus rekening mee houden door zodanig te sturen dat de piekwaarden onder het overstromingspeil blijven. Daarnaast bezit het MPC-GA-algoritme ook een zelfcorrigerend vermogen tegen deze instabiliteiten. Op het moment dat de kost voor de verschillende gevallen wordt berekend, zullen de gevallen die grote schommelingen veroorzaken immers vaak ook tot de grootste kost leiden. Wanneer door instabiliteiten op bepaalde plaatsen het overstromingspeil of één van de andere

waakpeilen overschreden wordt, zal dit namelijk een belangrijke meerkost veroorzaken. Dit heeft te maken met de definitie van de kostfuncties uit Hoofdstuk 4. Wanneer het waterpeil bijvoorbeeld evolueert als in Figuur 30 zal door de instabiliteiten in de helft van de tijdstippen de grenswaarde van het waakpeil overschreden worden. Doordat de kost sneller toeneemt boven deze waarde dan eronder zal het gemiddelde van de kost voor een waterhoogte in de piek en een waterhoogte in het dal groter zijn dan de kost voor het aanhouden van de gemiddelde waterhoogte.



Figuur 30: Waterpeil tijdens een instabiliteit

Het voorbeeld van Figuur 30 zal vaak blijken voor te komen aangezien de sturing er voor zal zorgen dat de grenswaarde zo kort mogelijk wordt benaderd. Deze gevaarlijke situatie wordt dus opgezocht. De gevallen met minder instabiliteiten hebben lagere piekwaarden waardoor de kans op het overschrijden van de grenswaarde sterk vermindert en de kost vaak lager zal zijn.

Het doorrekenen van het model met instabiliteiten gaat samen met een aantal belangrijke nadelen. Doordat de piekwaarden een aantal centimeter hoger zullen uitsteken dan de eigenlijke gemiddelde waarde van de waterhoogte, zal op die manier een gedeelte van de berging verloren gaan. Om de kost te beperken zal het algoritme namelijk proberen de pieken onder de grenswaarde te houden. Een tweede nadeel is dat op deze manier in de kleine bakken mogelijks sterk fluctuerende waterpeilen zullen voorkomen.

Een mogelijke oplossing voor het probleem van de instabiliteiten is om tijdens de voorspelling een benaderende functie door de instabiliteiten te fitten. Deze volgt de trend en vermijdt dus de pieken. In het MPC-GA-algoritme kan dan uitgaande van deze trend berekend worden welk geval de laagste kost met zich meebrengt zonder dat de instabiliteiten hierbij beschouwd worden. Het voordeel hiervan is dat dankzij deze benadering in theorie beter gebruik kan worden gemaakt van de aanwezige berging. Dit zou immers betekenen dat de kostberekening voor de situatie van Figuur 30 zou gebeuren op basis van de gemiddelde waarden, die onder de grenswaarde liggen, waardoor het waterpeil hoger gestuurd kan worden, aangezien geen rekening wordt gehouden met de meerkost ten gevolge van het overschrijden van de grenswaarde door de pieken.

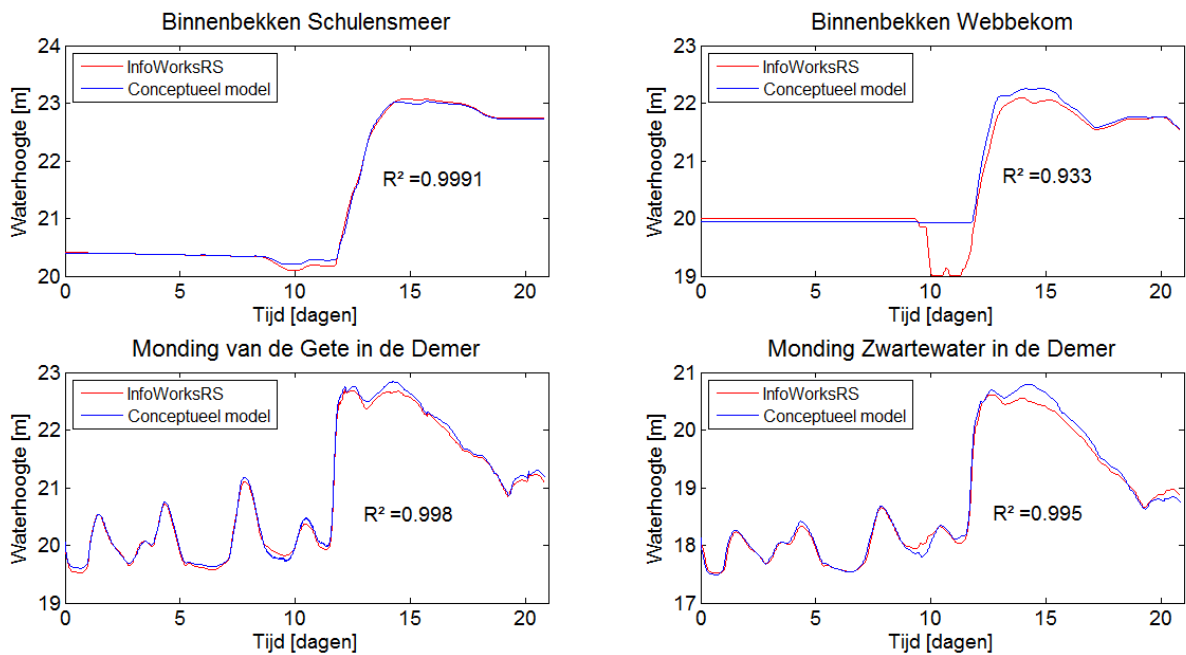
Uitgaande van deze redenering is men geneigd te besluiten om de methode met benaderende functie te gebruiken. In de analyse is echter alleen nog maar gekeken naar de situatie in het voorspellingsmodel. De optimale klepstanden moeten nog aangelegd worden in het hoofdmodel. Wanneer de methode met benaderende functie gevolgd wordt, zou dit betekenen dat een inconsistentie in het systeem wordt gebracht. Wanneer de eerste waarde van de berekende klepstanden in het hoofdmodel wordt aangelegd, zal het systeem op

dezelfde manier reageren als het voorspellingsmodel zou doen zonder benaderende functie. Het wordt dus instabiel wanneer dit in het voorspellingsmodel het geval was. Wanneer het voorspellingsmodel nu een volgende keer wordt opgeroepen zullen de beginvoorwaarden gelijk zijn aan de berekende, lees instabiele, waarden uit het hoofdmodel. Hiermee werd in de vorige voorspelling echter geen rekening gehouden waardoor de berekende resultaten niet meer in overeenkomst zullen zijn met de voorspelde resultaten uit de voorgaande stap. Een mogelijke oplossing voor dit probleem bestaat in het verkleinen van de tijdstap in het hoofdmodel, maar het behouden van de tijdstap in het voorspellingsmodel. De extra rekentijd die hiermee gepaard gaat blijft immers vrij beperkt. Dit zou echter opnieuw leiden tot (beperkte) verschillen tussen beide modellen waardoor beslist is om af te stappen van deze werkwijze. Om het probleem echt op te lossen zou zowel in het hoofd- als in het voorspellingsmodel een moving average functie als benaderingsmethode moeten worden gebruikt. Dit heeft als nadeel dat dit de complexiteit van het programma zou verhogen. Daarnaast zal het gebruik van een benaderende functie er ook voor zorgen dat het zelfcorrigerend vermogen van het MPC-GA-algoritme wordt aangetast. Doordat de kost wordt bepaald op basis van de benaderende functie zal mogelijks een zeer instabiel geval als beste worden gekozen. De vraag rest dan in hoeverre deze resultaten nog betrouwbaar en in overeenkomst met de werkelijkheid zullen zijn. Bovendien zal dit op lange termijn niet de te volgen oplossing zijn waardoor verder onderzoek naar een benaderingsfunctie niet nuttig lijkt.

Concluderend kan gesteld worden dat de problemen bij het gewoon doorrekenen met instabiliteiten zullen verminderen wanneer het aantal beschouwde gevallen voldoende hoog is dankzij de aanwezigheid van het zelfcorrigerend vermogen. De te hanteren oplossing op termijn is echter om de tijdstap te verkleinen, wat gepaard gaat met een serieuze toename van de rekentijd. Dit in acht genomen is er voor gekozen om de maximale volumeverandering uit het model te verwijderen en te rekenen met instabiliteiten. De validatie van dit finaal geïntegreerd model volgt in volgende paragraaf.

5.4 Validatie finaal geïntegreerd model

De resultaten bekomen met het nieuwe geïntegreerd model, waarin de maximale volumeverandering verwijderd is, moeten gevalideerd worden met het IWRS-model. Figuur 31 geeft voor beide modellen het verloop van de waterhoogte weer voor dezelfde locaties als hiervoor. Uit deze figuur blijkt dat de resultaten van het conceptueel model een goede benadering vormen. De R^2 -waarde ligt steeds zeer dicht bij 1, wat eveneens op een goede overeenkomst duidt. Enkel bij het binnenbekken van de Webbekom is de overeenkomst minder goed door de inconsistentie ten gevolge van de manier waarop de hypsometrische curves gekalibreerd zijn, zoals uitgelegd in paragraaf 5.3. Daarnaast bevestigt de controle van de waterbalans dat er geen oneigenlijk water meer is. Hieruit kan besloten worden dat het finaal geïntegreerd model goed overeenkomt met het IWRS-model en dat de validatie van het model bijgevolg in orde is.



Figuur 31: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het finaal geïntegreerd model

5.5 Conclusie

Simulatieresultaten met het geïntegreerd model leerden dat de waterbalans niet gegarandeerd was. Dit was te wijten aan het conceptueel model waarin in elke bak de volumeverandering per tijdstap beperkt was om instabiliteiten te vermijden. Door deze maximale volumeverandering weg te halen was het probleem van de waterbalans opgelost, maar ontstonden instabiliteiten.

Er zijn twee manieren besproken om deze instabiliteiten tegen te gaan: de tijdstap verkleinen en gebruik maken van een benaderingsfunctie. Het verkleinen van de tijdstap is de oplossing die op lange termijn zeker moet worden gevolgd. Dit heeft echter belangrijke gevolgen voor de rekentijd waardoor het niet mogelijk was om alle simulaties in dit onderzoek met een kleinere tijdstap door te rekenen. Het gebruik van een benaderingsfunctie is een andere mogelijkheid, maar heeft als belangrijkste nadeel dat dit het zelfcorrigerend vermogen van het algoritme aantast. Een zeer instabiel geval kan dan mogelijk als beste worden gekozen waardoor de bekomen resultaten minder betrouwbaar kunnen zijn.

Uit bovenstaand pleidooi blijkt dat geen van beide manieren om met de instabiliteiten om te gaan ideaal is voor dit onderzoek. Er is dan ook gekozen om in de verdere hoofdstukken met het model met instabiliteiten te rekenen. Op die manier wordt het zelfcorrigerend vermogen van het model behouden en blijft de rekentijd beperkt(er). Daarnaast zal het programma de instabiliteiten in het hoofdmodel en in het voorspellingsmodel op exact dezelfde wijze doorrekenen en ontstaan er zo geen inconsistenties. Bovendien komen de simulatieresultaten met dit model goed overeen met die uit IWRS, waardoor het gebruik van dit model verantwoord is.

Hoofdstuk 6: Analyse het MPC-GA-algoritme

Na de validatie in vorig hoofdstuk zijn een aantal simulaties met het geïntegreerd model uitgevoerd. Zoals eerder aangehaald moeten hiervoor een aantal parameters vastgelegd worden:

- **Aantal beschouwde gevallen:**
Hoeveel gevallen elke regelstap doorgerekend worden. Hierbij is een geval een groep van reeksen klepstanden, één reeks voor elke regelbare stuw. Deze reeksen stellen het verloop van de klepstanden vanaf het huidige tijdstip tot aan de controlehorizon voor.
- **Regelstap:**
Het tijdsinterval waarmee de stuwen bijgesteld kunnen worden.
- **Aantal bijgehouden beste gevallen:**
Hoeveel beste gevallen bijgehouden worden om de volgende regelstap opnieuw te beschouwen.
- **Controlehorizon:**
Hoe ver het algoritme in de toekomst kan kijken om te anticiperen op voorspelde neerslag

In een eerste deel van dit hoofdstuk wordt de invloed van deze parameters nagegaan. Daarna volgt een grondige analyse van één van de bekomen simulatieresultaten en een evaluatie van de efficiëntie van het MPC-GA-algoritme. Voor al deze simulaties is de historische bui van september 1998 beschouwd. Deze was wordt gesimuleerd van 2 september 9u tot 21 september 5u met toepassing van MPC-GA vanaf 10 september 17u. Dit zorgt er voor dat de rekentijd beperkt blijft. Daarna is nagegaan of het algoritme ook goed werkt voor andere neerslagreeksen. Hiertoe is het model onderworpen aan de historische gebeurtenis van januari 2002 waarin twee pieken achter elkaar voorkomen. Deze is gesimuleerd van 15 januari 9u tot Ten slotte volgen enkele aanbevelingen ter verbetering van de vaste regels.

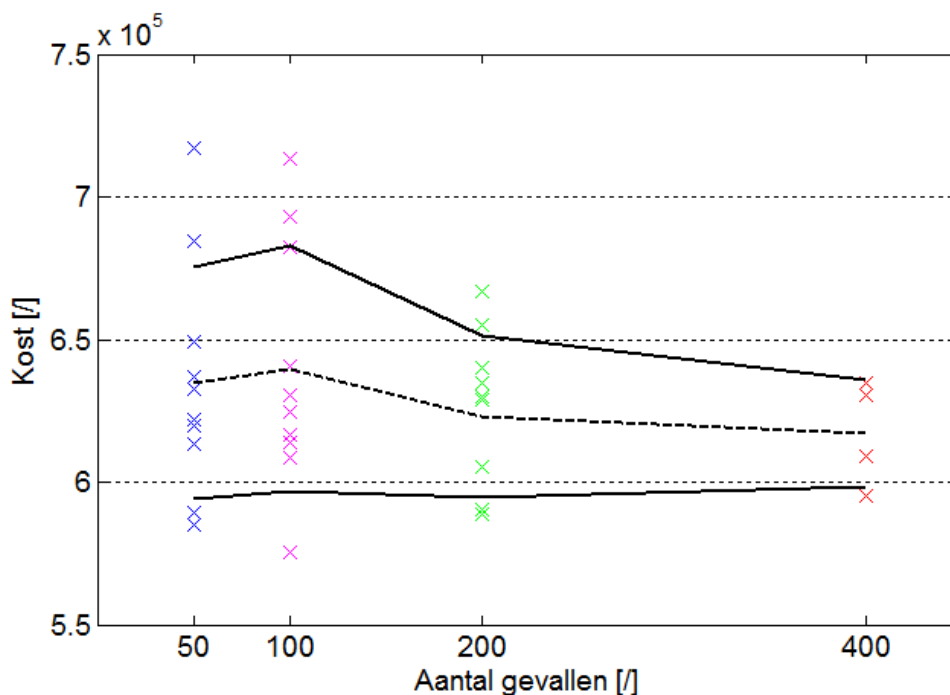
Belangrijk om op te merken is dat de neerslagvoorspelling in volgende simulaties steeds perfect is. In werkelijkheid zal hier echter onzekerheid opzitten, waardoor de bekomen toestand verschilt van de voorspelde. Dit kan een belangrijke invloed hebben op de werking van het algoritme. Hier wordt op het eind van de parameterstudie kort op ingegaan, maar is verder buiten beschouwing gelaten en dient in verder onderzoek nog te worden nagegaan.

6.1 Parameterstudie

6.1.1 Aantal beschouwde gevallen

Een eerste belangrijke modelparameter is het aantal beschouwde gevallen. Het is te verwachten dat de resultaten zullen verbeteren naarmate meer gevallen worden doorgerekend. Figuur 32 geeft de kost weer voor de verschillende simulatieresultaten. Hierbij bedraagt de regelstap 15 minuten, zijn telkens de 40 beste gevallen bijgehouden en bedraagt de controlehorizon 48 uur. De zwarte volle lijnen geven de spreiding weer, voorgesteld door één standaarddeviatie. De zwarte stippellijnen geven tot slot het gemiddelde weer. Telkens zijn de resultaten van tien simulaties weergegeven. Voor 400 gevallen zijn echter slechts 4 simulaties uitgevoerd omwille van de lange rekentijd. Er moet nog opgemerkt worden dat ten gevolge van instabiliteiten in één van de simulaties met 100 gevallen in één tijdstap het overstromingspeil in één van de wachtbekkens wordt overschreden, wat een strafkost van 10^6 veroorzaakt. In Figuur 32 is deze strafkost verwaarloosd.

Allereerst kan opgemerkt worden dat de kost voor alle simulaties lager is dan de kost voor de vaste regels, zijnde $6,7 \cdot 10^8$. Deze kost is zo hoog omdat de wachtbekkens bij deze regeling overstromen en de strafkost bijgevolg aangerekend wordt. Deze strafkost is echter geïmplementeerd zodat bij toepassing van het MPC-GA-algoritme de wachtbekkens zeker niet zouden overstromen. Het is dus niet geheel eerlijk om de vaste regeling hier op af te rekenen. Indien deze strafkost buiten beschouwing wordt gelaten bedraagt de totale kost voor de vaste regeling $1,06 \cdot 10^6$. Vergelijking van deze waarde met de bekomen resultaten levert dezelfde conclusie: de resultaten met de MPC-GA-sturing zijn steeds beter.



Figuur 32: Spreiding van de kost in functie van het aantal beschouwde gevallen (regelstap 15 minuten, 40 bijgehouden besten, controlehorizon 48 uur)

Uit deze figuur blijkt ondanks het tamelijk beperkte aantal resultaten dat de spreiding afneemt naarmate het aantal beschouwde gevallen toeneemt. Dit is een logische uitkomst.

Het toevalseffect zal namelijk sterker spelen wanneer weinig gevallen worden doorgerekend. Bijgevolg is er dus een groot verschil tussen het beste en slechtste simulatieresultaat. Wanneer het aantal gevallen toeneemt convergeren de resultaten aangezien de kans op het vinden van een goed geval veel groter is. In de resultaten is naast een duidelijk afname van de spreiding ook een afname van gemiddelde kost te zien naarmate het aantal gevallen toeneemt. Het is namelijk zo dat het algoritme door de hoge kost die aan het overstromen van de wachtbekkens wordt toegekend in eerste instantie op deze locaties zal focussen. Bijgevolg zal uit de gevallen die in geen enkel wachtbekken overstromen de beste sturing voor de rest van het netwerk gehaald worden. De kans op een goede regeling stijgt naarmate deze groep groter wordt. Het beschouwen van meer gevallen zou dus normaliter tot nog betere resultaten moet leiden. Het feit dat de laagste kost gevonden is in een simulatie met 100 gevallen zal aan toeval te wijten zijn. Verder onderzoek moet uitwijzen hoe sterk de resultaten nog verbeteren wanneer veel meer gevallen worden doorgerekend. Met het huidige model en de beschikbare rekenkracht (PC: Quadcore i7 , 64bit, 3,4GHz) is het mogelijk om in een real-time simulatie 6450 gevallen te beschouwen in elke regelstap. Dit betekent dat 6450 voorspellingen kunnen worden doorgerekend gedurende één regelstap van 15 minuten. Omdat het voor dit onderzoek nodig was om veel simulaties te kunnen uitvoeren op een beperkte tijd en met een beperkte rekencapaciteit is het aantal beschouwde gevallen echter beperkt tot 200 gevallen. Hoewel de spreiding merkkelijk groter is, lag de gemiddelde kost voor de resultaten met dit beschouwde aantal gevallen niet veel hoger dan de gemiddelde kost van de resultaten met 400 beschouwde gevallen en dit terwijl de rekestijd slechts de helft bedraagt, zie ook Tabel 7. Daarnaast komen nooit overstroming in de wachtbekkens voor en worden ook de waterpeilen in de rest van het netwerk goed gestuurd. Tot slot blijkt de kost in deze simulaties steeds duidelijk lager te liggen dan bij toepassing van de vaste regels.

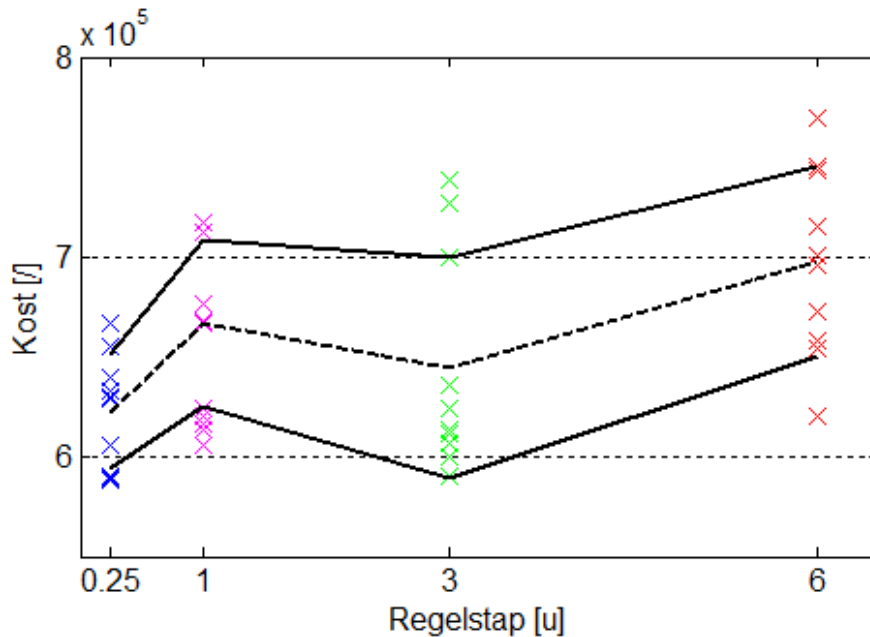
Tabel 7 geeft een overzicht weer van de benodigde rekestijd voor het doorrekenen van de was van september 1998. Hierbij kan wel nog worden opgemerkt dat het aantal beschouwde gevallen voor een real-time simulatie wel gevoelig kan toenemen door meerdere computers aan elkaar te koppelen, een krachtigere computer te gebruiken of in een andere programmeeromgeving zoals bijvoorbeeld C te werken. Er wordt verwacht dat met dit laatste een belangrijke versnelling mogelijk is. Deze implementatie kan dan ook best gebeuren in verder onderzoek.

Tabel 7: Vergelijking van de rekestijd in functie van het aantal beschouwde gevallen voor het simuleren van 12,5 dagen (300 uren) met toepassing van MPC-GA.

Aantal beschouwde gevallen	Rekestijd [uren]
50	2,3
100	4,7
200	9,3
400	18,7
6450	300,0 (real-time)

6.1.2 Regelstap

De regelstap is zoals eerder aangehaald gedefinieerd als het tijdsinterval waarmee de stuwen bijgeregeld kunnen worden. Het is de bedoeling om in de werkelijkheid de stuwen in de toekomst ieder kwartier bij te sturen tijdens real-time sturing. De regelstap zal bijgevolg 15 minuten bedragen. Toch is het interessant om na te gaan wat de invloed is van deze parameter aangezien deze een belangrijk effect heeft op de rekensnelheid. De resultaten in Figuur 33 geven de invloed weer. Daarbij zijn telkens 200 gevallen beschouwd waarvan de 40 beste gevallen elke stap zijn bijgehouden. De controlehorizon bedraagt 48 uur. De zwarte lijnen geven opnieuw de spreiding en het gemiddelde aan.



Figuur 33: Spreiding van de kost voor verschillende regelstappen (200 gevallen, 40 bijgehouden besten, controlehorizon 48 uur)

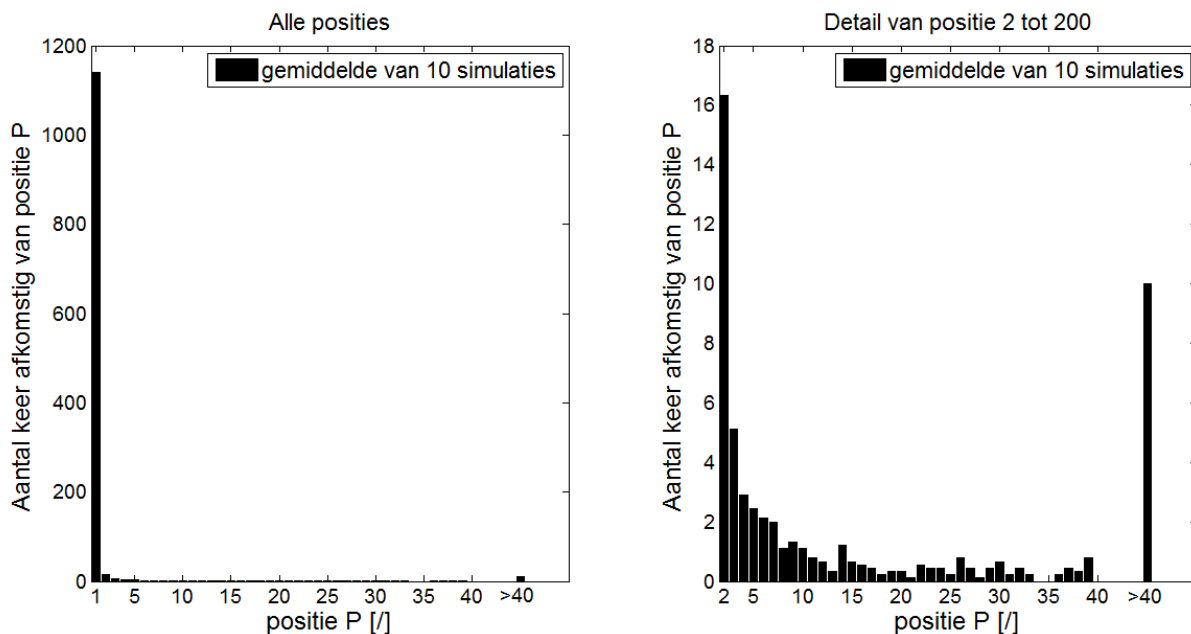
Vooreerst blijkt het MPC-GA-algoritme de overstromingen steeds beter te beperken dan de vaste sturing (kost gelijk aan $1,06 \cdot 10^6$), ook wanneer het algoritme slechts om de zes uur wordt uitgevoerd. Uit de vergelijking van de resultaten met verschillende regelstap blijkt een duidelijk verband te bestaan tussen de regelstap en de kost. De spreiding op de resultaten blijkt groter te worden wanneer de regelstap toeneemt. De verwachting dat de kost zal afnemen wanneer de regelstap daalt wordt niet helemaal ingelost doordat het gemiddelde voor de simulaties met regelstap gelijk aan 1 uur hoger ligt dan voor de simulaties met regelstap gelijk aan 3 uur. Door de grote spreiding en het beperkte aantal resultaten zal dit aan toeval te wijten zijn.

Het vergroten van de regelstap heeft een gelijkaardig effect als het beschouwen van minder gevallen. Als het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende regelstappen vergroot, daalt het vermogen om te anticiperen op de aankomende was. Hiermee hangt samen dat de optimalisatieberekening ook in totaal minder gevallen zal doorrekenen wanneer de regelstap vergroot, wat het verloop van de spreiding verklaart. Tot slot dient nog te worden opgemerkt dat het MPC-GA-algoritme er desalniettemin toch in slaagt om de waterpeilen in de wachtbekkens in iedere simulatie te beperken tot het overstromingpeil.

6.1.3 Aantal bijgehouden beste gevallen

In iedere simulatie tot nu toe werden de veertig beste gevallen uit de vorige regelstap door het programma bijgehouden en in de volgende regelstap opnieuw doorgerekend. Het idee hierachter is dat hiermee in het verleden reeds zeer goede resultaten bekomen werden waardoor de kans reëel lijkt dat ook in de toekomst hier goede resultaten uit zullen volgen.

De beschouwde gevallen zijn op ieder tijdstip in volgorde van totale kost over de volledige controlehorizon, gerangschikt in een lijst met hierbij het beste geval op de eerste positie. De klepstanden die uiteindelijk aan het hoofdmodel worden aangelegd in een bepaalde regelstap, worden dus geleverd door het geval dat op dat moment op de eerste positie staat. Het bijhouden van een geval in de lijst is bijgevolg alleen nuttig wanneer dit geval in één van de volgende regelstappen op de eerste positie komt te staan. Omdat rekentijd zeer belangrijk is en het doorrekenen van teveel gevallen uit de vorige regelstap mogelijks geen nuttige bijdrage levert, is onderzoek gevoerd naar de manier waarop een geval op de eerste positie in de lijst komt te staan. Daartoe is in iedere regelstap voor elk geval bijgehouden op welke positie in de lijst het in de vorige regelstap stond. Hierdoor is het mogelijk om na te gaan op welke positie een geval dat op een bepaald moment de eerste positie bekleedt, voor het eerst in de lijst verschenen is. Dit levert een goede indicatie voor het aantal beste gevallen dat interessant is om bij te houden. Figuur 34 toont het gemiddelde resultaat van deze berekening voor tien simulaties met 200 beschouwde gevallen, een regelstap van 15 minuten en een controlehorizon van 48 uur. Hierbij zijn de 40 beste gevallen bijgehouden. Doordat het gemiddelde genomen wordt, kunnen kommagetallen voorkomen in de figuur. In iedere afzonderlijke simulatie worden uiteraard overal discrete waarden bekomen.



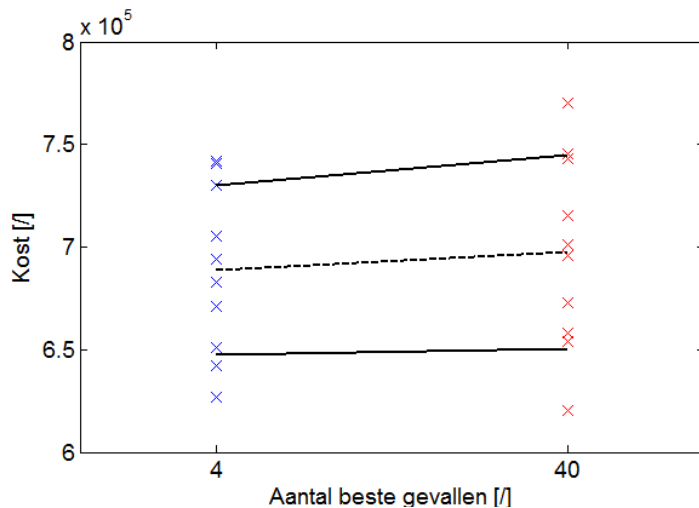
Figuur 34: Positie van gevallen die als beste voorkomen

Uit de grafiek volgt dat het beste geval meestal niet wijzigt (in 1139 van de 1200 regelstappen). Dit impliceert dat gemiddeld tijdens de hele simulatie 61 keer van beste geval wordt gewisseld. Nu blijkt dat gemiddeld tien keer hiervan (16%) de nieuwe beste een volledig nieuw gegenereerd semi-random geval uit die regelstap zal zijn. Dit komt voor wanneer de positie groter is dan 40 en is duidelijk te zien rechts op Figuur 34. Wanneer dus

van beste gewisseld wordt, is dat gemiddeld 51 van de 61 keer (84%) naar een geval dat in de vorige regelstap al tot de 40 beste gevallen behoorde. Rechts op de figuur is verder te zien dat het bijhouden van het geval op positie twee met voorsprong belangrijker is dan het bijhouden van de andere gevallen in de lijst. De waarde in de grafiek hiervoor is 16,3 terwijl deze voor positie drie slechts 5,1 bedraagt. Wanneer gerecapituleerd wordt dat de kost van een geval lager moet zijn dan de kost van het huidige beste geval vermenigvuldigd met een factor 0,98 vooraleer deze zal worden aangelegd, blijkt dit een logisch resultaat. Het is immers zeer plausibel dat een nieuw geval een iets hogere kost zal hebben dan deze herrekende waarde en bijgevolg op positie twee geplaatst wordt om dan in een volgende regelstap wel aan deze eis te voldoen en als beste geselecteerd te worden. In volgende regelstappen zal de kost immers lichtjes wijzigen ten gevolge van de platte staart, zie paragraaf 4.3.2 en volgende alinea.

Wanneer de positie toeneemt, wordt het steeds minder nuttig om het bijhorende geval bij te houden voor de volgende regelstap. De kans dat een geval van de veertigste positie in de lijst ooit op de eerste positie geraakt is dan ook bijzonder klein. Dit is immers enkel mogelijk doordat de gevallen verbeteren aan het nieuwe stuk op het einde van de controlehorizon, de rest van het geval ligt op dat moment immers vast. Hierbij wordt in herinnering gebracht dat de klepstand een constante waarde zal aannemen in de staart, dewelke steeds langer wordt naarmate het geval langer in één van de eerste 40 posities staat. Wanneer de staart van een hoog gepositioneerd geval een slechte waarde aanneemt, zal dit geval steeds slechtere resultaten leveren om uiteindelijk uit de lijst te verdwijnen, waardoor gevallen op een lagere positie kunnen stijgen. Daarnaast zal wanneer de constante staart van een laag gepositioneerd geval een zeer goede waarde aanneemt, het mogelijk zijn dat zijn positie gestaag verbetert om uiteindelijk op positie één te geraken. De kans dat dit voorkomt is echter zeer klein. Het is dus duidelijk dat het doorgeven van de 40 beste gevallen uit de vorige regelstap weinig zal bijdragen tot de kwaliteit van het algoritme, maar daarentegen voor veel nutteloos rekenwerk zal zorgen. De vier beste gevallen bijhouden lijkt dan ook meer dan voldoende. Uit voorgaande resultaten blijkt immers dat de posities twee tot vier samen verantwoordelijk zijn voor de helft van de situaties waarin één van de 40 bijgehouden beste gevallen tot op de eerste positie stijgt. Het bijhouden van slechts vier gevallen zorgt er voor dat meer rekencapaciteit vrijkomt voor het doorrekenen van nieuwe semi-random gevallen.

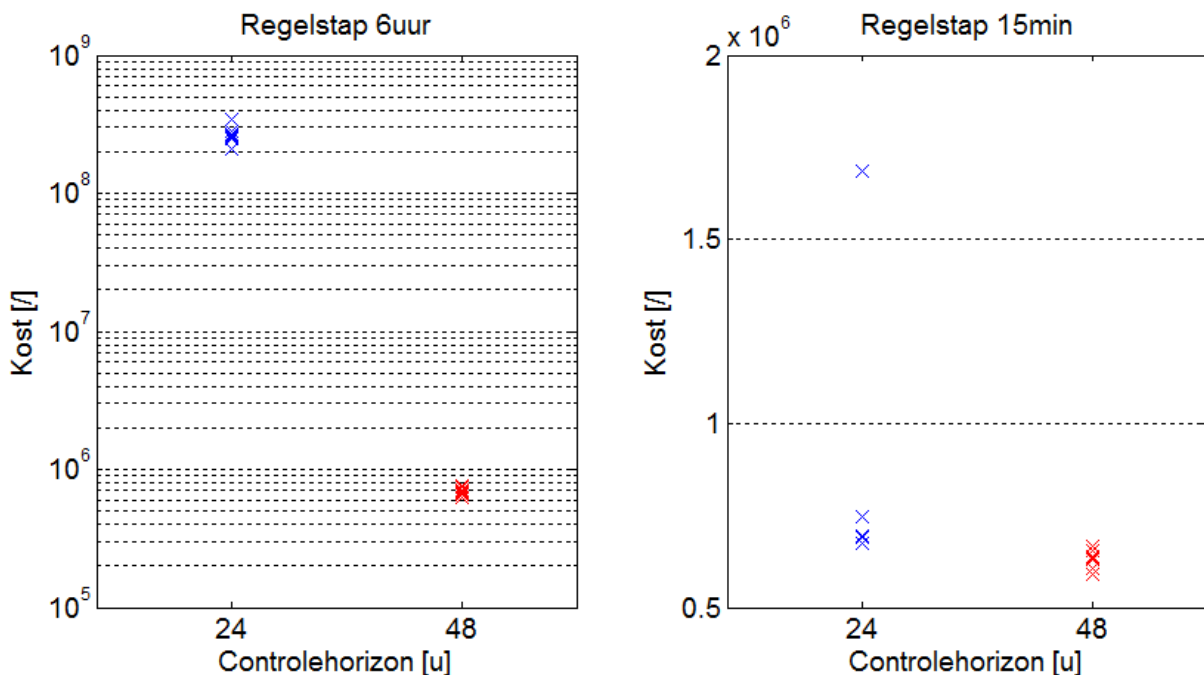
Dit is vervolgens gecontroleerd door enkele simulaties uit te voeren waarbij slechts vier gevallen bijgehouden werden in plaats van de hiervoor aangenomen 40. Figuur 35 vergelijkt de resultaten voor tien simulaties met 200 beschouwde gevallen, een controlehorizon van 48 uur en een regelstap van 6 uur. Uit deze figuur blijkt dat de spreiding kleiner is indien slechts de vier beste gevallen bijgehouden worden en dus meer nieuwe (semi-random) gevallen aangemaakt worden. De gemiddelde kost is hierbij eveneens lager dan bij 40 bijgehouden beste gevallen. Dit is in overeenstemming met de verwachtingen en dus kan gesteld worden dat de resultaten door het bijhouden van slechts vier beste gevallen licht zullen verbeteren. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het aantal beschouwde simulaties vrij beperkt is en dat om hier met zekerheid uitsluitel over te kunnen geven meer simulaties dienen te worden uitgevoerd.



Figuur 35: Vergelijking van de spreiding van de kost voor het bijhouden van 4 en 40 beste gevallen (regelstap 6 uur, 200 gevallen, controlehorizon 48 uur).

6.1.4 Controlehorizon

De controlehorizon legt vast hoe ver het algoritme in de toekomst kan kijken om rekening te houden met de voorspelde neerslag. Het gebruikt deze verrekijker met andere woorden om te kunnen anticiperen op de verwachte buien. Naarmate de controlehorizon vergroot, kan het model zich vroeger beginnen voorbereiden op de voorspelde neerslag. De verwachting is dan ook dat de resultaten in dit onderzoek zullen verbeteren naarmate de controlehorizon toeneemt, aangezien is uitgegaan van perfecte neerslagvoorspellingen. Het belang van deze vereenvoudiging zal in de volgende paragraaf besproken worden. Om de invloed van de controlehorizon na te gaan, geeft Figuur 36 een vergelijking van de resultaten met een controlehorizon van respectievelijk 24u en 48u met telkens 200 beschouwde gevallen, waarvan 40 bijgehouden besten uit de vorige regelstap. In het linkerdeel van de figuur is een regelstap van 6 uur aangenomen terwijl deze in het rechterdeel 15 minuten bedraagt.



Figuur 36: Spreiding van de kost voor verschillende controlehorizon (regelstap van 6u (links) en 15min (rechts), 200 beschouwde gevallen, 40 bijgehouden besten)

Uit de resultaten blijkt dat de grootte van de controlehorizon een erg belangrijke invloed heeft. Wanneer de controlehorizon 24 uur bedraagt en de regelstap 6 uur, zoals links in voorgaande figuur, blijkt het algoritme er in geen enkele simulatie in te slagen de waterpeilen in alle wachtbekkens onder het overstromingspeil te houden. Dit verklaart de hoge totaalkost voor deze simulaties. Bij een controlehorizon van 48 uur stelt de grote regelstap geen probleem. Wanneer een regelstap van 15 minuten gehanteerd wordt, blijkt dat in de meeste simulaties met een controlehorizon van 24 uur overstromingen in de wachtbekkens vermeden worden. Slechts in één van de vijf simulaties wordt het overstromingspeil in één van de wachtbekkens gedurende één tijdstap overschreden tengevolge van een instabiliteit. Deze belangrijke verbetering is te verklaren door het feit dat bij een regelstap van 15 minuten in totaal veel meer gevallen beschouwd worden en de kans op een goede sturing bijgevolg groter is. De resultaten met controlehorizon van 24 uur blijken echter nog steeds beduidend slechter te zijn dan die bij een controlehorizon van 48u. Daarom kan algemeen besloten worden dat het vergroten van de controlehorizon, zoals verwacht, een gunstige invloed heeft op de resultaten. Dit zorgt er immers voor dat het MPC-GA-algoritme beter kan anticiperen op de verwachte neerslag.

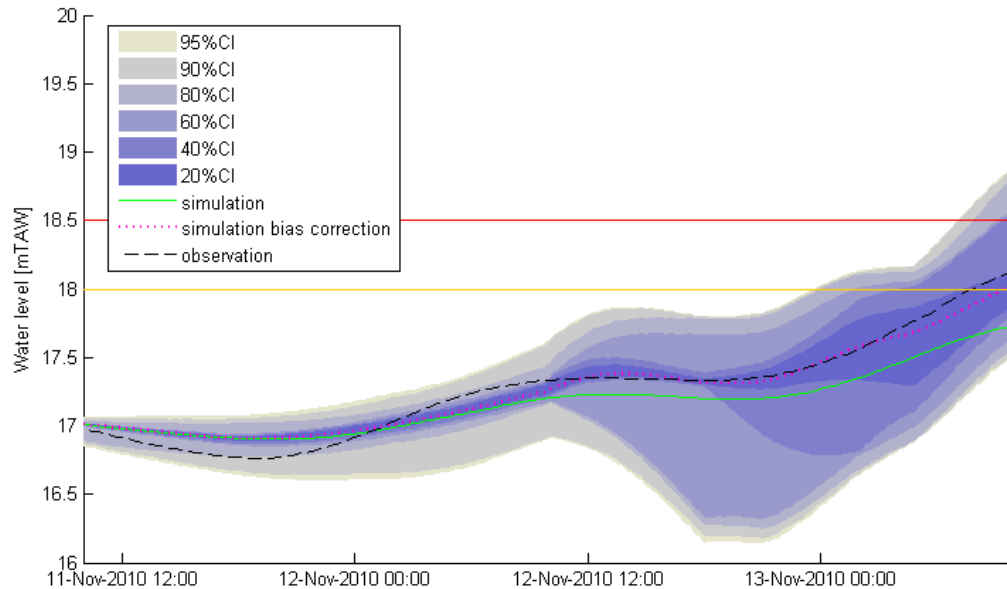
Er dient echter opgemerkt te worden dat de horizon ook niet te groot mag gekozen worden. Op die manier zou immers een geval met een zeer lage kost op het einde van de voorspellingsperiode en een hogere kost in het begin van de reeks als beste kunnen worden aangelegd. Bijgevolg zouden de eerste klepstanden niet optimaal zijn. De korte termijn is echter zeer belangrijk omdat iedere regelstap alleen de eerste klepstanden van het beste geval aangelegd worden in het systeem, waarna een nieuwe optimalisatie plaatsvindt. Daarbij komt nog dat de onzekerheid van de voorspelling in realiteit toeneemt naarmate men verder in de toekomst kijkt waardoor de resultaten op korte termijn met de grootste zekerheid bepaald zijn.

Een mogelijkheid om meer belang te hechten aan de korte termijn is het toekennen van een variabel gewicht aan de kost over de controlehorizon. Dit zou echter leiden tot een vermindering van de transparantie van de kostberekening. Bovendien wordt voorgaand probleem door het beschouwen van voldoende gevallen per regelstap vanzelf opgelost. Dit aantal benodigde gevallen is daarbij evenredig met de controlehorizon. Er zullen immers meer gevallen beschouwd dienen te worden om tot een eenduidige sturing te komen naarmate de horizon toeneemt, aangezien de lengte van de reeksen eveneens groter wordt. Bijgevolg is besloten de controlehorizon niet verder te vergroten, daarbij ook rekening houdend met effecten van onzekerheid op de neerslagvoorspelling die in een latere fase in rekening moeten worden gebracht. Dit thema wordt in de volgende paragraaf aangekaart. De controlehorizon bedraagt bijgevolg 48 uur.

6.1.5 Onzekerheid op de neerslagvoorspelling

De onzekerheid op de neerslagvoorspelling zal een erg belangrijke parameter zijn bij real-time sturing. Het implementeren hiervan in het geïntegreerd model is in dit onderzoek nog niet doorgevoerd, maar moet in een latere fase zeker gebeuren. Het verwachte effect is als volgt. Doordat de voorspelde inkomende debieten niet volledig zullen overeenkomen met de werkelijk inkomende debieten, zal het veel moeilijker zijn voor het algoritme om goed te anticiperen. De vraag die zich hierbij opdringt, is hoe groot de onzekerheden en potentiële verschillen tussen deze debieten zijn in functie van de voorspellingshorizon. Hiernaar is

reeds onderzoek verricht door Van Steenberg [2012]. Daarbij werd een casestudy rond het debietstation op de Demer te Zichem uitgevoerd voor de ontwerpbui van november 2010. De bekomen resultaten leveren een goed beeld van het te verwachten onzekerheidsinterval tot 48 uur in de toekomst. Voor het bekomen van dit resultaat werd de vaste regeling toegepast.



Figuur 37: Onzekerheid op de waterstanden in de Demer te Zichem voor de ontwerpbui van november 2010 [Van Steenberg, 2012]

Uit voorgaande figuur blijkt dat de onzekerheid op de waterstanden sterk toeneemt met de voorspellingshorizon. Dit wordt veroorzaakt door de onzekerheid op de inkomende neerslag wat onzekerheid op de inkomende debieten met zich meebrengt. Hiervoor kan een onzekerheidsinterval worden opgesteld, waarna alle potentieel inkomende debieten gekend zijn.

Een andere manier om de onzekerheid op de inkomende debieten te bepalen is met behulp van een Monte Carlo analyse. Door rekening te houden met de verwachte onzekerheden op een bepaald resultaat en de correlaties met de onzekerheid op andere tijdstippen in te rekenen, kunnen eveneens onzekerheidsintervallen worden gevonden. Hier wordt niet dieper op ingegaan. Voor meer informatie wordt naar de literatuur verwezen. De vraag is nu op welke manier het algoritme rekening moet houden met al deze mogelijkheden. Hieronder volgt een mogelijke aanpak.

Indien de reken capaciteit in de toekomst sterk toeneemt, kan men alle relevante mogelijkheden doorrekenen met voldoende gevallen, waardoor het geïntegreerd model voor ieder scenario de optimale sturing van de stuwen kan bepalen. De kost horende bij ieder scenario is dan gekend, net als de kans dat het scenario zich zal voordoen. De te volgen strategie moet hier op één of andere manier uit volgen. Een mogelijkheid daarvoor is om de kost van ieder scenario te vermenigvuldigen met de kans dat het voorkomt. Het scenario waarvoor deze waarde het hoogst is, zal dan het scenario zijn waar het meest rekening mee gehouden moet worden en waaruit bijgevolg de sturingsmethode zal volgen.

Men zou deze berekening nog verder kunnen zetten door na te gaan welk effect het aanleggen van de klepstanden uit dit scenario heeft, wanneer toch andere debieten zouden voorkomen. Doordat de klepstanden vastliggen vraagt deze berekening slechts weinig rekenkracht. Door deze effecten mee in rekening te brengen kan de strategie eventueel bijgestuurd worden of kan overgegaan worden naar de optimale klepstanden uit een ander scenario. Naar deze mogelijkheden is verder onderzoek vereist.

Daarnaast kan in het MPC-GA-algoritme zelf ook een maatregel getroffen worden om met onzekerheden om te gaan. Om er voor te zorgen dat de wachtbekkens zeker niet overstromen wanneer het inkomend debiet toch iets hoger zou zijn dan voorspeld, kan een marge ingebouwd worden door het overstromingspeil in het model kunstmatig te verlagen. Hierbij wordt wel het risico gelopen dat de bergingscapaciteit van de wachtbekkens niet optimaal benut wordt.

6.1.6 Samenvatting van de resultaten uit de parameterstudie

Op basis van voorgaande bespreking zijn de optimale parameters voor verdere simulaties bepaald. Deze zijn samengevat in Tabel 8. Uit de resultaten volgt dat het verkleinen van de regelstap en het verhogen van het aantal gevallen systematisch tot betere resultaten leidt. De regelstap is gelijk aan 15 minuten gekozen omdat dit de waarde zal zijn die in een latere fase in de praktijk zal worden gehanteerd. Om een compromis te bereiken tussen het bekomen van goede resultaten en het beperken van de rekentijd is het aantal doorgerekende gevallen per regelstap vastgelegd op 200. Het bijhouden van 4 beste gevallen voor de volgende tijdstap bleek voldoende te zijn om goede resultaten te garanderen. Door deze waarde vrij laag te kiezen, kan meer rekentijd gaan naar het berekenen van nieuwe semi-random gevallen. De controlehorizon bleek eveneens een erg belangrijke factor te zijn. Hiervoor is een waarde van 48 uur aangenomen om enerzijds te garanderen dat voldoende anticiperen mogelijk is maar anderzijds het vereiste aantal beschouwde gevallen om tot een eenduidige sturing te komen toch te beperken.

Tabel 8: Resultaten van de parameterstudie

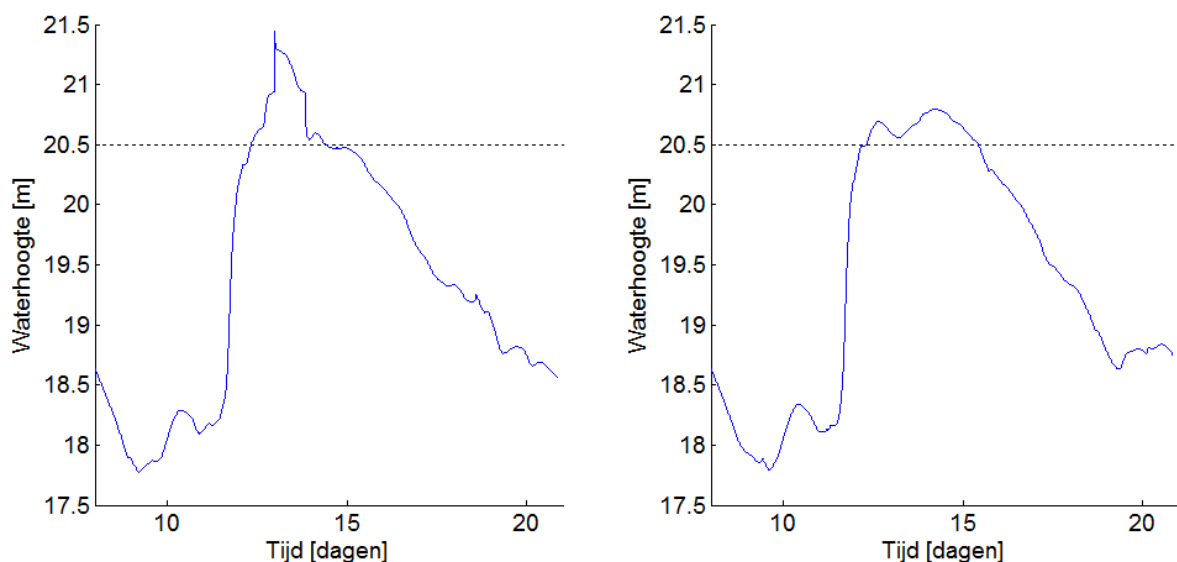
Parameter	Waarde
Regelstap	15 minuten
Totaal aantal doorgerekende gevallen per regelstap	200
Aantal bijgehouden beste gevallen	4
Controlehorizon	48u

Hierbij dient opgemerkt te worden dat al deze conclusies gebaseerd zijn op simulaties met perfecte neerslagvoorspellingen. De onzekerheid van de neerslag zal echter een belangrijke invloed hebben. In dit onderzoek werd dan ook de aanzet gegeven voor een manier waarop deze onzekerheid in een latere fase in rekening kan worden gebracht. Nader onderzoek hieromtrent is vereist.

6.2 Diepgaande analyse van een simulatieresultaat

Mits er vanuit te gaan dat de reken capaciteit in de toekomst sterk kan verbeteren, zal het aantal doorgerekende gevallen fors kunnen toenemen en zullen de resultaten dus steeds zeker zo goed zijn als de beste resultaten die op dit moment bekomen werden met 200 beschouwde gevallen voor een regelstap van 15 minuten en 40 bijgehouden besten.

Wanneer het verloop van de waterpeilen voor deze tien simulaties bekeken wordt, blijkt dat er twee groepen van resultaten zijn. Figuur 38 geeft het verloop van het waterpeil voor beide groepen afwaarts in de Demer, te Diest centrum, weer (WL 20 zoals gedefinieerd in Figuur 22 op pagina 43). In de eerste groep resultaten is een scherpe piek merkbaar in het verloop. Bij de tweede groep resultaten is deze piek veel lager en minder scherp, maar wel iets breder. Van de tien uitgevoerde simulaties bleek het verloop van de waterpeilen in 3 simulaties tot de eerste groep te behoren en in 7 simulaties tot de tweede groep.



Figuur 38: Vergelijking van het verloop van het waterpeil afwaarts in de Demer voor de twee groepen van simulatieresultaten (regelstap 15min, 200 gevallen)

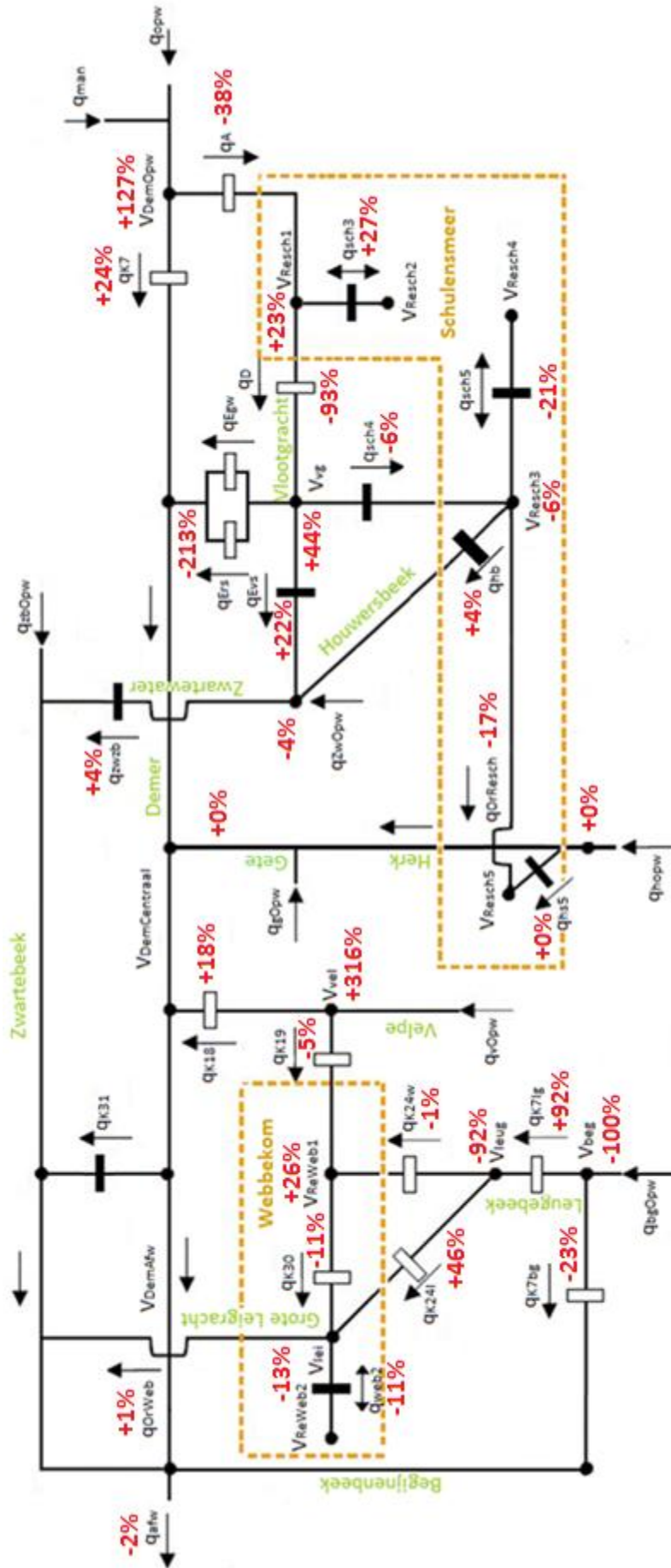
Het verschil in deze twee groepen is wellicht te wijten aan de manier waarop de kostfuncties gedefinieerd zijn. Deze zijn op een vrij eenvoudige manier bepaald en verlopen lineair wanneer het waterpeil boven het overstromingsniveau blijft toenemen. Daardoor is het mogelijk dat een lage brede piek een gelijkaardige kost oplevert als een korte, hoge piek. Dit zal echter niet overeenkomen met de werkelijkheid. De schade boven het overstromingspeil zal immers meer dan lineair toenemen met het waterpeil. In het geval zoals te zien op de linkse grafiek is de verwachte schade dan ook groter. Het is dus aangeraden om de kostfuncties in verder onderzoek te verbeteren en eventueel te koppelen aan een financiële waarde. Daarnaast is de kost voor de beste simulatie uit elke groep ongeveer even groot. Omwille van deze redenen zal de simulatie met de laagste kost uit de tweede groep, zonder piek, hier besproken worden. Het is deze simulatie die in vorig hoofdstuk is gevalideerd in IWRS. Daarnaast bevestigt dit verschil ook het feit dat het doorrekenen van 200 gevallen eigenlijk te weinig is. Indien voldoende gevallen beschouwd worden zouden de resultaten van alle simulaties immers (zo goed als) allemaal dezelfde, optimale, resultaten moeten geven. Deze waarde is zoals eerder gesteld toch aangenomen omdat de bekomen resultaten reeds zeer goed waren en de rekentijd op die manier aanvaardbaar kon blijven.

De resultaten van deze simulatie zullen nu vergeleken worden met de resultaten uit het conceptueel model bij aanleggen van de vaste regels. Figuur 39 geeft een vergelijking van de cumulatieve debietverdeling in beide simulaties weer. De waarden op de figuur stellen de verhouding voor van het verschil tussen de cumulatieve debieten van beide regelmethodes tot de cumulatieve debieten in de vaste regeling, zoals duidelijk wordt in volgende formule:

$$\frac{\sum Q_{MPC-GA} - \sum Q_{Vaste\ regels}}{\sum Q_{Vaste\ regels}} \quad (6.1)$$

Deze cumulatieve debieten werden bepaald voor de eerste achttien dagen van de historische was van september 1998. Dit is tot aan het moment net na de was, zoals te zien in Figuur 24 van Hoofdstuk 5 waar het verloop van het inkomend debiet opwaarts in de Demer en in de Gete is weergegeven. Dit tijdstip is gekozen zodat de effecten van het ledigen van de wachtbekkens uit de tabel worden geweerd. De debietsverdeling zal daarbij immers andere patronen volgen, wat het trekken van conclusies zou bemoeilijken. Tabel 9 geeft vervolgens een gedetailleerd overzicht van de verschillen tussen beide regelingen in de verschillende vertakkingspunten van het netwerk. Daarbij wordt in de kolom 'invloed' voor ieder debiet weergegeven of het al dan niet om een belangrijke wijziging gaat.

Uit de resultaten blijkt dat de regelingen een aantal verschillen vertonen. De belangrijkste zijn te vinden in het gebied van het Schulensmeer. Vooreerst wordt in het MPC-GA-model opwaarts meer water via stuw K7 langs de Demer afgevoerd en minder rechtstreeks naar het binnenbekken via stuw A. Via stuwen E_{rs} en E_{gw} stroomt het water bij de MPC-GA-sturing naar de Vlootgracht terwijl het in de vaste sturing in de omgekeerde richting stroomt. Het Schulensmeer wordt in de MPC-GA-sturing vervolgens gedeeltelijk gevuld vanuit de Vlootgracht. Tijdens het ledigen zal een deel van het water uit het binnenbekken via stuw A opnieuw in de Demer worden geloosd terwijl dit in de vaste regeling quasi volledig via stuw D gebeurt. Aan de Webbekom zijn de belangrijkste verschillen gesitueerd aan de splitsing van de Begijnenbeek en de Leugebeek. In de MPC-GA-regeling wordt beduidend meer water afgevoerd via de Leugebeek. Deze verschillen worden met meer detail weergegeven vanaf Figuur 40 tot Figuur 43.



Figuur 39: Vergelijking van de resultaten met MPC-GA-regeling en vaste sturing voor de was van september 1998: Verhouding van het verschil tussen de cumulatieve debieten van beide regelmethodes tot de cumulatieve debieten in de vaste regeling na de eerste 18 dagen.

Tabel 9: Vergelijking tussen de resultaten met vaste sturing en met MPC-GA-regeling voor de was van 1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen.

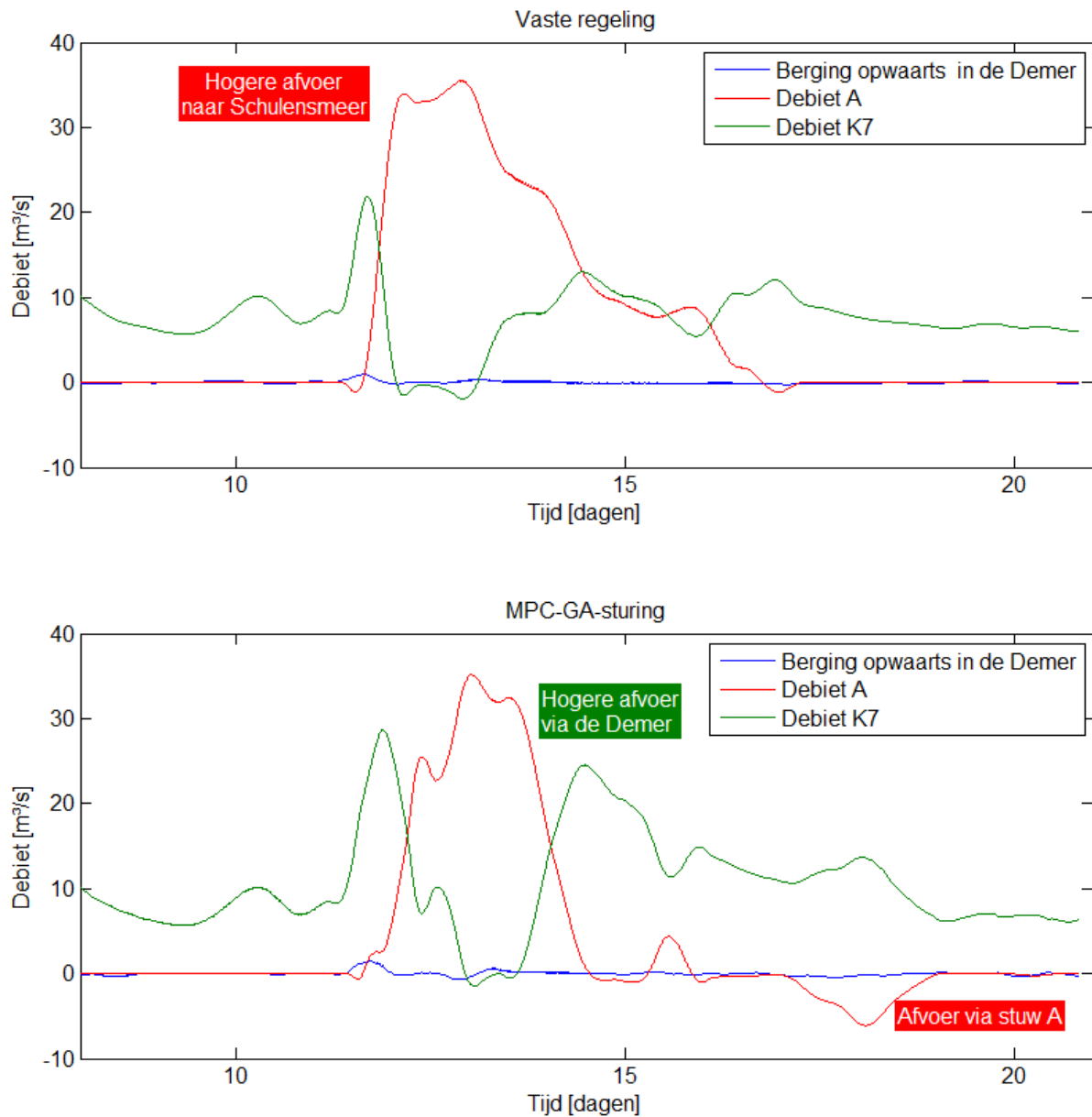
	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil MPC-GA t.o.v. vaste	Invloed (0 – 1)	Invloed MPC-GA-regeling
	Vaste regels	MPC-GA			
Demer opwaarts					
qA	7695	4787	-38%	1	Minder vulling binnenbekken via A
qK7	12198	15100	+24%	1	Grotere afvoer via Demer
VDemOpw	5	11	+127%	0	Kleine toename berging opwaarts in de Demer
Schulensmeer binnenbekken					
qD	4090	293	-93%	1	Sterk verminderde afvoer via D
qsch3	1866	2364	+27%	1	Meer vulling tweede binnenbekken
VResch1	1738	2131	+23%	1	Meer berging in binnenbekken Schulensmeer
Vlootgracht					
qEgws	1730	-1955	-213%	1	Andere stromingsrichting: instroom vanuit de Demer
qEvs	102	124	+22%	0	Kleine toename afvoer naar de Zwartewater
qsch4	2267	2128	-6%	1	Minder vulling buitenbekken Schulensmeer
Vvloot	8	12	+44%	0	Kleine toename berging in de Vlootgracht
Zwartewater					
qzwzb	1573	1628	+4%	0	Kleine toename afvoer naar de Zwartebeek
Vzwartewater	24	23	-4%	0	Kleine afname berging Zwartewater
Schulensmeer buitenbekken					
qsch5	281	221	-21%	0,5	Minder vulling tweede buitenbekken
qhb	746	778	+4%	0	Kleine toename afvoer naar de Houwersbeek
qOrResch	370	306	-17%	0,5	Verminderde afvoer naar het derde buitenbekken
VResch3	838	792	-6%	0,5	Kleine afname berging buitenbekken Schulensmeer

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil MPC-GA t.o.v. vaste	Invloed (0 - 1)	Invloed MPC-GA-regeling
	Vaste regels	MPC-GA			
Herk en Gete					
qgete	25300	25300	0%	0	Gelijke afvoer langs de Gete
qhs5	262	262	0%	0	Gelijke afvoer naar derde buitenbekken
Vherk	0	0	0%	0	Geen verschil in berging Herk
Begijnenbeek					
qK7bg	2353	1816	-23%	1	Verminderde afvoer via de Begijnenbeek
qK7lg	596	1141	+92%	1	Verhoogde afvoer langs de Leugebeek
Vbeg	9	0	-100%	0	Verminderde berging Begijnenbeek
Leugebeek					
qK24l	866	1260	+46%	1	Verhoogde afvoer naar de Grote Leigracht
qK24w	438	433	-1%	0	Gelijkaardige vulling binnenbekken Webbekom
Vleug	1	0	-92%	0	Weinig verschil in berging Leugebeek
Webbekom binnenbekken					
qK30	4001	3570	-11%	1	Verminderde afvoer naar de Grote Leigracht
VReWeb1	753	952	+26%	0	Kleine toename berging binnenbekken Webbekom
Velpe					
qK18	1182	1395	+18%	0,5	Toegenomen doorvoer naar de Demer
qK19	4315	4089	-5%	0,5	Verminderde afvoer naar de Webbekom
Vvel	4	17	+316%	0	Kleine toename berging Velpe

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil MPC-GA t.o.v. vaste	Invloed (0 - 1)	Invloed MPC-GA-regeling
	Vaste regels	MPC-GA			
Grote Leigracht					
qweb2	782	696	-11%	0	Weinig verschil afvoer naar tweede buitenbekken
qOrWeb	4185	4237	+1%	0,5	Kleine toename doorvoer naar Demer
Vlei	19	16	-13%	0	Ongeveer gelijke berging in de Grote Leigracht
Demer afwaarts					
qafw	54295	53321	-2%	1	Toegenomen berging in het volledige bekken

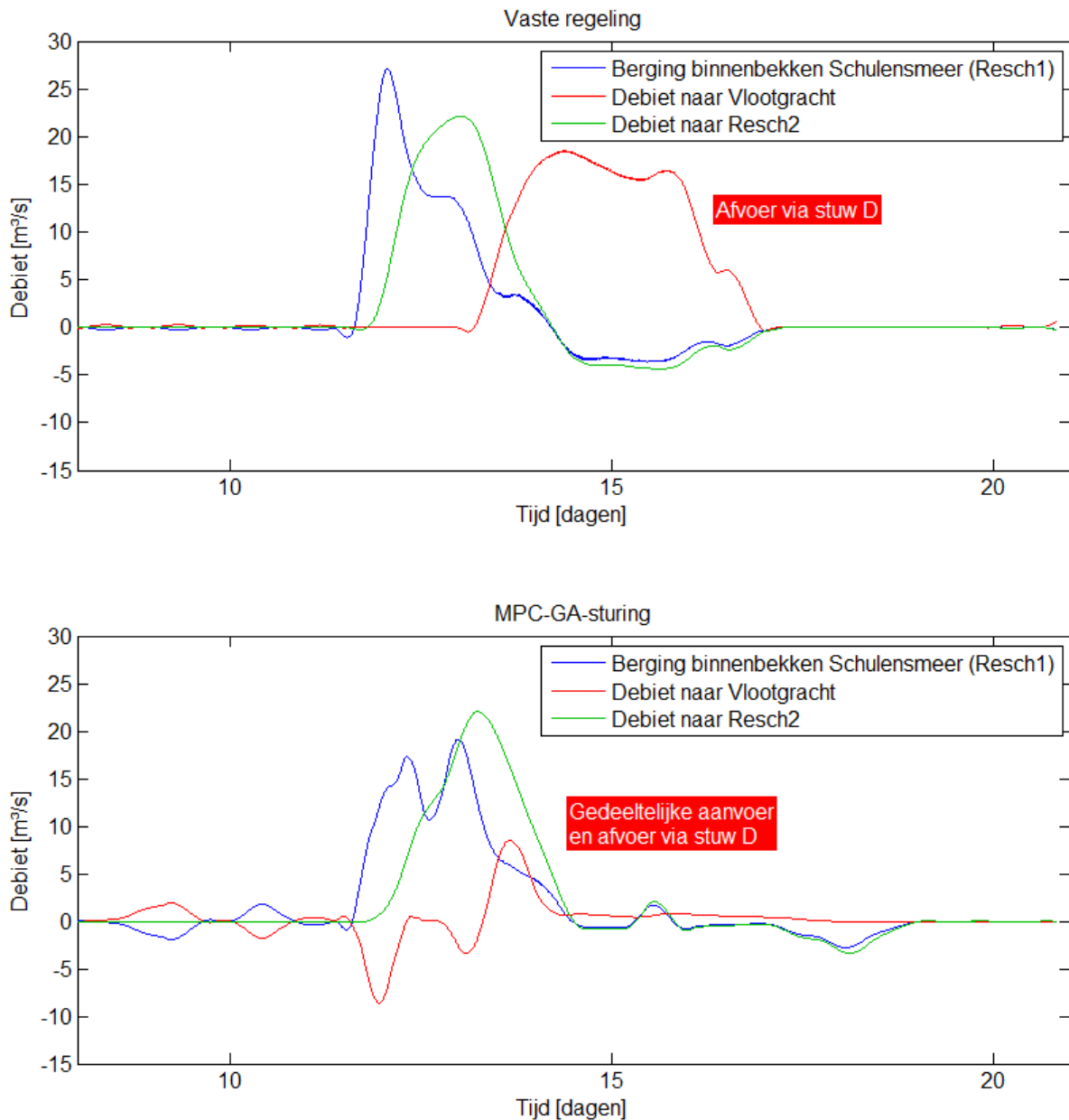
Om de belangrijkste verschillen tussen de MPC-GA-sturing en de vaste regeling verder te onderzoeken volgt hierna een verdere analyse van de debieten in het netwerk. Figuur 40 tot Figuur 43 geven het verloop van de debieten [m³/s] voor de vaste sturing en voor de MPC-GA-regeling. Daarbij heeft elke figuur, net als in voorgaande tabel, betrekking op een locatie waar een verdeling van het debiet over de verschillende takken en het betreffende bergingspunt gebeurt. Bij de weergave van deze resultaten is een filtering toegepast om instabiliteiten van een aantal debieten uit de figuren te weren.

Ter herinnering: de piek van de bui doet zich voor vanaf 11,5 dagen en eindigt na 16,5 dagen. Het is in dit interval dat de grootste verschillen tussen beide regelmethode zich voordoen.



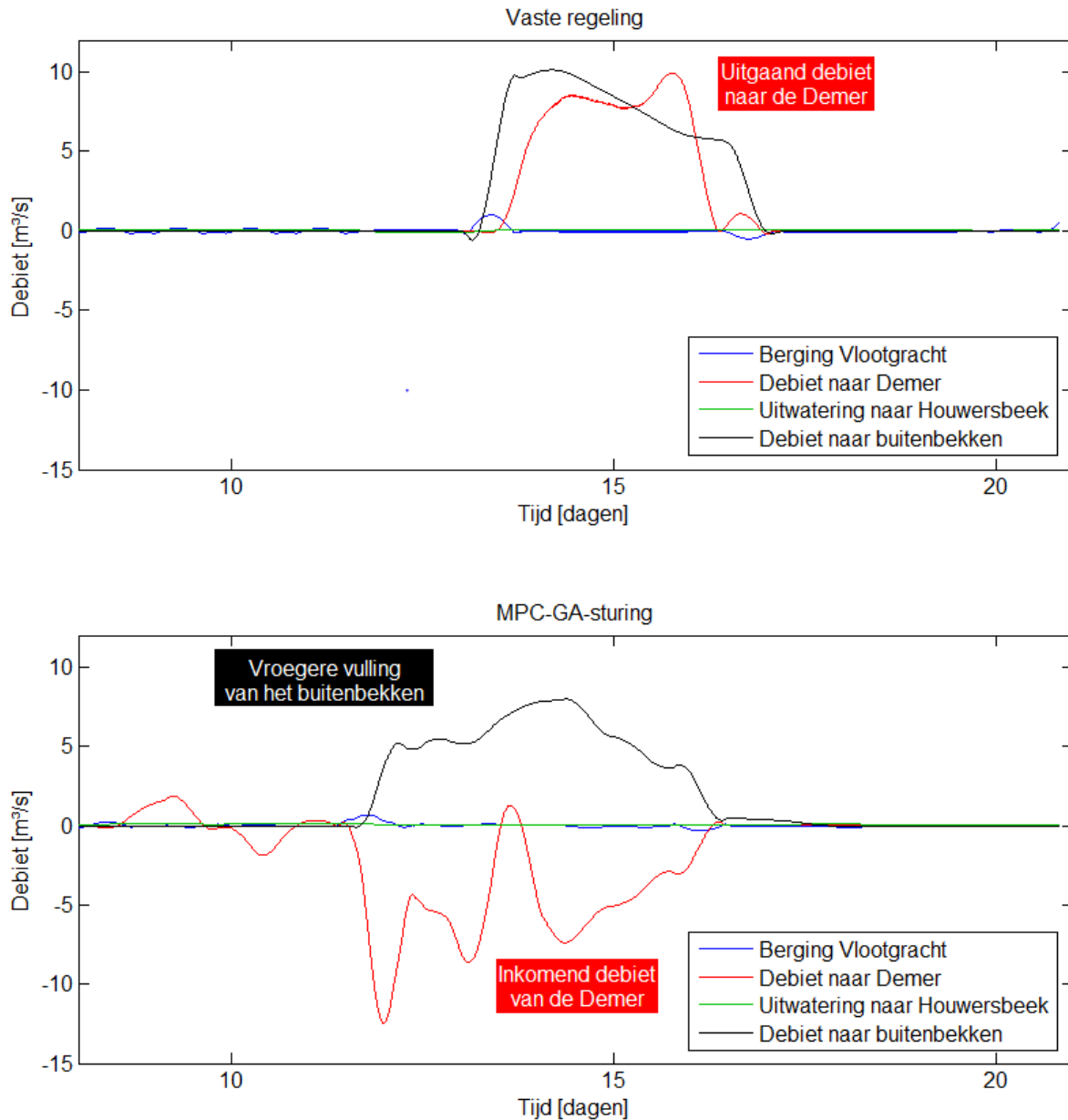
Figuur 40: Debieten [m³/s] opwaarts in de Demer voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.

Volgens de vaste regeling gebeurt meer afwatering via stuw A naar het Schulensmeer, terwijl bij toepassing van de MPC-GA-sturing meer water via de Demer wordt afgevoerd. Na de bui wordt door de MPC-GA-sturing een deel van het binnenbekken via stuw A geleidigd.



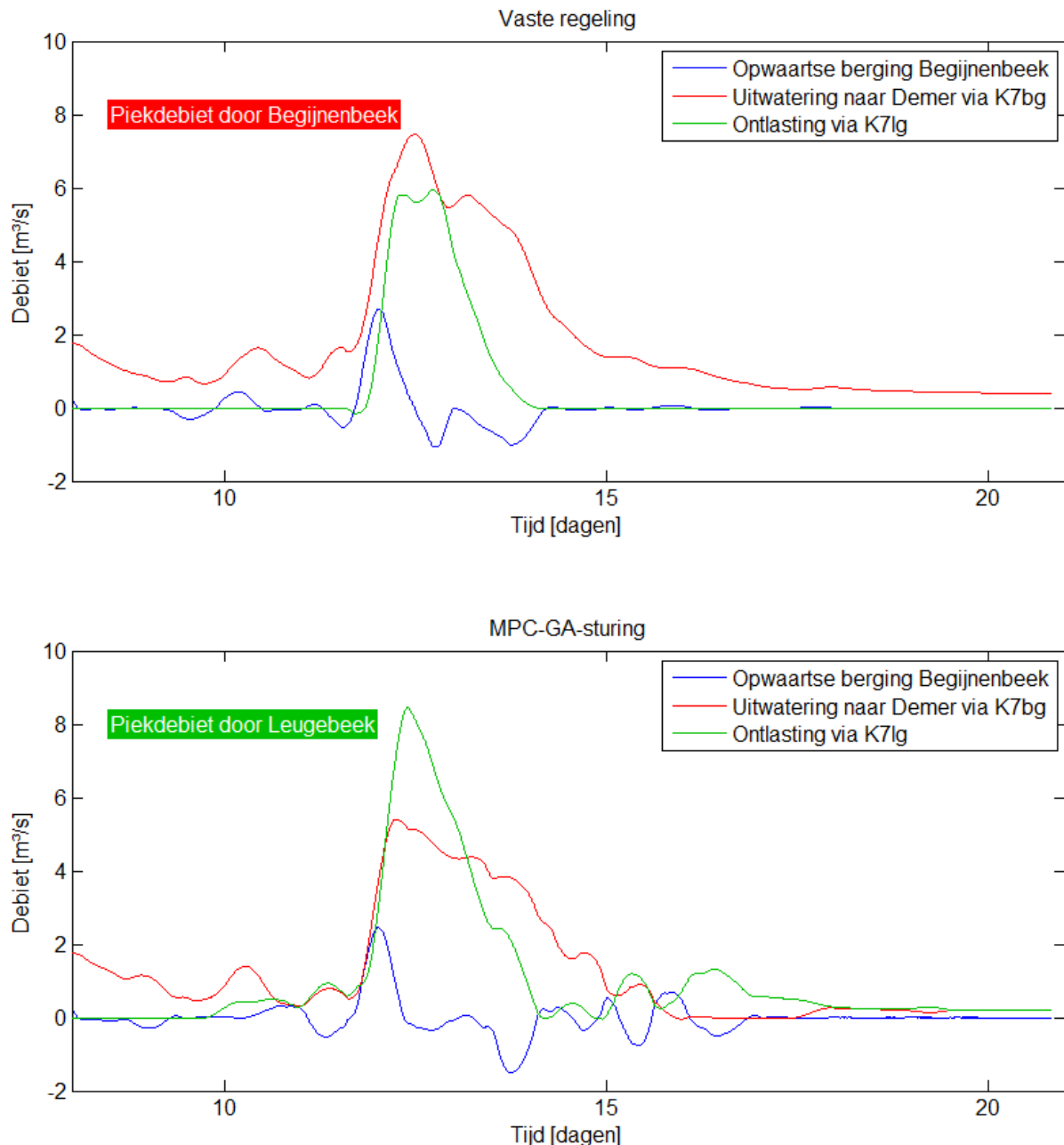
Figuur 41: Debeten [m³/s] aan het binnenbekken van het Schulensmeer voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.

De functie van stuw D is anders in beide simulaties. Bij toepassing van de vaste sturing zal water via deze stuw uit het binnenbekken wegstromen wanneer het geleidigd wordt. De MPC-GA-sturing zal echter via deze weg water vanuit de Vlootgracht naar het binnenbekken laten.



Figuur 42: Debieten [m³/s] aan de Vlootgracht voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.

Er is duidelijk te zien dat het debiet over stuwven E_{gw} en E_{rs} in beide regelingen omgekeerd verloopt. In de MPC-GA-regeling wordt water vanuit de Demer naar de Vlootgracht gevoerd terwijl bij toepassing van de vaste regeling het water uit de Vlootgracht naar de Demer stroomt. Vulling van het buitenbekken gebeurt pas later wanneer de vaste regels worden gevolgd.



Figuur 43: Debieten [m³/s] opwaarts in de Begijnenbeek voor de was van september 1998: (boven) voor de vaste regeling, (onder) na toepassing van het MPC-GA-algoritme.

Bij de verdeling van het water over de Begijnenbeek (K7bg) en de Leugebeek (K7lg) wordt in de vaste regeling het grootste debiet via de Begijnenbeek naar de Demer afgevoerd. In de MPC-GA-sturing daarentegen stroomt het merendeel van het water via de Leugebeek.

6.3 Evaluatie efficiëntie van het MPC-GA-algoritme

Het MPC-GA-algoritme stuurt zoals reeds vermeld op basis van de kost voor het waterpeil op twintig locaties. Uit de geanalyseerde resultaten blijkt dat het algoritme er in slaagt het water zo te sturen dat de totale kost zo laag mogelijk blijft. Om na te gaan of de bekomen sturing ook effectief beter is dan de vaste regels worden hierna de overschrijdingen van de overstromingspeilen geanalyseerd. Daarbij wordt gekeken naar de maximale waterpeiloverschrijding [m] (overschrijding van het overstromingspeil), de som van de

waterpeiloverschrijdingen [mh], het overstroomd volume [m³] en de overstromingsduur [h]. Deze waarden staan weergegeven in Tabel 10 voor de twintig locaties en dit zowel voor de vaste regels als voor de MPC-GA-sturing. De procentuele verhoudingen van de MPC-GA-sturing ten opzichte van de vaste regeling staan vervolgens in Tabel 11 opgelijst.

Het dient echter opgemerkt te worden dat de weergegeven waarden voor het overstroomd volume niet met de werkelijkheid overeenkomen, maar zo goed als zeker overschattingen zijn. Deze worden immers bepaald door op elke locatie het waterpeil via een omgekeerde hypsometrische curve te koppelen aan het volume water in de bijhorende bak. Dit ene waterpeil is echter niet representatief voor de hele bak. Soms worden zelfs verschillende waterpeilen aan dezelfde bak gekoppeld. Om tot een betere benadering van het werkelijk overstroomd volume te komen zou eigenlijk met overstromingsgebieden of meerdere kleine bakken moeten worden gewerkt. Dit zou echter te ver leiden in deze masterproef, waardoor deze waarden behouden zijn, aangezien zij toch een goede indicatie geven van het effect van de MPC-GA-sturing.

Tabel 10: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen voor de vaste regels en de MPC-GA-regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstroomd volume en de overstromingsduur.

Waterpeil	Locatie	Maximale waterpeiloverschrijding [m]		Som waterpeiloverschrijding [mh]		Overstroomd volume [10 ³ m ³]		Overstromingsduur [h]	
		Vaste regels	MPC-GA	Vaste regels	MPC-GA	Vaste regels	MPC-GA	Vaste regels	MPC-GA
WL1	DemOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL2	Velpe	-	-	-	-	-	-	-	-
WL3	BegOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL4	HerkOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL5	Resch1	0,03	-	0,17	-	1962	-	10,50	-
WL6	Resch2	0,03	-	0,17	-	2324	-	10,33	-
WL7	Resch3	-	-	-	-	-	-	-	-
WL8	Resch4	-	-	-	-	-	-	-	-
WL9	ReWeb1	-	-	-	-	-	-	-	-
WL10	K7afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL11	MondGete	0,25	0,14	7,48	2,51	17477	5805	48,50	33,92
WL12	MondVI	0,07	-	0,84	-	1851	-	19,83	-
WL13	K31Opw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL14	ZwaOpw	0,51	0,48	32,65	25,63	22301	17171	89,25	88,83
WL15	Vlootgr	0,60	0,28	20,92	7,16	3694	1256	69,58	41,75
WL16	K31Afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL17	Begijnenb	0,05	-	0,71	-	NG	-	15,67	-
WL18	Leugeb	-	-	-	-	-	-	-	-
WL19	Leigracht	0,13	-	2,17	-	419	-	34,92	-
WL20	DemAfw	0,33	0,29	17,31	12,22	15218	10681	74,58	74,58

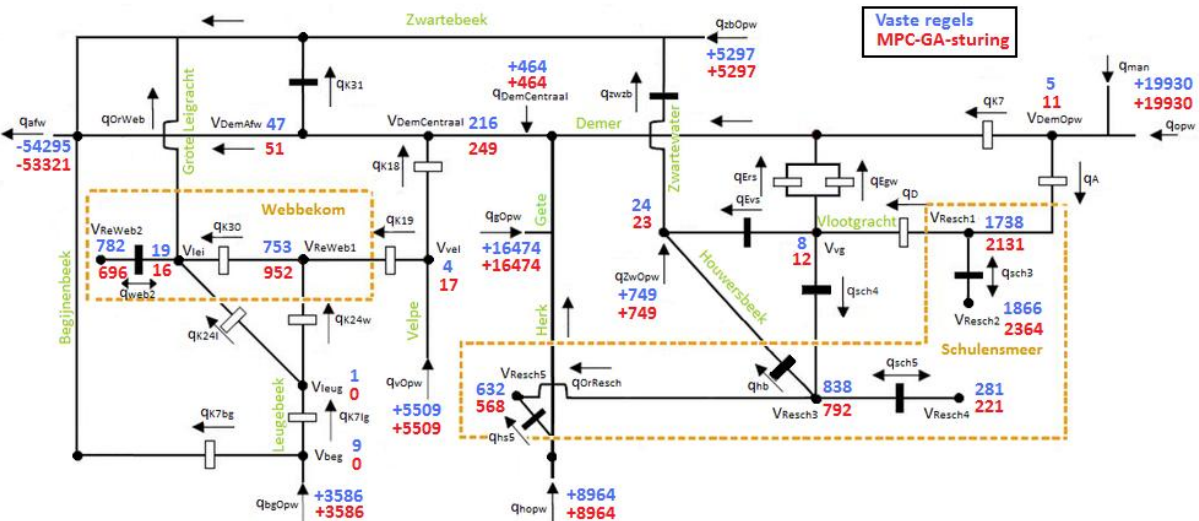
Tabel 11: Analyse van de procentuele verhouding van de MPC-GA-regeling ten opzicht van de vaste regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstromd volume en de overstromingsduur.

Waterpeil	Locatie	Maximale waterpeiloverschrijding	Som waterpeiloverschrijding	Overstromd volume	Overstromingsduur
WL1	DemOpw	-	-	-	-
WL2	Velpe	-	-	-	-
WL3	BegOpw	-	-	-	-
WL4	HerkOpw	-	-	-	-
WL5	Resch1	0%	0%	0%	0%
WL6	Resch2	0%	0%	0%	0%
WL7	Resch3	-	-	-	-
WL8	Resch4	-	-	-	-
WL9	ReWeb1	-	-	-	-
WL10	K7afw	-	-	-	-
WL11	MondGete	55%	33%	33%	70%
WL12	MondVI	0%	0%	0%	0%
WL13	K31Opw	-	-	-	-
WL14	ZwaOpw	94%	79%	77%	100%
WL15	Vlootgr	46%	34%	34%	60%
WL16	K31Afw	-	-	-	-
WL17	Begijnenb	0%	0%	0%	0%
WL18	Leugeb	-	-	-	-
WL19	Leigracht	0%	0%	0%	0%
WL20	DemAfw	90%	71%	70%	100%

De resultaten van de MPC-GA-sturing blijken op iedere locatie beter te zijn. De overstromingen in de wachtbekkens (WL5, WL6, WL7, WL8, WL9 en WL19) zijn zoals eerder gesteld volledig voorkomen. Ook op de andere plaatsen is grote vooruitgang geboekt. De overschrijding van het overstromingspeil is telkens minder groot en duurt minder lang.

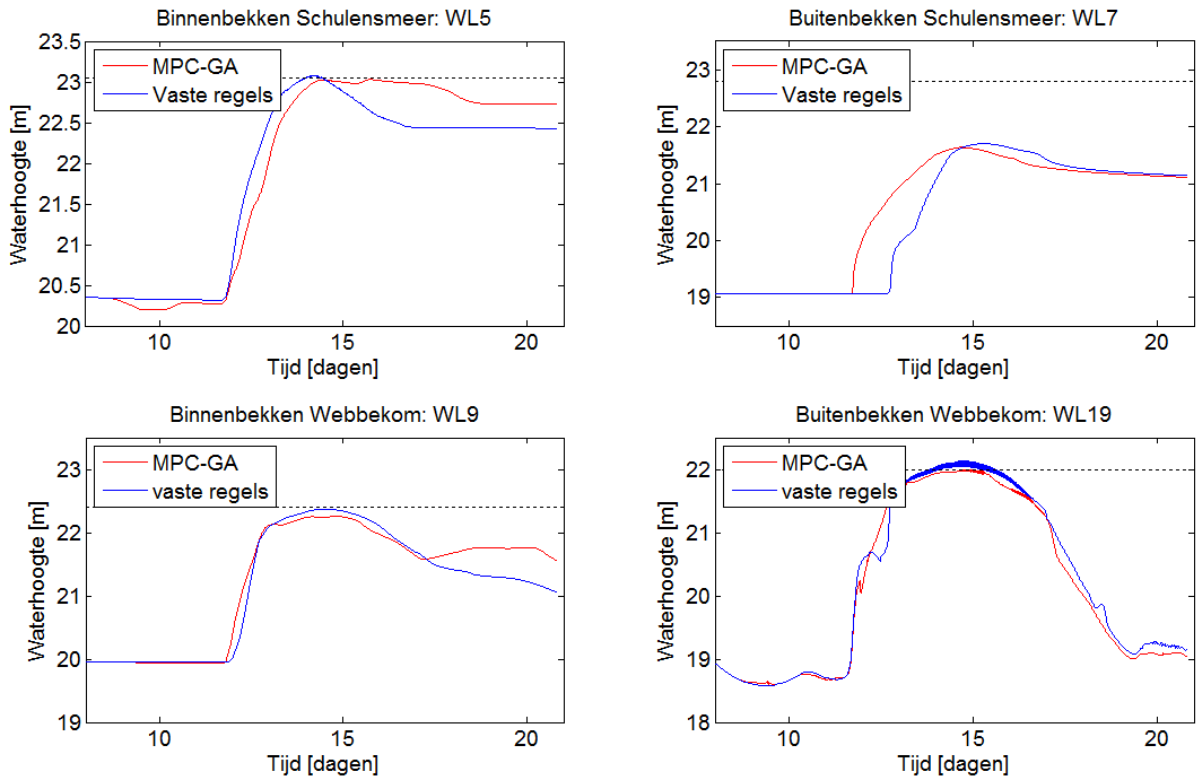
In Figuur 44 wordt weergegeven hoe deze verhoging van de efficiëntie bereikt wordt door een analyse van de berging in het systeem na 18 dagen. Het totale geborgen volume zal op dat moment het grootst zijn. Op de figuur zijn de inkomende debieten en het totaal uitgaand debiet weergegeven. Daarnaast is voor alle bakken in het model de toename van de berging [10^3m^3] ten opzichte van het begin van de ontwerpbeurt aangeduid, zowel voor de MPC-GA-regeling als voor de vaste sturing. Allereerst blijkt dat bij toepassing van de MPC-GA-regeling ongeveer 1 miljoen m^3 extra water geborgen wordt dan bij de vaste sturing. Uit de figuur blijkt dat het grootste verschil tussen beide terug te vinden is in het geborgen volume in de wachtbekkens. De MPC-GA-sturing maakt veel beter gebruik van de bergingscapaciteit van de binnenbekkens van zowel het Schulensmeer als van de Webbekom. Daartegenover staat wel dat de buitenbekkens minder gevuld worden. Dit blijkt echter een logisch resultaat te zijn. De buitenbekkens van het Schulensmeer staan namelijk in rechtstreeks contact met de

Vlootgracht en de Zwartewater doordat hiertussen vaste overlaten aanwezig zijn. Het algoritme zal de waterpeilen in de Vlootgracht en de Zwartewater echter onder het overstromingspeil proberen te houden waardoor het overstromingspeil in de buitenbekkens niet bereikt wordt. De verminderde berging in het buitenbekken van de Webbekom bij de MPC-GA-sturing is te wijten aan het feit dat dit wachtbekken overstroomt bij toepassing van de vaste regels. Zoals gesteld is dit onaanvaardbaar. Met de MPC-GA-sturing is dit vermeden, waardoor bijgevolg minder water geborgen wordt in dit deel van het bekken.

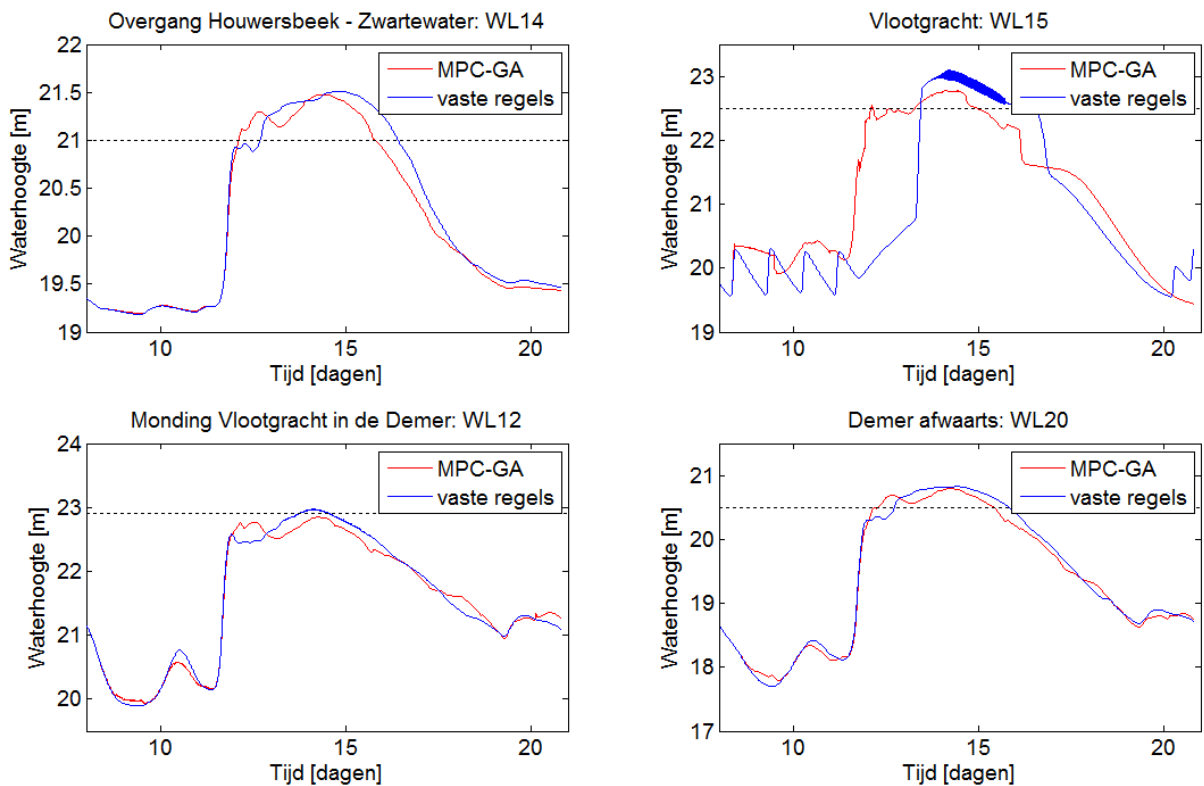


Figuur 44: Vergelijking van de berging in het systeem bij toepassing van MPC-GA-sturing (rood) en vaste sturing (blauw) voor de was van september 1998: Cumulatieve debieten na de eerste 18 dagen uitgedrukt in 10³m³

Het verloop van de belangrijkste waterpeilen is weergegeven in Figuur 45 en Figuur 46. Op Figuur 45 is te zien dat het binnenbekken van het Schulsmeer bij de MPC-GA-regeling pas op een later tijdstip volledig gevuld is en pas later gedeeltelijk geleidigd wordt. Daarnaast liggen bij toepassen van de MPC-GA-regeling de waterpeilen in de wachtbekkens overall onder het overstromingspeil. Dit geeft vooral in het buitenbekken van de Webbekom een verschil. Het valt op dat in het buitenbekken van het Schulsmeer in beide sturingen een groot deel van de potentiële berging onbenut blijft. Hoofdstuk 7 bespreekt dit fenomeen en onderzoekt een mogelijke verbetering van het netwerk. De waterpeilen in Figuur 46 kennen voor beide regelmethodes vrij gelijkaardig verlopen. Alleen voor de Vlootgracht valt een groot verschil te bemerken. Het waterpeil zal bij toepassing van de MPC-GA-regeling eerder stijgen opdat het buitenbekken van het Schulsmeer vroeger gevuld kan worden. Het maximale waterpeil blijft echter duidelijk lager.



Figuur 45: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schuylmeer en de Webbekom tijdens de historische was van september 1998.



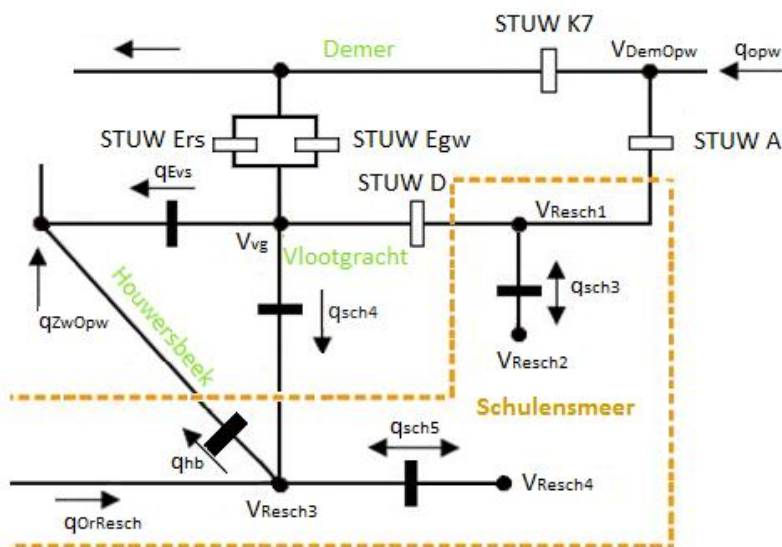
Figuur 46: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de historische was van september 1998.

6.4 Aanbevelingen ter verbetering van de vaste regels

Uit voorgaande bespreking volgt dat het MPC-GA-algoritme er duidelijk in slaagt om betere resultaten te bekomen dan de vaste regels. Het is nu interessant om na te gaan op welke manier de sturing is gebeurd en of belangrijke trends in de klepstanden voorkomen. De verlopen van de stuwen horende bij de in voorgaande paragraaf besproken simulatie zullen hierna vergeleken worden met de vaste regels zoals deze zijn toegepast tijdens de bui van september 1998. Hieruit volgen enkele conclusies en aanbevelingen ter verbetering van de vaste sturing. Deze bestaat voor het studiegebied immers slechts uit een beperkt aantal regels. Gezien de complexiteit van het systeem kunnen op die manier enkel suboptimale resultaten worden bekomen. Bij deze analyse wordt eerst gekeken naar de stuwen in de omgeving van het Schulensmeer en vervolgens naar die aan de Webbekom.

6.4.1 Omgeving Schulensmeer

In de omgeving van het Schulensmeer zijn vijf regelbare stuwen gesitueerd. Een overzicht van de ligging van deze stuwen staat in Figuur 47. Bij het opstellen van de aanbevelingen voor de vaste regels zijn deze in dit hoofdstuk nogmaals onderverdeeld in twee groepen. Eerst wordt gefocust op de stuwen opwaarts aan de Demer. Dit zijn stuw A en K7. Vervolgens worden de stuwen aan de Vlootgracht besproken, namelijk stuw D, stuw Egv en stuw Ers.



Figuur 47: Detail van de omgeving van het Schulensmeer

Stuwen A en K7

Het eerste vertakkingspunt met regelbare stuwen in de omgeving van het Schulensmeer bevindt zich opwaarts in de Demer. Stuwen K7 en A verdelen het debiet over de Demer en het wachtbekken. In de vaste regels wordt alleen de klepstand van stuw A gevarieerd, K7 wijzigt niet. Deze regels staan samengevat in Tabel 12 en Tabel 13. De opbouw van deze en volgende tabellen is als volgt. Indien aan de eerste voorwaarde is voldaan, wordt de bijhorende actie uitgevoerd. Indien niet voldaan is, wordt naar de tweede voorwaarde overgegaan, enzovoorts. De regel voor de uiterste klepstanden wordt altijd beschouwd.

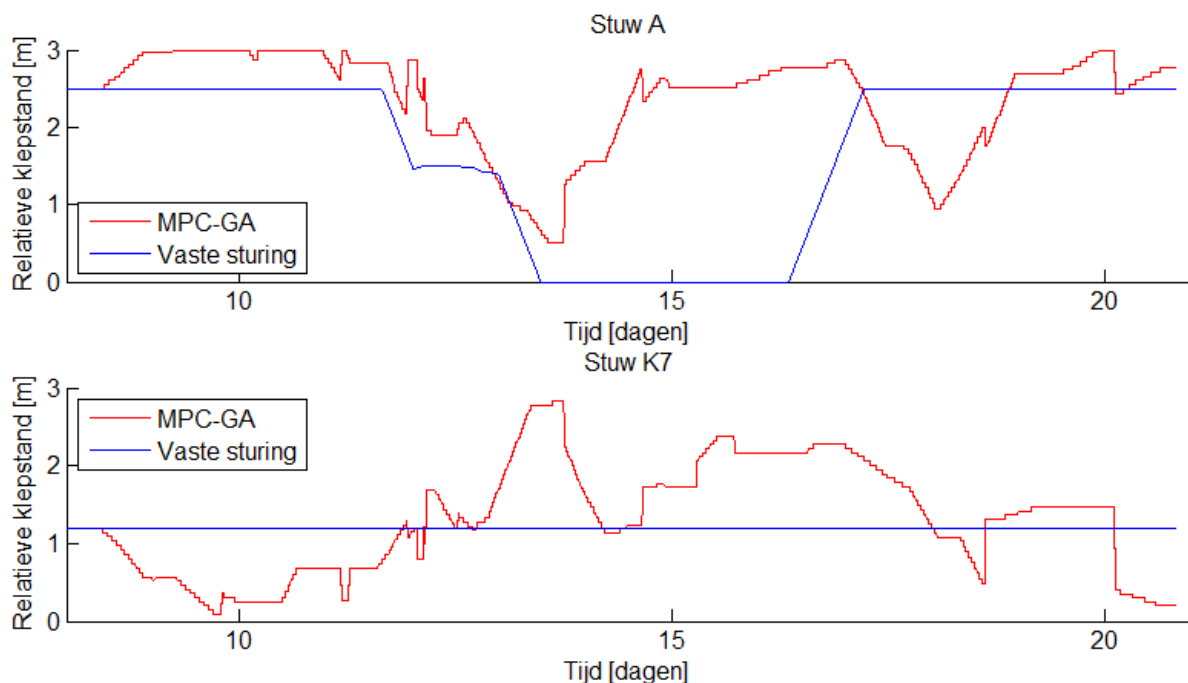
Tabel 12: Vaste regels voor stuw A

Regel	Voorwaarde	Actie
A.1	$WL_{opw} < 22,49m$	Stijgen met 0,01 m/s
A.2	$WL_{opw} \geq 22,49m$ & $WL_{opw} \leq 22,51m$	Constant houden
A.3	$WL_{opw} > 22,51m$	Dalen met 0,01 m/s
A.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 3m)	Extrema aanleggen

Tabel 13: Vaste regels voor stuw K7

Regel	Voorwaarde	Actie
K7.1	/	Constant houden (1,2m)

De klepstanden die volgen uit de vaste regels en de geoptimaliseerde klepstanden uit Hoofdstuk 6 die werden bekomen met de MPC-GA-sturing zijn weergegeven in Figuur 48.



Figuur 48: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de stuwen A en K7 opwaarts in de Demer tijdens de historische was van september 1998.

Uit bovenstaande figuur volgt dat beide stuwen een belangrijke functie vervullen. Vooreerst is het belangrijk om te anticiperen op een aankomende piek door zo veel mogelijk water af te voeren via de Demer wanneer dit nog niet tot overstromingen leidt. De MPC-GA-sturing maakt zo lang mogelijk gebruik van de afvoercapaciteit van de Demer door stuw K7 te verlagen en stuw A te verhogen. Er kan dus een verbetering van de vaste regels voor stuw K7 worden opgesteld. Een regel hiertoe kan bestaan in het verlagen van stuw K7 wanneer binnen 48 uur een hevige bui en bijgevolg een hoog waterpeil verwacht wordt opwaarts in de Demer (WL1). Dit is regel K7.2' in Tabel 15. De vaste regels voor stuw A leveren hier een goed resultaat.

Bij het begin van de bui zal stuw A in de MPC-GA-sturing geleidelijk dalen terwijl stuw K7 stijgt. Er ontstaat dus een belangrijke wisselwerking tussen beide stuwen. In de vaste regels begint stuw A momenteel te dalen wanneer het waterpeil opwaarts in de Demer zich boven

een kritisch niveau begeeft. Deze regel, A.3 in Tabel 12, blijkt goed opgesteld. Toch is verbetering mogelijk door niet alleen stuw A te laten dalen, maar tegelijkertijd stuw K7 te laten stijgen. Hierdoor verhoogt de efficiëntie bij het vullen van het Schulensmeer. Het gevolg zal zijn dat de kritische waarde voor het opwaartse waterpeil in regel A.1 tot A.3 iets kan toenemen voor de regeling van stuw A. Stuw K7 kan op een gelijkaardige manier stijgen als de manier waarop A daalt. Dit is geformuleerd in regel K7.4'.

Een volgend kritisch moment dringt zich op wanneer het binnenbekken bijna tot aan het overstromingspeil gevuld is. De stuwen volgen dan in de MPC-GA-sturing een omgekeerd verloop ten opzichte van de vorige fase. Stuw A begint opnieuw te stijgen terwijl stuw K7 daalt. Hierna moet de klepstand van stuw A hoog gehouden worden tot het waterpeil afwaarts in het netwerk terug beneden het waarschuwingspeil is gezakt. In de vaste regels zal de minimale klepstand van stuw A behouden blijven tot het opwaartse waterpeil opnieuw onder de kritische waarde is gedaald. Het wachtbekken wordt dus niet afgesloten wanneer het overstromingspeil bereikt wordt. Om met de vaste regels een gelijkaardige sturing te bekomen als die via MPC-GA, zou regel A.1 moeten worden gewijzigd zodat rekening gehouden wordt met het waterpeil in het binnenbekken. De stuw moet dus nog steeds stijgen wanneer het opwaartse waterpeil in de Demer lager is dan het kritische niveau en het niveau in het binnenbekken het referentiepeil benadert, zie regel A.1'. Daarnaast moet deze ook stijgen wanneer het waterpeil in het binnenbekken van het Schulensmeer het overstromingspeil benadert en de waterstand opwaarts boven de kritieke waarde gelegen is. Dit is geformuleerd in regel A.3'.

Na de was dienen de klepstanden van beide stuwen opnieuw te dalen om het wachtbekken te ledigen. De doorvoer via de Demer wordt daarbij opnieuw optimaal benut door stuw K7 naar een lage stand te brengen. Dit kan op eenvoudige wijze aan de vaste regels worden toegevoegd. Wanneer de waterpeilen zowel opwaarts als afwaarts in de Demer onder een kritische waarde zijn gedaald kan de lediging worden ingezet. Dit zijn regels A.2' en K7.2'.

Deze aanbevelingen worden in volgende tabellen samengevat. Hierin stelt KW telkens de kritische waterhoogte voor die van toepassing is. Een exacte waarde hiervoor is in deze studie niet verder uitgewerkt. Verder staat RP voor referentiepeil en OP voor overstromingspeil.

Tabel 14: Verbeterde vaste regels voor stuw A

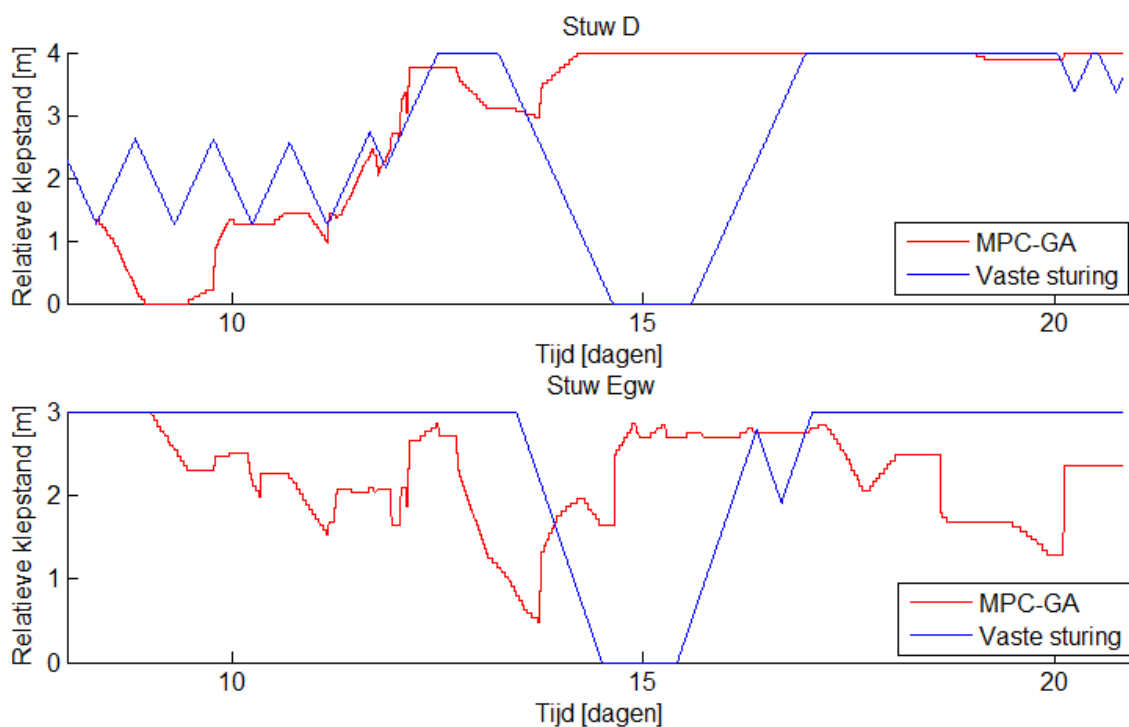
Regel	Voorwaarde	Actie
A.1'	$WL_{opw} < KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{afw} \sim RP_{afw}$	Stijgen met 0,01m/s
A.2'	$WL_{opw} < KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{DemAfw} < KW_{DemAfw}$ & $WL_{afw} > RP_{afw}$	Dalen met 0,01m/s
A.3'	$WL_{opw} > KW_{opw} + 0,01m$ & $WL_{afw} > OP_{afw} - marge$	Stijgen met 0,01m/s
A.4'	$WL_{opw} \geq KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{opw} \leq KW_{opw} + 0,01m$	Constant houden
A.5'	$WL_{opw} > KW_{opw} + 0,01m$	Dalen met 0,01m/s
A.Extrema'	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 3m)	Extrema aanleggen

Tabel 15: Verbeterde vaste regels voor stuw K7

Regel	Voorwaarde	Actie
K7.1'	$WL_{opw} < KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{DemAfw} < KW_{DemAfw}$ & $WL_{opw}(48u) < KW_{opw}$ & $WL_{Resch1} \sim RP_{Resch1}$	Naar referentiestand (~1,2m)
K7.2'	$WL_{opw} < KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{DemAfw} < KW_{DemAfw}$ & $(WL_{opw}(48u) > KW_{opw} \text{ OF } WL_{Resch1} > RP_{Resch1})$	Dalen
K7.3'	$WL_{opw} \geq KW_{opw} - 0,01m$ & $WL_{opw} \leq KW_{opw} + 0,01m$	Constant houden
K7.4'	$WL_{opw} > KW_{opw} + 0,01m$	Stijgen
K7.Extrema'	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 2,97m)	Extremum aanleggen

Stuwen D, Egw en Ers

Vervolgens blijken ook stuwen D en Egw een belangrijke invloed te hebben op de debietsverdeling in het gebied rond het Schulensmeer. Deze zijn beide gesitueerd aan de Vlootgracht, zoals aangeduid op Figuur 47. Stuw D is gelegen tussen het binnenbekken van het Schulensmeer en de Vlootgracht. Stuwen Egw en Ers vormen de verbinding tussen de Vlootgracht en de Demer. Het verloop van de klepstanden voor stuw D en stuw Egw is weergegeven in Figuur 49. Hieruit blijkt dat beide stuwen in de vaste sturing kunnen variëren volgens bepaalde regels, weergegeven in Tabel 16 en Tabel 17. In Tabel 18 staan vervolgens de vaste regels voor stuw Ers. Deze zal hier niet verder besproken worden, aangezien hier geen eenduidige aanbevelingen voor te vinden waren.



Figuur 49: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de stuwen D en Egw aan de Vlootgracht tijdens de historische was van september 1998.

Tabel 16: Vaste regels voor stuw D

Regel	Voorwaarde	Actie
D.1	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} < 19,94m$	Stijgen met 0,01m/s
D.2	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} \geq 19,94m$ & $WL_{opw} \leq 19,96m$	Constant houden
D.3	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} > 19,96m$	Dalen met 0,01 m/s
D.4	$WL_{afw} \geq 19,9m$ & $WL_{opw} < 22,7m$	Stijgen met 0,01 m/s
D.5	$WL_{afw} \geq 19,9m$ & $WL_{opw} \geq 22,7m$	Dalen met 0,01 m/s
D.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 4m)	Extremum aanleggen

Tabel 17: Vaste regels voor stuw Egw

Regel	Voorwaarde	Actie
Egw.1	$WL_{opw} < 20,7m$	Stijgen met 0,01 m/s
Egw.2	$WL_{opw} > 22,7m$	Dalen met 0,01 m/s
Egw.3	$WL_{opw} \geq 20,7m$ & $WL_{opw} \leq 22,2m$	Stijgen met 0,01 m/s
Egw.4	$WL_{opw} \geq 22,2m$ & $WL_{opw} \leq 22,7m$ & $WL_{afw} < 22,2m$	Dalen met 0,01 m/s
Egw.5	$WL_{opw} \geq 22,2m$ & $WL_{opw} \leq 22,7m$ & $WL_{afw} \geq 22,2m$	Stijgen met 0,01 m/s
Egw.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 3m)	Extremum aanleggen

Tabel 18: Vaste regels voor stuw Ers

Regel	Voorwaarde	Actie
Ers.1	$WL_{opw} < 20,5m$ OF $WL_{opw} > 21,1m$	Dalen met 0,01 m/s
Ers.2	$WL_{opw} \geq 20,5m$ & $WL_{opw} \leq 21,1m$ & $WL_{afw} < 21,0m$	Stijgen met 0,01 m/s
Ers.3	$WL_{opw} \geq 20,5m$ & $WL_{opw} \leq 21,1m$ & $WL_{afw} \geq 21,0m$	Constant houden
Ers.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 5,2m)	Extremum aanleggen

Door stuw D voor de bui te laten dalen wordt in de MPC-GA-regeling geanticipeerd op het groot aankomend debiet. Het waterpeil in het binnenbekken van het Schulensmeer zal daardoor tijdelijk onder het referentiepeil dalen. Dit blijkt ook uit het uitgaand debiet van het binnenbekken na 9 dagen, te zien op Figuur 41. Om dit te bereiken zou deze stuw in de vaste regeling kunnen worden neergelaten wanneer een hoog waterpeil opwaarts in de Demer wordt verwacht binnen 48 uur, maar de waterstand op het huidige moment nog laag is, regel D.1'. Tijdens het eerste gedeelte van de was, tot circa 13 dagen, reageren beide sturingsmethodes op een gelijkaardige manier. Hier is dus geen verbetering van de vaste regeling noodzakelijk. Deze werking zit in regels D.1' en D.3' vervat. Wanneer het waterpeil opwaarts in de Demer het kritisch niveau overschrijdt, zal immers overgeschakeld worden naar regel D.3'.

Na de piek blijft de klepstand gedurende lange tijd hoog in de MPC-GA-regeling terwijl dit in de vaste sturing niet het geval is. Dit komt omdat het ledigen en vullen van het binnenbekken via stuw A gebeurt in de MPC-GA-regeling. In realiteit kan het echter de bedoeling zijn dat ledigen van het wachtbekken steeds via stuw D geschiedt. Het is zelfs mogelijk dat de structuren zodanig ontworpen zijn dat ze alleen in die richting overstroomd mogen worden. Deze informatie was voor dit onderzoek niet ter beschikking waardoor het MPC-GA-algoritme geen rekening met dergelijke zaken houdt. Dergelijke randvoorwaarden zouden eenvoudig geïmplementeerd kunnen worden door bijvoorbeeld een strafkost op te leggen wanneer het debiet over stuw A negatief is. Omdat de resultaten met de intelligente sturing beter zijn dan die met de vaste, wordt daarom aangenomen dat het ook in de praktijk beter zou zijn om te ledigen via stuw A. Daartoe kan het eventueel nodig zijn deze regelstructuur in de toekomst aan te passen. In het algemeen kan dus gesteld worden dat het aangeraden is om stuw D standaard op de hoogste stand te plaatsen, behalve net voor en in het begin van een hevige bui. Dit zit impliciet in regel D.3' vervat.

Stuw Egw vervult ook een belangrijke rol tijdens de piek van de bui. Bij toepassing van de MPC-GA-sturing wordt de stuw op dat moment verlaagd zodat water uit de Demer via de Vlootgracht naar het buitenbekken van het Schulensmeer kan stromen. Hierdoor kan de capaciteit van het buitenbekken benut worden. Via regel Egw.1' kan dit geïmplementeerd worden in de vaste regels. Deze stelt dat de klepstand moet worden verlaagd wanneer een bepaald waterniveau in de Demer wordt overschreden. Hierbij wordt het waterpeil in de Vlootgracht rond het overstromingspeil gehouden door te sturen op basis van de inkomende en uitgaande debieten, zie regel Egw.2. Op die manier gebeurt een maximale vulling van de buitenbekkens. Op het moment dat het waterpeil in de Demer begint te dalen of het buitenbekken bijna volledig gevuld is, wordt stuw Egw opnieuw omhoog verplaatst via regel Egw.4'. Ledigen gebeurt in de MPC-GA-regeling niet via deze stuw, maar zeer geleidelijk via de Houwersbeek. Deze werkwijze is echter niet optimaal. Het lijkt aangeraden om de buitenbekkens wel via stuw Egw te ledigen wanneer het waterpeil in het netwerk terug gedaald is. Dit zal ook blijken in paragraaf 6.6, bij het ledigen van de wachtbekkens tussen twee neerslagpieken.

Voor deze stuwen geldt dezelfde opmerking als bij stuw A in verband met de stromingsrichting over de stuwen. De aanbevelingen ter verbetering van de huidige vaste regels, er van uitgaande dat dit geen probleem vormt, blijven voor beide stuwen vrij beperkt en zijn samengevat in Tabel 19 en Tabel 20.

Tabel 19: Verbeterde vaste regels voor stuw D

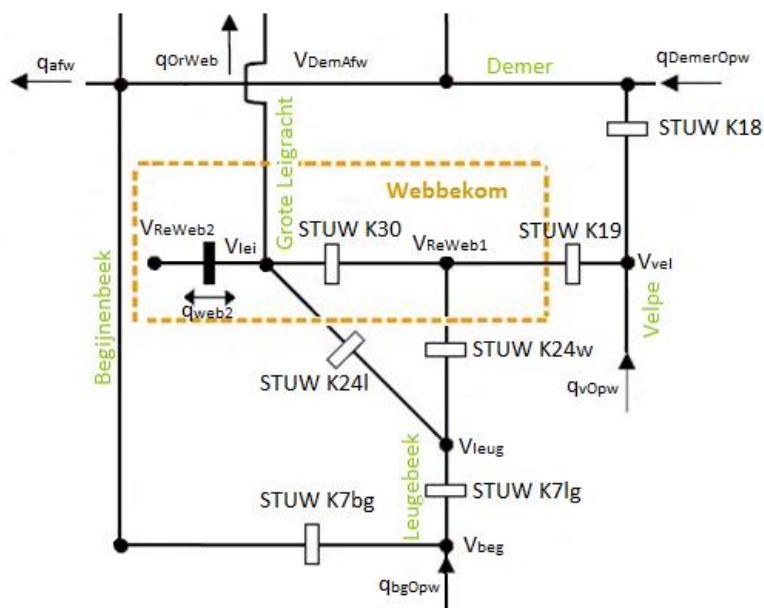
Regel	Voorwaarde	Actie
D.1'	$WL_{DemOpw}(48u) > KW_{DemOpw}$ & $WL_{DemAfw} < KW_{DemAfw}$ & $WL_{Afw} < KW_{Afw}$	Dalen met 0,01m/s
D.2'	$WL_{opw} > OP_{opw} - \text{marge}$	Dalen met 0,01m/s
D.3'	Alle andere situaties	Stijgen met 0,01m/s
D.Extrema'	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 4m)	Extremum aanleggen

Tabel 20: Verbeterde vaste regels voor stuw Egw

Regel	Voorwaarde	Actie
Egw.1'	$WL_{Dem} > KW_{Dem}$	Dalen met 0,01m/s
Egw.2'	$WL_{Dem} > KW_{Dem} \ \& \ WL_{vg} \sim OP_{vg}$	Sturen zodat $q_E = q_{sch4} + q_{Evs} - q_d$
Egw.3'	$WL_{Dem} < KW_{Dem} \ \& \ WL_{DemAfw} < KW_{DemAfw}$ & $WL_{Resch3} > KW_{Resch3}$	Dalen met 0,01m/s
Egw.4'	Alle andere situaties	Stijgen met 0,01m/s
Egw.Extrema'	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 3m)	Extremum aanleggen

6.4.2 Omgeving Webbekom

De verschillen tussen de MPC-GA-sturing en de vaste regels zullen in de omgeving van de Webbekom eerder beperkt blijven. De belangrijkste verschillen, met bijhorende aanbevelingen voor de vaste sturing, worden hieronder samengevat. Deze verbeteringen zijn minder concreet te formuleren en zullen een minder grote meerwaarde betekenen dan in de omgeving van het Schulensmeer, maar kunnen desalniettemin bijdragen tot een verbetering. Ze worden hier niet met even veel detail uitgewerkt, maar zullen eerder algemeen besproken worden. Figuur 50 geeft een overzicht van de omgeving van de Webbekom met de stuwen die hier van belang zijn. De huidige vaste regels voor deze stuwen staan in Bijlage E opgelijst.



Figuur 50: Detail van de omgeving van de Webbekom

Een eerste verbetering is mogelijk aan het vertakkingspunt in de Velpe, waar stuwen K18 en K19 het debiet verdelen tussen de Demer en het binnenbekken van de Webbekom. In de vaste sturing is K18 als vaste overlaat beschouwd. Hier kan, net als in het vertakkingspunt opwaarts in de Demer, een efficiëntere sturing van de debieten bekomen worden door beide stuwen te bewegen in plaats van slechts één van beide. Door bijvoorbeeld stuw K18 te laten stijgen en K19 te laten dalen, zal het binnenbekken van de Webbekom efficiënter gevuld worden, dan wanneer dit enkel met stuw K19 zou gestuurd worden.

Een volgend vertakkingspunt is gelegen aan de splitsing van de Begijnenbeek en de Leugebeek. Hier zijn enkele verschillen in de debietsverdeling voor beide regelingen te vinden, zoals te zien is in Figuur 43. Er kan echter besloten worden dat de vaste regels voor de stuwen K7bg en K7lg goed functioneren. Ze zorgen er voor dat steeds een vast debiet via de Begijnenbeek zal worden afgevoerd terwijl het overige water via de Leugebeek naar de wachtbekkens van de Webbekom stroomt. Een verbetering kan er hier in bestaan om bij de verdeling van de debieten rekening te houden met de waterpeilen afwaarts in de Demer en in de Webbekom. Wanneer het waterpeil afwaarts in de Demer bijvoorbeeld reeds alarmerend hoog is terwijl de Webbekom nog niet gevuld is, kan een verbetering worden geboekt door een herverdeling van het debiet. Mede doordat het inkomend debiet in de Begijnenbeek vrij laag blijft, gaat het slechts om een maatregel met beperkt effect.

Tot slot resten nog de drie stuwen K24l, K24w en K30 dewelke de debieten rond de Webbekom en de Grote Leigracht sturen. Hier zijn ook slechts in beperkte mate verbeteringen mogelijk. Doordat de drie stuwen er als het ware voor zorgen dat de Leugebeek, de Grote Leigracht en de Webbekom een driehoek vormen, kan de debietsverdeling op verschillende manieren goede resultaten leveren. De aanbeveling die kan worden gegeven om overschrijding van de overstromingspeilen in de Webbekom en de Grote Leigracht te voorkomen is om stuw K24w naar een hoge stand te brengen wanneer de kritische waterpeilen op strategisch bepaalde locaties zijn overschreden. Doordat het water afwaarts van de Grote Leigracht wordt afgevoerd via een duiker, blijft het uitgaande debiet hier vrij beperkt. Om de bergingsmogelijkheden optimaal te blijven benutten wanneer het overstromingspeil in de wachtbekkens quasi bereikt is, kan het inkomend debiet afgestemd worden op het uitgaand. Dit inkomend debiet is afkomstig van rechtstreekse regenval in dit deelgebied en de inkomende debieten via stuwen K19 en K7lg. Het opleggen van een voorwaarde die de doorgelaten debieten over beide stuwen aan elkaar koppelt wanneer de waterpeilen in de Grote Leigracht en de Webbekom net onder het overstromingspeil gelegen zijn, zou hier een belangrijke verbetering kunnen zijn. Deze aanbevelingen voor de omgeving van de Webbekom staan samengevat in Tabel 21.

Tabel 21: Aanbevelingen ter verbetering van de vaste sturing voor de omgeving van de Webbekom.

Stuwen	Maatregel
K18 en K19	Niet alleen K19 als beweegbare stuw gebruiken, maar beide stuwen op elkaar afstemmen.
K7bg en K7lg	Rekening houden met de waterpeilen afwaarts in de Demer en in de Webbekom bij het verdelen van de debieten.
K24w, K19 en K7lg	Stuw K24w hoog houden bij hoge waterpeilen in de Webbekom en de Grote Leigracht. Vervolgens de inkomende debieten via K19 en K7lg koppelen en afstemmen op het uitgaand debiet van de Grote Leigracht.

6.4.3 Conclusie

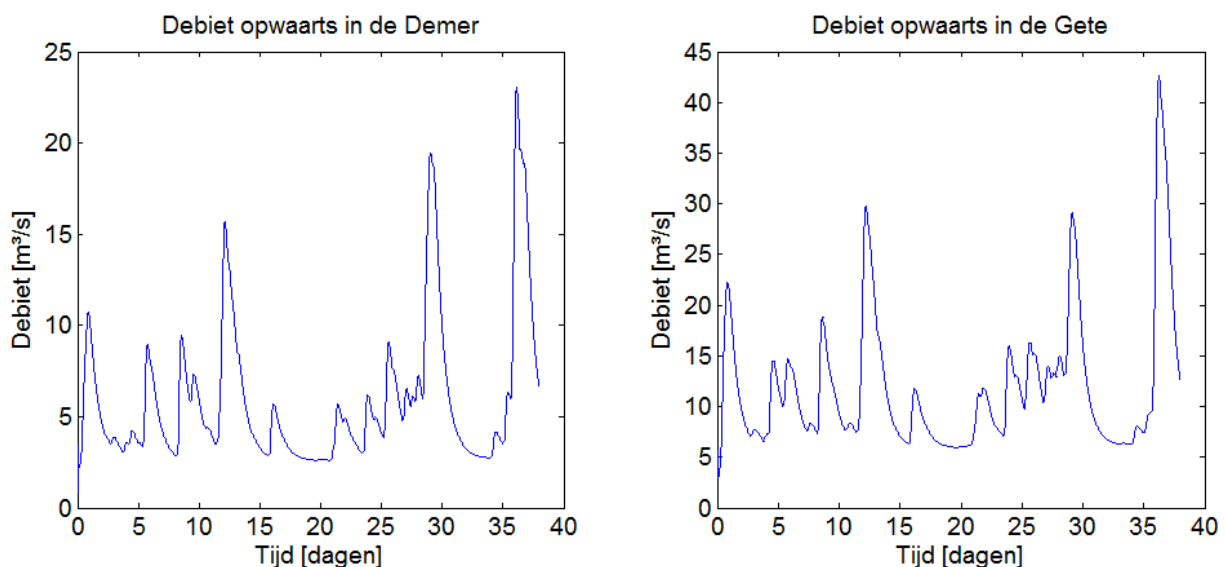
Enkele aanbevelingen werden geformuleerd ter verbetering van de vaste regels, zoals die tijdens de bui van september 1998 werden toegepast. Vooral aan het Schulensmeer lijkt ruimte voor verbetering aanwezig te zijn. Voor dit deel van het bekken zijn de aanbevelingen dan ook uitgewerkt tot concrete regels. Hierbij dient opgemerkt te worden dat voorlopig nog

geen invulling is gegeven aan de kritische waarden en dat de snelheid waarmee de stuwen optimaal bewegen niet verder werd onderzocht. In de omgeving van de Webbekom lijkt de vaste regeling al voor een goede sturing te zorgen. Bijgevolg zijn hier slechts enkele algemene mogelijke verbeteringen gesuggereerd.

Voor de meeste geformuleerde aanbevelingen kan beroep worden gedaan op de huidige infrastructuur en real-time waterhoogtemetingen. Het is echter zo dat voor sommige aanbevelingen een uitbreiding van het systeem zich opdringt. Zo zullen bijkomende locaties met real-time waterhoogtemetingen moeten worden geconstrueerd en moet het mogelijk zijn om beroep te doen op voorspellingsresultaten. Door rekening te houden met een aantal voorspelde waterhoogtes moet het ook via vaste regels mogelijk zijn om op een bepaalde manier te anticiperen op verwachte neerslag.

6.5 Historische gebeurtenis januari 2002

Het is interessant om na te gaan hoe het algoritme reageert indien een andere bui zich zou voordoen dan de historische was van september 1998. Om dit te onderzoeken is gekozen voor de historische gebeurtenis van januari 2002. Het verloop deze bui verschilt van dat van september 1998 in het feit dat het hier niet één grote brede piek is die moet worden geborgen maar de bui uit een aantal smallere pieken bestaat die elkaar opvolgen. Figuur 51 geeft het verloop van deze bui weer voor het meest opwaarts gemodelleerde punt in de Demer en de Gete. Daarbij kan zoals gesteld worden opgemerkt dat de pieken iets lager zijn dan bij de bui van september 1998.

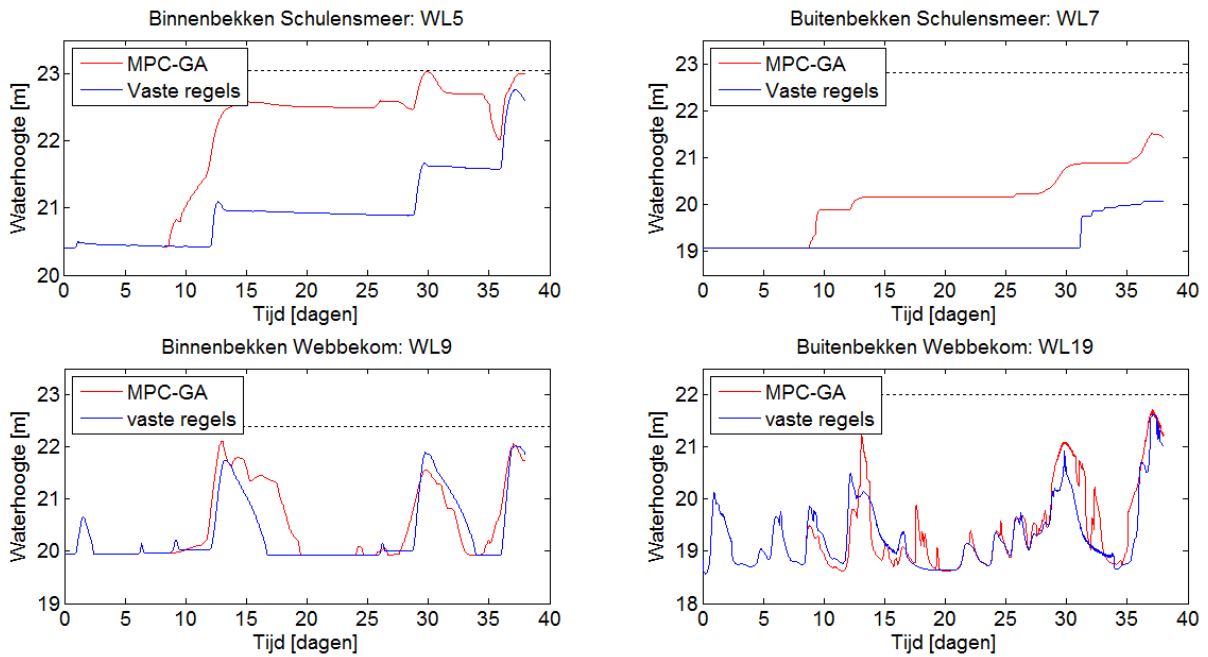


Figuur 51: Inkomend debiet opwaarts in de Demer (links) en opwaarts in de Gete (rechts) voor de historische gebeurtenis van januari 2002.

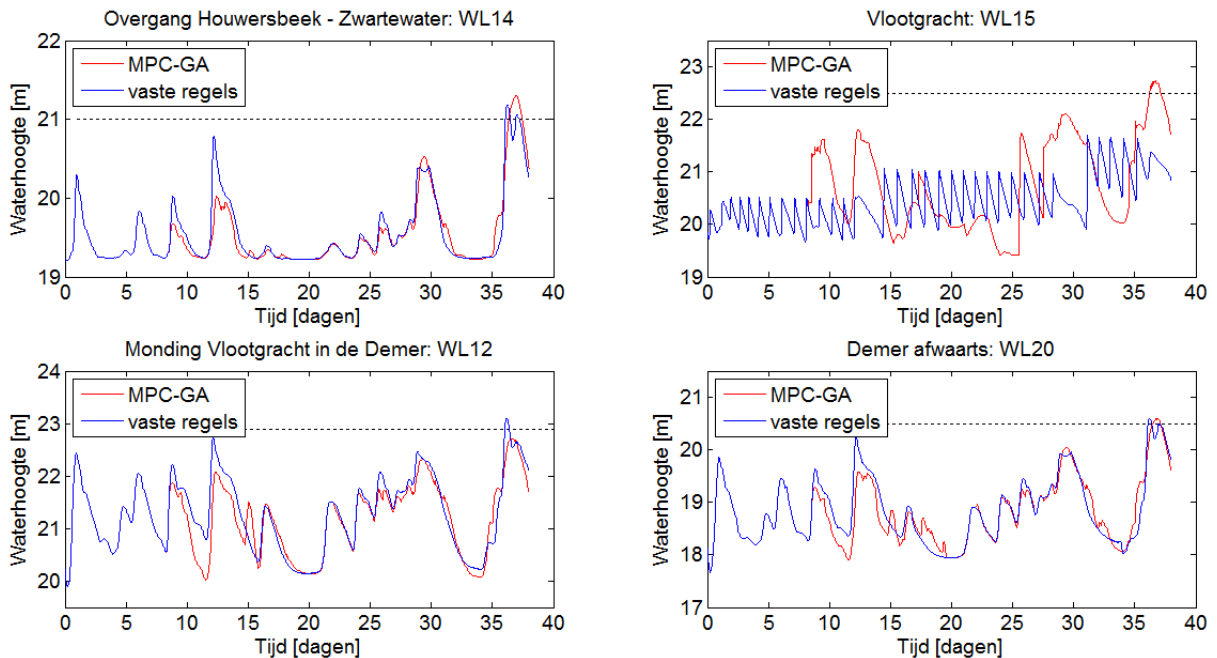
Zoals blijkt uit bovenstaande figuur is dit een zeer lange periode. Daarom is besloten om opnieuw slechts een deel van de bui te simuleren, namelijk vanaf 8,25 dagen. Op deze manier zal de rekentijd beperkt blijven en blijft voor het algoritme toch voldoende tijd over om te anticiperen op de eerste hoge piek. Door het eerste deel van de bui door te rekenen met de vaste regels zullen goede beginvoorwaarden voor het MPC-GA-algoritme bekomen worden.

6.5.1 Analyse van de resultaten

De bekomen resultaten voor een aantal belangrijke waterpeilen zijn hierna samengevat in Figuur 52 en Figuur 53.



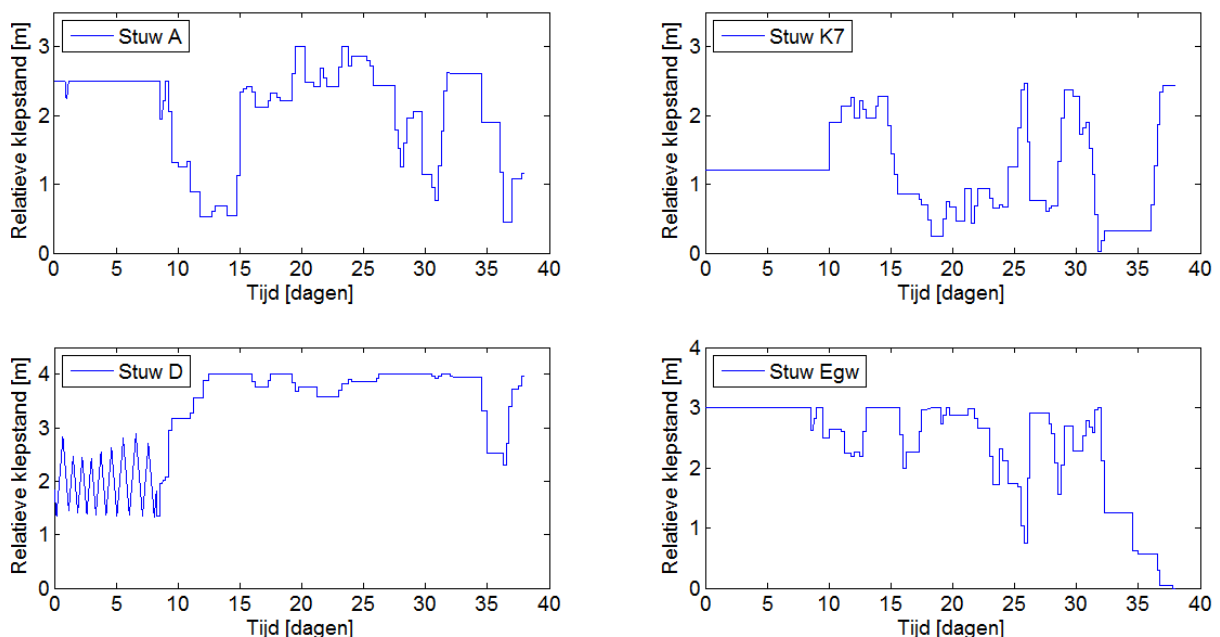
Figuur 52: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schuilensmeer en de Webbekom tijdens de historische was van januari 2002.



Figuur 53: Vergelijking tussen de vaste sturing en de MPC-GA-regeling van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de historische was van januari 2002

Hieruit blijkt dat alle wachtbekkens reeds tijdens de eerste piek gevuld worden. De wachtbekkens van de Webbekom worden steeds tijdig terug geledigd. Er stelt zich echter een probleem bij de wachtbekkens van het Schulensmeer, aangezien deze niet worden geledigd na de eerste piek. De verklaring hiervoor is dat de kost om de wachtbekkens gevuld te houden bij deze bui lager blijkt te zijn dan de kost die op die manier elders in het netwerk vermeden wordt. Immers, indien de wachtbekkens zich zouden ledigen, zouden de andere waterpeilen opnieuw stijgen en zou de kost overal toenemen. Er stelt zich dus een probleem met de gewichten die in de kostfuncties aan de verschillende waakpeilen en locaties zijn toegekend. Deze moeten in later onderzoek verder geoptimaliseerd worden om dergelijke situaties te vermijden. De gewichten gekoppeld aan de waterpeilen rond de Webbekom blijken wel zeer goed gedefinieerd te zijn, aangezien de lediging daar zoals gesteld perfect verloopt.

Het feit dat het algoritme correct werkt en de schade zo laag mogelijk probeert te houden blijkt wanneer het waterpeil in het binnenbekken van het Schulensmeer grondig wordt bestudeerd. Daaruit wordt duidelijk dat het algoritme anticipeert op het grote verwachte inkomend debiet door het waterpeil in het binnenbekken zo snel mogelijk te laten dalen. Het verloop van de stuwen die hier een belangrijke invloed hebben is weergegeven in Figuur 54. Voor de laatste piek, na circa 34 dagen, worden alle kleppen omlaag bewogen. Hierdoor zal een maximale lediging van het binnenbekken gebeuren en dit zowel via stuw A als via stuw D. Tijdens de laatste piek wordt het bekken opnieuw gevuld. Daartoe bewegen stuwen K7 en D snel terug omhoog. Het waterpeil in het binnenbekken wordt op die manier opnieuw tot net onder het overstromingspeil gestuurd.

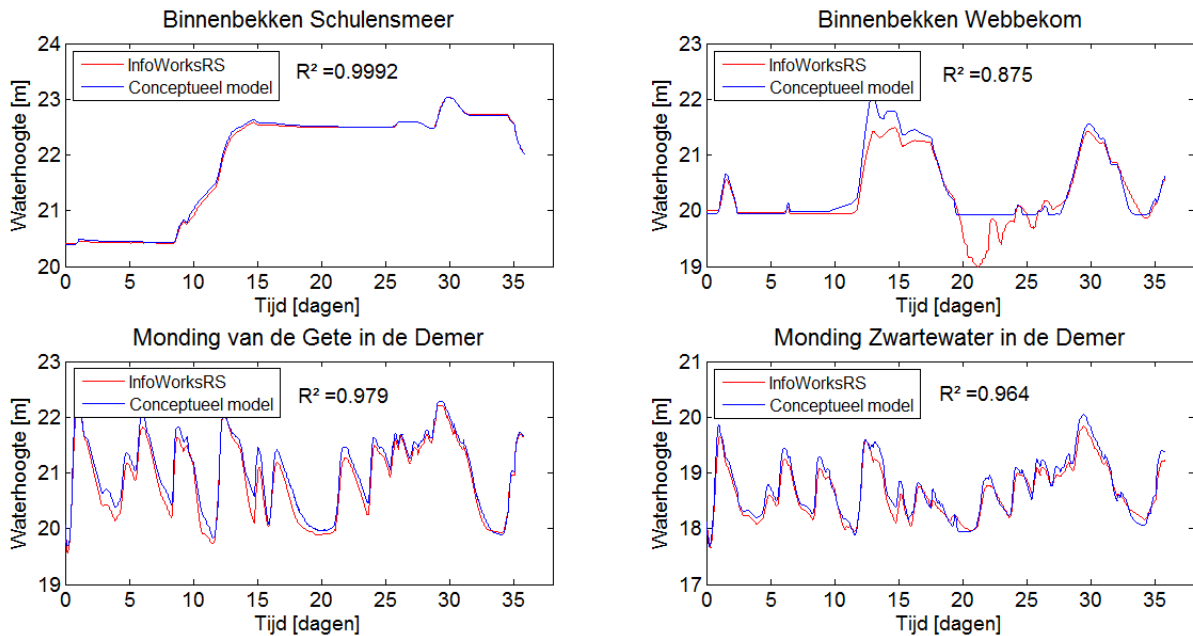


Figuur 54: Verloop van de belangrijkste stuwen aan het Schulensmeer (A, K7, D en Egw) tijdens de historische was van januari 2002.

6.5.2 Validatie van het model voor de historische gebeurtenis van januari 2002

De klepstanden bekomen met de MPC-GA-sturing zijn vervolgens aangelegd in IWRS om de correcte werking van het conceptueel model ook voor deze ontwerpbeurt te garanderen. Figuur 55 geeft de vergelijking van de resultaten met beide modellen weer. De

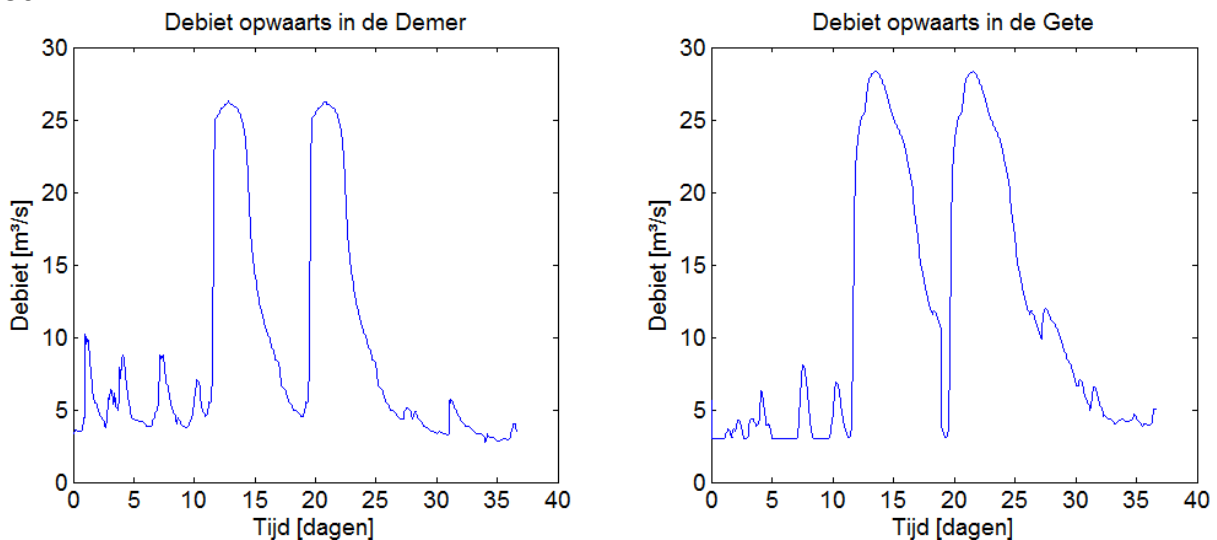
overeenkomst blijkt zeer goed te zijn. Het verschilpunt in het binnenbekken van de Webbekom werd reeds in paragraaf 5.3 beschreven. Het probleem hierbij is dat het minimale waterpeil van de hypsometrische curven in het conceptueel model onvoldoende laag zijn vastgelegd. Dit is zoals gesteld te wijten aan de manier waarop de kalibratie van het conceptueel model is gebeurd. Dit kan in verder onderzoek worden opgelost door het conceptueel model ook af te ijken aan periodes van droogte.



Figuur 55: Vergelijking simulatieresultaten conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling.

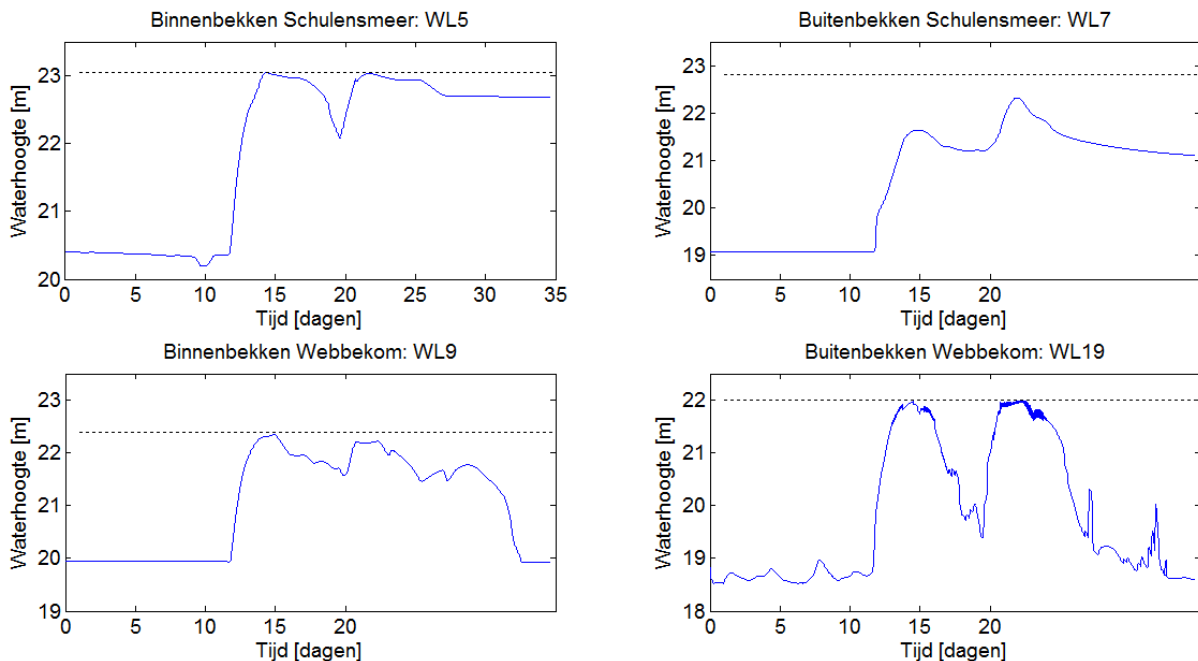
6.6 Openvolging van twee grote neerslagpieken

Tot slot is een simulatie met het geïntegreerd model uitgevoerd, opnieuw voor een regelstap van 6 uur, voor een artificiële bui bestaande uit twee opeenvolgende perioden van hoge neerslag. Hiervoor is de piek van de bui van september 1998 tweemaal achter elkaar geplaatst. Het inkomend debiet opwaarts in de Demer en de Gete is weergegeven in Figuur 56.

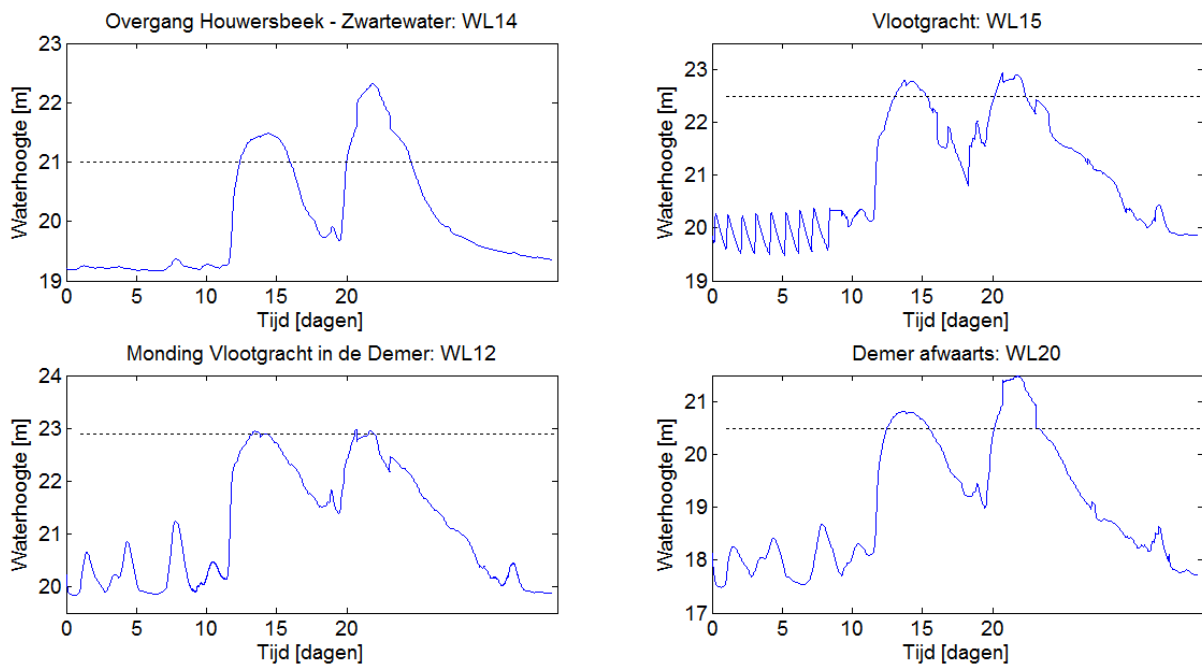


Figuur 56: Inkomend debiet opwaarts in de Demer (links) en opwaarts in de Gete (rechts) tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998.

De resultaten voor een aantal belangrijke waterpeilen zijn hierna weergegeven in Figuur 57 en Figuur 58. Daarin blijkt dat het waterpeil in de wachtbekkens tussen de twee pieken sterk verlaagd wordt. Het buitenbekken van de Webbekom ledigt voor het grootste deel en ook het waterpeil in het binnenbekken van het Schulensmeer daalt met ongeveer een meter. Het algoritme slaagt er ook tijdens de tweede piek in om overstroming van de wachtbekkens te voorkomen, zelfs voor deze extreme gebeurtenis.



Figuur 57: Verloop van de waterpeilen in het binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-sturing.



Figuur 58: Verloop van de waterpeilen aan de overgang van Houwersbeek- Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de tijdens een artificiële bui met twee opeenvolgende pieken als in de bui van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-sturing.

Het algoritme anticipeert dus goed op de tweede piek door de wachtbekkens zo veel mogelijk te ledigen. Door de extreme neerslaghoeveelheden heeft het logischerwijs niet genoeg tijd om het waterpeil in het wachtbekken tot het normale niveau te verlagen. Tijdens de tweede piek liggen de waterhoogtes op de meeste plaatsen dan ook een stuk hoger. Vooral afwaarts in de Demer is dit duidelijk waar te nemen. Opnieuw blijkt de waterhoogte in de wachtbekkens van het Schulensmeer aan het einde van de bui onvoldoende af te nemen. Dit hangt zoals hiervoor reeds gesteld samen met de verhouding van de gewichten in de kostfuncties.

6.7 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn verschillende simulaties met het MPC-GA-model geanalyseerd. Uit de parameterstudie blijkt dat de kwaliteit van de resultaten in sterke mate afhankelijk is van het aantal beschouwde gevallen. Vooral bij een zeer beperkt aantal gevallen komt dit fel naar voren. Er zal steeds minder winst per bijkomend beschouwd geval geboekt worden bij toenemend aantal beschouwde gevallen. Er kan gesteld worden dat vanaf 200 gevallen steeds goede resultaten bekomen worden.

De regelstap van de simulatie bepaalt eveneens in belangrijke mate de kwaliteit van de resultaten. Hier geldt dat een kleinere regelstap gemiddeld gezien een lagere kost levert en bijgevolg betere resultaten. Dit is een logisch gevolg van twee fenomenen. Aan de ene kant verbetert de mogelijkheid om te anticiperen op de aankomende bui en aan de andere kant neemt het totaal aantal beschouwde gevallen over de hele simulatie toe. Bijgevolg hangt het resultaat bij een grotere regelstap meer af van toeval en zal de spreiding hierbij dus ook groter zijn. Daarom is de regelstap gelijk genomen aan de kleinste onderzochte waarde, 15 minuten. Het is ook deze regelstap die later in de praktijk zal worden toegepast.

Uit de analyse van de simulatieresultaten met 40 bijgehouden beste gevallen blijkt dat in het overgrote deel van de regelstappen het beste geval uit vorige tijdstap behouden blijft. Wanneer toch overgeschakeld wordt naar een ander geval blijkt dit gemiddeld voor 16% te gebeuren naar een semi-random geval dat op die tijdstap gegenereerd werd. Wanneer overgestapt wordt naar een geval uit de lijst van 40 besten uit de vorige tijdstap, blijkt dit vooral te gebeuren naar een geval uit een van de eerste posities. Naarmate de positie toeneemt blijkt het bijhouden van een geval steeds minder relevant te worden voor de kwaliteit van het algoritme. Simulatieresultaten met minder bijgehouden beste gevallen bevestigen deze bevindingen en leveren zelfs betere resultaten. Dit is te verwachten aangezien op die manier rekentijd vrijkomt om meer semi-random gevallen te genereren. Daarom is gesteld dat het bijhouden van de vier beste gevallen volstaat.

Wat de controlehorizon betreft, is besloten dat 48 uur de optimale waarde is. Op deze manier heeft het algoritme voldoende tijd om te anticiperen op de aankomende bui, zelfs bij een grote regelstap. Het verder vergroten van de controlehorizon lijkt niet interessant, aangezien dit gepaard zou gaan met een groter vereist aantal beschouwde gevallen om tot een eenduidige sturing te komen. Daarnaast zal de onzekerheid op de neerslag toenemen, wat een belangrijke invloed zal hebben op de resultaten. Om dit in te rekenen werd gesuggereerd om verschillende neerslagsscenario's door te rekenen waarvoor steeds de optimale sturing gezocht wordt. Vervolgens wordt de kost horende bij de optimale sturing voor elk scenario vermenigvuldigd worden met de bijhorende kans van voorkomen. De

sturing van het scenario waarvoor deze waarde het grootst is, zal vervolgens worden toegepast. Voor het in detail uitwerken van deze methodologie is verder onderzoek vereist.

Uit de parameterstudie volgden dus de optimale parameters voor het MPC-GA-algoritme. Deze zijn gelet op de beperkte rekencapaciteit in de uitgevoerde experimenten (i) een regelstap van 15 minuten, (ii) 200 beschouwde gevallen, (iii) 4 bijgehouden besten en (iv) een controlehorizon van 48 uur. Met deze parameters zullen de resultaten voor de onderzochte ontwerpbuien zeer bevredigend zijn en zal de totale kost in grote mate gereduceerd worden ten opzicht van de vaste regeling. Voor tien simulaties was de gemiddelde kost 41% lager dan bij de vaste regeling.

In de simulatieresultaten met 200 beschouwde gevallen en 40 bijgehouden besten konden twee groepen onderscheiden worden. Dit duidt er op dat 200 beschouwde gevallen eigenlijk te weinig is om een eenduidige optimale sturing te bekomen. Het grote verschil tussen beide groepen werd verklaard door de manier waarop de kostfuncties boven het overstromingspeil gedefinieerd zijn. Deze verlopen namelijk lineair, zodat een hoge smalle overstromingspiek tot dezelfde kost leidt als een brede lage piek. Dit is echter in tegenstelling tot wat in de realiteit wordt verwacht. De schade zal in praktijk immers meer dan lineair toenemen met het waterpeil. Er dient dan ook verder onderzoek naar deze kostfuncties te gebeuren. Het zou bovendien interessant zijn om deze te koppelen aan monetaire waarden.

Na diepgaande analyse van een simulatieresultaat bleek dat de winst van de MPC-GA-regeling voornamelijk bekomen werd door het aannemen van een andere verdeling van de debieten in het netwerk. Het grootste verschil hierbij is dat het debiet via stuwen Egw en Ers bij de MPC-GA-regeling van de Demer naar de Vlootgracht stroomde, terwijl dit bij de vaste regeling andersom gebeurde. Daarnaast bleek ook dat stuw D niet meer gebruikt werd om het binnenbekken te ledigen en de buitenbekkens te vullen. Dit eerste gebeurde namelijk via stuw A en het tweede via stuwen Egw en Ers. Het grootste verschil aan de Webbekom is terug te vinden bij de afvoer van de Leugebeek. Deze is duidelijk hoger in het model met MPC-GA-sturing. Bij het bekomen van deze resultaten werd rekening gehouden met de eigenschappen van de aanwezige stuwen en werd geen preferentiële richting voor de stroming opgelegd. Het is echter mogelijk dat het in de praktijk niet de bedoeling is om stroming in de andere richting toe te laten dan op dit moment het geval is. Dergelijke randvoorwaarden kunnen later indien nodig op een eenvoudige manier in het model worden geïmplementeerd.

Om na te gaan of de bekomen resultaten effectief beter zijn dan die met de vaste regeling is een evaluatie van de efficiëntie gebeurd. Hieruit bleek dat het MPC-GA-algoritme er in slaagde de overstromingen in het gehele netwerk bijkomend te beperken. Het totaal overstroomd volume werd voor de besproken simulatie met 46% gereduceerd. Bijgevolg kan besloten worden dat de MPC-GA-sturing tot betere resultaten leidt dan de vaste regels.

Daarom zijn uitgaande van deze resultaten enkele aanbevelingen ter verbetering van de vaste regels geformuleerd. Deze hebben vooral betrekking op de stuwen rond het Schulensmeer. Door de verbeterde vaste regels in gebruik te nemen zullen de resultaten op korte termijn kunnen worden verbeterd.

Vervolgens is ook een analyse uitgevoerd van de manier waarop het systeem reageert op de historische was van januari 2002. De totale kost bij toepassing van de MPC-GA-sturing was wel iets hoger dan de kost bekomen met de vaste regeling. De oorzaak hiervan is dat het algoritme de wachtbekkens meer gaat vullen dan nodig en deze nadien moeilijk terug ledigt. Dit hangt samen met de waarden voor de gewichten van de kostfuncties die aan de verschillende waterpeilen zijn toegekend. Hieruit volgt opnieuw dat het erg belangrijk is dat de kostfuncties nader onderzocht worden, vooral om het ledigen van de wachtbekkens te verbeteren.

Tot slot is het MPC-GA-algoritme ook toegepast op een artificiële bui bestaande uit twee opeenvolgende perioden van hoge neerslag. Hiervoor is de piek van de bui van september 1998 tweemaal kort na elkaar geplaatst. Hieruit bleek dat het algoritme de wachtbekkens zo veel mogelijk gaat ledigen voor het aantreden van de tweede piek. Het buitenbekken van de Webbekom ledigt daarbij quasi volledig tussen de twee pieken. In de andere wachtbekkens gebeurt dit slechts beperkt.

Samenvattend kan gesteld worden dat het MPC-GA-algoritme goed functioneert. Het slaagt er in om overstromingen in belangrijke mate te beheersen en te anticiperen op de verwachte neerslag. Verbetering is echter nog mogelijk bij het ledigen van de wachtbekkens. Verder onderzoek naar de kostfuncties kan de resultaten nog verbeteren.

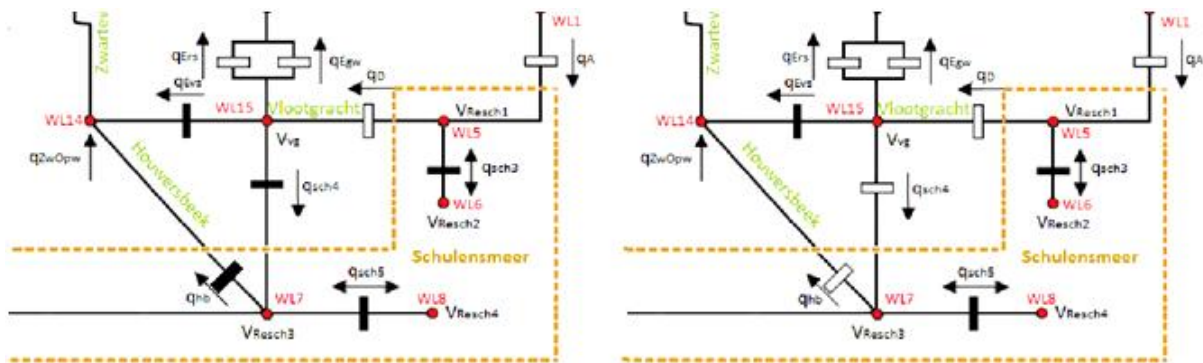
Hoofdstuk 7: Extra regelbare stuwen

Uit de resultaten van vorig hoofdstuk blijkt dat de waterpeilen in het buitenbekken van het Schulensmeer (WL7 en WL8) steeds ver onder hun overstromingspeil blijven. Daar gaat dus veel potentiële berging verloren. In dit hoofdstuk wordt in eerste instantie nagegaan waarom deze berging niet benut wordt. Vervolgens zal een maatregel onderzocht worden die moet zorgen voor een efficiënter gebruik van de aanwezige bergingscapaciteit. Dit gebeurt aan de hand van een grondige analyse van simulatieresultaten, gevolgd door een evaluatie van de efficiëntie. Hierbij wordt zowel vergeleken met de MPC-GA-sturing uit vorig hoofdstuk als met de vaste regeling. Dit zal opnieuw gebeuren door gebruik te maken van de historische gebeurtenis van september 1998, gesimuleerd vanaf 2 september 9u tot 21 september 5u met toepassing van MPC-GA vanaf 10 september 17u.

7.1 Bergingscapaciteit van het buitenbekken van het Schulensmeer

Het feit dat de wachtbekkens niet hoger gevuld worden duidt er op dat dit niet mogelijk is in het model. Wanneer naar de modellering van dit gebied wordt gekeken blijkt dat het buitenbekken V_{Resch3} zowel met de Vlootgracht als met de Zwartewater verbonden is via een vaste overlaat. Dit heeft als gevolg dat het bekken alleen tot aan het overstromingspeil gevuld kan geraken wanneer zowel de Vlootgracht als de Zwartewater eveneens dit peil aannemen. Het overstromingspeil in de Zwartewater ligt echter lager, waardoor bij een volledige vulling van het buitenbekken op die plaats overstromingen zouden ontstaan die gepaard gaan met een grote kost. Bijgevolg stuurt het MPC-GA-algoritme zodanig dat het waterpeil in de Zwartewater beperkt blijft om zo de kost laag te houden, waardoor ook het waterpeil in Resch3 beperkt blijft.

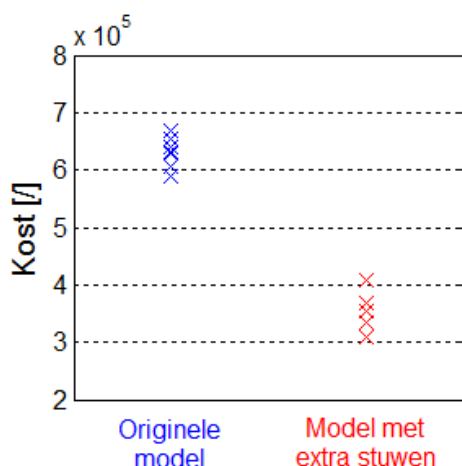
Om toch optimaal gebruik te kunnen maken van de bergingscapaciteit van het buitenbekken lijkt het interessant de twee vaste overlaten te vervangen door twee extra regelbare stuwen. Op deze manier zal het waterpeil in de Zwartewater minder invloed ondervinden van dat in het buitenbekken. Omdat het in deze fase van het onderzoek slechts de bedoeling is om na te gaan of het hiermee effectief mogelijk is een belangrijke verbetering te bekomen zijn de twee extra regelbare stuwen identiek aan stuw A gekozen. In verder onderzoek kunnen deze dan eventueel nader bepaald worden. Figuur 59 geeft een detail van de nieuwe modellering (rechts) in de buurt van het Schulensmeer naast de originele (links). Hierin zijn vaste overlaten weergegeven met een volle rechthoek en beweegbare stuwen met een holle rechthoek.



Figuur 59: Vergelijking van het originele model (links) en het model met extra stuwen (rechts)

7.2 Resultaten

Om het effect van de extra stuwen ten opzichte van het originele model na te gaan zijn vijf simulaties uitgevoerd met het aangepaste model. De resultaten voor de totale kost van deze simulaties, met 200 beschouwde gevallen, 40 bijgehouden besten en een regelstap van 15 minuten, staan weergegeven in Figuur 60 samen met de tien overeenkomstige simulatieresultaten uit het originele MPC-GA-model.



Figuur 60: Vergelijking van de totale kost voor simulaties met het originele model en het model met extra stuwen (regelstap 15 minuten, 200 gevallen, 40 bijgehouden besten)

Het model met extra stuwen blijkt significant betere resultaten te leveren en is in staat om overstromingen verder te beheersen. De gemiddelde kost blijkt te zijn gedaald met maar liefst 43%. Door de extra bergingsmogelijkheden in het buitenbekken van het Schulensmeer zullen de waterpeilen elders in het netwerk immers lager kunnen blijven. Dat de spreiding voor de resultaten met de extra stuwen iets groter is dan bij het originele model is te wijten aan het feit dat het algoritme nu op veertien stuwen tegelijk stuurt. Bijgevolg zijn er veel meer combinatiemogelijkheden en is er dus meer variatie op de resultaten te verwachten indien het aantal beschouwde gevallen beperkt is. Het benodigde aantal beschouwde gevallen om tot een eenduidige sturing te komen zal hierbij dan ook groter zijn dan voor het originele model.

7.3 Diepgaande analyse van een simulatieresultaat

Opnieuw kan gesteld worden dat indien voldoende rekenkracht beschikbaar is, de resultaten steeds even goed of beter zullen zijn als de beste resultaten die in dit onderzoek bekomen zijn. Daarom volgt hieronder een diepgaande analyse van het beste simulatieresultaat, datgene met de laagste kost. De overige simulatieresultaten met het nieuwe model kenden immers een gelijkaardig verloop. De resultaten van deze simulatie zullen hieronder vergeleken worden met het in Hoofdstuk 6 besproken resultaat, bekomen met de MPC-GA-regeling in het originele model.

Figuur 61 geeft een vergelijking van de cumulatieve debietverdeling in beide simulaties weer. Hierin zijn de extra regelbare stuwen weergegeven met een zwart-witte rechthoek. De waarden op de figuur stellen de verhouding voor van het verschil tussen de cumulatieve debieten van beide regelmethodes tot de cumulatieve debieten in het originele model, zoals duidelijk wordt in volgende formule:

$$\frac{\sum Q_{Extra} - \sum Q_{Originele}}{\sum Q_{Originele}} \quad (7.1)$$

Deze cumulatieve debieten werden opnieuw bepaald voor de eerste achttien dagen van de historische was van september 1998. Tabel 22 geeft vervolgens een gedetailleerd overzicht van de verschillen tussen beide regelingen in de verschillende vertakkingspunten van het netwerk. Daarbij wordt in de kolom 'invloed' voor ieder debiet weergegeven of het al dan niet om een belangrijke wijziging gaat. De vergelijkende tabel van het model met extra stuwen met de resultaten van de vaste regeling is eveneens opgesteld en is terug te vinden in Bijlage F, samen met de bijhorende overzichtsfiguur.

Uit de bekomen resultaten blijkt dat de regelingen in beide modellen een aantal verschillen vertonen. De belangrijkste wijzigingen zijn gesitueerd in het gebied van het Schulensmeer. Dit is volgens de verwachtingen aangezien daar de wijzigingen in het netwerk zijn doorgevoerd. Vooreerst wordt opwaarts veel meer water via stuw A naar het binnenbekken gevoerd. Dit extra volume wordt via stuw D integraal doorgevoerd naar de Vlootgracht en van daaruit verder naar de buitenbekkens Resch3, Resch4 en Resch5. Ook via stuwen Egw en Ers wordt tijdens de piek een groter volume van de Demer naar de buitenbekkens geleid. Tijdens het ledigen zal deze weg in de omgekeerde richting worden gebruikt om een gedeelte van het water uit het binnenbekken af te voeren. Aan de Webbekom zijn tot slot ook nog een aantal verschillen op te merken. Deze zijn echter minder prominent aanwezig en worden veroorzaakt door de veranderde opwaartse omstandigheden.

Tabel 22: Vergelijking tussen de resultaten via MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen voor de was van september 1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen.

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. originele model	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen aan Schulensmeer
	originele model	Extra stuwen			
Demer opwaarts					
qA	4787	7457	+56%	1	Meer vulling binnenbekken via A
qK7	15100	12405	-18%	1	Kleinere afvoer via Demer
VDemOpw	11	35	+220%	0,5	Toename berging opwaarts in de Demer
Schulensmeer binnenbekken					
qD	293	3078	+951%	1	Sterk toegenomen afvoer via D
qsch3	2364	2300	-3%	0	Bijna gelijke vulling tweede binnenbekken
VResch1	2131	2080	-2%	0	Bijna gelijke berging in binnenbekken Schulensmeer
Vlootgracht					
qEgwrs	-1955	-1117	-43%	1	Verminderde instroom vanuit de Demer
qEvs	124	127	+3%	0	Gelijke afvoer naar de Zwartewater
qsch4	2128	4067	+91%	1	Meer vulling van het buitenbekken Schulensmeer
Vvloot	12	17	+46%	0	Kleine toename berging Vlootgracht
Zwartewater					
qzwzb	1628	888	-45%	1	Afname afvoer naar de Zwartebeek
Vzwartewater	23	19	-20%	0	Kleine afname berging Zwartewater
Schulensmeer buitenbekken					
qsch5	221	1214	+449%	1	Toegenomen doorstroming naar het tweede buitenbekken
qhb	778	31	-96%	1	Zeer sterke afname afvoer naar de Houwersbeek
qOrResch	306	1044	+241%	1	Sterk toegenomen afvoer naar het derde buitenbekken
VResch3	792	1747	+121%	1	Sterke toename berging buitenbekken Schulensmeer

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. originele model	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen aan Schulensmeer
	originele model	Extra stuwen			
Herk en Gete					
qgete	25300	25300	0%	0	Gelijke afvoer via de Gete
qhs5	262	262	0%	0	Gelijke afvoer naar derde buitenbekken
Vherk	0	0	0%	0	Gelijke berging Herk
Begijnenbeek					
qK7bg	1816	1880	+3%	0	Quasi gelijke afvoer via de Begijnenbeek
qK7lg	1141	1078	-6%	0	Quasi gelijke afvoer via de Leugebeek
Vbeg	0	0	0%	0	Gelijke berging Begijnenbeek
Leugebeek					
qK24l	1260	1037	-18%	0,5	Verminderde afvoer naar de Grote Leigracht
qK24w	433	601	+39%	0,5	Toegenomen vulling binnenbekken Webbekom
Vleug	0	0	0%	0	Gelijke berging Leugebeek
Webbekom binnenbekken					
qK30	3570	4762	+33%	1	Toegenomen afvoer naar de Grote Leigracht
VReWeb1	952	703	-26%	0,5	Afname berging binnenbekken Webbekom
Velpe					
qK18	1395	631	-55%	1	Afgenomen doorvoer naar de Demer
qK19	4089	4864	+19%	1	Toegenomen afvoer naar de Webbekom
Vvel	17	6	-67%	0,5	Afname berging Velpe

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. originele model	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen aan Schulensmeer
	originele model	Extra stuwen			

Grote Leigracht

qweb2	696	766	+10%	0,5	Toegenomen afvoer naar tweede buitenbekken Webbekom
qOrWeb	4237	5134	+21%	1	Toename doorvoer naar Demer
Vlei	16	18	+13%	0	Kleine toename berging Grote Leigracht

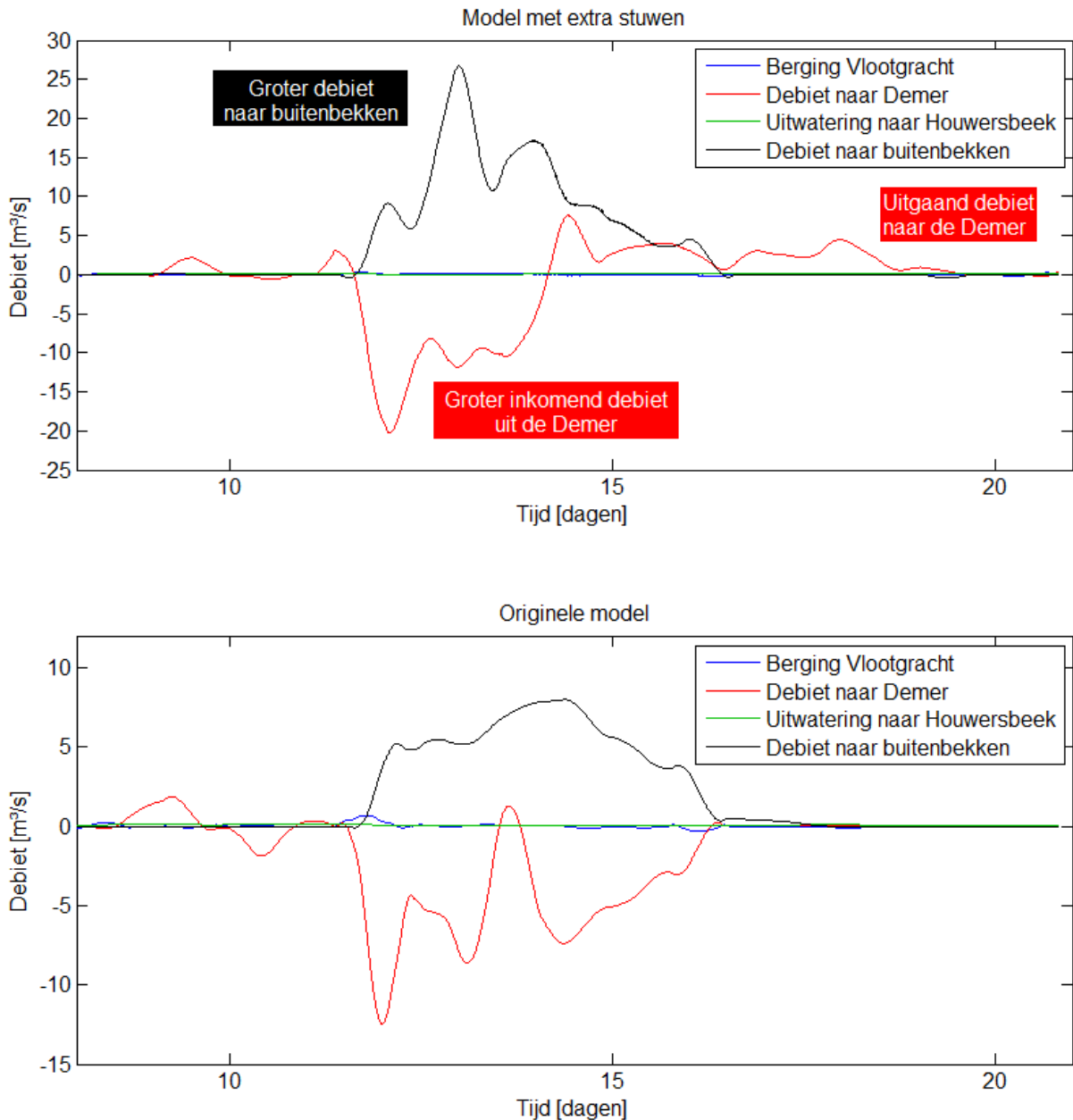
Demer afwaarts

qafw	53321	50875	-5%	1	Sterk toegenomen berging in het volledige bekken
------	-------	-------	-----	---	---

Uit voorgaande tabel blijkt dat in het model met extra stuwen ongeveer 2500.10³m³ water extra in het systeem geborgen wordt. Dit blijkt zoals verwacht quasi volledig te gebeuren in de buitenbekkens van het Schulensmeer, dewelke beter benut worden. De extra opslagcapaciteit voor Resch3 (955.10³m³), Resch4 (993.10³m³) en Resch5 (738.10³m³) tezamen bedraagt namelijk 2686.10³m³. Deze waarde komt slechts beperkt tot uiting in de toegenomen berging in het volledige bekken, omdat elders de waterpeilen zullen dalen en op die plaatsen dus minder berging zal zijn.

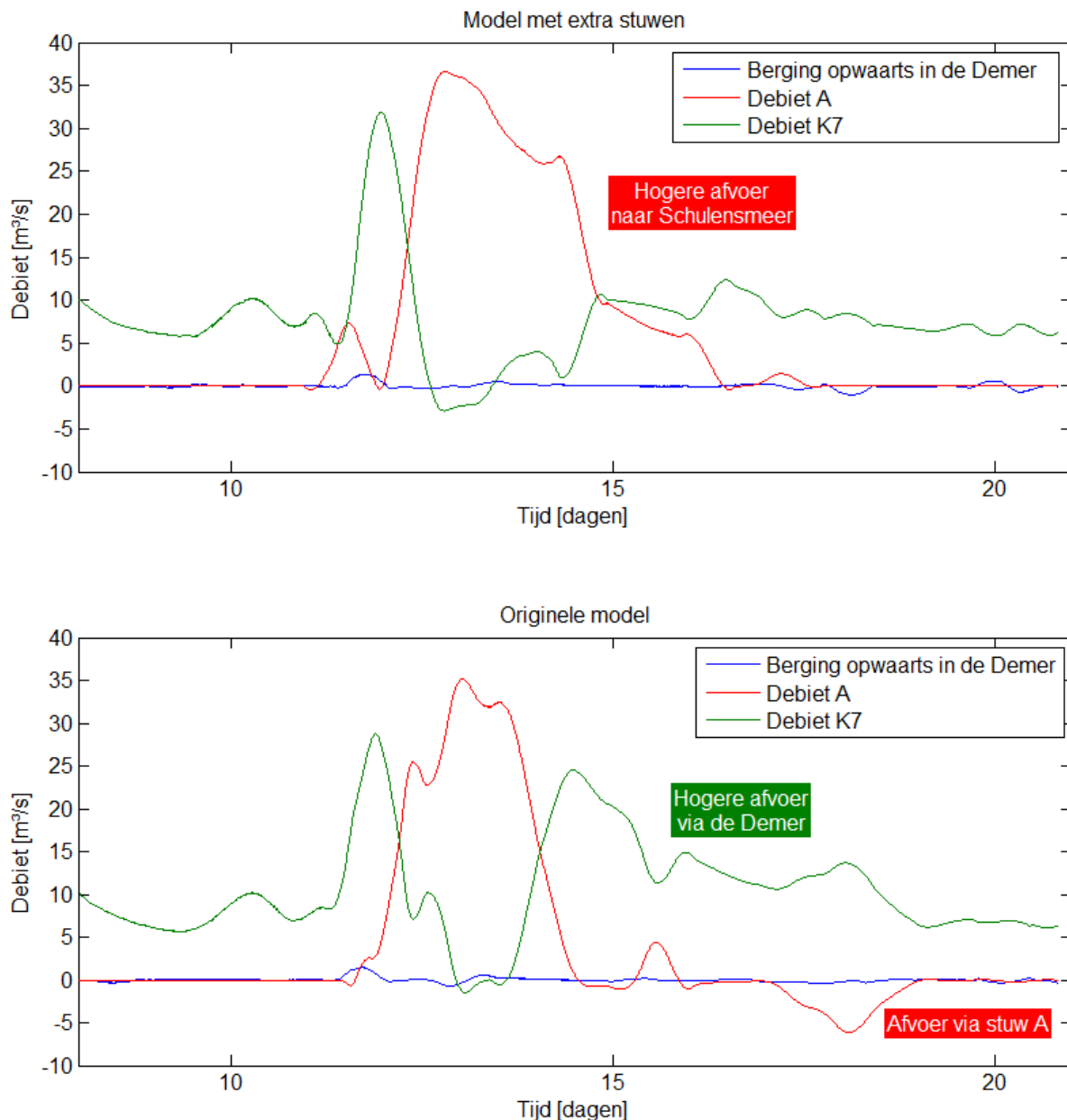
Om de belangrijkste verschillen tussen beide modellen verder te onderzoeken volgt hierna een grondigere analyse van de debieten in het netwerk. Doordat de wijzigingen zich voordoen in het gedeelte van het Schulensmeer zullen alleen hiervan resultaten worden getoond. Zoals reeds gesteld zullen verder afwaarts in het systeem ook een aantal wijzigingen voorkomen ten gevolge van het verminderde debiet afkomstig van het opwaarts gedeelte van het netwerk. Deze zijn echter van ondergeschikt belang en zullen dan ook niet besproken worden.

In Figuur 62 tot en met Figuur 65 is op ieder tijdstip het verloop van de debieten [m³/s] weergegeven, bovenaan voor het model met extra stuwen en onderaan voor het originele model. Daarbij heeft elke figuur net als in voorgaande tabel betrekking op een locatie waar een herverdeling van het debiet over de verschillende takken en het bijhorende bergingspunt gebeurt. De locaties die worden weergegeven zijn de knopen in de Vlootgracht, opwaarts in de Demer, in het binnenbekken van het Schulensmeer en aan de Houwersbeek. Bij de weergave van de resultaten is een filtering toegepast om de instabiliteiten van een aantal debieten uit de figuren te weren.



Figuur 62: Debieten [m³/s] aan de Vlootgracht voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).

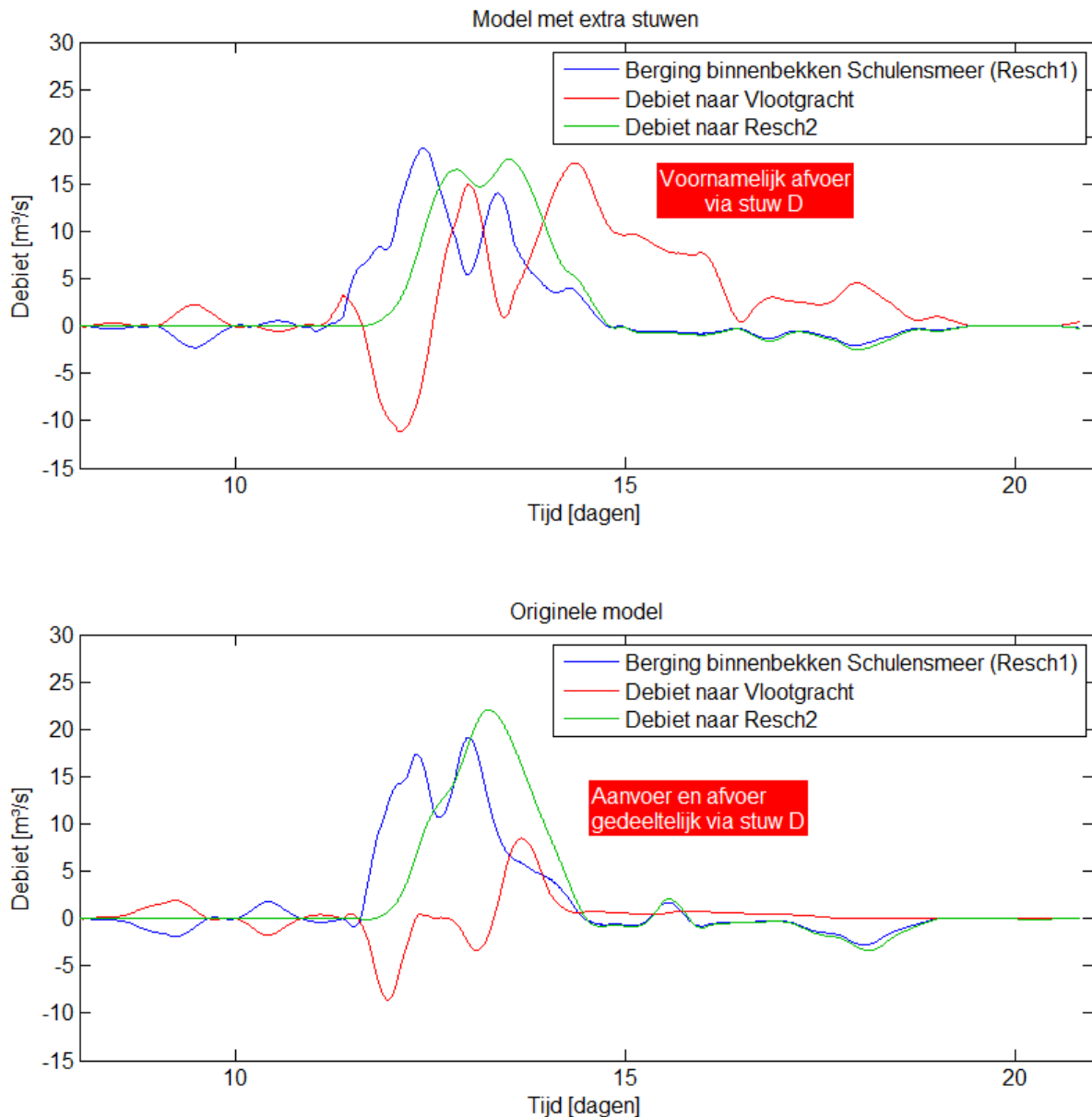
Het belangrijkste verschil is terug te vinden aan de Vlootgracht. Het is immers van daaruit dat de buitenbekkens kunnen worden gevuld. In het bovenste deel van de figuur is te zien dat in het model met extra stuwen een belangrijk debiet naar de buitenbekkens doorstroomt. Hierdoor zorgt het MPC-GA-algoritme er voor dat de berging beter wordt benut en overstromingen in belangrijke mate beperkt worden. Daarnaast blijkt voor beide simulaties, in tegenstelling tot bij de vaste regeling, in de Vlootgracht een inkomend debiet uit de Demer voor te komen. Dit debiet is groter voor het model met extra stuwen en wordt bijna integraal doorgevoerd naar de buitenbekkens. In het originele model zal dit debiet voor een deel naar het binnenbekken stromen. Dit blijkt ook uit Figuur 63. Na de was is voor het model met extra stuwen een uitgaand debiet naar de Demer waarneembaar. Dit debiet ontstaat door het gedeeltelijk ledigen van het binnenbekken van het Schulensmeer.



Figuur 63: Debieten [m³/s] opwaarts in de Demer voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).

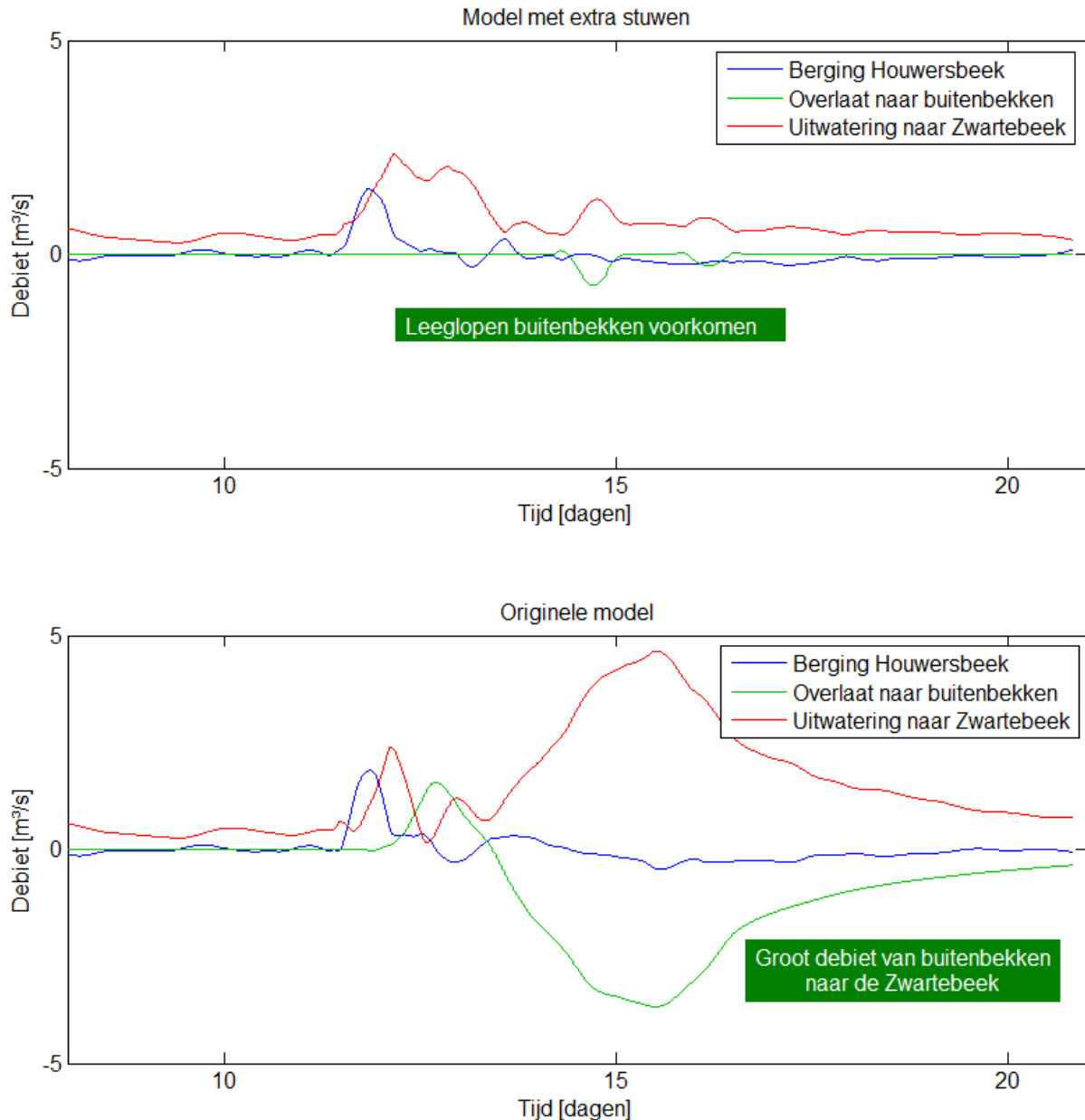
Opwaarts in de Demer valt een groot verschil te bemerken tussen beide modellen. De afvoer via de Demer is in het model met extra stuwen met bijna 20% afgenomen. Dit water stroomt via stuw A naar het binnenbekken van het Schulensmeer. In Figuur 64 zal blijken dat al het extra water dat het binnenbekken instroomt, het via stuw D ook weer verlaat. Op die manier komt het in de Vlootgracht terecht. Daarnaast blijkt uit Figuur 64 dat tijdens de was ook nog eens een groter debiet via stuwen Ers en Egw naar de Vlootgracht wordt geleid. Hierdoor zal het debiet dat in de Demer overblijft veel lager zijn dan in het originele model. Dit komt de waterpeilen verder afwaarts in het systeem ten goede.

Samenvattend kan men stellen dat het debiet in de Demer in het model met extra stuwen sterk afneemt. Deze vermindering gebeurt opwaarts in de Demer en aan de monding van de Vlootgracht. In het originele model wordt een vergelijkbaar debiet afgeleid naar de Vlootgracht via stuwen Ers en Egw, maar via stuw A stroomt in het model met extra stuwen 56% meer water naar het bekken.



Figuur 64: Debieten [m³/s] aan het binnenbekken van het Schulensmeer voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).

Het belangrijkste verschil bij het binnenbekken van het Schulensmeer hangt samen met de bespreking van Figuur 63 op de vorige pagina. Het water dat via stuw A binnenstroomt kan in het model met extra stuwen niet allemaal in het binnenbekken geborgen worden. Daarom zal een belangrijk debiet via stuw D naar de Vlootgracht doorstromen. Van daaruit komt het in het buitenbekken terecht. Waar stuw D in het originele model een onbelangrijke functie had, vervult deze hier een cruciale rol.



Figuur 65: Debieten [m³/s] aan de Houwersbeek voor de was van september 1998 na toepassing van MPC-GA voor het model met extra stuwen (boven) en voor het originele model (onder).

Tenslotte kan het debiet van uit het buitenbekken naar de overgang van de Houwersbeek in de Zwartewater (WL14) worden bekeken. Dit wordt weergegeven in Figuur 65. In het model met extra stuwen zal het waterpeil op dit punt veel lager liggen dan het waterpeil in het buitenbekken van het Schulensmeer, zie Figuur 68 en Figuur 69. De extra stuw, waarvan het verloop rechts in Figuur 70 weergegeven wordt, zorgt er immers voor dat het buitenbekken niet via deze weg leegstroomt. Dit is te zien wanneer de groene curves uit bovenstaande figuur worden bekeken. Bij het originele model is na 13 dagen een uitgaand debiet naar het buitenbekken waarneembaar. Wanneer het waterpeil in het buitenbekken na 14 dagen echter hoger wordt, stroomt het water terug uit het buitenbekken richting de Zwartebeek. Door toevoeging van de extra stuwen aan het model, slaagt het MPC-GA-algoritme er in de uitstroom via deze weg quasi volledig uit te schakelen. Het debiet naar de Zwartebeek ligt bijgevolg beduidend lager (45%).

7.4 Evaluatie efficiëntie van het model met extra stuwen

Om na te gaan of de bekomen resultaten effectief beter zijn, worden de overschrijdingen van de overstromingspeilen vergeleken. Daarbij wordt gekeken naar de maximale waterpeiloverschrijding [m] (overschrijding van het overstromingspeil), de som van de waterpeiloverschrijdingen [mh], het overstromd volume [m³] en de overstromingsduur [h]. Deze waarden, bekomen in Simulink®, zijn terug te vinden in Tabel 23 voor de MPC-GA-sturing voor zowel het originele model als voor het model met extra stuwen. De vergelijking tussen de MPC-GA-regeling met extra stuwen en de vaste regeling staat in Bijlage G. De procentuele verhoudingen van de resultaten van de MPC-GA-sturing met het model met extra stuwen ten opzichte van de MPC-GA-regeling met het originele model en ten opzichte van de vaste regeling staan vervolgens in Tabel 24 opgelijst. De verschillen blijken enorm groot te zijn. Overstromingen komen in het model met extra stuwen voor deze extreme gebeurtenis nog steeds voor, maar zijn tot een minimum herleid zoals blijkt uit onderstaande tabellen. Zo bedraagt het totaal overstromd volume in het model met extra stuwen nog slechts 5% van dat in het originele model bij toepassing van MPC-GA. Ten opzichte van de vaste sturing bedraagt dit nog slechts 3%.

Tabel 23: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de MPC-GA-regeling in het originele model en in het model met extra stuwen voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstromd volume en de overstromingsduur.

Waterpeil	Locatie	Maximale waterpeiloverschrijding [m]		Som waterpeiloverschrijding [mh]		Overstromd volume [10 ³ m ³]		Overstromingsduur [h]	
		Originele model	Extra stuwen	Originele model	Extra stuwen	Originele model	Extra stuwen	Originele model	Extra stuwen
WL1	DemOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL2	Velpe	-	-	-	-	-	-	-	-
WL3	BegOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL4	HerkOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL5	Resch1	-	-	-	-	-	-	-	-
WL6	Resch2	-	-	-	-	-	-	-	-
WL7	Resch3	-	-	-	-	-	-	-	-
WL8	Resch4	-	-	-	-	-	-	-	-
WL9	ReWeb1	-	-	-	-	-	-	-	-
WL10	K7afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL11	MondGete	0,14	-	2,51	-	5805	-	33,92	-
WL12	MondVI	-	-	-	-	-	-	-	-
WL13	K31Opw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL14	ZwaOpw	0,48	0,10	25,63	2,17	17171	1257	88,83	45,92
WL15	Vlootgr	0,28	0,24	7,16	2,63	1256	461	41,75	25,58
WL16	K31Afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL17	Begijnenb	-	-	-	-	-	-	-	-
WL18	Leugeb	-	-	-	-	-	-	-	-
WL19	Leigracht	-	-	-	-	-	-	-	-
WL20	DemAfw	0,29	0,02	12,22	0,10	10681	88	74,58	6,67

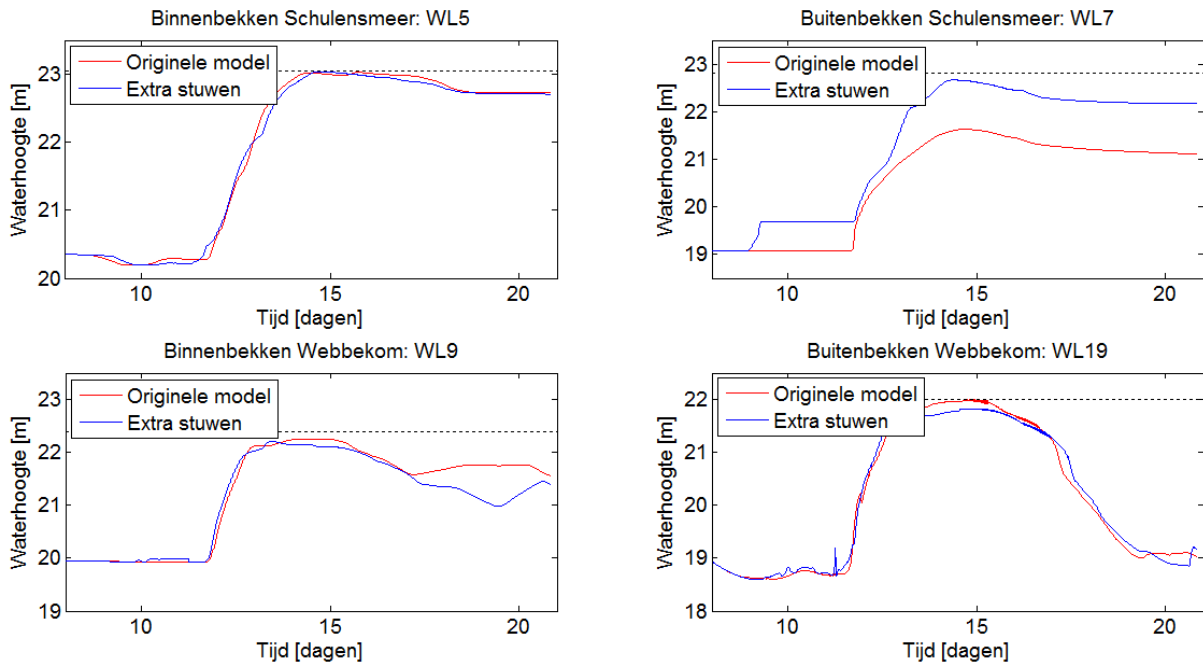
Tabel 24: Analyse van de procentuele verhouding van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen ten opzichte van de MPC-GA-regeling in het originele model en ten opzichte van de vaste regeling voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstromd volume en de overstromingsduur.

Waterpeil	Locatie	Maximale waterpeiloverschrijding		Som waterpeiloverschrijding		Overstromd volume		Overstromingsduur	
		T.o.v. originele model	T.o.v. vaste regels	T.o.v. originele model	T.o.v. vaste regels	T.o.v. originele model	T.o.v. vaste regels	T.o.v. originele model	T.o.v. vaste regels
WL1	DemOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL2	Velpe	-	-	-	-	-	-	-	-
WL3	BegOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL4	HerkOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL5	Resch1	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%
WL6	Resch2	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%
WL7	Resch3	-	-	-	-	-	-	-	-
WL8	Resch4	-	-	-	-	-	-	-	-
WL9	ReWeb1	-	-	-	-	-	-	-	-
WL10	K7afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL11	MondGete	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
WL12	MondVI	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%
WL13	K31Opw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL14	ZwaOpw	20%	19%	8%	7%	7%	6%	52%	51%
WL15	Vlootgr	87%	40%	37%	13%	37%	12%	61%	37%
WL16	K31Afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL17	Begijnenb	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%
WL18	Leugeb	-	-	-	-	-	-	-	-
WL19	Leigracht	-	0%	-	0%	-	0%	-	0%
WL20	DemAfw	8%	8%	1%	1%	1%	1%	9%	9%

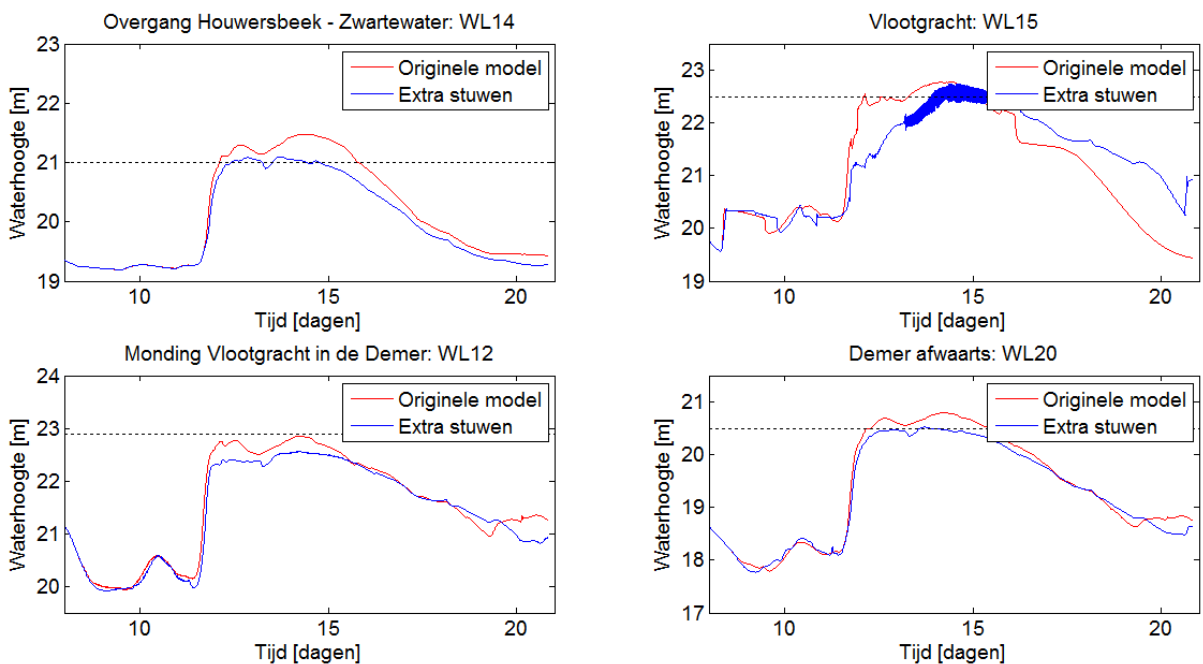
Het weergegeven overstromd volume komt zoals uitgelegd in paragraaf 6.3 niet overeen met het werkelijk overstromd volume en is vooral bedoeld om een vergelijking tussen beide modellen mogelijk te maken.

Opnieuw kan onderzocht worden op welke manier het water geborgen wordt in het systeem na het einde van de ontwerpbui (na 18 dagen). Figuur 66 toont de toename van de berging in alle bakken, de inkomende debieten en het uitgaand debiet bij toepassing van de MPC-GA-regeling in het originele model en in het model met extra stuwen. Deze volumes worden steeds uitgedrukt in 10^3m^3 . Het blijkt dat 2,5 miljoen m^3 water extra geborgen wordt in het systeem. Deze sterke stijging is zoals verwacht te wijten aan de betere vulling van de buitenbekkens van het Schulensmeer. Het kan opgemerkt worden dat het geborgen volume in een aantal wachtbekkens kleiner is dan in het originele model. Dit is te wijten aan het feit dat enkele wachtbekkens reeds geleidigd worden.

bestaat. Dit is een logisch resultaat aangezien dit peil hoger ligt dan het overstromingspeil in de Vlootgracht en het bekken alleen van daaruit gevuld wordt. Op de figuren is dan ook te zien dat het waterpeil in het buitenbekken van het Schulensmeer beperkt blijft tot de maximale waterhoogte in de Vlootgracht. Het algoritme maakt hier een afweging tussen enerzijds het beperkt laten overstromen van de Vlootgracht, om zo het buitenbekken te vullen en overstromingen elders in het netwerk te beperken, en anderzijds het voorkomen van hogere waterpeilen in de rest van het netwerk.



Figuur 68: Vergelijking van de waterpeilen in binnen- en buitenbekken van het Schulensmeer en de Webbekom tijdens de was van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen.

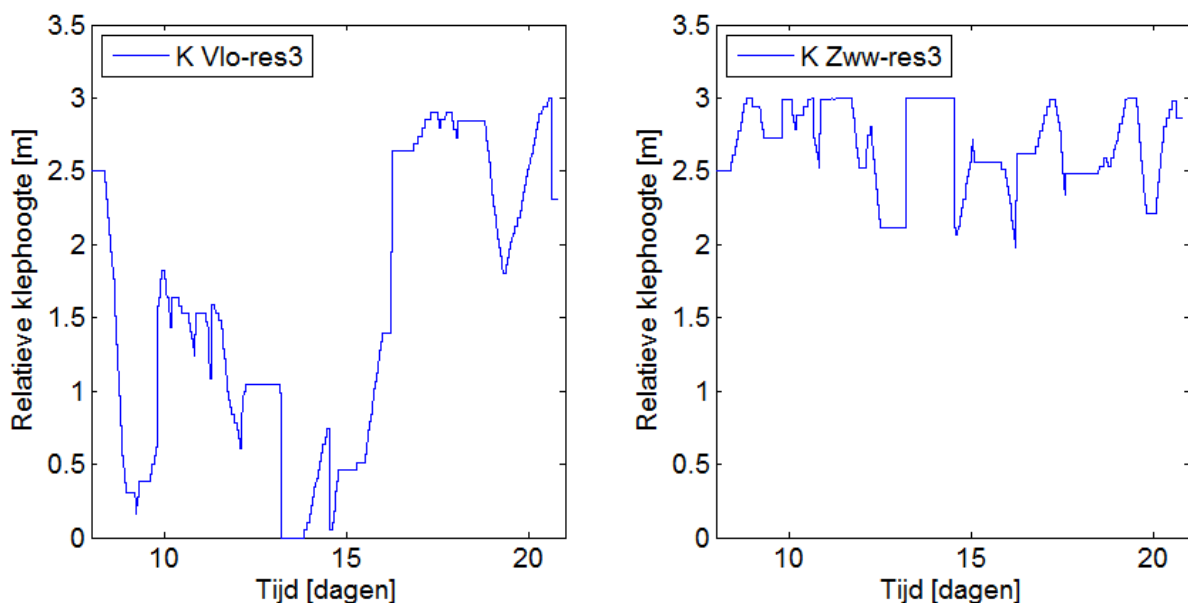


Figuur 69: Vergelijking van de waterpeilen aan de overgang Houwersbeek-Zwartewater, in de Vlootgracht, aan de monding van de Vlootgracht in de Demer en afwaarts in de Demer tijdens de was van september 1998 bij toepassing van MPC-GA-regeling voor het originele model en het model met extra stuwen.

7.5 Werking van de extra stuwen

In Figuur 70 zijn de klepstanden van beide extra stuwen weergegeven. Aan de hand van deze figuur kan de werking van het MPC-GA-algoritme nagegaan worden. Vooral de stuw tussen de Vlootgracht en het buitenbekken van het Schulensmeer (links op de figuur) blijkt een belangrijke invloed te hebben. Tijdens de piek van de bui zal het algoritme deze stuw naar zijn laagste stand sturen om de buitenbekkens te kunnen vullen. Wanneer het waterpeil in de Vlootgracht begint te dalen, na iets meer dan 15 dagen, beweegt de stuw snel naar zijn hoogste stand om het leeglopen van de buitenbekkens te vermijden. Zodoende kan eerst de toestand in de rest van het netwerk gestabiliseerd worden alvorens over te gaan tot het ledigen van de bekkens.

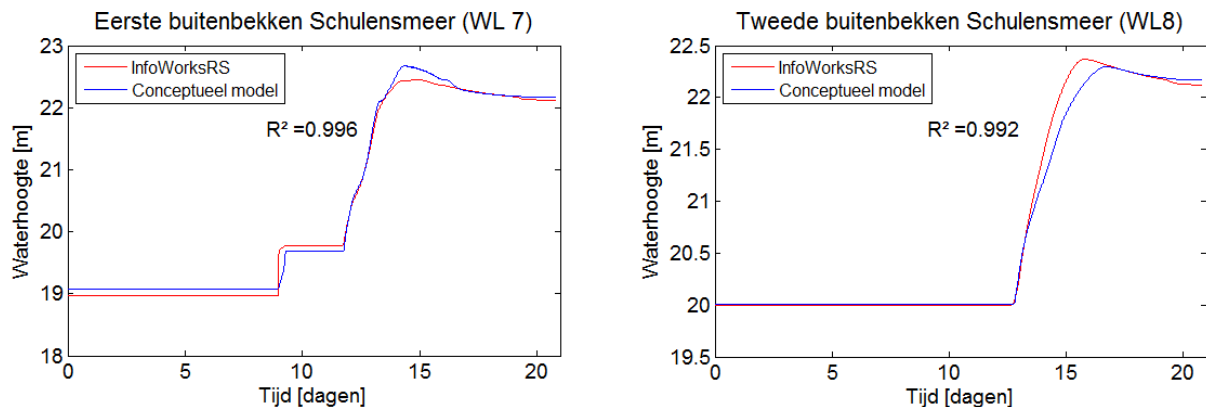
De stuw naar de Houwersbeek (rechts op Figuur 70) blijkt ook een belangrijke invloed op het eindresultaat te hebben. In het model met extra stuwen stroomt hier slechts een verwaarloosbaar debiet langs ($31 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ na 18 dagen, zie Tabel 22). Ten opzichte van het originele model is dit een afname met 96%. Uit de resultaten blijkt dat het zeer belangrijk is dat de klepstand vrij hoog is. Hierdoor zorgt deze stuw er voor dat het buitenbekken niet leegloopt via deze weg. Aangezien de enige functie van deze stuw het tegenhouden van het water is, kan gesteld worden dat het toevoegen van een beweegbare stuw op deze locatie weinig bijdraagt tijdens de was. Het verhogen van de bestaande vaste overlaat zou immers volstaan om de uitstroom langs deze weg te verhinderen en de beschikbare berging beter te benutten. Een beweegbare stuw kan hier wel zijn nut bewijzen bij het ledigen van de buitenbekkens. Dit kan echter niet worden aangetoond aan de hand van voorgaande resultaten, omdat de simulatie niet lang genoeg na de neerslagpiek doorloopt. Samenvattend kan men stellen dat de klepstand van deze stuw alleen laag zal zijn tijdens het ledigen van de buitenbekkens van het Schulensmeer. In alle andere situaties is het aangewezen om deze de maximale klepstand te laten aannemen.



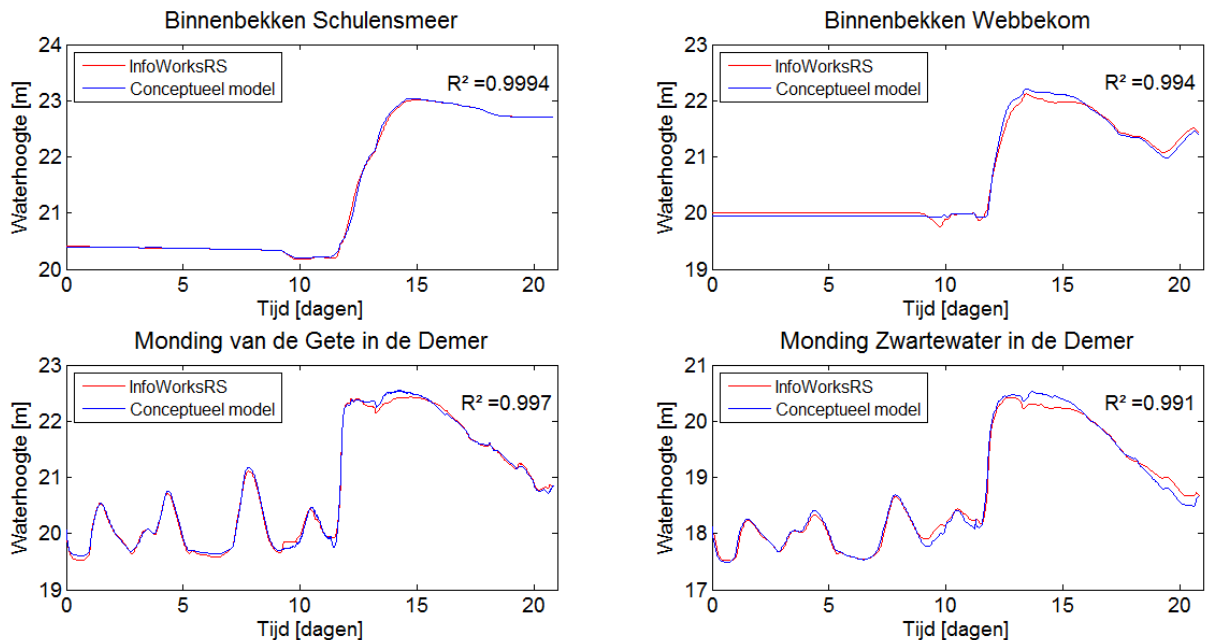
Figuur 70: Verloop van de extra stuwen KVlo-res3 (links) en KZww-res3 (rechts) voor het model met extra stuwen tijdens de historische was van september 1998.

7.6 Validatie van het model met extra regelbare stuwen

Om de resultaten te valideren is de voorgestelde wijziging van het netwerk eveneens geïmplementeerd in IWRS. Hierdoor kan gecontroleerd worden of de buitenbekkens van het Schulensmeer ook in dit gedetailleerde hydrodynamische programma beter gevuld worden. De waterpeilen ter plaatse van buitenbekkens één (WL7) en twee (WL8) zijn weergegeven in Figuur 71. Figuur 72 geeft de belangrijkste andere waterpeilen in het netwerk weer. De overeenkomsten blijken zeer goed te zijn.



Figuur 71: Vergelijking van de simulatieresultaten in de buitenbekkens van het Schulensmeer voor het conceptueel model (blauw) en IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het model met extra regelbare stuwen



Figuur 72: Vergelijking van de simulatieresultaten voor het conceptueel model (blauw) en het IWRS-model (rood) voor de MPC-GA-regeling bekomen met het model met extra regelbare stuwen

7.7 Conclusie

Door twee extra regelbare stuwen ter plaatse van het buitenbekken van het Schulensmeer te voorzien is het mogelijk om de aanwezige bergingscapaciteit beter te benutten. Hierdoor verbeterden de resultaten aanzienlijk en kwamen zelfs bijna geen overstromingen meer voor bij de ontwerpbeurt van september 1998. Het algoritme slaagt er door deze maatregel in om het overstroomd volume met 95% te beperken ten opzichte van de MPC-GA-sturing in het originele model en zelfs met 97% ten opzichte van de vaste regels. Daarnaast verminderde de gemiddelde kost met 43% ten opzichte van het originele MPC-GA-model en met 66% ten opzichte van de vaste regels. De debietsverdeling in de omgeving van het Schulensmeer is door deze maatregel in belangrijke mate gewijzigd om de buitenbekkens optimaal te kunnen vullen. Als conclusie kan worden gesteld dat het invoeren van deze twee extra regelbare stuwen aan de ingang van het buitenbekken van het Schulensmeer een belangrijke maatregel kan zijn om de overstromingsproblematiek in het Demerbekken verder aan te pakken. Door vandaag te investeren in deze stuwen kunnen in de toekomst grote kosten bespaard worden.

Hoofdstuk 8: Verbeteringen en alternatieven voor het genetisch algoritme

Uit voorgaande twee hoofdstukken blijkt dat het genetisch algoritme zeer doeltreffend kan zijn in combinatie met MPC. Het algoritme is echter zeer rekenintensief. De oorzaak hiervan ligt in het louter (semi-)random karakter van de MPC-GA-techniek. Langs de ene kant is dit het grootste voordeel van de methode. Er wordt namelijk telkens naar een optimum gezocht aan de hand van de aanwezige modelcondities, zonder dat hieraan een patroon wordt opgelegd dat mogelijk kan leiden tot het bereiken van een suboptimale oplossing. Langs de andere kant wordt door het gebrek aan intelligentie veel rekenwerk verricht dat leidt tot slechte resultaten.

Mits er van uit te gaan dat voldoende rekenkracht beschikbaar is, kan echter gesteld worden dat steeds bevredigende resultaten uit het MPC-GA-algoritme zullen voortvloeien. In de toekomst zal de rekentijd wellicht oplopen indien overgeschakeld wordt naar een kleinere tijdstap om instabiliteiten te vermijden. Ook wanneer neerslagonzekerheid in rekening zal worden gebracht, zal dit een belangrijke toename van de rekentijd met zich meebrengen. Daarom kan het interessant zijn om meer intelligentie in het algoritme te brengen zodanig dat het in de juiste richting zoekt in plaats van louter op toeval te berusten. Het beschouwen van minder of evenveel gevallen zal dan tot gelijke of zelfs betere resultaten kunnen leiden. Ook met het oog op het implementeren van grotere riviernetwerken met meer stuwen in het model is deze intelligentie zeer interessant. Voor deze netwerken zullen immers meer beschouwde gevallen nodig zijn om een eenduidige optimale sturing te bekomen. Omwille van deze redenen zijn in dit onderzoek een aantal aanvullende of alternatieve technieken voor het MPC-GA-algoritme ontwikkeld. Dit hoofdstuk licht deze toe.

8.1 Vaste trends

Een eerste mogelijkheid bestaat er in om de klepstanden niet langer semi-random te genereren. Dit zorgt er op dit moment namelijk voor dat onmogelijk voorspeld kan worden welke klepstanden gegenereerd zullen worden. Een alternatief kan er in bestaan te werken met vaste trends. Op deze manier wordt op voorhand exact vastgelegd welke verlopen de klepstanden zullen aannemen. Daardoor kan zekerheid ingebouwd worden dat alle combinaties die men wil aanleggen effectief doorgerekend worden en dus eenduidig het beste geval gevonden wordt. Zodoende kan perfect voorspeld worden hoe lang de simulatie zal duren om alle mogelijke combinaties door te rekenen, of omgekeerd hoeveel en welke

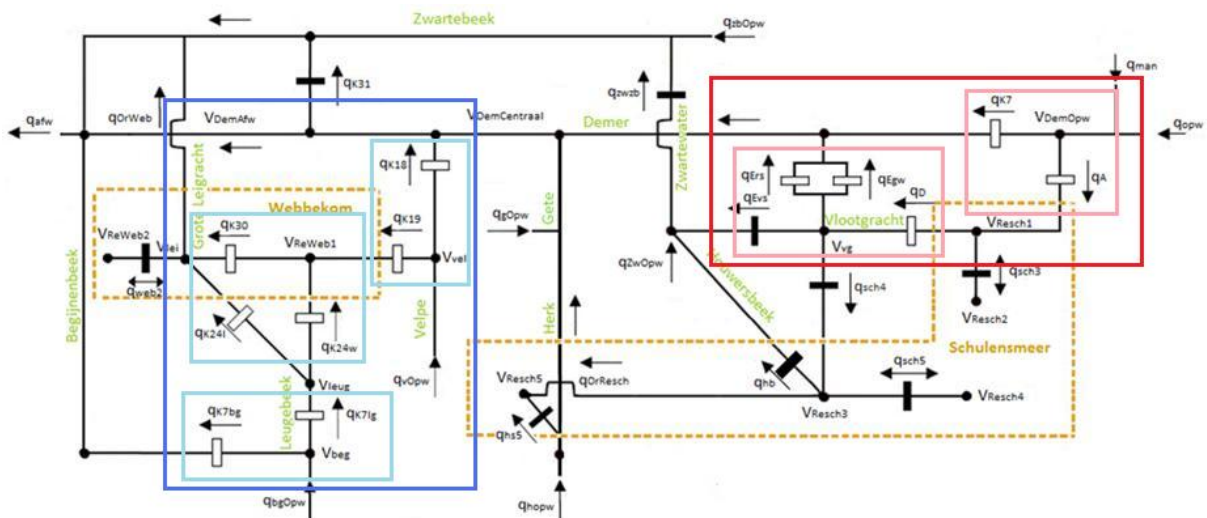
zullen stuw K7 en D een hoge stand aannemen, terwijl stuw A laag staat. In het geval van ledigen is dit net omgekeerd. Uitgaande van deze redenering moet slechts één reeks klepstanden (semi-)random gegeneerd worden. De andere twee reeksen worden dan opgesteld op basis van deze reeks, rekening houdend met de correlatie. Het aantal onafhankelijke stuwstanden daalt bijgevolg met twee (van 12 naar 10). Mits voor iedere klep opnieuw drie mogelijke trends te beschouwen blijven 3^{10} (ongeveer 59000) mogelijke combinaties over in plaats van 3^{12} . Dit is een vermindering van ongeveer 89%. Door meer van dergelijke verbanden tussen de klepstanden in rekening te brengen kan de winst nog vergroot worden.

Het vastleggen van dergelijke verbanden is echter zeer moeilijk. Zo zou in het deelmodel uit Figuur 73 eveneens de situatie kunnen voorkomen waarbij water opwaarts van het wachtbekken geborgen moet worden. Dit zou betekenen dat zowel stuw K7 als stuw A een hoge klepstand moeten aannemen. Dit leidt echter tot een ander verband tussen beide stuwstanden dan hetgeen hierboven beschouwd werd. Dit eenvoudige voorbeeld toont bijgevolg aan dat het opstellen van correlaties tussen de klepstanden een ingewikkelde en tijdrovende bezigheid is. Wanneer in verder onderzoek gezocht zou worden naar correlatieverbanden tussen de verschillende stuwstanden kan hierbij gebruik worden gemaakt van de aanbevelingen zoals geformuleerd in hoofdstuk 6 van deze masterproef.

8.4 Groepering van de stuwstanden

Een alternatief voor het correleren is het groeperen van de stuwstanden. Mits er van uit te gaan dat de wederzijdse beïnvloeding tussen stuwstanden uit verschillende groepen beperkt blijft, kan eerst de ene groep geoptimaliseerd worden en in de volgende stappen de andere groepen. Tijdens het optimalisatieproces van de eerste groep stuwstanden, zullen de andere stuwstanden het beste verloop uit de vorige regelstap overnemen. Bij het optimaliseren van de andere groepen wordt aan de reeds geoptimaliseerde stuwstanden het beste geval tot dan toe aangelegd. Door de stuwstanden rond het Schulensmeer (5 stuwstanden) en de stuwstanden rond de Webbekomen (7 stuwstanden) te groeperen en vervolgens afzonderlijk te optimaliseren, leidt het beschouwen van drie mogelijke trends per stuwstand tot ongeveer 17000 combinatiemogelijkheden ($3^5 + 3^7$). Dit is een daling met maar liefst 99%. Deze maatregel houdt dus opnieuw een aanzienlijke daling van het aantal mogelijke combinaties in.

De stuwstanden kunnen nu nog verder onderverdeeld worden in subgroepen, rekening houdend met de conclusies uit paragraaf 6.4 met betrekking tot de verbanden tussen de verschillende stuwstanden. Figuur 74 toont een mogelijke onderverdeling in groepen en subgroepen voor het in dit onderzoek gemodelleerde gebied. Groep 1, in rood omkaderd, bevat de vijf stuwstanden die aan het Schulensmeer gelegen zijn. Het betreft stuwstanden A, D, K7, Egw en Ers. Deze groep is verder onderverdeeld in twee subgroepen: Groep 1.1 met stuwstanden A en K7 en groep 1.2 met stuwstanden Egw, Ers en D. De resterende zeven stuwstanden zijn gesitueerd in de buurt van de Webbekomen en zijn in het blauw omkaderd. Deze vormen groep 2 en zijn eveneens verder onderverdeeld in drie subgroepen: Groep 2.1 met stuwstanden K18 en K19, groep 2.2 met stuwstanden K7bg, K7lg en groep 2.3 met stuwstanden K30, K24l en K24w.



Figuur 74: Verdeling van de stuven in groepen en subgroepen

De gehanteerde methode bestaat uit drie fases. In de eerste fase worden de vier beste gevallen uit de vorige regelstap opnieuw doorgerekend. Dit gebeurt samen met het eerste deel van de tweede fase waarin voor de stuven rond het Schulensmeer semi-random reeksen klepstanden aangemaakt worden en de stuven rond de Webbekom het beste geval uit de vorige regelstap overnemen. Hieruit volgen dan de vier beste gevallen tot nu toe. De klepstanden die volgen uit het beste geval van deze vier worden in het tweede deel van de tweede fase aangelegd aan de stuven rond het Schulensmeer terwijl nieuwe semi-randomreeksen voor de stuven rond de Webbekom worden aangemaakt. Hieruit worden opnieuw de vier beste gevallen tot nu toe bepaald, rekening houdend met de vier beste gevallen uit het vorige deel van de fase. De tweede fase kan indien gewenst een aantal keer achter elkaar doorlopen worden. Het is immers mogelijk interessanter om dit proces twee keer te doorlopen waarbij elke keer de helft van de gevallen wordt beschouwd, zodat in de tweede iteratie reeds rekening kan gehouden worden met de resultaten uit de eerste.

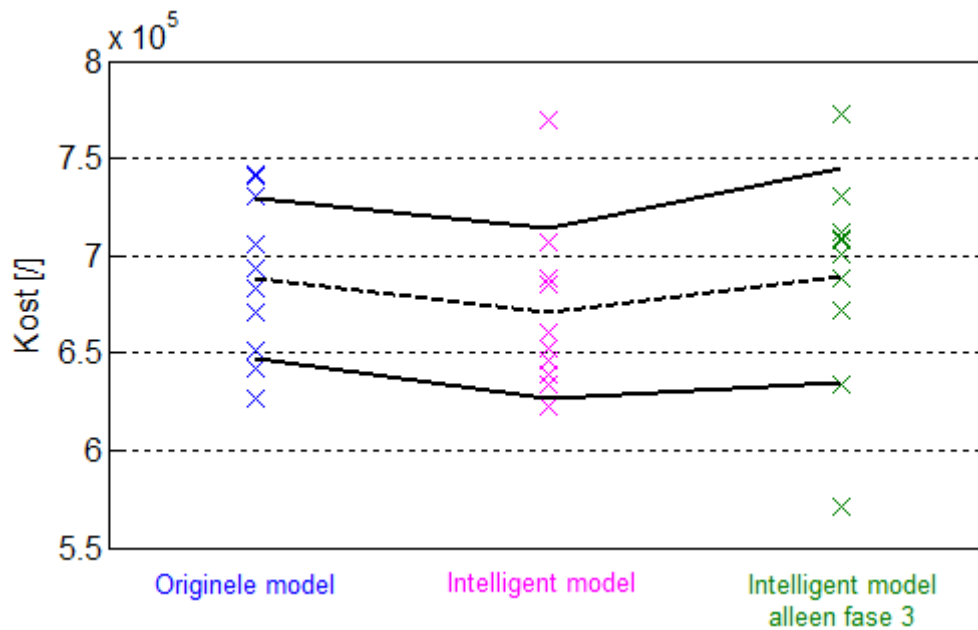
De derde fase bestaat er vervolgens in het beste geval uit de vorige fase verder te optimaliseren. Dit gebeurt één voor één voor de verschillende subgroepen. Hierbij geldt opnieuw dat het interessanter kan zijn om dit proces een aantal keer te herhalen met minder beschouwde gevallen per keer dan slechts één iteratie met veel beschouwde gevallen. Als uitkomst van deze fase volgt dan het geoptimaliseerde beste geval uit de derde fase. Indien immers vier beste gevallen uit de derde fase behouden zouden worden, zouden deze waarschijnlijk zeer weinig van elkaar verschillen. Het is inderdaad de bedoeling om vier zo goed mogelijke gevallen bij te houden, maar indien door de platte start op het einde (zie Hoofdstuk 4) één van de gevallen slecht wordt, zullen de anderen dit hoogstwaarschijnlijk ook worden en is er geen vangnet meer voorhanden. Daarom is gekozen om uit de derde fase alleen het beste geval te selecteren en dit samen met de drie beste gevallen uit de tweede fase door te geven naar de volgende regelstap.

Tabel 25 vat voorgaand proces samen en geeft tegelijkertijd het voorbeeld waarvan de resultaten later aan bod komen. Om een vergelijking met de resultaten uit Hoofdstuk 6 mogelijk te maken bedraagt het aantal gevallen dat in totaal in de drie fases wordt doorgerekend eveneens 200. Uitgaande van dit totale aantal is een verdere onderverdeling naar de verschillende fases in het model afgeleid. Het aantal beschouwde gevallen voor de tweede stap is vastgelegd op $2^{\text{aantal stuwen}}$. Bij de Webbekom is het aantal stuwen voor deze berekening echter met één verminderd. De reden hiervoor is dat anders te veel gevallen moesten beschouwd worden en sommige stuwen van minder belang zijn voor de sturing, zoals bleek uit paragraaf 6.4. De resterende 100 gevallen zijn tot slot verdeeld over twee iteraties van de vijf subgroepen met telkens tien beschouwde gevallen per subgroep.

Tabel 25: Samenvatting principe groepering van de stuwen

Fase	Aantal iteraties	Input	Groep	Stuwen	Aantal gevallen per iteratie	Output
1	1	4 beste uit vorige regelstap	/	Geen	4	4 beste gevallen
2	1	Beste uit vorige fase	1	Schulensmeer	32	4 beste gevallen tot nu
		Beste uit vorige deelfase	2	Webbekom	64	4 beste gevallen tot nu
3	2	Beste uit vorige fase	1.1	A, K7	10	Beste geval uit deelfase
		Beste uit vorige deelfase	1.2	D, Egw, Ers	10	Beste geval uit deelfase
		Beste uit vorige deelfase	2.1	K18, K19	10	Beste geval uit deelfase
		Beste uit vorige deelfase	2.2	K7bg, K7lg	10	Beste geval uit deelfase
		Beste uit vorige deelfase	2.3	K30, K24l, K24w	10	4 beste gevallen tot nu

Om een idee te krijgen of deze methode effectief een verbetering realiseert, is het geïntegreerd model aangepast aan bovenstaand voorbeeld. Deze aanpassing verliep heel makkelijk, wat het adaptief vermogen van het model nogmaals benadrukt. Om op een snelle manier een idee te krijgen over de efficiëntie van deze werkwijze zijn enkele simulaties met een regelstap van 6 uur met dit “intelligent” model uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn weergegeven in samen met de overeenkomstige resultaten voor het originele geïntegreerd model (regelstap van 6 uur, 200 beschouwde gevallen, 4 bijgehouden besten). Om het belang van iedere fase na te gaan zijn ook simulaties uitgevoerd waarin alleen fase drie doorlopen wordt (vier iteraties) en alleen het beste geval bijgehouden blijft. De resultaten zijn eveneens te zien in Figuur 75.



Figuur 75: Vergelijking van de spreiding van de kost voor simulaties met het originele MPC-GA-model, het intelligent model en een aangepast intelligent model dat alleen uit fase drie bestaat (regelstap 6 uur, 200 beschouwde gevallen)

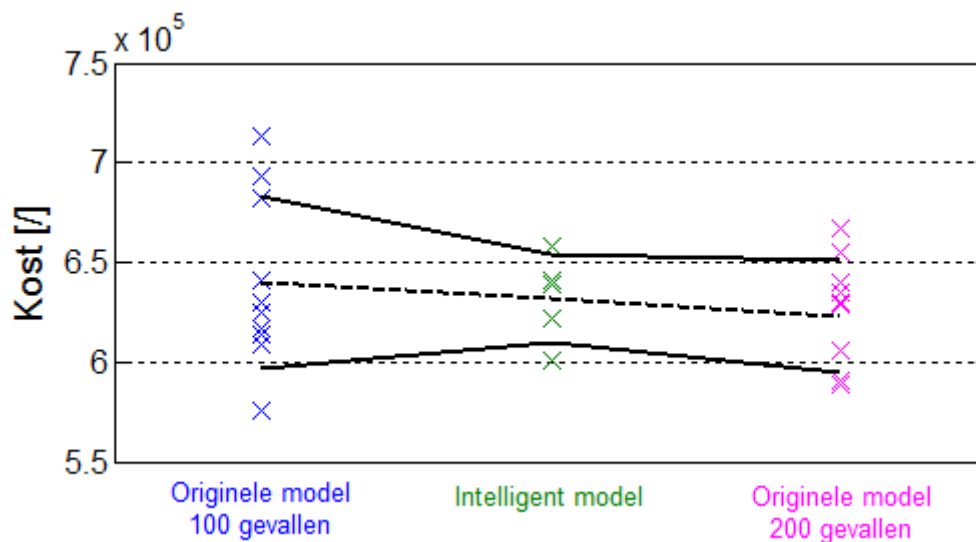
Alvorens de resultaten te bespreken moet worden opgemerkt dat de verwachte spreiding vrij groot is doordat de regelstap 6 uur bedraagt en het aantal simulaties vrij laag is. Toch levert dit een vrij goed beeld van de verwachte resultaten. Uit bovenstaande figuur blijkt dat de gemiddelde kost met het intelligent model duidelijk lager ligt dan met het originele geïntegreerd model. Eén van de gevallen ligt echter gevoelig hoger dan het slechtste resultaat met het originele model. Dit zal te wijten zijn aan toeval, aangezien slechts met een regelstap van 6 uur gewerkt wordt en mogelijks op een cruciaal moment naar een lokaal optimum is geconvergeerd in plaats van naar het globaal. Om hierover uitsluitsel te krijgen moeten in verder onderzoek meer simulaties worden uitgevoerd. Toch lijkt het plausibel dat deze techniek, rekening houdend met het lagere gemiddelde en de kleinere spreiding, een verbetering van het bestaande MPC-GA-algoritme met zich meebrengt. Uit het verloop van de waterpeilen blijkt bovendien dat de wachtbekkens, wanneer dit nodig is, tot slechts enkele millimeters onder het overstromingspeil gevuld worden. Op die manier wordt de bergingscapaciteit optimaal benut, nog beter dan in de simulaties met het originele model.

Op de resultaten met het aangepast intelligent model, waarbij de tweede fase niet wordt beschouwd en in de plaats vier iteraties van de derde fase worden doorlopen, blijkt een zeer grote spreiding te bestaan. Het gemiddelde ligt ook iets boven dat van de andere modellen. Wat echter wel opvalt in positieve zin is het feit dat in één simulatie een resultaat wordt gevonden dat beter is dan alle resultaten die in hoofdstuk 6 met het originele model werden bekomen. Zelfs wanneer in die simulaties meer gevallen werden doorgerekend en een lagere regelstap aangenomen blijkt de ene resultaat met het aangepaste intelligente model beter te zijn.

De grote spreiding op de resultaten bevestigt echter de gedachte die hiervoor is geformuleerd dat het risico bestaat dat naar een lokaal optimum wordt geconvergeerd in plaats van naar het globaal. Het feit dat hier slechts één geval overgenomen wordt uit de vorige regelstap en dan meteen wordt overgegaan naar optimalisatie in de subgroepen

vergroot dit effect. Wanneer het optimum waarnaar geconvergeerd wordt nu per toeval toch het globaal optimum blijkt te zijn, is het mogelijk om op deze manier een zeer goed resultaat te bekomen. Om zekerheid in te bouwen dat het algoritme naar het juiste optimum convergeert is het dus nodig om eerst op het niveau van de groepen te werken, zodat na de tweede fase een geval in de buurt van het globaal optimum bekomen wordt. Door in de volgende fase op het niveau van subgroepen te werken, zal het resultaat verder convergeren richting het globaal optimum. Door het lage aantal doorgerekende gevallen en de grote regelstap komen de voordelen van deze techniek in voorgaande resultaten nog slechts beperkt tot uiting.

Om de invloed van de regelstap op de resultaten van de techniek verder te onderzoeken zijn enkele simulaties met het intelligent uitgevoerd voor een regelstap van 15 minuten. De resultaten hiervan zijn samen met de resultaten van het originele model voor een regelstap van 15 minuten en respectievelijk 100 en 200 beschouwde gevallen in Figuur 76 weergegeven.



Figuur 76: Vergelijking van de spreiding van de kost voor simulaties met het intelligente model en het originele MPC-GA-model met 100 en 200 beschouwde gevallen voor een regelstap van 15 minuten

Het gemiddelde van de resultaten uit het intelligente model blijkt iets hoger te liggen dan dat van het originele model met 200 gevallen. Rekening houdend met het feit dat de rekentijd van het intelligente model voor het doorrekenen van bovenstaand resultaat circa 15% hoger ligt, lijkt het intelligente model niet echter een verbetering te realiseren voor een regelstap van 15 minuten. De spreiding van de resultaten is echter kleiner, waardoor de kans op een minder goed geval gereduceerd wordt. Om zekerheid over dit resultaat te verkrijgen zijn echter meer proeven nodig.

Vergelijken op basis van de rekentijd is aangewezen, maar in dit geval niet helemaal eerlijk. Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat de derde fase van het intelligente model bedoeld is om verder te convergeren naar het optimum dat in de tweede fase werd gevonden. In de tweede fase werden echter maar 100 gevallen doorgerekend waardoor de kans op het vinden van een geval in de buurt van het globaal optimum voor het intelligente model slechts 50% is ten opzichte van het originele model waarin 200 gevallen worden doorgerekend. Om de invloed van het opdelen in beide fases na te gaan is het hier dus correcter om te vergelijken met de resultaten bekomen met het originele model met 100

gevallen, hoewel de rekentijd van het intelligente model daarbij het dubbele bedraagt. Hierbij wordt verwacht dat de tussenresultaten in het intelligente model na de tweede fase al iets beter zullen zijn door het opdelen in groepen, en deze vervolgens nog verder zullen worden verbeterd in de derde fase.

Uit de resultaten volgt dat zowel de gemiddelde kost als de spreiding aanzienlijk dalen in de derde fase. Dit kan gecontroleerd worden door de kost van het beste geval na de tweede fase te vergelijken met die van het geoptimaliseerde geval na de derde fase. Hieruit volgt dat gemiddeld in 29% van de regelstappen in de huidige modellering een verbetering zal gebeuren tijdens de derde fase. Over al de regelstappen heen bedraagt de gemiddelde verbetering van de kost 4,8%. Ter vergelijking: voor een regelstap van 6 uur bedragen deze waardes respectievelijk 85% en 4,2%. Hieruit blijkt dat verbeteringen in de derde fase duidelijk minder frequent voorkomen wanneer de regelstap laag is. Dit is een logisch resultaat, in de vorige regelstappen werden immers ook al dergelijke optimalisaties doorgevoerd. Wanneer het gevonden optimum in fase twee niet wijzigt, zal het vaak voorkomen dat in fase drie nog slechts weinig verbetering mogelijk is. Dit resultaat onderstreept dan ook de goede werking van het principe van de optimalisatie in subgroepen. Wanneer wel een beter resultaat wordt bekomen, blijkt de verbetering in beide modellen ongeveer even groot te zijn. Ook dit is een logisch resultaat. Wanneer een ander optimum gevonden wordt in stap twee, wordt verwacht dat voor beide regelstappen een gelijkaardige winst wordt geboekt in fase drie.

Een vergelijking van de resultaten met de verschillende modellen levert ook een aantal conclusies. Hierbij is wel enige voorzichtigheid geboden door het kleine aantal simulaties. Uit Figuur 76 blijkt dat de verbetering van de gemiddelde kost in het intelligente model ten opzichte van het originele model met 100 gevallen 3,1% bedraagt. De relatieve verbetering van het model met 200 gevallen bedraagt 4,5%. Wanneer gerecapituleerd wordt dat de verbetering in fase drie van het intelligent model gemiddeld 4,8% bedroeg, volgt hieruit dat het bekomen resultaat na de tweede fase in het intelligent model gemiddeld slechter was dan het resultaat in het originele model met 100 gevallen. Dit zou er op wijzen dat het opdelen van de stuwen in twee groepen mogelijk niet optimaal is en er toch een zekere onderlinge beïnvloeding tussen stuwen uit beide groepen bestaat of nog een voorafgaande stap moet worden doorgevoerd waarin nieuwe gevallen voor het hele systeem worden beschouwd. De vraag is natuurlijk in hoeverre deze conclusie stand houdt wanneer meer simulaties worden beschouwd. Concluderend kan men stellen dat de techniek veelbelovend is maar verder onderzoek aangewezen is.

Verwacht wordt namelijk dat de verbetering tengevolge van de derde fase groter wordt dan de verbetering door het beschouwen van extra gevallen, wanneer het aantal beschouwde gevallen toeneemt. In paragraaf 6.1.1 bleek immers al dat het verdubbelen van het aantal beschouwde gevallen van 200 naar 400 slechts een beperkte verlaging van de gemiddelde kost met zich meebracht. De spreiding daarentegen kende wel een grote verbetering. Dit zijn logische resultaten. Indien immers meer gevallen beschouwd worden is de kans ook groter dat er steeds een goed geval tussen zit. De verbetering per bijkomend beschouwd geval zal echter steeds kleiner worden, omdat steeds nieuwe semi-random reeksen worden aangemaakt voor de twaalf stuwen gelijk. Indien een nieuw geval bijvoorbeeld een verbetering aan de ingang van het Schulensmeer met zich meebrengt, maar aan de Webbekom voor een zeer slechte regeling zorgt zal dit geval in het gewone model

verworpen worden. Er worden met andere woorden zeer veel gevallen doorgerekend die slechte resultaten leveren.

In het intelligente model worden de klepstanden in één deel van het bekken constant aangehouden terwijl in het andere een optimalisatie plaatsvindt. Daarom lijkt het aangeraden om de klepstanden per subgroep te optimaliseren wanneer een groter aantal gevallen wordt doorgerekend. Dit komt doordat de gevallen per stuw efficiënter ingezet worden ter verbetering van de sturing in zijn geheel.

Samenvattend kan dus gesteld worden dat de hierboven besproken methode tot een verbetering van het originele MPC-GA-algoritme kan leiden. Hierbij dient het globaal optimum reeds in de tweede fase te worden benaderd waarna verder optimalisatie gebeurt in de derde fase. Indien dit niet het geval zou zijn, zal in de derde fase een lokaal optimum gevonden worden in plaats van het globaal. Het is dus erg belangrijk om bij deze methode trapsgewijs te werk te gaan en voldoende aantal gevallen per niveau te beschouwen. De grondslag van deze techniek is het vermijden van een hele hoop slechte gevallen. Indien een goed geval bekomen is, is het immers nuttiger om slechts een beperkt aantal stuwen (2 of 3) die samen horen te optimaliseren. Zodoende loopt het algoritme niet het risico dat een goed geval voor deze stuwen verworpen wordt, omdat de nieuwe reeksen elders tot slechte resultaten leiden.

Daarnaast kan nog opgemerkt worden dat deze methode nog heel wat speelruimte biedt voor alternatieve groeperingen. Zo kan bijvoorbeeld nog een voorafgaande fase plaatsvinden waarin gevallen met semi-random reeksen voor de twaalf stuwen gelijk beschouwd worden of kan nog een extra fase toegevoegd worden waarin elke stuw nog eens apart geoptimaliseerd wordt. Ook kan een optimalisatie gebeuren van de volgorde waarin de verschillende (sub)groepen geoptimaliseerd worden en de hoeveel iteraties per fase worden uitgevoerd. Belangrijk is dat in elke fase voldoende gevallen beschouwd worden opdat steeds naar het globaal optimum geconvergeerd wordt en niet naar een lokaal. Deze techniek en varianten verdienen verder onderzoek.

Ondanks de indeling in groepen en subgroepen zal bij toepassing van deze techniek nog steeds een heel deel slechte gevallen doorgerekend worden, zelfs in de derde fase. Dit is te verklaren door het feit dat het intelligent model eigenlijk niet echt intelligent is. De opdeling in groepen en subgroepen is wel intelligent, maar nog steeds zullen heel wat gevallen slechte resultaten leveren, omdat niet doelgericht gezocht wordt. Het algoritme heeft immers nog steeds een zeer groot semi-random karakter. Zo zal in de derde fase voor elke stuw opnieuw een totaal nieuwe reeks klepstanden aangemaakt worden, terwijl in de tweede fase al een goede reeks was gevonden. Zoals eerder gezegd is dit semi-random karakter zowel het grootste voordeel als het grootste nadeel van het MPC-GA-algoritme. Het nadeel ligt in het hierboven aangehaalde feit dat heel wat slechte gevallen doorgerekend worden, terwijl het voordeel ligt in het feit dat alle mogelijke stuwstanden worden beschouwd. Voorgaande techniek behoudt dus deze voordelen, maar beperkt de nadelen. Toch kan het interessant zijn om na te gaan hoe het algoritme reageert als de nadelen nog verder geëlimineerd worden. Dit houdt het hanteren van een doelgerichtere aanpak in, waarin actief gezocht wordt in een zone met veel potentieel. In de hierna volgende paragrafen worden twee mogelijkheden hiervoor besproken.

8.5 Stelselmatige verkleining van het onderzoeksgebied

In de industrie zijn voorbeelden terug te vinden van optimalisatieproblemen waarbij de juiste mengverhouding voor bepaalde stoffen moet bekomen worden. Stel dat de samenstelling van een stof uit vijf producten moet geoptimaliseerd worden. Een goede manier om dit te doen is om in een eerste fase een aantal steekproeven met verschillende samenstelling uit te voeren. Vervolgens wordt een zone afgebakend waarbinnen de beste resultaten werden bekomen. Opnieuw worden een aantal steekproeven uitgevoerd, maar nu binnen de zojuist bepaalde zone. Vervolgens wordt de zone weer verkleind en zo verder tot de optimale mengverhouding bepaald is. Figuur 77 geeft dit schematisch weer.



Figuur 77: Voorbeeld van een optimalisatieproces in de industrie: Bepaling van de mengverhouding van vijf producten

Dit principe kan hier ook zijn toepassing vinden. Door bijvoorbeeld eerst na te gaan of de stuw op een bepaald moment hoog, middelmatig of laag moet staan, kan vervolgens in een kleinere, interessante zone verder gezocht worden. Bijgevolg zullen minder slechte gevallen doorgerekend worden en zal de zoektocht naar het optimale verloop van de klepstand veel efficiënter gebeuren. Een nadeel van deze methode is dat mogelijk niet naar het globaal optimum geoptimaliseerd wordt, maar slechts een suboptimum bereikt wordt. Dit hangt af van de kwaliteit van de eerste stap in het optimalisatieproces.

Deze methodologie toepassen voor twaalf stuwen tegelijk is echter niet haalbaar. Indien voor elke stuw eerst drie posities onderzocht worden, namelijk hoog, laag en tussenin, zullen in totaal 3^{12} mogelijke combinaties voorkomen. Het is duidelijk dat dit veel te veel gevallen zijn om in de eerste ruwe fase van het algoritme door te rekenen. Daarom is het beter om dit principe toe te passen in combinatie met het groeperen van stuwen. Op het niveau van de groepen leidt dit echter ook nog tot een hoog aantal gevallen voor de ruwe benadering (243 gevallen voor het Schulensmeer en 2187 voor de Webbekom). Op het niveau van de subgroepen lijkt deze werkwijze echter wel haalbaar. Een subgroep bestaat immers slechts uit twee of drie stuwen en bijgevolg zijn er maximum 27 gevallen nodig voor het bepalen van de ruwe positionering. Nadien kan dan met een beperkt aantal gevallen doelgericht in de afgebakende zone verder gezocht worden.

Hieruit blijkt dat deze methode slechts interessant zal zijn indien de derde stap een aantal keer herhaald wordt. In real-time simulaties zal dit geen probleem vormen op het vlak van rekestijd. Alternatief zou ook elke stuw apart geoptimaliseerd kunnen worden. Zodoende zijn er maar drie gevallen per stuw nodig om de interessante zone voor elke stuw te lokaliseren.

8.6 Permutaties op het verloop van een klepstand

In plaats van eerst drie mogelijke klepstanden te onderzoeken en dan na te gaan welke zone het interessantste is, kan ook beroep worden gedaan op de reeksen klepstanden die uit de twee stap voortkomen. Deze geven immers al goede resultaten en het verloop van de optimale klepstanden zal hierbij in de buurt liggen. Om deze klepstanden verder te verbeteren kunnen dus permutaties aangebracht worden. Zodoende zal het verloop lichtjes wijzigen en eventueel verbeteren. Indien de regenvoorspellingen immers goed zijn en het model goed met de werkelijkheid overeenkomt, zal de feedback die het systeem terugkrijgt niet veel afwijken van wat voorspeld is en zal het beste geval voor lange tijd goed blijven. Indien nieuwe neerslagvoorspellingen sterk afwijken van de vorige, kunnen de permutaties tijdelijk vergroot worden om opnieuw een ruimer gebied te onderzoeken en zo de mogelijkheid te bieden om te reageren op de veranderde voorspellingen. Dit principe kan ook toegepast worden indien de feedback in het systeem sterk afwijkt van het voorspelde. Daarnaast kan ook gefocust worden op het verloop achteraan in de reeks door varianten voor de platte staart aan te leggen.

Hiervoor kan uitgegaan worden van het beste geval uit de vorige regelstap of van het beste verloop uit de tweede stap bij toepassing van het groeperen van de stuwen. Daarnaast kan ook eerst gekeken worden naar wat de vaste regels zouden doen in deze situatie om vervolgens op dit verloop permutaties aan te brengen. In Hoofdstuk 6 bleek echter dat de klepstanden bij toepassing van de MPC-GA-regeling soms helemaal anders verlopen dan bij de vaste regels. Indien de permutaties dan slechts kleine aanpassingen inhouden, wat zo zal moeten zijn aangezien anders de intelligentie van het algoritme opnieuw verdwijnt, zal een hoge klepstand bekomen met de vaste regels nooit omgezet worden tot een lage in het intelligent model. Dit is het grootste probleem van deze techniek. Indien de vaste regels echter vernieuwd worden, rekening houdend met de aanbevelingen uit paragraaf 6.4 vormt dit misschien geen probleem meer. Dit dient nader onderzocht te worden.

8.7 Conclusie

De resultaten met het MPC-GA-algoritme zijn reeds zeer bevredigend. Doch is het interessant om na te gaan of het algoritme niet intelligenter gemaakt kan worden. Door het semi-random karakter zullen vele doorgerekende gevallen immers tot zeer slechte resultaten leiden. Wanneer grote netwerken met vele stuwen beschouwd worden, kan een intelligenter algoritme uitkomst bieden om met dezelfde rekenkracht betere resultaten te boeken. Dit zou tevens een oplossing kunnen zijn indien het model in de toekomst zou vertragen, bijvoorbeeld omdat er met een kleinere tijdstap moet gewerkt worden om instabiliteiten te vermijden.

In eerste instantie is gekeken of het mogelijk is om te werken met vaste trends in plaats van met semi-random reeksen. Dit leidde echter tot een aanzienlijk aantal mogelijke combinaties die allemaal doorgerekend zouden moeten worden om eenduidig het optimale geval te bekomen. Daarom is gekeken hoe het aantal mogelijke combinaties beperkt kan blijven. Een eerste mogelijkheid bestaat er in om een aantal vaste regels te voorzien die zo veel mogelijk combinaties kunnen uitsluiten waarvan verwacht wordt dat deze onder de huidige omstandigheden slechte resultaten zullen leveren. Daarnaast kan door het correleren van bepaalde klepstanden het aantal mogelijke combinaties eveneens aanzienlijk afnemen. Uit

paragraaf 8.3 blijkt echter dat de werking van sommige stuwen verband houdt met die van andere, maar dat het toch niet zo eenvoudig is om duidelijke correlaties tussen de stuwen te detecteren. Daarom is overgeschakeld naar het groeperen van de stuwen en het werken met niveaus, wat opnieuw een aanzienlijke daling van het aantal combinatiemogelijkheden met zich meebrengt.

De resultaten hiervan tonen aan dat door op deze manier te werk te gaan stelselmatig richting het globaal optimum wordt geconvergeerd. Hierbij zorgen de hogere niveaus, met veel stuwen per groep, voor een ruwe benadering van de optimale sturing, terwijl de lagere niveaus de resultaten verder verfijnen. Ondanks de bevredigende resultaten is het algoritme in se nog niet echt slimmer en worden nog steeds heel wat slechte gevallen doorgerekend. Zoals reeds gesteld is het beschouwen van alle mogelijke gevallen zowel de sterkte als de zwakte van het genetisch algoritme. Door het groeperen van de stuwen en het werken met niveaus blijft dit sterke punt behouden, maar wordt de zwakte gereduceerd. Toch is het ook interessant om eens te kijken naar technieken waarmee doelgerichter naar de optimale sturing gezocht wordt.

In het eerste voorstel worden in een eerste fase een aantal steekproeven uitgevoerd waarna de zone met de beste resultaten wordt afgebakend. Hierna kan in een volgende fase deze zone verder onderzocht worden, waarna opnieuw een verkleining van het onderzoeksgebied volgt. Deze fase wordt herhaald tot de optimale combinatie bekomen is. Deze techniek reikt een goed alternatief voor het genetisch algoritme aan. Om opnieuw het aantal combinatiemogelijkheden te beperken kan dit best toegepast worden in combinatie met het groeperen van de stuwen. Tot slot is nog onderzocht of het interessant kan zijn om permutaties aan te brengen op goede reeksen klepstanden om op die manier verder te optimaliseren. Hiervoor kan uitgegaan worden van het beste geval uit de vorige regelstap, het beste geval uit stap twee bij toepassing van het groeperen van stuwen of na doorrekenen van de (herziene) vaste regels. Door de permutaties tijdelijk te vergroten kan geanticipeerd worden op sterk afwijkende feedback en sterk veranderende neerslagvoorspellingen.

Voorgaande ideeën leveren interessante alternatieven voor het genetisch algoritme en verdienen dan ook verder onderzoek. Daarnaast kan door middel van een bijkomende literatuurstudie onderzocht worden welke technieken in andere vakgebieden worden toegepast bij het oplossen van dergelijke optimalisatieproblemen.

Hoofdstuk 9: Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

9.1 Maatschappelijk belang

Tijdens periodes van hevige regenval kunnen overstromingen optreden waarvan de schade vaak niet te overzien valt. Vandaag de dag blijkt het beheersen van overstromingen alsmäär aan belang te winnen. Regelbare stuwen op rivieren en wachtbekkens worden momenteel via vaste regels gestuurd, wat suboptimale resultaten levert. Het toepassen van intelligente sturing kan de beheersing van overstromingen verbeteren. Daartoe is in deze masterproef de Model Predictive Control-techniek (MPC) toegepast in combinatie met een genetisch algoritme (GA).

9.2 Implementatie van de MPC-GA-techniek

Het hoofddoel van deze masterproef bestond uit het implementeren van de MPC-GA-techniek om de regeling van de stuwen langs de Demer te verbeteren ter beheersing van overstromingen. Hiertoe zijn in eerste instantie enkele voorgaande onderzoeken bestudeerd. Bij het ontwikkelen van de sturingstechniek werd vooral het doctoraatsonderzoek van Chiang [2013] bestudeerd waar een soortgelijke MPC-GA-techniek reeds wordt toegepast. Uitbreidingen en verbeteringen van de onderzochte technieken zijn vervolgens geïmplementeerd in het conceptueel Demermodel van Meert [2012] in Simulink®. Het is dankzij de lage rekentijd van een dergelijk conceptueel model dat het mogelijk wordt om MPC toe te passen.

Bij de implementatie drongen een aantal aanpassingen van het conceptueel model zich op. Zo is een extra bak aan de Begijnenbeek aangemaakt om een correcte werking van de regelbare stuwen op die locatie te garanderen. Daarnaast is de bak van de Velpe uitgebreid om instabiliteiten te vermijden en zijn de hypsometrische curven geëxtrapoleerd zodat het waterpeil bij toenemend volume mee kan blijven stijgen. Deze waterpeilen zijn zeer belangrijk voor de werking van het MPC-GA-algoritme omdat de kostberekening hierop gebaseerd is. Deze berekening doet beroep op kostfuncties die lineair toenemen met het waterpeil. Afhankelijk van de relatieve positie van de waterhoogte ten opzichte van enkele waakpeilen kennen deze kostfuncties een ander verloop. Daarnaast is de manier waarop de klepstanden van de stuwen worden gegenereerd onderzocht en geoptimaliseerd. Deze worden zodanig aangemaakt dat het verloop een trend vertoont. Hierbij is, net zoals in de rest van het model, gepoogd om de implementatie zo transparant mogelijk te houden. Ook het adaptief vermogen van het model is erg hoog, wat toelaat de belangrijkste parameters

op een eenvoudige manier te variëren en het model in de toekomst als basis voor de toepassing van intelligente sturing op andere netwerken te gebruiken. Tot slot werd ook veel onderzoek verricht naar het versnellen van het model om de rekentijd binnen de perken te houden. De belangrijkste verwezenlijking om dit doel te bereiken is het gebruik van parallel computing.

Hierna volgde een validatie van het model aan het hydrodynamische InfoworksTM-RS-model. Er waren echter inconsistenties tussen beide modellen bij toepassing van de MPC-GA-regeling. Na grondige analyse bleek dat de waterbalans in het conceptueel model niet gegarandeerd was doordat maximale volumeveranderingen per tijdstap werden opgelegd. Dit werd door het MPC-GA-algoritme uitgebuit, wat de mindere benadering verklaarde. Op langere termijn dient dit probleem opgelost te worden door het verkleinen van de tijdstap van het model, zodanig dat de volumeverandering per stap steeds beperkt blijft. Dit was voor dit onderzoek niet haalbaar, omdat de rekentijd hierdoor zou toenemen en het noodzakelijk was om op beperkte termijn veel simulaties te kunnen uitvoeren. In dit onderzoek zijn daarom de maximale volumeveranderingen uit het model verwijderd. Dit heeft het voorkomen van instabiliteiten in enkele kleine bakken tot gevolg. Validatie van de resultaten aan InfoWorksTM-RS toonde de correcte werking van het verbeterde model aan.

9.3 Evaluatie van het geïntegreerd model

In een volgend deel van deze masterproef werd de invloed van de belangrijkste parameters in het model nagegaan in een parameterstudie. Hieruit volgden de logische resultaten dat verbeteringen worden bekomen naarmate de tijdstap voor het bijstellen van de stuwen, de regelstap, verkleint en een groter aantal gevallen wordt beschouwd. Daarom is de regelstap gelijk gesteld aan 15 minuten. Het is deze regelstap die later ook in de praktijk zal worden toegepast. Het aantal beschouwde gevallen per regelstap is voor dit onderzoek vastgelegd op 200. Dit leidt immers steeds tot bevredigende resultaten en zorgt voor een aanvaardbare rekentijd. In real-time is het mogelijk om met dit model 6450 gevallen per regelstap door te rekenen met één computer. Vervolgens werd vastgesteld dat het bijhouden van de vier beste gevallen voldoende is om in de volgende regelstap goede resultaten te garanderen. De benodigde controlehorizon om voldoende te kunnen anticiperen op verwachte neerslag bedraagt 48 uur.

De gemiddelde totale kost voor de ontwerpbeurt van september 1998 werd met behulp van de MPC-GA-techniek gereduceerd met 41% ten opzichte van de vaste regeling. Daarbij wordt de capaciteit van de wachtbekkens waar mogelijk quasi perfect benut. Het MPC-GA-algoritme slaagt er in om de overstromingen in het gehele netwerk te beperken. Zo lag het totaal overstroomd volume 46% lager dan bij de vaste regeling. In een diepgaande analyse is nagegaan op welke manier de betere resultaten zijn verkregen. Onderzoek van de debietsverdeling leerde dat de grootste verschillen zich voordoen aan het Schulensmeer en de Vlootgracht. Uitgaande van de bekomen resultaten zijn enkele aanbevelingen ter verbetering van de vaste regels geformuleerd. Deze hebben vooral betrekking op de stuwen rond het Schulensmeer en de stuwen die in de vaste regels momenteel als vaste overlaat worden beschouwd.

Vervolgens werd nagegaan hoe het algoritme reageert op andere extreme gebeurtenissen. Daartoe is een simulatie uitgevoerd met de historische gebeurtenis van januari 2002. Hierbij is vastgesteld dat de wachtbekkens van het Schulensmeer onnodig veel gevuld worden tijdens het eerste gedeelte van de ontwerpbui en deze slechts beperkt worden geledigd. Dit probleem vindt zijn oorsprong bij de kostfuncties die nog verbeterd en verder onderzocht dienen te worden. Ook een ontwerpbui met twee extreme neerslagpieken achter elkaar werd beschouwd. Uit de resultaten bleek dat het algoritme goed anticipeert op de aankomende neerslag en de wachtbekkens zo veel mogelijk ledigt na de eerste piek.

Algemeen volgde uit de analyse van de resultaten dat het MPC-GA-algoritme goed functioneert en er in slaagt overstromingen in belangrijke mate te beheersen en te anticiperen op voorspelde neerslag.

9.4 Aanvullende verbeteringen

In een laatste deel van het onderzoek werd nagegaan welke aanpassingen aan het netwerk of de MPC-GA-regeling tot verdere verbeteringen kunnen leiden. Het eerste voorstel kwam voort uit de vaststelling dat de bergingscapaciteit van de buitenbekkens van het Schulensmeer onvoldoende werd benut. De oorzaak hiervan lag bij de vaste overlaten aan de ingang ervan. Een aanzienlijke verbetering werd bekomen door deze te vervangen door twee regelbare stuwen. In combinatie met MPC-GA worden de overstromingen voor de extreme gebeurtenis van september 1998 bijna volledig vermeden. Door vandaag te investeren in deze extra regelbare stuwen kunnen in de toekomst grote kosten bespaard worden.

De tweede verbetering heeft betrekking op het MPC-GA-algoritme. Dit heeft in zijn huidige vorm een semi-random karakter wat het benodigde aantal beschouwde gevallen om tot een eenduidige sturing te komen sterk doet oplopen. Rekening houdend met de toekomstige verhoging van de rekentijd indien de tijdstap van het model verkleind wordt, neerslagonzekerheid in rekening wordt gebracht of het algoritme op grotere netwerken met meer stuwen wordt toegepast, lijkt het interessant om het aantal benodigde gevallen te reduceren door meer intelligentie in het algoritme te brengen. In het laatste hoofdstuk zijn een aantal mogelijkheden hieromtrent ontwikkeld. De methode rond het groeperen van een aantal stuwen en het opdelen in verschillende niveaus om zo het aantal mogelijke combinaties te doen afnemen werd verder uitgewerkt. De resultaten tonen aan dat de techniek zeker potentieel heeft, maar verder onderzoek met meer simulaties vereist is.

9.5 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Tijdens het onderzoek is vastgesteld dat een aantal verdere uitbreidingen en verbeteringen van het huidige model mogelijk zijn. Het is interessant om met deze bevindingen in verder onderzoek rekening te houden. Vooreerst is het aangeraden om tijdens de kalibratie van conceptuele modellen niet alleen gebruik te maken van ontwerpboeien met grote neerslaghoeveelheden, maar ook van periodes van droogte. Deze maatregel moet de overeenkomst tussen conceptuele modellen en volledig hydrodynamische modellen in de toekomst verder verbeteren.

Vervolgens blijkt verdere kalibratie en optimalisatie van de kostfuncties aangewezen. Vooral bij het ledigen van de wachtbekkens is ruimte voor verbetering aanwezig. Daarnaast is het aangeraden om een meer dan lineair verloop toe te kennen aan de kostfuncties boven het overstromingspeil. Hierdoor zullen de resultaten beter aanleunen bij de praktijk. Daarbij is het ook interessant om te onderzoeken of de kostfuncties aan monetaire waarden gekoppeld kunnen worden.

Door de hoge rekentijd is het aantal beschouwde gevallen en het aantal simulaties in dit onderzoek vrij beperkt. In de toekomst zal de rekentijd verder moeten verbeteren. Dit is niet alleen interessant om de invloed van de verschillende parameters in later onderzoek verder te kunnen nagaan, maar zeker ook voor de toepassing van real-time sturing. Het resultaat zal immers verbeteren naarmate meer gevallen worden doorgerekend. De rekentijd kan sterk versneld worden door over te schakelen naar een andere programmeeromgeving.

Het kan in de toekomst eveneens interessant zijn om meer intelligentie in het MPC-GA-algoritme aan te brengen. Hiervoor zijn in dit onderzoek enkele ideeën ontwikkeld. Deze verdienen verder onderzoek, aangezien de resultaten getuigen van veel potentieel. Inspiratie voor nieuwe en aanvullende technieken kan gehaald worden uit de methodes die in andere vakgebieden bij dergelijke optimalisatieproblemen gebruikt worden.

Tot slot is het nodig om in de toekomst rekening te houden met de onzekerheid op de neerslag. Dit is een heel belangrijk aspect dat zeker onderzocht moet worden. Door afwijkingen in de neerslagvoorspellingen kan de voorspelde toestand immers afwijken van de werkelijk optredende, wat de sturing met het algoritme minder doeltreffend zal maken.

Deze masterproef is een volgende stap richting de implementatie van intelligente sturing ter beheersing van overstromingen in de praktijk. Daarnaast geeft het de aanzet voor verder onderzoek naar het uitbreiden van het netwerk met regelbare stuwen en de ontwikkeling van intelligente genetische algoritmes.

Referenties

Barjas-Blanco, T., Chian, P., Breckpot, M., Willems, P., Berlamont, J. & De Moor, B., 2009. Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer – Studie uitgevoerd voor Vlaamse Milieumaatschappij (Afdeling Operationeel Waterbeheer). 160p.

Barjas-Blanco, T., Chian, P., Breckpot, M., Willems, P., Berlamont, J. & De Moor, B., 2010. Flood regulation using nonlinear model predictive control. *Control Engineering Practice*, Vol 18, no. 10, p. 1147-1157

Barjas Blanco, T., Willems, P., Chiang, P-K., Cauwenberghs, K., De Moor, B., Berlamont, J. 2010. ‘Flood Regulation by means of Model Predictive Control’, In: “Intelligent Infrastructures” (Eds. R.R. Negenborn, Z. Lukszo, and H. Hellendoorn), Springer, Series: Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Vol. 42, 529 p., 407-437, doi: 10.1007/978-90-481-3598-1_16, ISBN: 978-90-481-3597-4

Berlamont, J., 2001, Overstromingen: waarom, waar, wanneer, hoe? Symposium ruimte voor water, de beste verzekering tegen wateroverlast. Brussel, 15 mei.

Berlamont, J., 2012, *Stuwen* cursustekst. Leuven: Acco (ISBN 978-90-334-6157-6)

Behrendt, M., 2009. A basic working principle of Model Predictive Control

Cant, P., 2013. Onderzoek naar de fysische sedimentkarakteristieken van de Demer en haar bijrivieren: Sedimentatieproeven in natuurlijk rivierwater, beschikbaar op: <http://www.scriptiebank.be/scriptie/onderzoek-naar-de-fysische-sedimentkarakteristieken-van-de-demer-en-haar-bijrivieren-sedime>

Chiang, P.K., 2012. Note for MPCGA’s objective function

Chiang, P.K., 2013. Flood control combining optimization techniques with hydrological-hydraulic modeling. Doctoraatsstudie aan de KU Leuven – Afdeling Hydraulica, lopend.

Chiang, P-K., Willems, P., 2010. A conceptual river model to support real-time flood control (Demer river, Belgium), *River Flow 2010* (eds. A. Dittrich, K. Koll, J. Aberle, P. Geisenhainer), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Germany; Volume 2, 1407-1414; ISBN 978-3-939230-00-7

Hasel, 1991. *Herk*, beschikbaar op: <http://www.hasel.be/nl/subjects/4991/herk.html>

HIC, 2003. *De digitale Demer, een nieuw en krachtig instrument voor waterpeilbeheer*, beschikbaar op: <http://www.lin.vlaanderen.be/awz/waterstanden/hydra/publicaties/demerbrochure.pdf>

Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2013. *Watertoets*, beschikbaar op <http://www.integraalwaterbeleid.be>

Innovyze, 2012. InfoWorks River Simulation Help Documentation (version 12.5).
Verenigd Koninkrijk, Wallingford Software

Integraal Waterbeleid Demerbekken, 2006. Vol van water... *De waterbeheerplannen in openbaar onderzoek. Demerbekken.*

Integraal Waterbeleid Demerbekken, 2008-2013. *Het bekkenbeheerplan van het Demerbekken.*

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

KMI, 2013. Meteo, beschikbaar op: <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/1103154-Neerslag.html>

Malaterre, P.O., Rogers, D.C., Schuurmans, J., 1998. Classification of Canal Control Algorithms, *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 124., no. 1, p. 3-10, januari 1998.

MathWorks, 2013. SIMULINK, Simulation and Model-Based Design, beschikbaar op: <http://www.mathworks.nl/products/simulink/index.html>

Meert, P., 2012. Intelligente sturing van wachtbekkens ter voorkoming van overstromingen. Masterthesis Faculteit Ingenieurswetenschappen KULeuven.

Natuurpunt, 2008. *Vallei van de Zwarte Beek, Hechtel-Eksel*, beschikbaar op: http://www.natuurpunt.be/nl/de-natuur-in/natuurgebied-vallei-van-de-zwarte-beek-hechtel-eksel_65.aspx

Negenborn, R.R., van Overloop, P.-J., Keviczky, T., and De Schutter, B., 2009. Distributed model predictive control of irrigation canals, *Networks and Heterogeneous Media*, vol. 4, no. 2, p. 359–380, juni 2009.

OBM-Demer, 2003. Operationeel Bekken Model Demer, *Technische Beschrijving v2.0*, Wallingford Software – Soresma – IMDC, November 2003.

Oostbrabantse Werkgemeenschap, 2009. Oost 1967-1, beschikbaar op: <http://www.oostbrabant.org/Tijdschriften/Oostbrabant/1967-1/div1.html>

Rutz, V.M., Ruiz, C., Ramires, L., 1998. Predictive control in irrigation canal operation. IEEE, SMC98, Vol. 4, p. 3897-3901

Schafer, R.W., 2011. Differentiation of data by simplified least squares, *IEEE Signal Processing Magazine*, p. 111-117, juli 2011.

Van Overloop, P.-J., Weijs, S., Dijkstra, S., 2008. Multiple Model Predictive Control on a drainage canal system, *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 5, p. 531-540, mei 2008

Van Steenbergen, N., Ronsyn, J., Willems, P., 2012. Non-parametric data-based approach for probabilistic flood forecasting in support of uncertainty communication, *Environmental Modelling & Software*, 33, 92-105

Van Steenbergen, N., Ronsyn, J., Willems, P., Van Eerdenbrugh, K., 2011. 'A data-based probabilistic approach to calculate and visualise the uncertainty of flood forecasts', International Symposium on "Urban Flood Risk Management (UFRIM 2011) - Approaches to enhance resilience of communities", 21-23 September 2011, Graz, Austria, Proceedings (Eds. Gerald Zenz, Rudolf Hornich), 177-182; ISBN 978-3-85125-173-9 (Verlag der Technischen Universitat Graz)

Van Steenbergen, N., Willems, P., 2012, 'Assessment of model improvement actions in river hydrodynamic modelling.', *River Flow 2012* (Ed. R.M. Muñoz), International Conference on Fluvial Hydraulics, Costa Rica, 5-7 Sept. 2012; Volume 2, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 1219-1225; ISBN 979-0-415-62129-8

Van Steenbergen, N., Willems, P., Deschamps, M., 2013. 'Identification of uncertainty sources in flood forecasting', International Conference on Flood Resilience (ICFR): Experiences in Asia and Europe, Exeter, UK, 5-7 September 2013, 7 p.

Velpeleven Boutersem, 1974. "*Al wandelend langs de Velpe, delen 1 & 2*, beschikbaar op: http://www.velpeleven.be/art1974_1_2_wandelendlangsdevelpe1.htm

Villazón, M.F., 2011. Modelling and conceptualization of hydrology and river hydraulics in flood conditions, for Belgian and Bolivian basins. Doctoraatsthesis Faculteit Ingenieurswetenschappen KU Leuven.

VMM, 2013. *Overstromingsvoorspeller*, beschikbaar op: www.overstromingsvoorspeller.be

Willems, P., Barjas Blanco, T., Chiang, P.-K., Cauwenberghs, K., Berlamont, J., De Moor, B., 2008. Evaluation of River Flood Regulation by means of Model Predictive Control, 4th International Symposium on Flood Defense: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Toronto, Ontario, Canada, May 6-8.

Willems P., Barjas Blanco T., Chiang P.-K., Cauwenberghs K., Berlamont J., De Moor B., 2008. Real-time control of urban flooding, In: *Water & Urban Development Paradigms: Towards an integration of engineering, design and management approaches*, J.Feyen, K.Shannon, M.Neville (ed.), CRC Press, Taylor & Francis Group, 265-270 (ISBN 978-0-415-48334-6 Hardback; 978-0-203-88410-2 eBook)

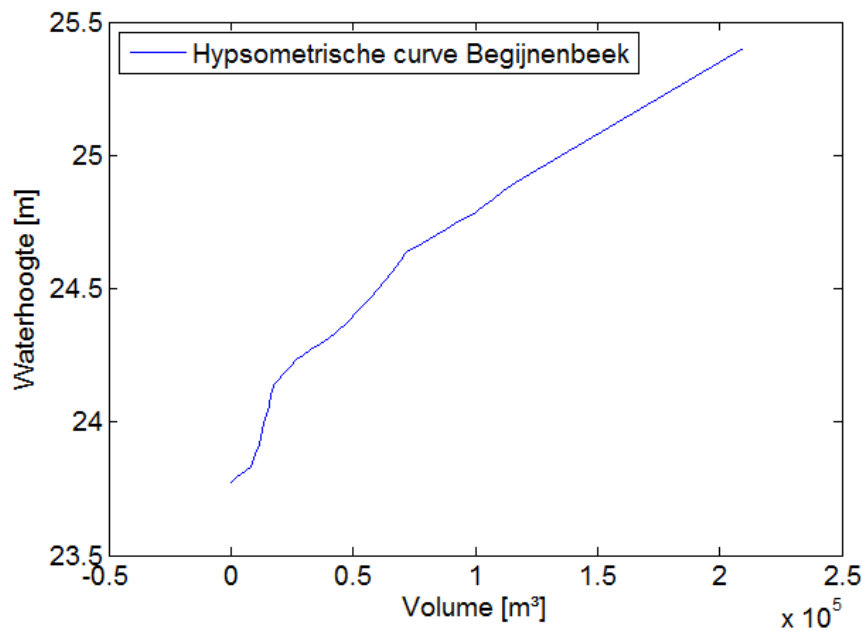
Wolfs, V., Van Steenbergen, N., Willems, P., 2012. 'Flood probability mapping by means of conceptual modeling', *River Flow 2012* (Ed. R.M. Muñoz), International Conference on Fluvial Hydraulics, Costa Rica, 5-7 Sept. 2012; Volume 2, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 1081-1085; ISBN 979-0-415-62129-8

Bijlagen

Bijlage A: Hypsometrische curve bak Begijnenbeek

Tabel 26: Hypsometrische curve bak Begijnenbeek

Volume [m ³]	Waterhoogte [m]	Volume [m ³]	Waterhoogte [m]
-131,05	23,77	51401,21	24,41
2590,73	23,80	55211,69	24,45
5856,85	23,81	58296,37	24,47
8215,73	23,83	59929,44	24,50
9667,34	23,88	63377,02	24,53
11481,85	23,92	65917,34	24,56
12933,47	23,97	69364,92	24,60
14022,18	24,01	71542,34	24,63
15473,79	24,06	72449,60	24,64
16562,50	24,10	76260,08	24,66
17469,76	24,13	81159,27	24,69
18014,11	24,14	88054,44	24,72
19647,18	24,16	91683,47	24,74
21643,15	24,18	95312,50	24,76
24183,47	24,21	100030,24	24,79
26723,79	24,23	103659,27	24,81
29627,02	24,25	107469,76	24,84
32348,79	24,27	110735,89	24,86



Figuur 78: Hypsometrische curve van de bak Begijnenbeek

Bijlage B: Uiterste klepstanden

Tabel 27: Overzicht van de uiterste klepstanden (relatief t.o.v. de laagste klepstand)

Stuw	Maximale klepstand (m)	Stuw	Maximale klepstand (m)
A	3	K7 Leug	1,15
K7	2,97	K18	3
D	4	K19	2,3
Egw	3	K24l	2,2
Ers	5,2	K24w	2,2
K7 Beg	1,15	K30	3,5

Bijlage C: Overzicht van de waakpeilen

Tabel 28: Overzicht van de verschillende waakpeilen

Waterpeil	Locatie	Referentiepeil (m TAW)	Waarschuwingspeil (m TAW)	Overstromingspeil (m TAW)
WL1	DemOpw	21,44	23,30	24,30
WL2	Velppe	20,12	23,20	24,00
WL3	BegOpw	23,77	24,30	24,80
WL4	HerkOpw	20,42	23,10	23,60
WL5	Resch1	20,20	22,75	23,05
WL6	Resch2	20,26	22,75	23,05
WL7	Resch3	19,62	22,75	22,80
WL8	Resch4	19,99	22,75	22,80
WL9	ReWeb1	19,93	22,00	22,40
WL10	K7afw	20,72	23,30	24,30
WL11	MondGete	19,57	21,70	22,70
WL12	MondVI	19,66	21,90	22,90
WL13	K31Opw	18,81	21,40	22,20
WL14	ZwaOpw	19,24	20,20	21,00
WL15	Vlootgr	20,02	21,70	22,50
WL16	K31Afw	18,56	20,40	21,40
WL17	Begijnenb	22,35	23,70	24,30
WL18	Leugeb	20,54	21,80	23,00
WL19	Leigracht	18,77	21,50	22,00
WL20	DemAfw	17,33	19,30	20,50

Bijlage D: Gewichten van de kostfuncties

Tabel 29: Gewichten voor de waterpeilen onder referentiepeil en tussen referentiepeil en waarschuwingspeil

Waterpeil	Locatie	Gewicht_RP	Waterpeil	Locatie	Gewicht_RP
WL1	DemOpw	1	WL11	MondGete	1
WL2	Velpe	0,6	WL12	MondVI	1
WL3	BegOpw	1	WL13	K31Opw	1
WL4	HerkOpw	1	WL14	ZwaOpw	1
WL5	Resch1	3,3	WL15	Vlootgr	1
WL6	Resch2	3,3	WL16	K31Afw	1
WL7	Resch3	5	WL17	Begijnenb	1
WL8	Resch4	5	WL18	Leugeb	2
WL9	ReWeb1	3,7	WL19	Leigracht	6
WL10	K7afw	0,7	WL20	DemAfw	1

Tabel 30: Gewichten voor de waterpeilen tussen waarschuwingspeil en overstromingspeil

Waterpeil	Locatie	Gewicht_WP	Waterpeil	Locatie	Gewicht_WP
WL1	DemOpw	20	WL11	MondGete	30
WL2	Velpe	20	WL12	MondVI	25
WL3	BegOpw	20	WL13	K31Opw	20
WL4	HerkOpw	25	WL14	ZwaOpw	20
WL5	Resch1	6,6	WL15	Vlootgr	20
WL6	Resch2	6,6	WL16	K31Afw	23
WL7	Resch3	10	WL17	Begijnenb	22
WL8	Resch4	10	WL18	Leugeb	20
WL9	ReWeb1	7,4	WL19	Leigracht	8
WL10	K7afw	20	WL20	DemAfw	20

Tabel 31: Gewichten voor de waterpeilen boven het overstromingspeil

Waterpeil	Locatie	Gewicht_OP	Waterpeil	Locatie	Gewicht_OP
WL1	DemOpw	260	WL11	MondGete	300
WL2	Velpe	260	WL12	MondVI	300
WL3	BegOpw	200	WL13	K31Opw	350
WL4	HerkOpw	300	WL14	ZwaOpw	320
WL5	Resch1	10000	WL15	Vlootgr	250
WL6	Resch2	10000	WL16	K31Afw	280
WL7	Resch3	10000	WL17	Begijnenb	200
WL8	Resch4	10000	WL18	Leugeb	300
WL9	ReWeb1	10000	WL19	Leigracht	10000
WL10	K7afw	300	WL20	DemAfw	600

Bijlage E: Vaste regels voor stuwen K7bg, K7lg, K19, K18, K24w, K24l en K30

Tabel 32: Vaste regels voor stuw K7bg

Regel	Voorwaarde	Actie
K7bg.1	$Q_{Tot} \leq 2\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} < 23,79\text{m}$	Stijgen met 0,01m/s
K7bg.2	$Q_{Tot} \leq 2\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} \geq 23,79\text{m}$ & $WL_{opw} \leq 23,81\text{m}$	Constant houden
K7bg.3	$Q_{Tot} \leq 2\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} > 23,81\text{m}$	Dalen met 0,01m/s
K7bg.4	$Q_{Tot} > 2\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 4\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} < 23,80\text{m}$	Stijgen met 0,01m/s
K7bg.5	$Q_{Tot} > 2\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 4\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} \geq 23,80\text{m}$ & $WL_{opw} \leq 24,05\text{m}$	Constant houden
K7bg.6	$Q_{Tot} > 2\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 4\text{m}^3/\text{s}$ & $WL_{opw} > 24,05\text{m}$	Dalen met 0,01m/s
K7bg.7	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{bg} > 4\text{m}^3/\text{s}$	Stijgen met 0,01m/s
K7bg.8	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{bg} < 4\text{m}^3/\text{s}$	Dalen met 0,01m/s
K7bg.9	$Q_{Tot} > 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{lg} < 3\text{m}^3/\text{s}$	Stijgen met 0,01m/s
K7bg.10	$Q_{Tot} > 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{lg} > 3\text{m}^3/\text{s}$	Dalen met 0,01m/s
K7bg.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 1,15m)	Extrema aanleggen

Tabel 33: Vaste regels voor stuw K7lg

Regel	Voorwaarde	Actie
K7lg.1	$Q_{Tot} \leq 4\text{m}^3/\text{s}$	Stijgen met 0,01m/s
K7lg.2	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{bg} > 4\text{m}^3/\text{s}$	Dalen met 0,01m/s
K7lg.3	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{Tot} \leq 7\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{bg} < 4\text{m}^3/\text{s}$	Stijgen met 0,01m/s
K7lg.4	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{lg} > 3\text{m}^3/\text{s}$	Stijgen met 0,01m/s
K7lg.5	$Q_{Tot} > 4\text{m}^3/\text{s}$ & $Q_{lg} < 3\text{m}^3/\text{s}$	Dalen met 0,01m/s
K7lg.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 1,15m)	Extrema aanleggen

Tabel 34: Vaste regels voor stuw K19

Regel	Voorwaarde	Actie
K19.1	$WL_{opw} \leq WL_{afwK19}$	Stijgen met 0,01m/s
K19.2	$WL_{opw} > WL_{afwK19}$ & $WL_{opw} < 21,49\text{m}$	Stijgen met 0,01m/s
K19.3	$WL_{opw} > WL_{afwK19}$ & $WL_{opw} \geq 21,49\text{m}$ & $WL_{opw} \leq 21,51\text{m}$	Constant houden
K19.4	$WL_{opw} > WL_{afwK19}$ & $WL_{opw} > 21,51\text{m}$	Dalen met 0,01m/s
K19.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 2,3m)	Extrema aanleggen

Tabel 35: Vaste regels voor stuw K18

Regel	Voorwaarde	Actie
K18.1	/	Constant houden (0,5m)

Tabel 36: Vaste regels voor stuw K24w

Regel	Voorwaarde	Actie
K24w.1	$WL_{afw} \geq 22,0m$	Stijgen met 0,01m/s
K24w.2	$WL_{afw} < 22,0m$ & $WL_{afw} \geq WL_{opw}$	Stijgen met 0,01m/s
K24w.3	$WL_{afw} < 22,0m$ & $WL_{afw} < WL_{opw}$ & $WL_{opw} < 20,89m$	Stijgen met 0,01m/s
K24w.4	$WL_{afw} < 22,0m$ & $WL_{afw} < WL_{opw}$ & $WL_{opw} \geq 20,89m$ & $WL_{opw} \leq 20,91m$	Constant houden
K24w.5	$WL_{afw} < 22,0m$ & $WL_{afw} < WL_{opw}$ & $WL_{opw} > 20,91m$	Dalen met 0,01m/s
K24w.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 2,2m)	Extrema aanleggen

Tabel 37: Vaste regels voor stuw K24l

Regel	Voorwaarde	Actie
K24l.1	$WL_{afwK24w} \geq 22,0m$ & $WL_{opw} < 20,59m$	Stijgen met 0,01m/s
K24l.2	$WL_{afwK24w} \geq 22,0m$ & $WL_{opw} \geq 20,59m$ & $WL_{opw} \leq 20,61m$	Constant houden
K24l.3	$WL_{afwK24w} \geq 22,0m$ & $WL_{opw} > 20,61m$	Dalen met 0,01m/s
K24l.4	$WL_{afwK24w} < 22,0m$ & $WL_{afwK24l} > 20,3m$	Stijgen met 0,01m/s
K24l.5	$WL_{afwK24w} < 22,0m$ & $WL_{afwK24l} \leq 20,3m$ & $WL_{opw} < 20,59m$	Stijgen met 0,01m/s
K24l.6	$WL_{afwK24w} < 22,0m$ & $WL_{afwK24l} \leq 20,3m$ & $WL_{opw} \geq 20,59m$ & $WL_{opw} \leq 20,61m$	Constant houden
K24l.7	$WL_{afwK24w} < 22,0m$ & $WL_{afwK24l} \leq 20,3m$ & $WL_{opw} > 20,61m$	Dalen met 0,01m/s
K24l.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 2,2m)	Extrema aanleggen

Tabel 38: Vaste regels voor stuw K30

Regel	Voorwaarde	Actie
K30.1	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} < 19,99m$	Stijgen met 0,05m/s
K30.2	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} \geq 19,99m$ & $WL_{opw} \leq 20,01m$	Constant houden
K30.3	$WL_{afw} < 19,9m$ & $WL_{opw} > 20,01m$	Dalen met 0,05m/s
K30.4	$WL_{afw} \geq 19,9m$ & $WL_{afw} \leq 20m$ & $WL_{opw} \leq 21,75m$	Constant houden
K30.5	$WL_{afw} > 20m$ & $WL_{opw} \leq 21,75m$	Stijgen met 0,05m/s
K30.6	$WL_{afw} > 19,9m$ & $WL_{opw} > 21,75m$	Dalen met 0,05m/s
K30.Extrema	Uiterste klepstanden overschreden (0m en 3,5)	Extrema aanleggen

Tabel 39: Vergelijking tussen de resultaten met vaste regeling en met MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen voor de was van 1998: Overzicht van de debietverdeling in de vertakkingspunten van het Demermodel voor de eerste 18 dagen.

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. vaste	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen
	Vaste regels	Extra stuwen			
Demer opwaarts					
qA	7695	7457	-3%	0	Gelijkaardige vulling binnenbekken via stuw A
qK7	12198	12405	+2%	0	Gelijkaardige afvoer via Demer
VDemOpw	5	35	+627%	0	Toename berging opwaarts in de Demer
Schulensmeer binnenbekken					
qD	4090	3078	-25%	1	Verminderde afvoer naar Vlootgracht
qsch3	1866	2300	+23%	1	Meer vulling tweede binnenbekken
VResch1	1738	2080	+20%	1	Meer berging in binnenbekken Schulensmeer
Vlootgracht					
qEgwrs	1730	-1117	-165%	1	Andere stromingsrichting: instroom vanuit de Demer
qEvs	102	127	+25%	0	Kleine toename afvoer naar de Zwartewater
qsch4	2267	4067	+79%	1	Meer vulling buitenbekken Schulensmeer
Vvloot	8	17	+111%	0	Kleine toename berging in de Vlootgracht
Zwartewater					
qzwzb	1573	888	-44%	1	Verminderde afvoer naar de Zwartebeek
Vzwartewater	24	19	-23%	0	Afname berging Zwartewater

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. vaste	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen
	Vaste regels	Extra Stuwen			
Schulensmeer buitenbekken					
qsch5	281	1214	+332%	1	Toename doorstroming naar het tweede buitenbekken
qhb	746	31	-96%	1	Verminderde afvoer naar de Houwersbeek
qOrResch	370	1044	+182%	1	Toename afvoer naar het derde buitenbekken
VResch3	838	1747	+108%	1	Toename berging buitenbekken Schulensmeer
Herk en Gete					
qgete	25300	25300	0%	0	Gelijke afvoer langs de Gete
qhs5	262	262	0%	0	Gelijke afvoer naar derde buitenbekken
Vherk	0	0	0%	0	Geen verschil in berging Herk
Begijnenbeek					
qK7bg	2353	1880	-20%	1	Verminderde afvoer via de Begijnenbeek
qK7lg	596	1078	+81%	1	Verhoogde afvoer langs de Leugebeek
Vbeg	9	0	-99%	0	Verminderde berging Begijnenbeek
Leugebeek					
qK24l	866	1037	+20%	0,5	Verhoogde afvoer naar de Grote Leigracht
qK24w	438	601	+37%	0,5	Meer vulling binnenbekken Webbekom
Vleug	1	0	-91%	0	Kleine afname berging Leugebeek
Webbekom binnenbekken					
qK30	4001	4762	+19%	1	Grotere afvoer naar de Grote Leigracht
VReWeb1	753	703	-7%	0	Afname berging binnenbekken Webbekom

	Cumulatief debiet [10 ³ m ³] na 18 dagen		% verschil extra stuwen t.o.v. vaste	Invloed (0 - 1)	Invloed extra stuwen
	Vaste regels	Extra Stuwen			
Velpe					
qK18	1182	631	-47%	1	Verlaagde doorvoer naar de Demer
qK19	4315	4864	+13%	1	Verhoogde afvoer naar de Webbekom
Vvel	4	6	+39%	0	Toename berging Velpe
Grote Leigracht					
qweb2	782	766	-2%	0	Kleine afname afvoer naar tweede buitenbekken
qOrWeb	4185	5134	+23%	1	Toename doorvoer naar Demer
Vlei	19	18	-1%	0	Kleine afname berging in de Grote Leigracht
Demer afwaarts					
qafw	54295	50875	-6%	1	Sterk toegenomen berging in het volledige bekken.

Bijlage G: Evaluatie efficiëntie: MPC-GA-sturing met extra stuwen versus vaste regeling

Tabel 40: Analyse van de waterpeiloverschrijdingen bij toepassing van de vaste regels en van de MPC-GA-regeling in het model met extra stuwen voor de historische was van september 1998: Vergelijking van de maximale waterpeiloverschrijding, de som van de waterpeiloverschrijdingen, het overstromd volume en de overstromingsduur.

Water-peil	Locatie	Maximale waterpeil-overschrijding [m]		Som waterpeil-overschrijding [mh]		Overstromd volume [10^3m^3]		Overstromings-duur [h]	
		Vaste regels	Extra stuwen	Vaste regels	Extra stuwen	Vaste regels	Extra stuwen	Vaste regels	Extra stuwen
WL1	DemOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL2	Velpe	-	-	-	-	-	-	-	-
WL3	BegOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL4	HerkOpw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL5	Resch1	0,03	-	0,17	-	1963	-	10,50	-
WL6	Resch2	0,03	-	0,17	-	2324	-	10,33	-
WL7	Resch3	-	-	-	-	-	-	-	-
WL8	Resch4	-	-	-	-	-	-	-	-
WL9	ReWeb1	-	-	-	-	-	-	-	-
WL10	K7afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL11	MondGete	0,25	-	7,48	-	17477	-	48,50	-
WL12	MondVI	0,07	-	0,84	-	1851	-	19,83	-
WL13	K31Opw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL14	ZwaOpw	0,51	0,10	32,65	2,17	22301	1257	89,25	45,92
WL15	Vlootgr	0,60	0,24	20,92	2,63	3694	461	69,58	25,58
WL16	K31Afw	-	-	-	-	-	-	-	-
WL17	Begijnenb	0,05	-	0,71	-	NG	-	15,67	-
WL18	Leugeb	-	-	-	-	-	-	-	-
WL19	Leigracht	0,13	-	2,17	-	419	-	34,92	-
WL20	DemAfw	0,33	0,02	17,31	0,10	15218	88	74,58	6,67

Fiche masterproef

Studenten: Bert Van den Zegel
Evert Vermuyten

Titel: Intelligente sturing ter beheersing van overstromingen langs de Demer

Engelse titel: Real-time control of floods along the Demer river

UDC: 626

Korte inhoud:

Deze masterproef kadert binnen het onderzoek naar het beheersen van overstromingen door middel van intelligente sturing van hydraulische structuren. De studie beperkt zicht tot de bovenloop van de Demer, maar de kennis en methodiek zijn overdraagbaar naar andere stromingsgebieden. De intelligente sturing moet de huidige vaste regels vervangen die vaak tot suboptimale resultaten leiden. Hiertoe werd een model opgesteld die de Model Predictive Control (MPC) techniek combineert met een genetisch algoritme (GA). Hierbij is beroep gedaan op een reeds bestaand conceptueel model van de Demer in Simulink dat vervolgens is uitgebreid met de MPC-GA-techniek. De techniek bestaat uit het genereren van semi-random reeksen klepstanden die in te toekomst aangelegd kunnen worden. Aan de hand van neerslagvoorspellingen wordt voor elk van deze reeksen onderzocht hoe het systeem zal evolueren. Door middel van een kostberekening op basis van twintig geselecteerde locaties wordt de beste combinatie van klepstanden geselecteerd die dan effectief aan het systeem zal worden aangelegd. Het toegepaste MPC-GA-algoritme slaagt er in de gestelde doelen te bereiken en het overstroomb volume met 46% te beperken ten opzichte van de huidige sturingstechnieken voor de historische was van september 1998. Aan de hand van een parameterstudie wordt de invloed van de belangrijkste parameters van het MPC-GA-algoritme nagegaan. Na een grondige analyse van de resultaten worden enkele aanbeveling opgesteld ter verbetering van de vaste regels. In een laatste fase zijn enkele aanvullende verbeteringen van het riviernetwerk en het MPC-GA-algoritme onderzocht. Het invoegen van twee strategisch geplaatste regelbare stuwen blijkt een belangrijke maatregel te zijn om overstromingen nog beter te beheersen. Het overstroomb volume is hierbij herleid tot slechts 3% ten opzichte van de huidige sturing. Tot slot werden enkele mogelijkheden ontwikkeld om de intelligentie van het genetisch algoritme te verhogen. Het groeperen van stuwen en optimaliseren op verschillende niveaus lijkt een techniek met veel potentieel.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor: Prof. dr. ir. P. Willems

Assessoren: Prof. dr. ir. J. Berlamont
Ir. J. Dewelde

Begeleider: Ir. V. Wolfs