

T. Barjas-Blanco¹, P. Willems²,
J. Berlamont³, B. De Moor⁴,
K. Cauwenberghs⁵,
S. Rombauts⁵,
F. Raymaekers⁵

Real-time sturing van wachtbekkens

¹ Doctorandus K.U.Leuven

² Postdoctoraal onderzoeker
FWO-Vlaanderen en gastdocent
K.U.Leuven

³ Gewoon hoogleraar
K.U.Leuven

⁴ Gewoon hoogleraar
K.U.Leuven

⁵ Ingenieurs Afdeling Water -
Vlaamse Milieumaatschappij

In een lopende studie van de K.U.Leuven voor de Afdeling Water van de Vlaamse Milieumaatschappij wordt de bruikbaarheid van regeltechniek onderzocht voor de specifieke toepassing van de real-time sturing van hydraulische regelstructuren. Meer specifiek wordt de techniek van Model Predictive Control (MPC) getoetst met het oog op het bekomen van een meest efficiënte regeling ter beheersing van overstromingen bij het ledigen en vullen van wachtbekkens. De regeling van de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom in het Demerbekken zijn als gevalstudie beschouwd. Het onderzoek maakt gebruik van het Operationeel BekkenModel (OBM) voor de Demer, dat door de Afdeling Water werd ontwikkeld voor real-time overstromingsvoorspelling in het Vlaamse Demerbekken.

Inleiding

In een lopend onderzoek voor de Afdeling Water van de Vlaamse Milieumaatschappij is een aanzet gegeven tot het uitwerken van een intelligente techniek voor het real-time sturen van wachtbekkens. Bedoeling is om een techniek uit te werken die op termijn moet toelaten om stuwen of hydraulische structuren aan te sturen op een automatische en meest efficiënte wijze. Die stuwen en structuren bepalen de vulling en de lediging van wachtbekkens. De huidige regeling gebeurt via waak- en alarmpeilen, vulvolgorden en -vulpeilen die vast zijn. Via een regeling die gebeurtenis-specifiek is en rekening houdt met toekomstig voorspelde afvoeren moet het mogelijk zijn om een meer efficiënte sturing te bekomen, en dus overstromingen op een meer efficiënte wijze te beheersen. Op dit ogenblik gebeurt de regeling ook reeds gebeurtenis-specifiek en wordt reeds rekening gehouden met real-time voorspelde afvoeren, maar op een subjectieve wijze die meer of minder efficiënt is in functie van de ervaring van de betrokken waterbeheerder. De huidige studie tracht een automatische regelprocedure en bijhorend algoritme uit te werken, gebruik makend van kennis die beschikbaar is in de regeltechniek (met toepassingen die zich momenteel vooral situeren in de elektronica en de scheikunde).

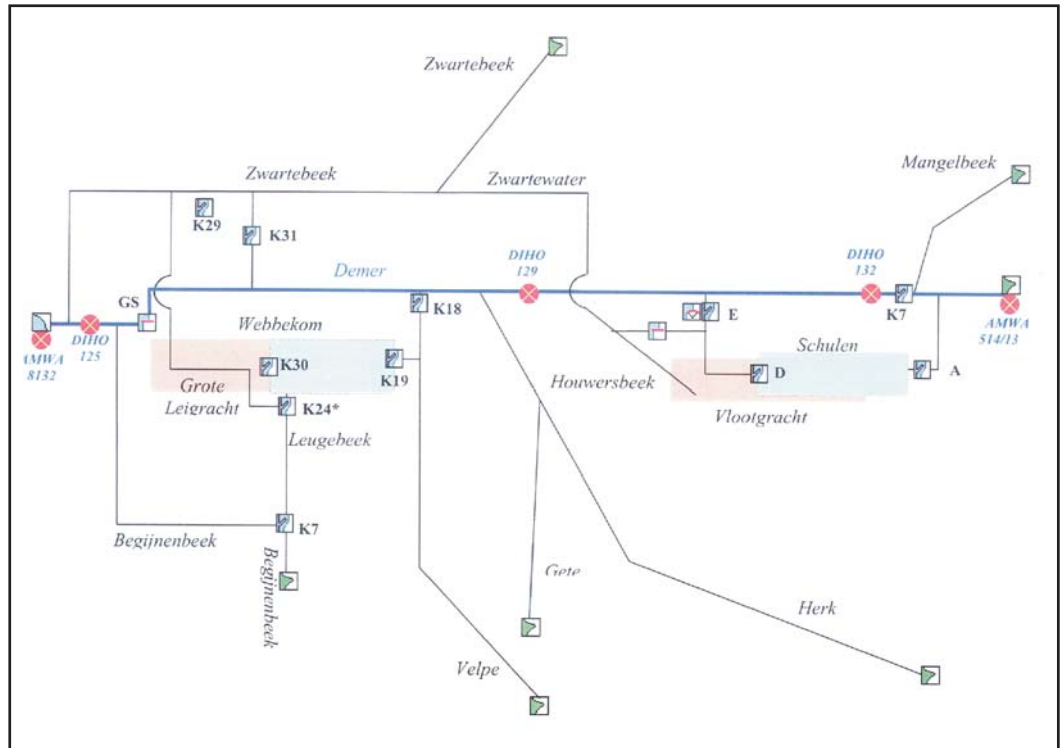
De studie wordt uitgevoerd door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven o.l.v. J. Berlamont en P. Willems, en de Afdeling SISTA van het Departement Elektrotechniek van de K.U.Leuven (ESAT-SISTA) o.l.v. B. De Moor. Ze is ingevuld door het doctoraatsonderzoek van T. Barjas-Blanco. Meer specifiek wordt de techniek van Model Predictive Control (MPC) vooropgesteld. Deze techniek wordt in de studie toegepast en geëvalueerd voor de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom langs de Demer. Er wordt gebruik gemaakt van de hydrologische en hydrodynamische modellering in het bestaande Operationeel BekkenModel (OBM) van de Demer, dat werd geïmplementeerd in de InfoWorks-RS en FloodWorks software van Wallingford Software Ltd.

De MPC-techniek wordt momenteel beloftevol aangewend in een breed domein aan toepassingen. Meest bekend zijn de toepassingen bij chemische reactoren. MPC is in vergelijking met andere gangbare technieken van regeltechniek een zeer geavanceerde methode die als voordelen heeft dat het kan rekening houden met beperkingen (vb. uiterste standen van de regelkleppen, maximaal toelaatbare beweging van de kleppen, grenzen waarbij overstroming optreedt, enz.), met toekomstig voorspelde waarden (vb. neerslagvoorspellingen), en met meervoudige regelobjectieven en prioriteiten. De auteurs hebben geen weet van een succesvolle toepassing van MPC voor overstromingsbeheersing langs rivieren. Een hydrologisch-hydraulisch waterlopen-netwerk heeft immers in vergelijking met andere toepassingen enkele specifieke moeilijkheden:

- het systeem (piekafvoeren, waterstanden, overstromingshoogten) reageert sterk niet-lineair op neerslag;
- de toestand van het systeem is sterk tijdsvariabel (sterk tijdsvariabele afvoer) waardoor het systeem werkingspunten heeft die niet vast zijn; ook verschillen de regelpeilen in de tijd naargelang overstromingsdreiging zich aandient of niet, en naargelang overstromingen zich reeds hebben voorgedaan of niet; ook dit verschilt van wat gangbaar is in de klassieke regeltechniek;
- het systeem vertoont sprongsgewijze overgangen tussen toestanden (vb. in werking treden van een overlaat; al dan niet vullen van het wachtbekken);
- regelstrategieën zijn gecombineerd (regeling op meerdere plaatsen, met wisselwerkingen).

In de eerste fase van het onderzoek werden deze problemen onderzocht en oplossingen uitgewerkt. Dit werd om redenen van eenvoud gedaan voor een beperkt gedeelte van het model voor de omgeving van het Schulensmeer. Om de rekentijd te beperken, werd complementair aan het gedetailleerd hydrodynamische model, zoals geïmplementeerd in InfoWorks, een vereenvoudigd conceptueel model opgebouwd en gebruikt als basis van de MPC-regeling.

Figuur 1. Schematische structuur van het waterlopiennetwerk, de wachtbekkens en de hydraulische regelstructuren in de omgeving van Schulensmeer en Webbekom (OBM-Demer, 2003).

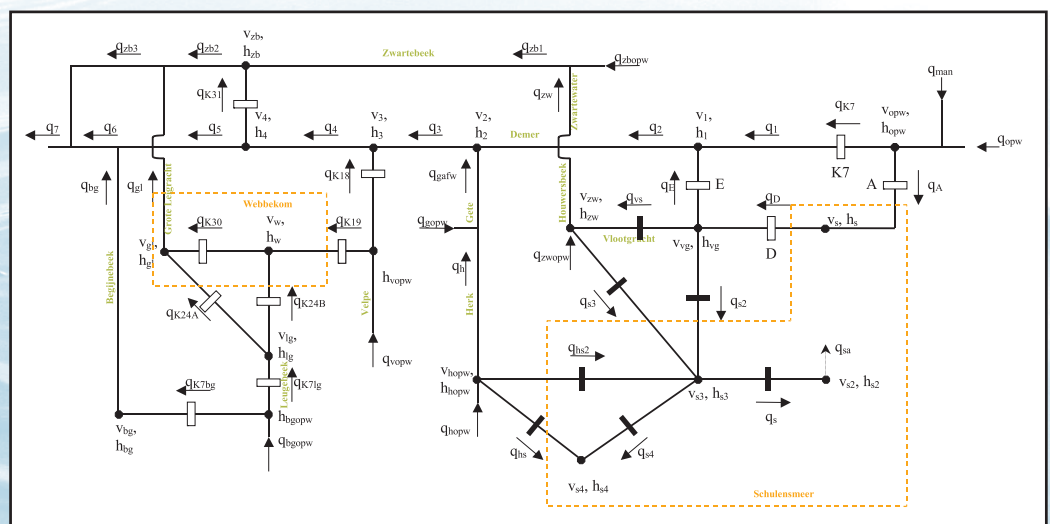


Studiegebied en hydrodynamische modelering

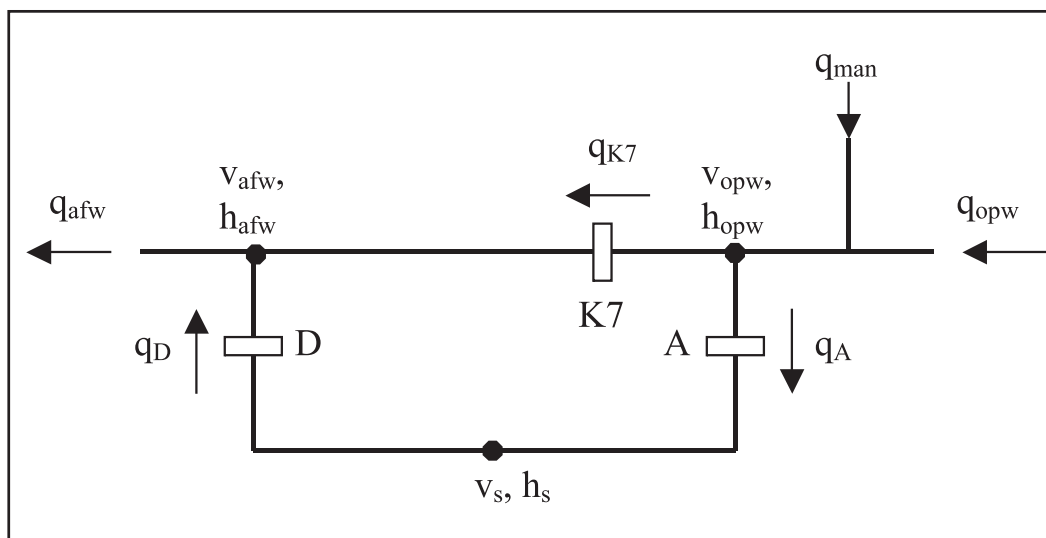
Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de InfoWorks-modelelementen van het OBM-Demer in het gebied van de gevalstudie rond de wachtbekkens van Schulensmeer en Webbekom opwaarts van Diest. Het gebied ontvangt opwaartse afvoer van de Demer, de Mangelbeek, de Herk, de Gete, de Velpe, de Zwarte Beek en de Begijnenbeek. Via de stuwten of regelstructuren A en K7 kan bij dreigende wateroverlast een deel van de opwaartse afvoer geborgen worden in het Schulensmeer. Na de hoogwaterafvoer kan dit reservoir (dat uit zowel een binnenbekken als

meerdere gedeelten van een buitenbekken bestaat) geledigd worden via de regelstructuren D en E. Het tweede wachtbekken rond Webbekom wordt gevuld en geledigd via regelstructuren K18, K19, K7 aan de Leugebeek, K24* en K30. Figuur 2 geeft voor dit gebied de structuur weer van het conceptueel model. De riviertakken worden in dit schema weergegeven door lijnstukken met de positieve stromingsrichting aangeduid via de pijlen, de regelstuwten door holle rechthoeken, de vaste overlaten door volle rechthoeken, en de modeldelen waarin de berging en de gemiddelde waterhoogte worden berekend door volle knopen. Voor de debietvariabelen is het symbool "q" gebruikt, "h" voor waterhoogten, "v"

Figuur 2. Conceptuele modelstructuur van het gebied Schulensmeer en Webbekom.



Figuur 3. Conceptuele modelstructuur van het deelmodel rond het binnenbekken van het Schulensmeer.



Figuur 4. Foto van de Demer aan de inlaat van het Schulensmeer.



voor volumes, en "k" voor de klepstand van de regelstuw. De waterhoogten en de volumes worden in de MPC-regelaar beschouwd als toestandsvariabelen, de klepstanden als ingangen en de opwaartse debieten als storingangen van de regelaar.

In dit artikel worden de resultaten voorgesteld voor het deelgebied rond het binnenbekken van het Schulensmeer. Dit deelgebied werd uit het grotere model "geknijpt" en vereenvoudigd zoals aangegeven in Figuur 3. Enkele van de model-elementen zijn aangeduid in de foto van Figuur 4.

De vereenvoudigde conceptuele modellen zijn van het reservoir-type. Hun modelvergelijkingen zijn geïdentificeerd en de parameters gecalibreerd op basis van simulatieresultaten met het gedetailleerd volledig hydrodynamisch OBM-InfoWorks model. Dit gebeurt onder meer via de calibratie van de volume-doorvoerrelaties volgens de methodologie beschreven in Vaes et al. (2002). Na opbouw van het vereenvoudigd model is een validatie doorgevoerd door vergelijking met zowel de resultaten van het OBM-InfoWorks model als met de werkelijke metingen voor een aantal historische wassen (Figuur 5).

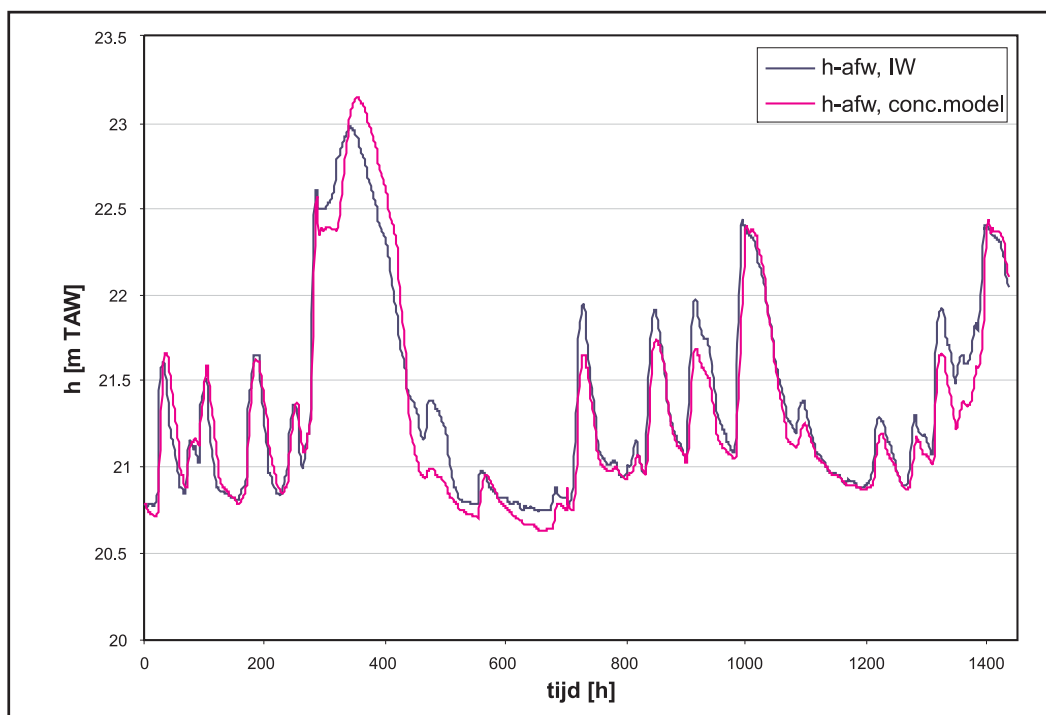
Zowel het OBM-InfoWorks model als het vereenvoudigd conceptueel model hebben een simulatietijdstep van 5 min. De uitvoerresultaten van het conceptueel model zijn geaggregeerd tot een tijdstep van 1h.

Implementatie MPC-techniek

De MPC-techniek laat toe om de klepstanden van de hydraulische regelstructuren (de ingangen van de regelaar) zodanig te bepalen dat de modelvoorspellingen zo dicht mogelijk liggen bij de gewenste referentiewaarden (de uitgangen van de regelaar). Hiervoor worden kost- en objectiefuncties gedefinieerd. Het algoritme zal de ingangen zodanig bepalen dat de uitgangen in de toekomst zo snel mogelijk naar de gewenste referentie gaan. Dit gebeurt op basis van kennis over de huidige toestand van het systeem en het gekende systeemmodel. Op iedere tijdstep wordt er een optimalisatieprobleem opgelost met de introductie van feedback in het systeem waardoor afwijkingen tengevolge van storingen en onzekerheden kunnen worden opgevangen.

Zoals in de inleiding gesteld werden op basis van de implementatie voor het beperkt model rond

Figuur 5. Vergelijking modelresultaten van het InfoWorks-model en het conceptueel model voor de waterhoogte in de Demer afwaarts van regelstuwen A en K7; simulatie historische wassen van september 1998 en januari 2002.



Schulensmeer oplossingen uitgewerkt voor een aantal technische problemen die zich blijken voor te doen bij toepassing van het klassieke MPC-algoritme op een hydrologisch-hydrodynamisch systeemmodel van een waterloppennetwerk. Het probleem van de niet-lineaire modelstructuur werd opgelost door de techniek van iteratieve meervoudige linearisatie. Het probleem van de spronggewijze toestandsveranderingen (via de if-then-else-modelstructuur bij bijvoorbeeld de stuwen) en een bijkomend probleem rond oncontroleerbare toestanden van het systeem werd opgelost door het gebruik van een 'fuzzy control' model. Gecombineerde regelstrategieën (verschillende variabelen en locaties, referentiepeilen versus minimale en waak/alarmpieilen, volgorde van prioriteiten, en eventuele andere wensen van de waterbeheerder) werden mogelijk gemaakt via de aangepaste keuze van de objectief- en kostfuncties. Ten slotte werd de MPC-regelaar in grote mate versneld door aanpassingen aan de optimalisatiealgoritmen.

Regelobjectieven en -prioriteiten: Met het oog op de MPC-regeling zijn na overleg met de Afdeling Water regelobjectieven vastgelegd. Onder normaal regime wordt het wachtbekken maximaal geleid, en tracht men het opwaartse waterpeil langs de Demer op een constant peil te regelen (21.5 m TAW). Als harde beperkingen zijn er de minimale en maximale klepstanden van de regelstuwen. In de huidige regeling maakt men gebruik van de waak- en alarmpieilen op- en afwaarts langs de Demer. Bij overschrijding van de waakpeilen wordt het wachtbekken gevuld, stapsgewijs tot een bepaald peil. Na het bereiken van dit vulpeil laat men de waterpeilen langs de Demer verder toenemen, tot de alarmpieilen, waarna het

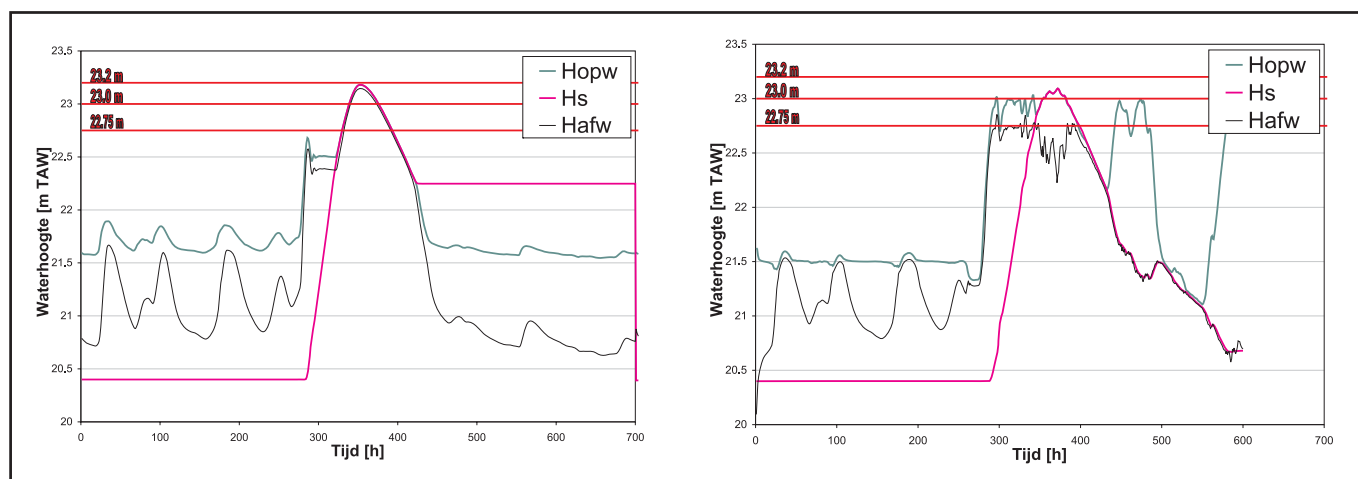
wachtbekken verder worden gevuld. In de MPC-regeling is voorlopig met dezelfde regelprioriteiten gewerkt.

Resultaten

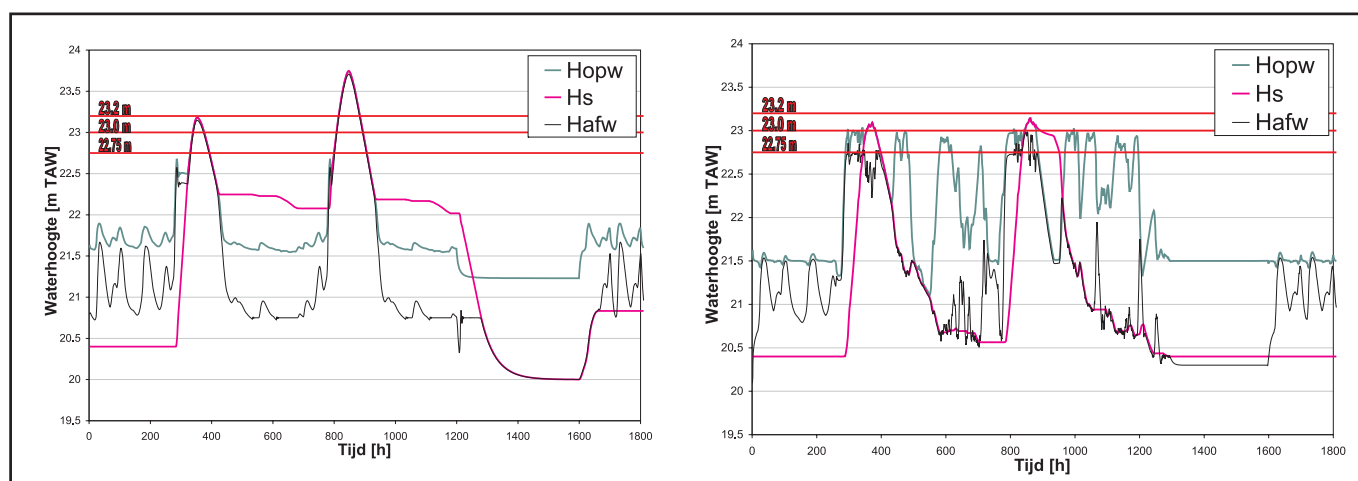
In de Figuren 6 en 7 worden de resultaten van de huidige regeling, zoals geïmplementeerd in het model, vergeleken met de MPC-regeling. Figuur 6 toont de resultaten voor de historische was van 1998. Uit de resultaten bij de eerste 250 uur blijkt dat de MPC-regeling de opwaartse peilen langs de Demer effectief naar 21.5 m regelt. Tijdens de was wordt het Demerpeil over de volledige periode beperkt tot 23 m opwaarts en 22.75 m afwaarts. De vulling van het Schulensmeer neemt hiervoor niet toe en wordt beperkt tot 23.10 m. Na de was wordt het Schulensmeer sneller geleid. De efficiëntieverhoging blijkt in dit geval gerealiseerd door bijkomende afvoer naar afwaarts en bijkomende berging opwaarts tijdens bepaalde deelperioden voor en na de wasperiode.

Om de invloed na te gaan van het in rekening brengen van toekomstige afvoeren, is bij Figuur 7 de historische was van 1998 tweemaal kort achter elkaar gesimuleerd. Ook voor de tweede was blijken de peilen beperkt tot 23 m. Dit wordt gerealiseerd door bijkomende afvoer en lediging van het Schulensmeer tussen de twee wassen, anticiperend op de hoge afvoer voorspeld voor de beschouwde zichttijd.

Figuur 6. Simulatie van de historische was van september 1998; (links) voor de huidige regeling zoals geïmplementeerd in het model, (rechts) de MPC-regeling.



Figuur 7. Simulatie van twee fictief en kort na elkaar voorkomende sept. 1998 wassen; (links) voor de huidige regeling zoals geïmplementeerd in het model, (rechts) de MPC-regeling.



Conclusies

Op basis van de resultaten van de simulaties voor de historische wassen van 1998 en 2002 is aangetoond dat de regelaar in staat blijkt om de gewenste objectieven te bekomen, en dat via MPC-regeling de efficiëntie van de regeling in belangrijke mate kan worden verhoogd. Dezelfde conclusies zijn bekomen bij het kort na elkaar simuleren van twee grote wassen. De MPC-regelaar blijkt verder voldoende flexibiliteit te bieden om gecombineerde regelstrategieën (verschillende variabelen en locaties, referentiepeilen versus minimale en waak/alarmpeilen, volgorde van prioriteiten, vulvolgorden, enz.) met succes te implementeren.

Tijdens de vervolgstudie zal de MPC-regeling verder uitgewerkt en getest worden voor het meer uitgebreide gebied, inclusief het buitenbekken van Schulensmeer, Webbekom en de interacties met de Herk, Gete, Houwersbeek, Zwart Water, Zwarte Beek, Velpe, Begijnenbeek, Leugebeek en Grote Leigracht. De MPC-regeling zal voor dit meer complexe systeem verder geanalyseerd worden;

voor de regelstrategieën, die door de Afdeling Water zijn vooropgesteld voor het volledige gebied Schulensmeer – Webbekom. Belangrijke aandacht zal uitgaan naar het halen van de regelobjectieven, het minimaliseren van de overstromingen en de rekentijd voor het berekenen van de optimale klepstanden.

Ook zal gewerkt worden aan het versnellen van de regelaar en het uittesten van een vrije regeling. Het versnellen van de regelaar is nodig om voor het uitgebreide model (met een zeer groot aantal toestandsvariabelen en te regelen stuwten) de rekestijden voldoende beperkt te houden (vb. kleiner dan 15min per regelstap), zodat operationele implementatie haalbaar wordt. Verder zal een vrije regeling worden uitgetest, in tegenstelling met de huidige MPC-regeling die gebruik maakt van een aantal vooraf gedefinieerde prioriteiten. Deze zijn voorlopig identiek genomen aan deze van de huidige regeling. Een volledig vrije regeling, zonder vooraf gedefinieerde prioriteiten, maar met optimalisatie van een globale objectief-functie (vb. op basis van het totale overstromingsvolume of -schade, gecombineerd op verschillende locaties) moet haalbaar zijn.

Referenties

Barjas-Blanco, T., Willems, P., (2006). "Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer", Tussentijds rapport door K.U.Leuven voor VMM – Afdeling Water, september 2006, 47 p.

OBM-Demer (2003). "Operationeel Bekken Model Demer", Technische Beschrijving v2.0, Wallingford Software – Soresma – IMDC, november 2003.

Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J. (2002). "Het gebruik van bakmodellen voor de voorspelling van de invoer in riviermodellen ter plaatse van riooloverstorten met het oog op een geïntegreerde modellering", Studie in opdracht van AMINAL - Afdeling Water, in samenwerking met IMDC, Eindrapport februari 2002.

T. Barjas-Blanco^{1,2}
Doctorandus K.U.Leuven

P. Willems¹,
Postdoctoraal onderzoeker FWO-Vlaanderen en
gastdocent K.U.Leuven

J. Berlamont¹
Gewoon hoogleraar K.U.Leuven

B. De Moor²
Gewoon hoogleraar K.U.Leuven

K. Cauwenberghs³, S. Rombauts³,
F. Raymaekers³
Ingenieurs Afdeling Water - Vlaamse Milieu-
maatschappij

¹Katholieke Universiteit Leuven, Afdeling
Hydraulica
Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee
(Leuven), tel. 016 32 16 58, fax 016 32 19 89,
E-mail: Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

²Katholieke Universiteit Leuven,
Afdeling ESAT-SISTA
Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Heverlee
(Leuven), tel. 016 32 17 09, fax 016 32 19 70,
E-mail: Toni.Barjas-Blanco@esat.kuleuven.be

³Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Water
Graaf de Ferraris-gebouw, Koning Albert-II laan
20, 1000 Brussel, tel. 02 553 21 29, fax 02 553
21 05,
E-mail: kris.cauwenberghs@lin.vlaanderen.be