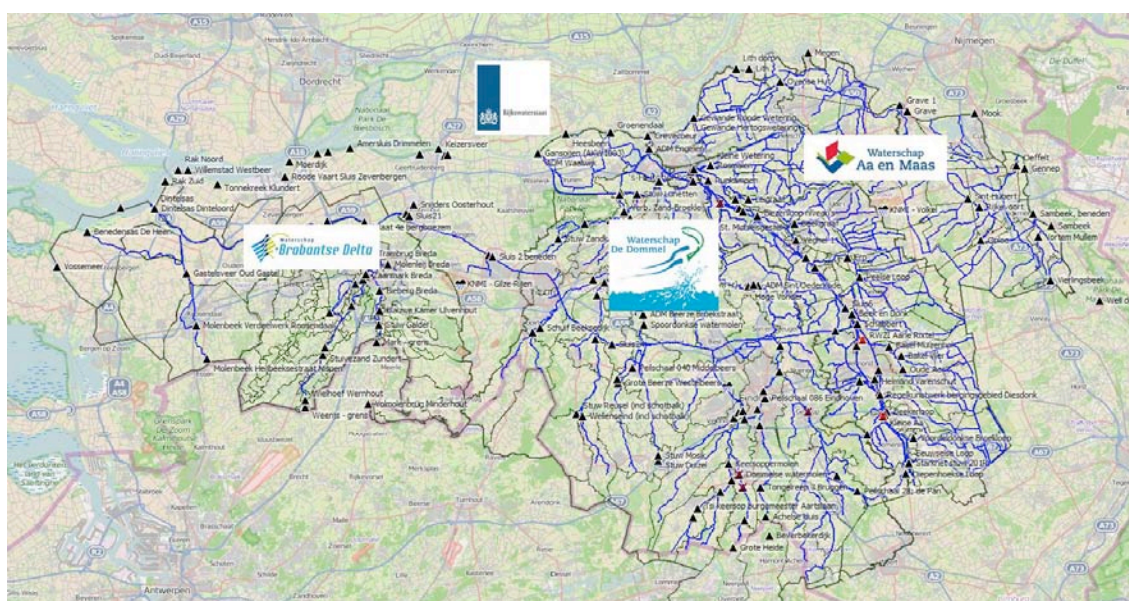


## Noord-Brabantse waterbeheerders anticiperen samen op hoogwater

*Klaas-Jan Douben (waterschap Brabantse Delta), Klaas-Jan van Heeringen (Deltares), Ruben Ijpelaar (waterschap Aa en Maas), Arnejan van Loenen (Deltares) en Mark van de Wouw (waterschap De Dommel)*

Waterbeheerders lopen met hun maatregelen zoveel mogelijk vooruit op verwacht hoogwater. Soms zijn de totale maatschappelijke kosten lager als daarbij over de grens van het beheergebied heen wordt gekeken. Dat maakt nauwe samenwerking tussen beheerders noodzakelijk. De Brabantse waterschappen en Rijkswaterstaat Zuid-Nederland hebben voor het gezamenlijke beheergebied een beslissing-ondersteunend systeem ontwikkeld dat plaats, omvang en moment van hoogwater gedetailleerd voorspelt en het effect van operationele maatregelen inzichtelijk maakt. Tevens wordt de inzet van sturingsmiddelen geoptimaliseerd. Innovatief modelgebruik (RTC) levert in enkele minuten gedetailleerde informatie.

De regionale watersystemen in Noord-Brabant vallen onder vier verschillende waterbeheerders: de waterschappen Aa en Maas, De Dommel en Brabantse Delta en Rijkswaterstaat Zuid-Nederland. De systemen bestaan vooral uit middelgrote kanalen (Zuid-Willemsvaart en Wilhelminakanaal), semi-natuurlijke beekdalen zoals de Aa, Dommel en Bovenmark en poldergebieden (afbeelding 1). Het gezamenlijke beheergebied wordt aan de oost-, noord- en westzijde begrensd door rijkswater (Maas, Hollands Diep en Volkerak-Zoommeer) en aan de zuidzijde door de circa 185 km lange grens met Vlaanderen. De Dommel, Bovenmark en Aa of Weerij zijn de belangrijkste grensoverschrijdende beken.



**Afbeelding 1. Regionaal watersysteem Noord-Brabant**

De waterbeheerders hebben een groot aantal sturingsmogelijkheden die tijdens een hoogwatersituatie kunnen worden benut. De effecten van het operationele hoogwaterbeheer reiken echter vaak verder dan de beheergrenzen van de individuele waterbeheerders.

Een integrale benadering van operationele beheermaatregelen tijdens hoogwatersituaties is noodzakelijk om de ruimte en de veerkracht van het watersysteem optimaal te benutten. Daarbij spelen niet alleen technisch-inhoudelijke aspecten een rol, maar ook beheergrens-overschrijdende samenwerking en afstemming.

Onder de naam 'Dynamisch waterbeheer' heeft Rijkswaterstaat samen met de Brabantse waterschappen een pilot opgezet, met als doel de wateroverlast door hoogwater te verminderen. Met elkaar zoeken ze de beste manier om de waterbergings- en afvoercapaciteit van het integrale watersysteem optimaal te benutten [1], treden ze gezamenlijk op tijdens calamiteiten, en geven ze vanuit de waterkolom (indien noodzakelijk) één advies richting de veiligheidsregio. 'Dynamisch waterbeheer' is inmiddels omgedoopt tot 'Slim watermanagement' en richt zich voornamelijk op nieuwe technieken en organisatiemethoden. Naast praktische, bestuurlijke en juridische (governance)zaken, is in het kader van de pilot ook een beslissingondersteunend systeem ontwikkeld 'BOS Brabant'. De kern van het BOS is de Delft-FEWS-applicatie van Deltares [2].

### **Ontwikkeling van BOS Brabant**

De timing van de hoogwatergolf op de Maas nabij Den Bosch belemmerde in januari 1995 de waterafvoer van de Dommel en de Aa. Dat had ingrijpende directe en indirecte effecten en schade tot gevolg, zoals de overstroming van de A2 bij Vught. Tijdens dit hoogwater werd eens te meer duidelijk dat een goede afstemming van de waterverdeling en inzet van waterbergingsgebieden in de beheergebieden van de waterschappen De Dommel en Aa en Maas cruciaal is voor het voorkomen van wateroverlast en overstromingen. Een nauwkeurige voorspelling van het verloop van de hoogwatergolven in de regionale watersystemen was toentertijd niet beschikbaar.

Als gevolg van het hoogwater in 1995 is een groot aantal ontwikkelingen in gang gezet. Eén daarvan was de ontwikkeling van het beslissingondersteunend systeem (BOS) Dommel en Aa [3]. Een belangrijke doelstelling van dit BOS (BOS 1.0) was het optimaliseren van de inzet van waterbergingsgebieden om overstromingen en wateroverlast bij en in Den Bosch zoveel mogelijk te beperken. De effectiviteit van de waterbergingsgebieden is sterk afhankelijk van de hoogwatergolf op de Maas, waarbij timing van de inzet vanzelfsprekend een belangrijk afwegingscriterium is.

Het BOS 1.0 is in 2008 opgeleverd en geïmplementeerd bij de waterschappen De Dommel en Aa en Maas. Het systeem heeft tijdens verschillende kleinere hoogwatergebeurtenissen zijn waarde bewezen. Na het hoogwater van januari 2011 is op basis van gebruikerservaringen een verdergaand ontwikkelspoor opgesteld. Uitbreiding van het modelgebied en van de functionaliteiten behoorde tot de belangrijkste wensen. Omdat de doorontwikkeling onderdeel werd van het project Dynamisch Waterbeheer sloten Rijkswaterstaat en waterschap Brabantse

Delta aan, zodat een integraal systeem voor het gehele regionale watersysteem van de provincie werd ontwikkeld, BOS Brabant.

Het BOS 1.0 was de basis voor de ontwikkeling van BOS Brabant. Hierdoor is ook automatisch gekozen voor Delft-FEWS, een open platform voor het beheer van data en het aansturen van modellen. Delft-FEWS doet grofweg het volgende:

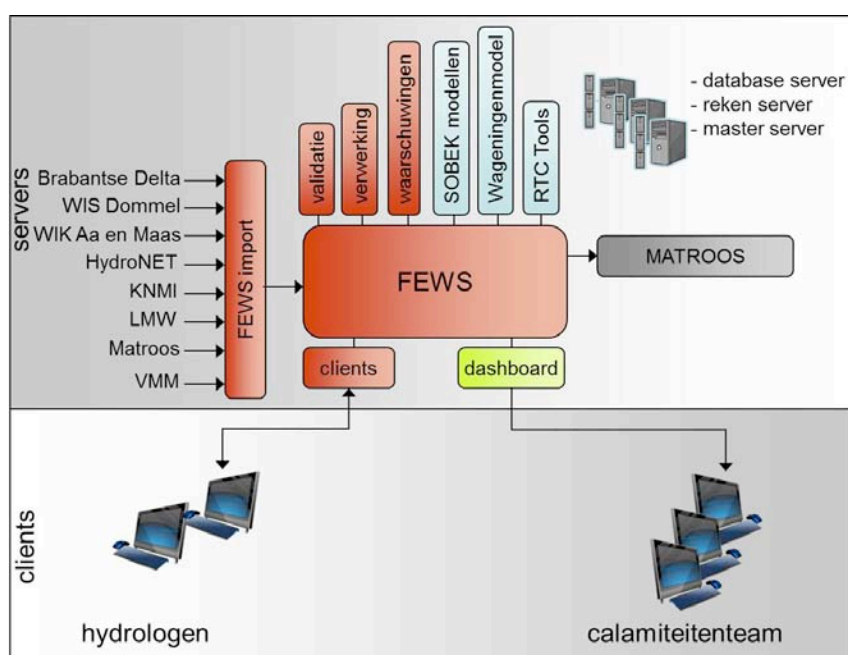
- importeren en valideren van gegevens (metingen en verwachtingen Rijkswaterstaat en KNMI);
- aansturen van neerslag-afvoer en oppervlaktewatermodellen;
- samenstellen van neerslag, maatregel- en beheerscenario's (handmatig opgesteld door de gebruiker);
- presenteren en exporteren van verwachtingen (modelresultaten) en metingen.

De neerslag-afvoer- en oppervlaktewatermodellen in BOS Brabant rekenen dusdanig snel, dat een 'voorspelcyclus' (pre-processing, berekeningen, post-processing, analyse en rapportage) maximaal 1 uur bedraagt. De modelschematisaties zijn opgesteld, gekalibreerd en gevalideerd door de waterschappen in samenwerking met Witteveen+Bos [4, 5]. Deltares heeft het FEWS volledig ingericht, opgebouwd en geïmplementeerd.

### Technische elementen van BOS Brabant

De kern van het BOS Brabant bestaat uit de Delft-FEWS applicatie (afbeelding 2), waarbinnen verschillende neerslag-afvoer-, Real-time Control (RTC)- en oppervlaktewatermodellen worden aangestuurd.

FEWS ontvangt een keur aan meetgegevens en verwachtingen op verschillende tijdschalen. De aanleverfrequentie van meetgegevens uit de monitoringsnetwerken van de waterschappen

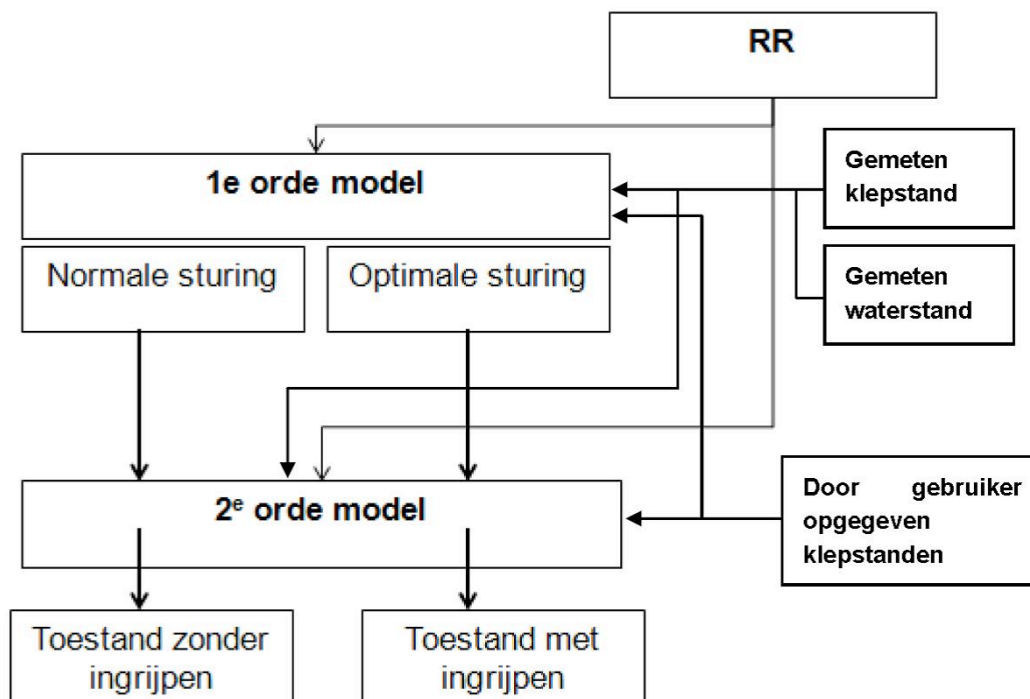


Afbeelding 2. Elementen van BOS Brabant

varieert tussen uur- en dagwaarden. De meteorologische verwachtingen van het KNMI bestaan uit neerslag (HIRLAM en EPS)-, verdampings- en winddata, die elke 6 uur worden aangeleverd. De actuele neerslag wordt afgeleid uit HydroNET radarbeelden. De hydraulische verwachtingsinformatie die op uurbasis aan de modelranden wordt opgelegd bestaat uit waterhoogten en afvoeren van zowel Rijkswaterstaat als de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM).

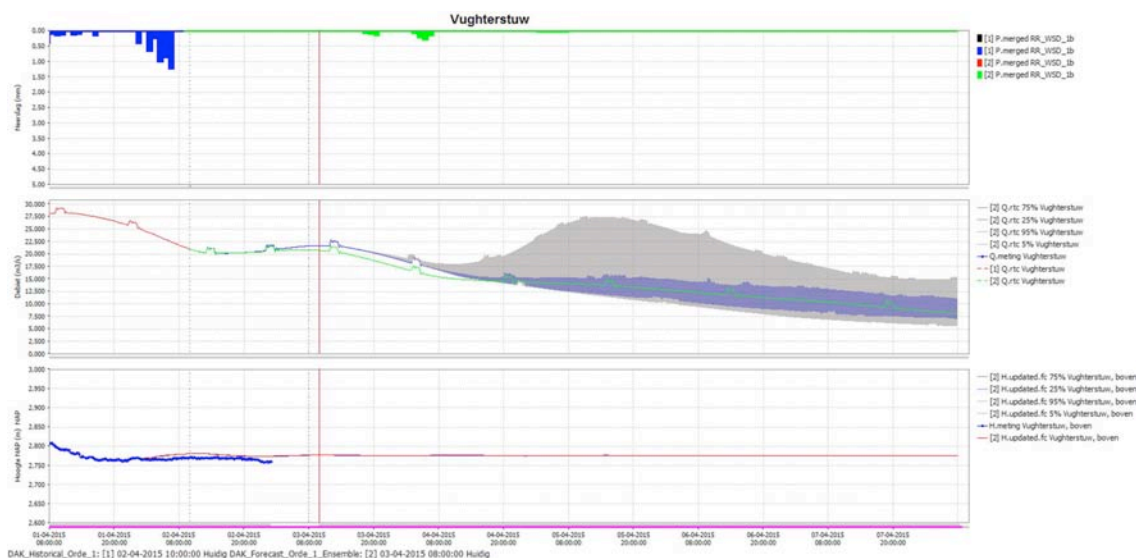
De neerslag-afvoermodellen sturen zowel de RTC (1<sup>e</sup> orde) als SOBEK (2<sup>e</sup> orde)-modellen aan (afbeelding 3). De 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> orde-modellen zijn voor vier (internationale) deelstroomgebieden opgezet:

- Dommel, Aa en de Brabantse kanalen (DAK)
- Mark en Vliet
- Herogswetering
- Hoge Raam



**Afbeelding 3. De koppeling van modellen in FEWS en sturing 1<sup>e</sup> orde model [4]**

De 1<sup>e</sup> orde-modellen met normale (vooraf ingestelde) sturing draaien continu en berekenen binnen enkele minuten 5-daagse verwachtingen voor waterhoogten, afvoeren en klepstanden op circa 115 locaties. Met de 1<sup>e</sup> orde-modellen wordt ook iedere 6 uur het ECMWF-ensemble (50 verwachtingen) doorgerekend, wat inzicht geeft in de onzekerheden van de berekende waterhoogten en afvoeren als gevolg van de onzekere weersverwachting (afbeelding 4). De resultaten van het ECMWF-ensemble kunnen overigens ook individueel worden geanalyseerd.



**Afbeelding 4. De vijfdaagse verwachting voor het debiet bij de Vugterstuw met 5, 25, 75 en 95% betrouwbaarheidsmarges**

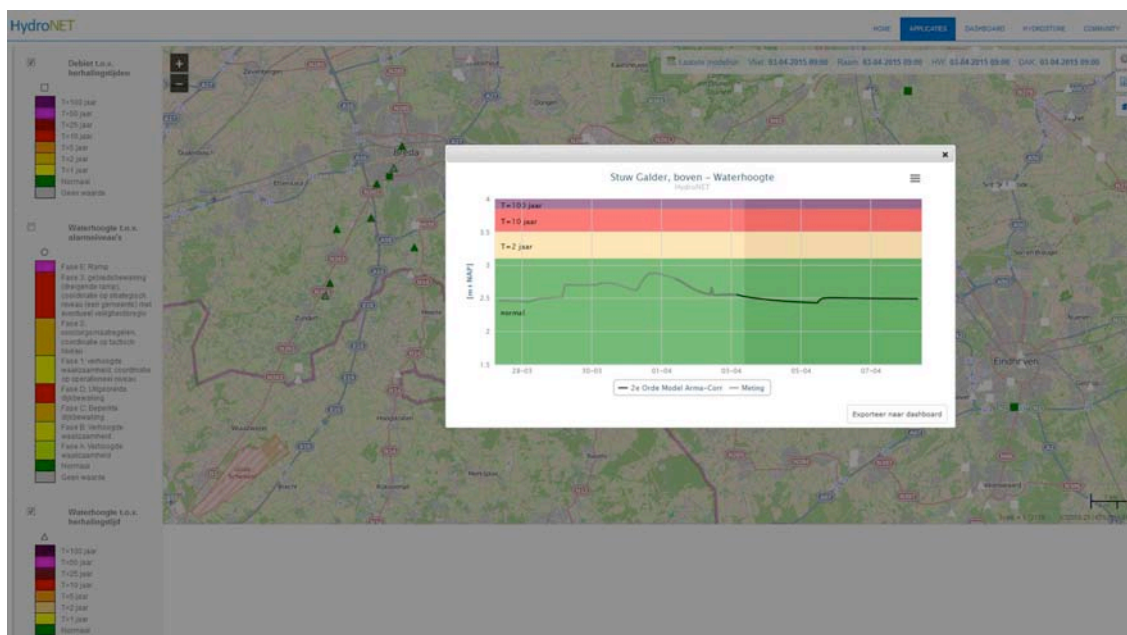
Daarnaast bevat het BOS RTC-modellen die de aansturing van kunstwerken optimaliseren voor de inzet van waterbergingen. De sturing van kunstwerken in deze 1<sup>e</sup> ordemodellen is gebaseerd op Model Predictive Control (MPC) met een doelfunctie [6]. Waterhoogten en afvoeren kunnen worden beïnvloed door aan de verschillende termen in de doelfunctie (relatieve) penalty's mee te geven voor de sturing van een kunstwerk.

Het FEWS bevat SOBEK-modelschematisaties met 1D2D overland flow grids die meer gedetailleerde informatie geven over verwachte waterhoogten, afvoeren en overstromingen. Deze modellen worden iedere 6 uur opgestart en hebben een rekestijd die varieert van 15 minuten tot één uur.

De uitkomsten van modelberekeningen kunnen in Delft-FEWS gedetailleerd worden geanalyseerd met verschillende presentatiemogelijkheden, variërend van grafieken tot animaties voor waterbalansen en overstromingen.

De uitvoer van Delft-FEWS is daarnaast ook gekoppeld aan een HydroNet-applicatie [7]. Zo kunnen binnen de 'verkeerstoren' bij Brabantse Delta en de 'waterkenniscentra' bij De Dommel en Aa en Maas zogenoemde interactieve stoplichtenkaarten worden geraadpleegd (afbeelding 5).





**Afbeelding 5. Interactieve stoplichtenkaart (HydroNet-applicatie) met gemeten en verwachte waterhoogten**

### Bestuurlijke afspraken: speelveld voor het BOS

Het innovatieve karakter van het BOS Brabant wordt niet alleen door de techniek (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> orde modellen, RTC optimalisatie, ensemble, scenario's, etc.) bepaald, maar zeker ook door het speelveld en kader waarbinnen het instrument gebruikt gaat worden.

Normaal gesproken zijn de verschillende (deel)watersystemen volledig onafhankelijk van elkaar, maar bij hoogwater kunnen verbindingen worden gemaakt via het kanalsysteem in Noord-Brabant. Een van de belangrijkste voordelen van de samenwerking tussen de waterschappen en Rijkswaterstaat is juist dat het operationele watersysteembeheer tijdens hoogwater kan worden geoptimaliseerd door de inzet van de kanalen als afvoermiddel en de inzet van waterbergingsgebieden integraal af te wegen. Waterhoogten en afvoeren kunnen worden beheerd en gestuurd met een groot aantal kunstwerken zoals pompen, kleppen, stuwen en sluizen. Overtollig water kan tijdens hoogwater via het kanalsysteem van Rijkswaterstaat van het ene naar het andere watersysteem worden verplaatst waardoor schade wordt vermeden of gereduceerd.

Om het bovenstaande te concretiseren is in het kader van het project Dynamisch Waterbeheer een zogenoemde 'Samenwerkingskaart Brabantse Kanalen' opgesteld, bestaande uit een kaart en tabel met besliscriteria. De Samenwerkingskaart geeft weer welke operationele beheermaatregelen in welke situaties getroffen kunnen worden om de effecten van wateroverlast optimaal te reduceren. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen extra afvoer van water over de Brabantse kanalen en/of de inzet van waterbergingsgebieden. De samenwerkingskaart geeft een principe-volgorde van maatregelen die is gebaseerd op maatschappelijke kosteneffectiviteit. Het BOS wordt gebruikt om maatwerk te leveren, waarbij

wordt geanticipeerd op de volgorde van maatregelen en hoe en wanneer precies ze worden ingezet.

De verwachtingen die worden opgesteld door het BOS Brabant geven inzicht in het gedrag van het integrale watersysteem en maken hiermee expliciet de belangen van de waterschappen en Rijkswaterstaat inzichtelijk. Met het BOS en de Samenwerkingskaart kunnen de Brabantse waterbeheerders snel en reproduceerbaar in onderling overleg hun afwegingen concretiseren, zodat (bestuurlijke) beslissingen over de inzet van operationele beheermaatregelen binnen een kort tijdsbestek kunnen worden geaccordeerd. Door deze samenwerking weet Rijkswaterstaat bijvoorbeeld ruim van tevoren dat er een beroep kan worden gedaan op de afvoercapaciteit van de kanalen, zodat tijdig voorzorgsmaatregelen kunnen worden genomen als het stilleggen van de scheepvaart. Als dit niet mogelijk is zijn de waterschappen tijdig op de hoogte en kunnen scenario's worden doorgerekend voor het optimaliseren van de inzet van waterbergingsgebieden.

Het BOS Brabant kan ook maatregelscenario's opstellen en doorrekenen, zoals:

- aanpassen van de neerslagverwachting;
- aanpassen van de verwachte buitenwaterhoogten;
- effect van kadebreuken;
- inzetten van dammen.

### **Toekomstige ontwikkelingen**

Het BOS Brabant zal zich in de huidige vorm eerst moeten bewijzen, zowel technisch als voor de beoogde samenwerking tussen de Brabantse waterbeheerders onderling. Omdat hoogwater waarbij het gebruik van het BOS noodzakelijk is niet frequent voorkomt, wordt ook aandacht besteed aan jaarlijks terugkerende trainingen en oefeningen. Die zijn belangrijk om kennis op peil te brengen, gebruikservaringen uit te wisselen en oplossingsrichtingen voor specifieke en kritieke situaties door te rekenen en te oefenen.

Hoewel het BOS Brabant nog niet operationeel is ingezet, wordt nu al nagedacht over toekomstige ontwikkelingen.

De afweging tussen het gebruik van de afvoercapaciteit van de kanalen en de inzet van waterbergingsgebieden kan verder worden onderbouwd met bijvoorbeeld schadefuncties. Verwachte schades van overstromingen in beekdalen en waterbergingsgebieden kunnen worden afgezet tegen schades die worden geleden (of juist vermeden) bij een scheepvaartverbod op de kanalen. De resultaten van de 1<sup>e</sup> orde optimalisatie- en/of scenarioberekeningen kunnen worden omgezet naar schades, waardoor in een zeer kort tijdsbestek (ca. 10 minuten) afwegingen kunnen worden gemaakt over de inzet van kanalen en/of waterbergingsgebieden. Bijvoorbeeld: "Er is door de inzet van waterbergingsgebieden schade geleden maar er is een drie keer zo hoge schade voorkómen doordat er geen scheepvaartverbod is afgekondigd".

Veel waterbeheerders in binnen- en buitenland passen nu al real-time technieken toe voor de volledige en integrale aansturing van kunstwerken in het watersysteem tijdens hoogwater. In Noord-Brabant is dat slechts ten dele het geval, omdat een aantal relevante kunstwerken nog handmatig wordt bediend. Mogelijk kunnen in de toekomst kunstwerken in de modellen in het BOS door Delft-FEWS worden aangepast op basis van real-time (handmatige) aanpassingen in het veld. Dit zou mogelijk worden als buitendienstmedewerkers via bijvoorbeeld een app aanpassingen door kunnen geven die (na een automatische validatie) in de modellen worden geïmplementeerd.

Daarnaast kan de toepassing van Model Predictive Control (MPC) worden geïntensiveerd en geoptimaliseerd.

BOS Brabant past momenteel een ARMA (Auto-Regressive Moving Average)-methode toe om de verschillen tussen metingen en modellen te nivelleren. Hierin wordt het modelresultaat (verwachting) dusdanig verschoven dat het aansluit op de laatst bekende meting. Deze ARMA-procedure kan worden vervangen door betere data-assimilatie technieken. Toepassing van een Kalmanfilter is een van de methoden om de resultaten van een modelsimulatie aan te passen. Van groot belang is daarbij dat de metingen onderling consistent zijn (zowel in waterbalans als afvoer-waterstandrelaties). De verwachte afvoer (uit het neerslag-afvoermodel) kan worden aangepast op basis van (real-time) beschikbare afvoermetingen.

### **Conclusie**

Het beslissingondersteunend systeem (BOS) dat door de Brabantse waterschappen en Rijkswaterstaat Zuid-Nederland is ontwikkeld, geeft op verschillende manieren inzicht in de effecten van beheermaatregelen tijdens hoogwater. Omdat de effecten van maatregelen beheergebied-overschrijdend kunnen zijn is de 'Samenwerkingskaart Brabantse Kanalen' opgesteld, die een principe-volgorde van maatregelen geeft, gebaseerd op maatschappelijke kosteneffectiviteit, om de effecten van wateroverlast optimaal te reduceren. Met het BOS en de Samenwerkingskaart kunnen de Brabantse waterbeheerders snel en reproduceerbaar in onderling overleg hun afwegingen concretiseren, zodat (bestuurlijke) beslissingen over de inzet van operationele beheermaatregelen binnen een kort tijdsbestek kunnen worden geaccordeerd. Door deze samenwerking kunnen waterbeheerders anticiperen op te nemen maatregelen, en kunnen burgers en autoriteiten (bijvoorbeeld de Veiligheidsregio) tijdig worden gewaarschuwd.

### **Dankwoord**

*Speciale dank gaat uit naar Carla Sengers van Rijkswaterstaat Zuid-Nederland voor haar bijdrage gedurende het ontwikkelproces van het BOS Brabant. De auteurs danken verder de vele medewerkers van de waterschappen Aa en Maas, De Dommel, Brabantse Delta en Rijkswaterstaat voor hun inzet bij de ontwikkeling van BOS Brabant. Ten slotte zijn wij dank verschuldigd aan de medewerkers van Witteveen+Bos voor hun inzet bij de ontwikkeling en tussentijdse aanpassingen van de modelschematisaties, en aan Hydrologic voor het opstellen van een HydroNet-dashboard.*



**Referenties**

1. Rijkswaterstaat (2015). Een optimale waterverdeling met Slim Watermanagement. [http://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie/innovatie\\_voor\\_waterveiligheid/lopende\\_projecten/slim\\_watermanagement/](http://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie/innovatie_voor_waterveiligheid/lopende_projecten/slim_watermanagement/) (geraadpleegd 3 april 2015).
2. Heeringen, K. van (2015). BOS Brabant, gebruikershandleiding. Deltares. Rapport 1208557-000-ZWS-0016.
3. Flood Control 2015 (2012). Optimale sturing van bergingsgebieden tijdens dreigend hoogwater; Onderzoekstoepassing voor beheergebied waterschappen De Dommel en Aa en Maas. Delft. Stichting Flood Control.
4. Mondeel, H.J. (2014). Beslissing Ondersteunend Systeem Hoogwaterverwachting Noord-Brabant – Modellerings. Witteveen+Bos. Rapport BTL207-1/14-014.468.
5. Mondeel, H.J. (2015). Kalibratie neerslag-afvoermodel Sacramento Witteveen+Bos. Rapport BR698-1/15-000.486.
6. Flood Control 2015 (2012). Pilot RTC Dommel and Aa. Delft. Stichting Flood Control.
7. Hydrologic (2015). Gebruikershandleiding FEWS-BOS Applicatie.