

Onzekerheidsanalyse van overstromingen met behulp van hydrologische ensemble voorspellingen

De voornaamste bron van onzekerheden in de voorspellingen van rivierafvoeren op middenlange tot lange termijn ligt hoofdzakelijk in de onzekerheid van de meteorologische voorspellingen. Sinds ongeveer één decennium leveren de grote operationele voorspellingscentra die wereldwijde modellen runnen zogenaamde ensemble voorspellingen. Hun model draait niet alleen één keer vertrekkende vanuit de beste beginvoorwaarden die gehaald worden uit de talrijke waarnemingsbronnen maar tevens een aantal keer vertrekkende vanuit verschillende beginvoorwaarden en fysische parametrisaties zodat de onzekerheden van de waarnemingen en van de modellering ingebouwd worden.

Recentelijk werd aangetoond dat de informatie bevat in de ensemble voorspelling nuttig kan gebruikt worden in de voorspelling van overstromingsrisico's. Het KMI heeft een dergelijk hydrologisch ensemble voorspellingsmodel ontwikkeld dat experimenteel draait voor twee testbekkens, namelijk de Demer te Diest en de Ourthe te Tabreux. Sinds één jaar wordt de waarschijnlijkheid dat de afvoer een gegeven drempel overschrijft geschat door middel van een automatische procedure die gebaseerd is op het gebruik van de waargenomen gegevens en van het "Ensemble Prediction System (EPS)" van het ECMWF te Reading in een waterbalans hydrologisch model. De resultaten ervan werden toegankelijk gemaakt voor de Regionale Waterbeheerders. De gebruikte methode wordt vervolgens geschetst en verificatie scores voor de waarschijnlijkheidsvoorspelling worden ingevoerd. In het licht van de resultaten van de validatie zal een leidraad naar een vroegtijdig waarschuwingssysteem uitgetekend worden.

Overstromingen zijn van alle tijden. Het is dan ook vanzelfsprekend dat de waterbeheerders zich zo goed mogelijk proberen in te dekken tegen overstromingsrisico's die bij de bevolking – en vooral diegenen onder hen die meermaals getroffen werden – veel materiele schade maar ook leed aanrichten.

De meest voorkomende vormen van overstroming in Vlaanderen zijn ofwel het gevolg van hevige lokale zomerregens en treden meestal vrij snel op na de bui of zijn te wijten aan het overtrekken van aanhoudende winterregens over grote gedeelten van het land. De gebruikte numerieke weersvoorspellingmodellen zijn verschillend: in het eerste geval worden modellen met hoge resolutie en een beperkte horizon gebruikt terwijl in het tweede geval globale atmosferische circulatiemodellen met grotere maas en langere voorspellingshorizon gehanteerd worden. De in het artikel voorgestelde methodologie situeert zich voornamelijk in het laatste domein en richt zich, in het bijzonder, tot de winterperiode.

De Afdeling Water van de VMM en het Waterbouwkundig Laboratorium van het Departement Mobiliteit en Openbare Werken van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap houden zich intensief bezig met het opmaken van verwachtingen van waterpeilen en debieten zowel voor onbevaarbare als voor bevaarbare waterlopen (Overstromingen in Vlaanderen, 2003; Van Eerdenbrugh, 2003). De Afdeling Water concentreert zich sinds jaren op het probleem van de oorzaken en oplossingen van overstromingen. Deze aanpak culmineerde onlangs in de overstromingsvoorspeller die op volgende web-pagina kan geconsulteerd worden: <http://www.overstromingsvoorspeller.be/>.

Deze wetenschappelijke bijdrage over hydrologische ensemble voorspellingen kadert volledig in de lijn van onderzoek en beheer en illustreert hoe automatische voorspellingen met een voorspellingshorizon van 9 tot 10 dagen aangeemaakt worden die bruikbaar kunnen zijn voor de hydrologische operator en tevens een tastbare economische waarde hebben.

De toekomst is en blijft onzeker. Het vertrouwen dat men al dan niet heeft in de meteorologische voorspellingen en specifiek in de neerslagvoorspellingen is een gespreksonderwerp van iedere dag. Het gebruik van neerslagvoorspellingen in de operationele hydrologie is slechts van een recente datum. Voor praktische redenen wordt nog meestal een uniek scenario voor de neerslag voor de eerstvolgende uren ja zelfs voor de volgende dagen verkozen zodat de *a posteriori* waargenomen fouten in de debieten toegeschreven worden aan de meteorologische voorspellingen. Nochtans zijn de beperkingen van de atmosferische voorspellingen bij de modelleerders sinds geruime tijd bekend. Sinds één decennium hebben de voornaamste centra voor weersvoorspellingen zoals het Europees Centrum voor Middenlange Weersvoorspellingen (ECMWF) te Reading (Verenigd Koninkrijk) ensemble voorspellingssystemen (EPS) ontwikkeld. Het gaat er niet om slechts één voorspelling voor de volgende tien dagen te maken maar een ensemble van bijkomende voorspellingen waarvoor de beginvoorwaarden van het numerieke weersvoorspellingmodel (NWP) verstoord werden ten einde de onzekerheden betreffende de kennis van de staat van de atmosfeer op het beginogenblik van de voorspelling in rekening te brengen. De onzekerheden gebonden aan

het numerieke weersvoorspellingmodel worden zo in rekening gebracht. De ruimtelijke resolutie van het numerieke model dat gebruikt wordt voor de ensemble voorspellingen is groter dan in de zogenaamde deterministische systemen. Het komt erop aan de beschikbare rekencapaciteit toe te kennen aan een ensemble van supplementaire simulaties. Dit is voor het ECMWF een ensemble van vijftig leden benevens de controle simulatie. De winst voor dit systeem is informatie over de onzekerheden die met de voorspellingen geassocieerd worden. Het ensemble voorspellings-systeem dat in onderliggend artikel beschreven wordt vormt een aanpak die gebruik maakt van deze complementaire informatie betreffende de neerslag voor de volgende dagen en die kan bijdragen tot het op punt stellen van vroegtijdige waarschuwingssystemen.

Hydrologische ensemble voorspellingen

De hydrologische ensemble voorspellingen bestaan niet alleen uit 50 scenario's voor de neerslag maar tevens voor de temperatuur en voor andere meteorologische veranderlijken die belangrijk zijn voor de waterbalans. Binnen de beperkingen van de meteorologische modellering is ieder van die scenario's coherent zowel in de ruimte als in de tijd. Het hier voorgestelde systeem bestaat erin ieder van deze scenario's afzonderlijk in een hydrologisch model te gebruiken ten einde de evolutie van het debiet van de rivier te schatten. Vijftig hydrogrammen voor de volgende dagen worden aangemaakt die in principe allen dezelfde waarschijnlijkheid hebben om zich voor te doen. Dit laat toe om voor een gegeven toekomstig ogenblik aan de voorspelling van een debiet een betrouwbaarheidsinterval te hechten. In het algemeen worden deze voorspellingen vergeleken met drempels van pre-waarschuwing of van waarschuwing ten einde de gepaste maatregelen te beslissen. Daarvoor wordt in de eenvoudigste configuratie het aantal hydrogrammen dat de drempelwaarde overschrijdt geteld.

Het model dat gebruikt wordt is het SCHEME model (dit staat voor **SCHE**lde en **Maas**). Dit model is een gedistribueerde versie van het conceptuele IRMB model (Bultot en Dupriez, 1976). Het stroombekken wordt verdeeld in een rooster met een maaslengte van 7 km. Binnen in elke maas wordt het conceptueel IRMB model gebruikt om verschillende delen van de hydrologische cyclus voor te stellen: accumulatie en smelten van het sneeuwdek, interceptie van de neerslag door de vegetatie en verdamping, bevochtiging van de bodem en zijn uitdroging door evapotranspiratie, doorsijpeling of percolatie naar de ondergrondse reserves, oppervlakte-afvoer met behulp van een eenheidshydrogram. Daarenboven worden, binnen iedere cel 9 verschillende bedekkingen voorgesteld door de fractie van de oppervlakte die ze innemen en worden de conceptuele reservoirs die de vegetatie simuleren en de twee bodemlagen afzonderlijk bepaald voor deze bedekkingen. De transfer van het berekende debiet voor de

verschillende roostercellen van het stroombekken naar een stroomafwaartse uitlaat wordt berekend met behulp van een ééndimensionaal model gebaseerd op het histogram van het aantal waterlopen met toenemende afstand van de uitlaat. Het aantal parameters werd beperkt ten opzichte van het oorspronkelijke IRMB model. De parameterwaarden werden geoptimaliseerd aan de hand van de waargenomen debietreeksen en de meteorologische veranderlijken over de deelbekkens die de verschillende hydrologische condities voorstellen. Zij worden vervolgens geregionaliseerd met behulp van empirische niet-lineaire relaties bekomen door neuronale netwerken tussen deze waarden en de fysiografische kenmerken.

Het hydrologisch model wordt eerst gebruikt om de beginvoorwaarden te berekenen die de waarden van de verschillende veranderlijken uitmaken: de waterinhoud van alle conceptuele reservoirs en de afvoeren, die de uitlaat nog niet bereikt hebben. Door vervolgens van deze beginvoorwaarden te vertrekken wordt de hydrologische simulatie voortgezet door de neerslag te gebruiken die voor de volgende dagen voorspeld wordt. Deze simulaties in voorspellingsmode worden herhaald voor de vijftig leden van de EPS voorspellingen.

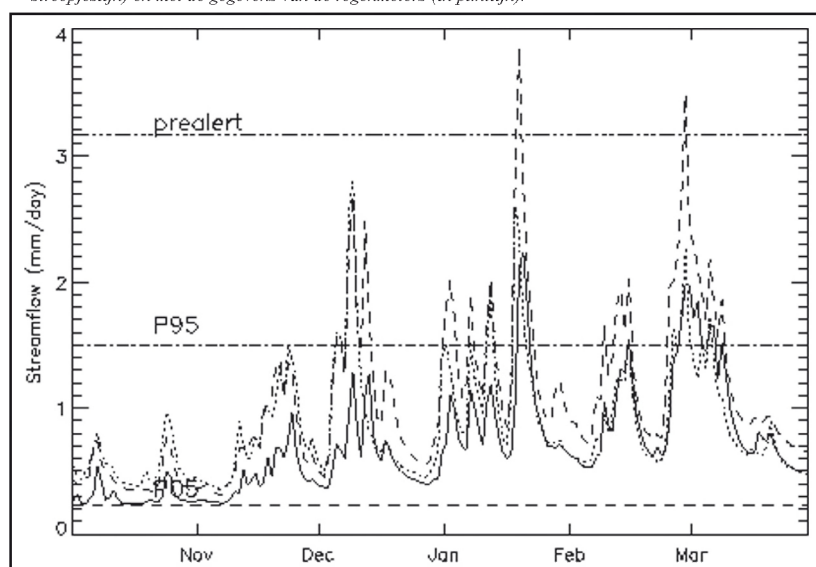
Een prototype van het systeem werd ontwikkeld ten einde de bruikbaarheid van de neerslagvoorspellingen van het systeem van ensemble voorspellingen van het ECMWF te evalueren. Gezien de efficiëntie van het systeem aangetoond werd (Termonia en Roulin, 2003; Roulin and Vannitsem, 2005), werd er een automatische procedure ontwikkeld die alle informatie gebruikt die op operationele manier beschikbaar is. Voorspellingen voor overstromingsrisico's voor de twee testbekkens worden sinds 2005 automatisch gegenereerd. Gedurende het jaar 2006 en tot de lente van 2007 werden deze voorspellingen ter beschikking gesteld aan de gewestelijke bekenbeheerders.

Voorspellingen in de winter 2006-2007

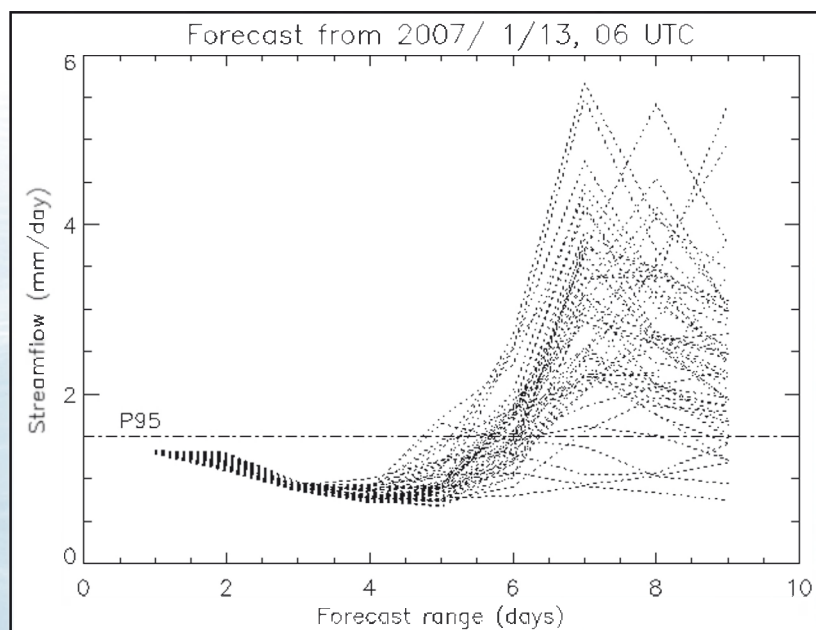
Om dit systeem te illustreren worden enkele resultaten voorgesteld die behaald werden met de automatische procedure in het Demerbekken in de loop van de vorige winter. In de Figuur 1 worden de twee met het model gesimuleerde debieten vergeleken met het gemeten debiet (bron HIC). De eerste reeks van de gesimuleerde debieten wordt dagelijks aangemaakt met de neerslaggegevens van de meteorologische radar te Wideumont gecumuleerd over de laatste 24 uren (vanaf 8h00 lokale tijd de vorige dag tot 8h00 de dag van de voorspelling). De tweede reeks debieten wordt uitgesteld aangemaakt wanneer de gegevens van het pluviometrisch meetnet van het KMI verzameld en gevalideerd werden. In de toekomst zullen verbeteringen aan dit aspect van de automatische procedure aangebracht worden. Inderdaad worden de radargegevens nu verbeterd met behulp van een aantal automatische stations. Het

hydrologisch model werd geoptimaliseerd voor gemiddelde condities en de modefficiëntie (de coëfficiënt van Nash-Sutcliffe) is 0.72 voor de jaren 2000 tot 2005. Geen enkele procedure voor assimilatie van het gemeten debiet werd reeds geïmplementeerd en geen enkele voorstelling van eender welke beleidsmaatregel van de waterloop werd gemodelleerd. De parameterwaarden van het hydrologisch model bleven onveranderd ten opzichte van 2000-2005. Nochtans vertonen de resultaten van de simulaties sinds de zomer van 2006 een positieve systematische fout ten opzichte van de waarnemingen. Deze resultaten moeten nog eerst kritisch geanalyseerd worden en hun impact op de voorspelde risico's moet geëvalueerd worden.

Figuur 1. Hydrologische winter 2006-2007: debiet van de Demer te Aarschot (in volle lijn, bron HIC) en het gesimuleerde debiet te Diest door het SCHEME-model met de gegevens van de radar te Wideumont (in streepjeslijn) en met de gegevens van de regenmeters (in puntlijn).



Figuur 2. Berekende hydrogrammen met het SCHEME-model aan de hand van de meteorologische ensemble voorspellingen van het ECMWF op 13 januari 2007.



De gebeurtenissen van januari tot maart 2007 worden geanalyseerd. Met de gesimuleerde debieten van de Figuur 1 corresponderen dus de beginvoorwaarden van het hydrologisch model waarmee de hydrologische voorspellingen worden aangemaakt op basis van de ensemble meteorologische voorspellingen. Figuur 2 toont de resultaten van deze hydrologische voorspellingen voor de 13^{de} januari 2007. Deze hydrogrammen worden vergeleken met de debietdrempel die overeenkomt met het percentiel 95. Bij voorbeeld moet men wachten tot de vijfde dag vanaf de datum van de voorspelling – dit is de 18^{de} januari – vooraleer de hydrogrammen de drempel van P95 overschrijden. Met twee hydrogrammen op de vijftig die het ensemble bevat komt dit overeen met een overschrijdingskans van 1%. Het aantal vermeerderd snel in de loop van de volgende dagen. Hierbij moet men opmerken dat de waarde van de piek en het ogenblik van de piek van scenario tot scenario verschillen.

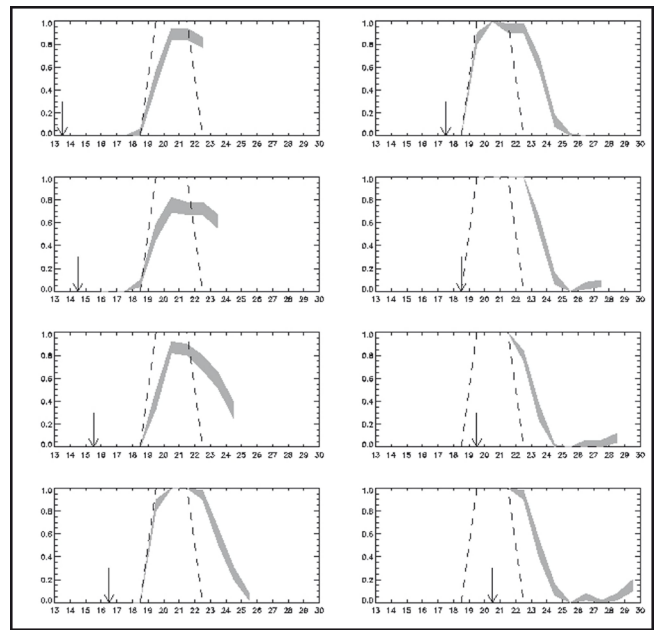
De Figuren 3 t.e.m. 5 stellen sequenties van hydrologische voorspellingen voor uit de winter 2006-2007. Op de grafiek duidt de pijl de dag van de voorspelling aan. De grijze band komt overeen met de overschrijdingskans van het debiet en de dikte van de band met de onzekerheid verbonden aan het aantal leden van het ensemble. De streepjeslijn werd *a posteriori* bepaald: deze komt overeen met de waarnemingen en de waarden die eraan gehecht worden zijn ofwel 1 indien het waargenomen debiet effectief de drempel van P95 overschreed en de waarde 0 in het tegenovergestelde geval. De opeenvolging van dergelijke grafieken werd in één figuur voorgesteld en laat toe van de loop der voorspellingen en gebeurtenissen te volgen.

De gebeurtenis van januari 2007 (zie Figuur 3) werd reeds 6 dagen vooruit met een hoge waarschijnlijkheid voorspeld. Bij het naderen van het hoogwater werd een vermindering van de waarschijnlijkheid voorspeld voor de volgende dagen en komt met een verlaging van het debiet overeen. De dagen waarvoor de variaties van de waarschijnlijkheid het grootst zijn schijnen vertraagd te zijn ten opzichte van de dagen waarop het debiet werkelijk de drempel overschreed of er terug onder gegaan is.

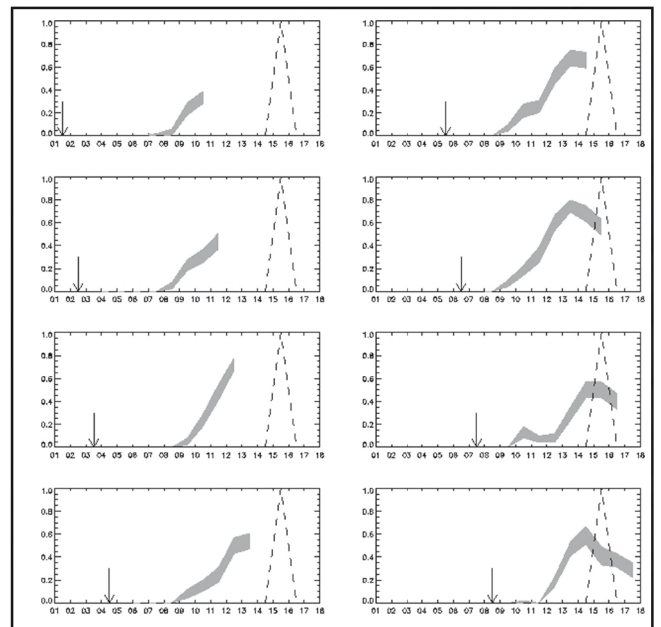
In de loop van de gebeurtenis van midden februari 2007 (zie Figuur 4) is volgens de gemeten debieten de drempel slechts één dag, namelijk op 15 februari 2007, overschreden geweest. De hydrologische voorspellingen hebben een belangrijke verhoging van het risico van hoogwater aangetoond voor de 12^{de} of de 13^{de} en dit negen dagen vooruit.

De gebeurtenis van februari-maart 2007 (zie Figuur 5) heeft één week geduurd. Ook deze gebeurtenis werd verschillende dagen vooruit ontdekt. Deze keer, bij het naderen van het hoogwater, bleven de waarschijnlijkheden zeer groot tot aan het einde van de voorspellingstermijn wat als correct ervaren werd gezien de duur

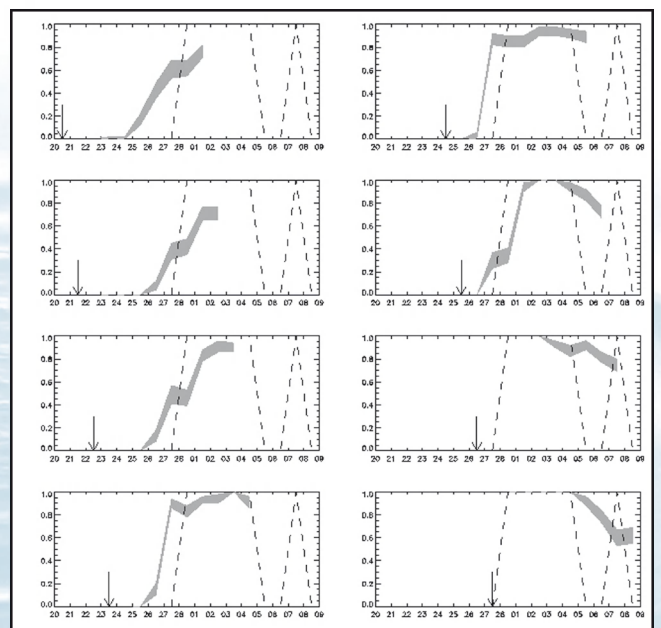
Figuur 3. Januari 2007: voorspelling van de waarschijnlijkheid dat het debiet van de Demer te Diest een drempel overschrijdt die overeenkomt met het percentiel 95 (in het grijs). De pijl wijst op de dag dat de voorspelling aangemaakt werd; a posteriori verificatie van de gebeurtenis (in streepjeslijn), de waarde 1 indien de drempel overschreden werd of 0 indien niet.



Figuur 4. Midden februari 2007: zelfde als Figuur 3.



Figuur 5. Februari – maart 2007: zelfde als Figuur 3.



van het hoogwater. Deze voorbeelden illustreren de gebruikte voorspellingstechniek bij zeer uiteenlopende situaties en tonen het voordeel van deze voorspellingen niet alleen om een kans op hoogwater op te sporen maar tevens om de duur van het hoogwater in te schatten. De ogenschijnlijke verschillen tussen de dagen waar de voorspelde kansen maximaal zijn en deze waarop de drempels effectief overschreden werden kunnen geval per geval uitgelegd worden op basis van de dispersie van de ensemble voorspellingen net zoals de verschillen tussen de gesimuleerde en de gemeten debieten. Een volgende stap zal bestaan uit het in rekening brengen van andere bronnen van onzekerheden dan deze van de neerslagvoorspellingen en deze voor te stellen in grafieken zoals in de Figuren 3 t.e.m. 5.

Validatie

Deze voorbeelden laten op zich zelf niet toe over het nut van de hydrologische voorspellingen te oordelen. Langere periodes moeten in rekening gebracht worden ten einde een voldoende aantal gevallen te omvatten. Uitgebreide verificaties werden in het hierboven vermelde project gerealiseerd. Daarvoor maakte men gebruik van de archieven van het ECMWF. Hydrologische voorspellingen werden aangemaakt op basis van de gearchiveerde ensemble voorspellingen (hindcasts). De indices die gebruikt werden om de hydrologische waarschijnlijkheidsvoorspellingen te kenmerken werden ontleend aan beproefde verificatiemethodes uit het domein van de meteorologische voorspellingen (Roulin en Vannitsem, 2005; Roulin, 2007).

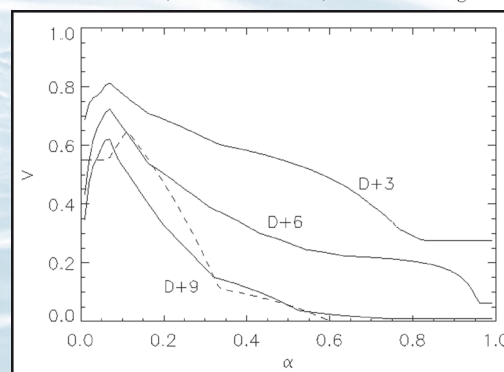
Een van deze methodes bestaat uit het karakteriseren van de gemaakte fout in de waarschijnlijkheidsvoorspelling. Dit komt erop neer van de afstand tussen de grijze band en de streepjeslijn in de Figuren 3 t.e.m. 5 te berekenen. De voornaamste conclusies waren als volgt: de hydrologische voorspellingen op middenlange termijn (hier tot 9 dagen) waren efficiënt. Hun prestatievermogen was hoger in de winter dan in de zomer wat overeen komt met een grotere moeilijkheid om de convectieve neerslag te voorspellen. Deze wordt gekarakteriseerd door kleinere ruimtelijke schalen dan deze die gebruikt wordt in het numerieke weersvoorspellingmodel. Daarenboven is de efficiëntie verbonden aan een goede betrouwbaarheid in de zin dat voor een voorspelde kans deze waarde overeenkomt met de waarschijnlijkheid waarmee de gebeurtenis zal waargenomen worden. Tevens werd een verbetering van de scores gevonden ten gevolge van de vermindering van de ruimtelijke resolutie van het ECMWF-model van 120 naar 80 km.

In een operationele context moeten de voorspellingen van de kansen op hoogwater aan de bekkenbeheerders toelaten om beslissingen te nemen. Zij moeten ook geëvalueerd worden met betrekking tot hun mogelijkheden om informatie te verstrekken die toelaat om optimale beslissingen

te nemen. In deze context werd een vereenvoudigd beslissingsmodel gebruikt (Roulin, 2007). Het gaat erom voor een gegeven periode de kosten veroorzaakt door de overstromingen en de kosten van de preventieve acties die beslist werden ten gevolge van de voorspellingen in rekening te brengen. Daar de kosten en de verliezen in reële situaties moeilijk in te schatten zijn wordt een relatieve economische waarde berekend door het voorspellingssysteem te vergelijken enerzijds met een perfect voorspellingssysteem en anderzijds met een voorspellingssysteem waarin enkel de frequentie van de overstromingen in het verleden gekend is (klimatologie). Deze waarde hangt af van het voorspellingssysteem, de te beheren toestand en het risico waartegen men zich wapent. Het voorspellingssysteem wordt gekenmerkt door de frequentie waarmee de gebeurtenissen correct voorspeld werden en waarmee valse alarmen werden gegeven. De te beheren situatie wordt bepaald door de verhouding tussen de kosten van de voorspellingssacties en het gedeelte van de kosten veroorzaakt door de overstromingen dat had kunnen vermeden worden door geschikte acties te ondernemen. Het risico wordt bepaald door de frequentie van de overstromingen in het verleden. De relatieve economische waarde die berekend wordt volgens dit vereenvoudigd beslissingsmodel is dus een positieve grootte indien het systeem krachtiger is dan een systeem dat enkel op de klimatologie gebaseerd is en die gelijk is aan 1 in het geval van een perfect systeem.

Figuur 6 toont de resultaten voor de Demer voor de voorspellingen van 2000 tot 2006 voor een ruimtelijke resolutie van 80 km van het ECMWF-model. Men kan zien dat de hydrologische voorspellingen een grote relatieve economische waarde hebben voor een grote verscheidenheid in toestanden. Zelfs met een horizon van 9 dagen kan het voordelig blijken rekening te houden met de hydrologische ensemble voorspellingen wanneer de kosten van de preventieve acties relatief klein zijn ten opzichte van de verliezen die door deze acties beschermd worden. Op dezelfde figuur wordt tevens de waarde van de hydrologische voorspellingen voortgebracht door

Figuur 6. Relatieve economische waarde (V) van de hydrologische ensemble voorspellingen in functie van de verhouding kosten/verliezen (α), de voorspelling dat het debiet van de Demer de drempel die correspondeert met het percentiel 95 overschrijdt; in volle lijn: 2000-2006, met de EPS voorspellingen met een resolutie van 80 km en voor de horizons van 3, 6 en 9 dagen; in streepjeslijn: de winter 2006-2007, resolutie van 50 km, horizon van 6 dagen.



de automatische procedure gebaseerd op de EPS voorspellingen met een ruimtelijke resolutie van 50 km voorgesteld. De vergelijking tussen de prestaties bereikt met de beide resoluties is beperkt, enerzijds daar één enkele winter een te korte periode is voor de validatie van een gebeurtenis die niet frequent voorkomt en anderzijds moeten de referentiedebieten – hier via de radargegevens bekomen – nog verbeterd worden.

Het voordeel van een systeem van waarschijnlijkheidsvoorspellingen ten opzichte van een meer klassiek systeem die slechts één enkele hydrologische simulatie nodig heeft ligt in het feit dat de beheerder de mogelijkheid heeft de drempel te kiezen waarboven hij zal beslissen tussen te komen.

Conclusies en perspectieven

Een voorspellingssysteem gebaseerd op het gebruik van de ensemble voorspellingen van het ECMWF in een hydrologisch model werd beschreven. De resultaten bekomen met een automatische procedure in de loop van de vorige winter (2006-2007) werden voorgesteld. Een meer systematische verificatie werd gedaan aan de hand van de archieven van het ECMWF voor de langere referentieperiode 2000-2006, d.w.z. voor een vorige versie van het numerieke weersvoorspellingmodel dat gekarakteriseerd werd door een grovere ruimtelijke resolutie. De efficiëntie en de waarde van de voorspellingen werden aangetoond.

De validatie van de hydrologische ensemble voorspellingen met behulp van objectieve methodes is een belangrijke fase in de ontwikkeling van het voorgestelde systeem van waarschijnlijkheidsvoorspellingen zoals bij ieder voorspellingssysteem. Onderzoek zoals gerapporteerd in Roulin en Vannitsem (2005) en in Roulin (2007) zal herhaald worden en de methodes voor verificatie zullen verder bestudeerd worden, onder andere, om rekening te houden met kleinere steekproeven.

De ontwikkeling van een hydrologisch ensemble voorspellingssysteem zal voortgezet worden. Onder de te bewandelen wegen wordt het in rekening brengen van andere bronnen van onzekerheden verbonden met de parameterwaarden van het hydrologisch model of nog met de waargenomen gegevens om de beginvoorwaarden te bepalen. Verder wordt nog gedacht aan de assimilatie van gegevens zoals de waargenomen debieten, de geschiktheid van de EPS voorspellingen op

schaal van het hydrologisch model of nog de verbetering van de voorspellingen in functie van de statistische analyse van voorbij fouten. Op die manier zullen de waarschijnlijkheidsvoorspellingen gebaseerd op de ensemble voorspellingen van het ECMWF zich nog nuttiger tonen voor de beheerders van de stroombekkens en van de bevaarbare waterlopen.

Referenties

BULTOT, F. en G.L. DUPRIEZ (1976), Conceptual hydrological model for an average-sized catchment area, *J. Hydrol.*, vol. 22, 251-292.

MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP, AFDELING WATER (2003), Overstromingen in Vlaanderen - Oorzaken en oplossingen - Met sprekende luchtfoto's, 83 pp.

TERMONIA, P. en E. ROULIN (2004), Numerieke voorspellingen ten behoeve van neerslagvoorspellingen en hydrologische toepassingen, Wetenschappelijke en technische publicatie nr. 035, Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, Brussel, 15 pp.

ROULIN, E. and S. VANNITSEM (2005), Skill of medium-range hydrological ensemble predictions, *J. Hydrometeor.*, vol. 6, 729-744.

ROULIN, E. (2007), Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 11, 725-736.

VAN EERDENBRUGH, K. (2003), Numerieke modellen ter ondersteuning in crisisperiodes, In: Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek (Ed.), Colloquium: Numerieke oppervlaktewater modellering, mogelijkheden en beperkingen, Antwerpen 23-24 oktober 2003.

E. Roulin

*Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
Ringlaan, 3, B-1180, Brussel
02 373 05 54*

G. Demarée

*Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
Ringlaan, 3, B-1180, Brussel
02 373 05 40*