

HOOFDSTUK 4. HULP BIJ HET BESLISSINGSPROCES IN METEOROLOGIE EN KLIMATOLOGIE

4.1 Inleiding

Zoals we in het vorige hoofdstuk reeds benadrukt hebben, blijven er veel onzekerheden over de werking van het klimaatstelsel bestaan. Zowel op internationaal als nationaal vlak, probeert men via operationele activiteiten en voortdurende observatie vanop de grond en vanuit de ruimte, evenals via fundamenteel onderzoek deze onzekerheden te verminderen. Ook het KMI draagt bij aan deze inspanningen, zoals blijkt uit de voorgaande hoofdstukken.

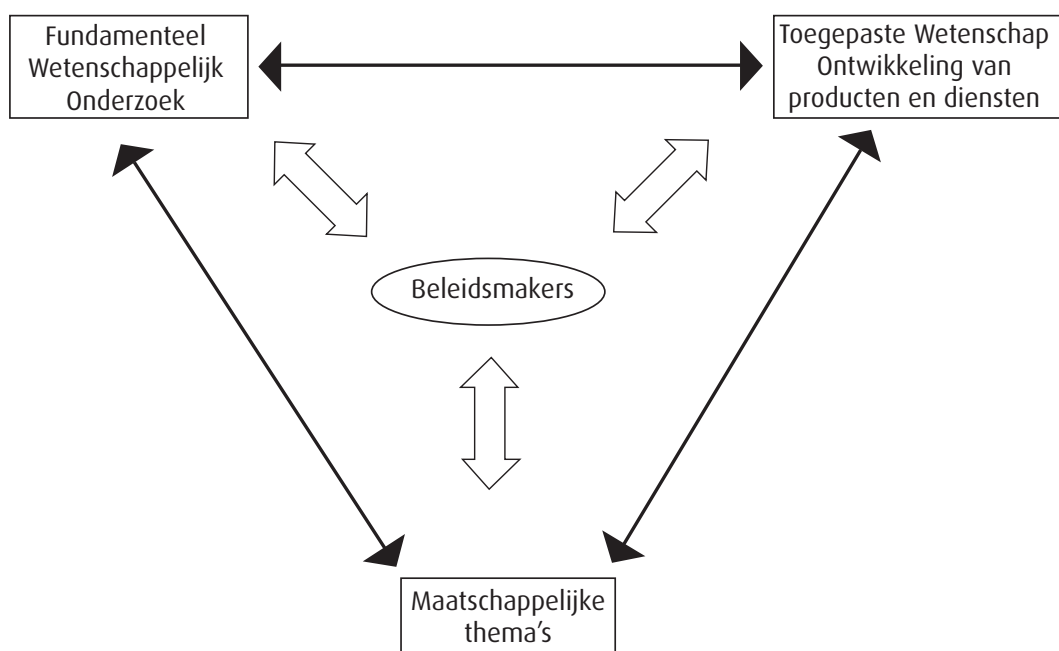
We weten dat veranderingen gesimuleerd door verschillende mondiale modellen doorheen de tijd (eeuwen), in reactie op veranderende concentraties van broeikasgassen, tot nu toe wijzen in de richting van de zeer waarschijnlijke voortzetting van de opwarming. Een vergelijking tussen modellen en waarnemingen op 10-jarige schaal is langzamerhand mogelijk en zelfs relevant geworden.

Momenteel belet het onvoltooid karakter in deze onderzoeksdomeinen niet dat sommige resultaten al hulp kunnen bieden bij de besluitvorming van de verschillende maatschappelijke actoren. Het KMI blijft inmiddels in dialoog met alle beleidsmakers, evenals met de wetenschappelijke gemeenschap, om vernieuwende of verfijnde benaderingen die beter anticiperen op de risico's in verband met klimaatveranderingen, toe te passen.

Maar er bestaat een essentiële voorwaarde opdat dergelijke aanpak enige slaagkans zou hebben: het is nodig om te zorgen dat de relatie tussen wetenschappers en beleidsmakers zich ontwikkelt van een puur sequentieel schema¹⁴ zoals hieronder

Fundamentele wetenschap → ...toegepaste wetenschap → ...beslissing

naar een interactief schema van 'stakeholders', zoals voorgesteld in onderstaand schema:



¹⁴ In dit schema, biedt de fundamentele wetenschap, die continu vooruitgang boekt, ideeën voor nieuwe toepassingen die geleidelijk aan worden uitgevoerd, waardoor beleidsmakers in het algemeen welzijn van de samenleving kunnen optreden. Dit, op zijn beurt, financiert het fundamenteel onderzoek want vroeg of laat zal dit winst opleveren.

In dit schema zijn de interacties tussen de verschillende actoren talrijk en diegenen die in de kern van de besluitvormingsprocessen staan, verzenden en ontvangen berichten, richtlijnen, wensen, enz., vanwege alle betrokkenen. Het zijn deze interacties die uiteindelijk het onderzoek stap voor stap stimuleren tot het vinden van oplossingen voor maatschappelijke problemen op het moment dat deze zich voordoen.

In dit hoofdstuk zullen we de «stakeholders»-aanpak zoals hierboven beschreven, illustreren door de presentatie van een aantal bijdragen die het KMI op het gebied van klimatologie en meteorologie onlangs gerealiseerd heeft.

4.2 Klimatologisch domein

In het voorgaande hoofdstuk werden hoofdzakelijk de theoretische aspecten van het klimatologisch domein belicht, maar nu stellen we u een aantal resultaten die het KMI recentelijk bereikt heeft en die voor het grootste deel beantwoorden aan de vraag van de beleidsmakers, voor.

4.2.1 Het stedelijk klimaat

Methodologie

Het stedelijk microklimaat ontstaat door de wisselwerking tussen de stedelijke oppervlakte en de atmosfeer. De fysische processen die zich in het hart van dit microklimaat voordoen, zijn het gevolg van energie- en wateruitwisseling tussen de stedelijke oppervlakte en de atmosfeer.

In het kader van een dienstverleningscontract met Leefmilieu Brussel (Brussels Instituut voor Milieubeheer, BIM), heeft het KMI in 2009 de studie over het stedelijk microklimaat voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (BHG) voorgesteld. De gegevens van satellietbeelden werden gebruikt om de evolutie van de oppervlakte van ondoordringbare gebieden te bepalen en werden gecombineerd met een landoppervlakte-model inclusief een specifiek schema dat de stedelijke energiebalans berekent. Dit nieuw oppervlaktemodel, SURFEX, werd ontwikkeld door het Nationaal Centrum voor Meteorologisch Onderzoek (Meteo-France). Het maakt het mogelijk om de uitwisselingen van water, luchtverplaatsingen en de hoeveelheid energie te beschrijven voor vier soorten oppervlaktes: zee, meer, vegetatie (bossen, weiden, velden...) en stedelijke gebieden. In het oppervlaktemodel SURFEX werkt de TEB (Town Energy Balance) - module specifiek voor stedelijke toepassingen.

De studie werd ontworpen om de gevolgen van de groei van de verstedelijking op het stedelijke microklimaat en de evolutie ervan in het BHG, te isoleren. Om dit doel te bereiken, heeft het SURFEX/TEB-model een prognose voor twee lange periodes gemaakt: voor het huidige klimaat tussen 1960 en 1999 en voor het toekomstige klimaat over de laatste 30 jaar van de 21ste eeuw (2071-2100). Om het huidige klimaat te simuleren, heeft het oppervlaktemodel in de «off-line»-modus (zonder terugkoppeling met de atmosfeer) gedraaid en werd het gekoppeld aan de her-analysedata ERA-40 van het Europees Centrum (ECMWF). Door deze koppeling werd het oppervlaktemodel op grote schaal gevoed met meteorologische gegevens. De data voor de klimaatveranderingsscenario's komen uit de database van het Europese project PRUDENCE.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (BHG) wordt beschouwd als een homogeen stedelijk gebied, gekenmerkt door een gedeelte vegetatie en een gedeelte ondoordringbare oppervlaktes. Het percentage van de historische verstedelijking werd geschat op basis van het percentage van ondoordringbare oppervlaktes berekend aan de hand van de satellietbeelden van Landsat. In het model is het percentage ondoordringbaarheid vastgesteld op 26% in 1955, 34% in 1970, 39% in 1985, 40% in 1993 en 47% in 2006 (VanHuyse *et al.*, 2006). Bijgevolg werd de vegetatieve oppervlakte voor het grondgebied van het BHG bijvoorbeeld voor 2006 vastgesteld op 53%.

Evolutie van de oppervlaktewaterafvoer

In stedelijke gebieden zijn de wateropslag aan de oppervlakte en de waterverdamping lager dan in de landelijke (rurale) gebieden. Echter, in tegenstelling tot gebieden met een natuurlijke bodem, is de bodemafvoer er veel sterker vanwege het bestaan van ondoordringbare oppervlaktes. Een van de doelstellingen van het onderzoek was dan ook om een beter begrip van de invloed van de verstedelijking op de waterhuishouding van het regenwater voor het BHG te bieden.

De parameters van het SURFEX-model waarvan het gedrag specifiek onderzocht werd, zijn:

- (i) oppervlaktewaterafvoer (dat wil zeggen het verschil tussen de neerslag enerzijds en verdamping en infiltratie in de bodem anderzijds),
- (ii) het piekvolume (dat wil zeggen de maximale jaarlijkse afvoer),
- (iii) het jaarlijkse aantal overstromingen (een dergelijke gebeurtenis doet zich voor elke keer dat een drempelwaarde van de afvoer wordt overschreden; deze drempelwaarde wordt berekend als de 0.95 percentielwaarde van de afvoer over de gehele simulatie).

De belangrijkste resultaten van de studie zijn de volgende (Hamdi *et al.*, 2011):

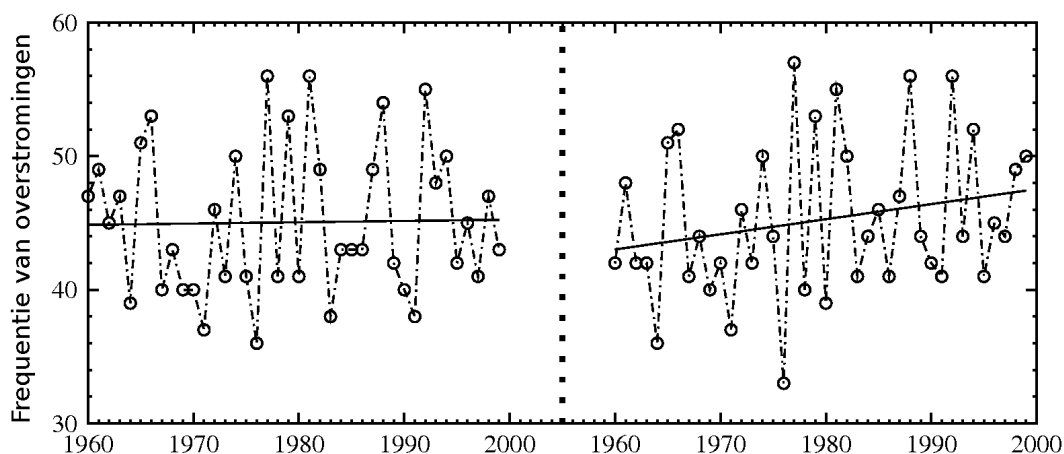
Wat betreft het effect van historische verstedelijking:

1. Wanneer het percentage van de ondoordringbaarheid 35% overschrijdt, wordt een verandering waargenomen in de jaarlijkse reeksen van oppervlaktewaterafvoer gecumuleerd over het jaar, het piekvolume en de frequentie van de overstromingen (zie figuur 4.1).
2. Voor elke stijging van 10% van ondoordringbare oppervlaktes, stijgt het piekvolume met 32% en de cumulatieve oppervlaktewaterafvoer met 40%. Van haar kant stijgt de jaarlijkse overstromingsfrequentie met 2,25 evenementen.
3. De grootste toename van de verhouding tussen oppervlaktewaterafvoer en neerslag bedraagt 40% en doet zich voor tijdens de zomer.

Wat betreft het effect van de klimaatveranderingen:

We dienen evenwel op te merken dat wat de neerslag betreft, er een zeer belangrijk verschil bestaat tussen de toekomstprojecties van de twee klimaatmodellen op wereldschaal die in deze studie gebruikt werden. Wat het einde van de 21ste eeuw betreft, toont een van de modellen weinig verschil met de regenval in het huidige klimaat, terwijl het tweede model tot 20% toename van de jaarlijkse totale neerslag simuleert. De analyse van de resultaten van onze studie, hieronder weergegeven, houdt rekening met het klimaatscenario dat een toename van de neerslag voorziet.

1. De neerslagveranderingen in de toekomst zijn meer bepalend dan toekomstige temperatuurveranderingen op het gebied van het piekvolume, de cumulatieve jaarlijkse waterafvoer en de relatie tussen de oppervlaktewaterafvoer en de neerslag.
2. De hypothese uitgaande van een toename van 10% aan ondoordringbare oppervlaktes in het BHG, gaat in tegen de toename van verdamping veroorzaakt door toekomstige hogere temperaturen.
3. Wanneer we het effect van toekomstige verstedelijking (men gaat uit van een stijging van 20% ondoordringbare oppervlaktes) en het klimaatscenario combineren, verscherpt de toename van het piekvolume in vergelijking met enkel het klimatologisch effect. Het piekvolume steeg met 140% ten opzichte van de geschatte ondoordringbare omstandigheden in 2006 (geschat op 47%).



Figuur 4.1. De frequentie van jaarlijkse overstromingen gesimuleerd door het SURFEX/TEB-model tussen 1960 en 1999. Links: met een percentage van ondoordringbaarheid van het BHG hypothetisch bepaald volgens de waarde van 1955 (26%). Rechts: rekening houdend met de historische stijging van het percentage van ondoordringbaarheid. In beide simulaties, zijn de jaarlijkse waarden berekend vanaf een drempelwaarde voor waterafvoer die overeenkomt met de 0,95 percentielwaarden van de waterafvoer over de gehele simulatie; de twee drempelwaarden zijn dus verschillend.

Klimaatscenario's gebruikt in de gevoeligheidsstudies Scenario's van het project PRUDENCE

De klimaatscenario's van het Europese project PRUDENCE werden gegenereerd uit simulaties van regionale klimaatmodellen. Deze simulaties gelden voor een periode van 30 jaar, zowel voor het huidige als voor het toekomstige klimaat (2071-2100), en worden gegenereerd door verschillende regionale modellen die «geleid» zijn door andere modellen op grotere schaal (mondiale modellen). Het toekomstige klimaat volgt bepaalde veronderstellingen over de socio-economische en demografische evolutie op grote schaal en de impact ervan op het milieu. Deze veronderstellingen kunnen gegroepeerd worden in families op basis van een aantal technische specificaties betreffende de mogelijke evolutiepaden en, bijgevolg, de ernst van de effecten; zij vormen de SRES-scenario's van het IPCC. Het verschil tussen de klimaat simulaties van het huidige en het toekomstige klimaat is een maat voor de klimaatverandering. Het project PRUDENCE biedt een set van dergelijke klimaat simulaties aan. Bijgevolg kan een reeks van schattingen van de klimaatverandering gegenereerd worden, wat dan weer ramingen over de onzekerheid van deze verandering toelaat (zie figuur 4.6 als voorbeeld).

Scenario's van het KNMI

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) heeft scenario's voor klimaatverandering ontwikkeld op basis van simulaties met een regionaal model en een vereenvoudigd geheel van scenario's van de evolutie van de atmosferische dynamica. De aanpak houdt rekening met twee variabelen: (1) het al dan niet wijzigen van de algemene atmosferische circulatie, en (2) de verhoging van de gemiddelde wereldtemperatuur met 1°C (gemiddeld scenario) of 2°C (warm scenario). (Zie figuren 4.4 en 4.5 als voorbeeld).

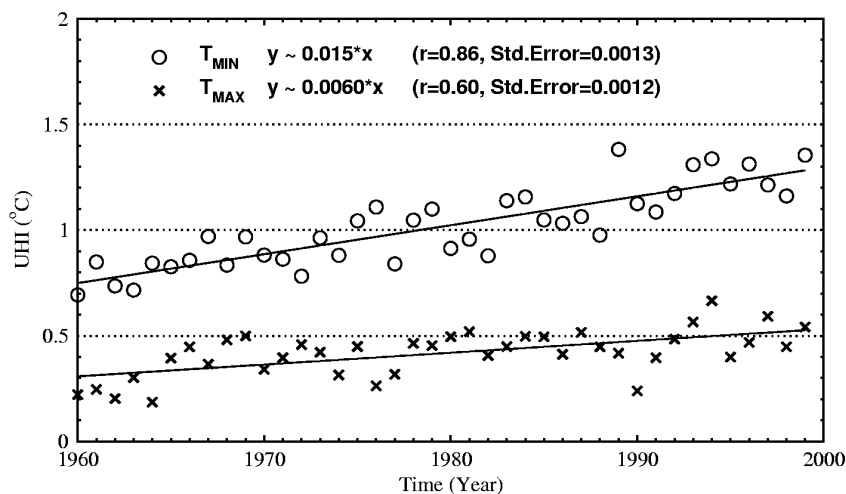
Evolutie van het stedelijk hitte-eiland

Het is bekend dat de temperaturen in de stedelijke gebieden in het algemeen hoger zijn dan in een meer landelijke omgeving. Dit heet het stedelijk hitte-eiland (of stadseffect). Het SURFEX/TEB-model is ook gebruikt om dit effect voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (BHG) in te schatten voor de afgelopen zomers tussen 1960 en 1999.

Met behulp van het model werd het stedelijk effect voor de zomer ingeschat door twee simulaties te vergelijken. De eerste houdt rekening met de historische evolutie van de ondoordringbaarheid in het BHG en de tweede simulatie gaat uit van een hypothetische situatie zonder stedelijke gebieden binnen het BHG (landelijke simulatie). Het stedelijk effect en de evolutie ervan wordt geschat door het verschil te maken tussen de temperaturen van beide simulaties.

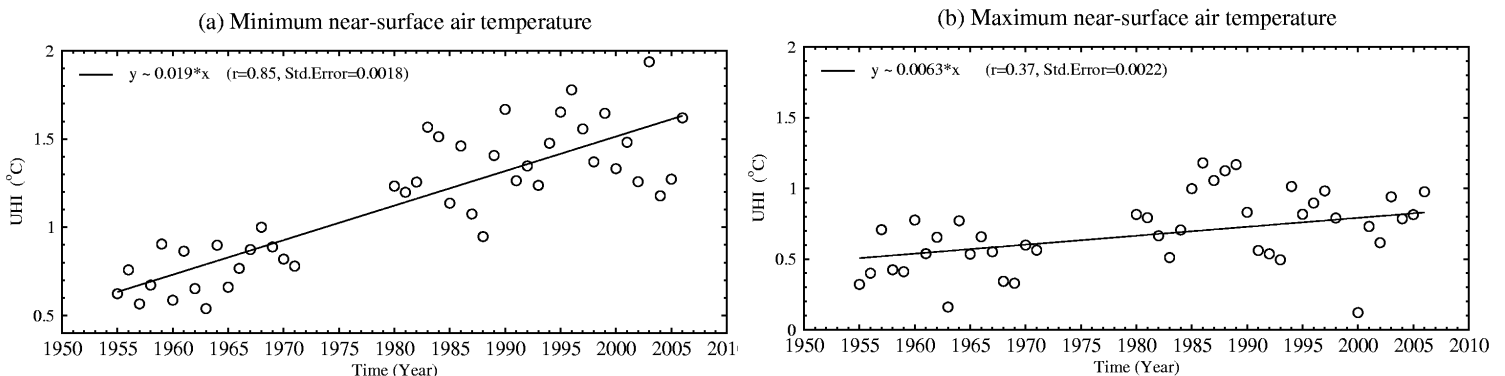
De belangrijkste resultaten van de simulaties zijn de volgende (Hamdi, 2010; Hamdi *et al.*, 2009):

1. Met de verstedelijking van het BHG, stijgt het zomers stadseffect op de jaarlijkse minimumtemperatuur twee maal zo snel als op de maximumtemperatuur.
2. Voor het gemiddelde tussen 1960 en 1999 wordt de stijging van het zomers stadseffect geraamd op $+0,4^{\circ}\text{C}$ voor de gemiddelde temperatuur ($+0,55^{\circ}\text{C}$ voor de minimumtemperatuur en $+0,25^{\circ}\text{C}$ voor de maximumtemperatuur). De metingen van het station in Ukkel gedurende deze periode laten een zomeropwarming van ongeveer $1,6^{\circ}\text{C}$ zien. Volgens de resultaten van het model heeft de intensivering van het stedelijk effect in het BHG op significante wijze (25%) bijgedragen aan de zomerse opwarming die gedurende de laatste vier decennia van de 20ste eeuw in Ukkel werd waargenomen.



Figuur 4.2. Evolutie van het stadseffect (UHI staat voor Urban Heat Island) op de minimum- en maximum- temperatuur gemiddeld over de zomers tussen 1960 en 1999. Het stadseffect wordt geschat door het berekenen van het temperatuurverschil tussen een stedelijke en een landelijke simulatie (zie tekst voor details).

Om de relevantie van deze methode voor het modelleren van het stadseffect op basis van observaties te beoordelen, werden twee meetpunten van het klimatologische netwerk van het KMI geselecteerd: Brussegem en Ukkel. Ukkel is een substedelijk meetpunt dat gelegen is in het zuiden van het BHG op 6 km van het centrum van Brussel. Het klimatologische meetpunt van Brussegem is een landelijk meetpunt dat op 20 km ten NW van het centrum van Brussel gelegen is. Dit meetpunt ligt buiten de zone die hoofdzakelijk door de stadseffecten van het BHG beïnvloed wordt en het wordt ook niet beïnvloed door de overheersende windrichting (ZW). Schattingen van de stedelijke afwijking voor het meetpunt in Ukkel worden gedefinieerd door het verschil te maken tussen de temperaturen gemeten in dit meetpunt en die in Brussegem. Figuur 4.3 toont de verschillen tussen de twee meetpunten voor de minimumtemperatuur (boven) en de maximumtemperatuur (onder) die berekend werden voor elke zomer in de periode 1955-2006. De evolutie van de lange-termijnverschillen wordt weergegeven door de rechte lineaire trendlijnen in figuur 4.3. Het ontbreken van gegevens tussen 1972 en 1979 kan verklaard worden door de onderbreking van de metingen in Brussegem tijdens deze periode.



Figuur 4.3. De stadseffect op de gemiddelde minimum- en maximumtemperaturen voor de zomer tussen 1955 en 2006. Het stadseffect wordt geschat door het verschil tussen de temperaturen geregistreerd in het meetpunt in Ukkel en het landelijke meetpunt van Brussegem.

De vergelijking van de schattingen van het stadseffect verkregen door modellering en door vergelijking van waarnemingen, toont aan dat de resultaten op basis van satellietbeelden in combinatie met een oppervlaktemodel overeenstemmen met schattingen van de stedelijke opwarming gebaseerd op de analyse van de metingen van de klimatologische meetpunten.

Meer recent hebben onderzoekers van het KMI een nieuwe werkwijze voor het modelleren van het stadseffect ontwikkeld. Het betreft een methode om de details van het gemiddelde stadseffect te kwantificeren. Van elke vierkante kilometer voor een gebied dat het hele Brussels Hoofdstedelijk Gewest dekt, wordt een gemiddelde berekend. De eerste resultaten worden voorgesteld in Hamdi et al., 2014.

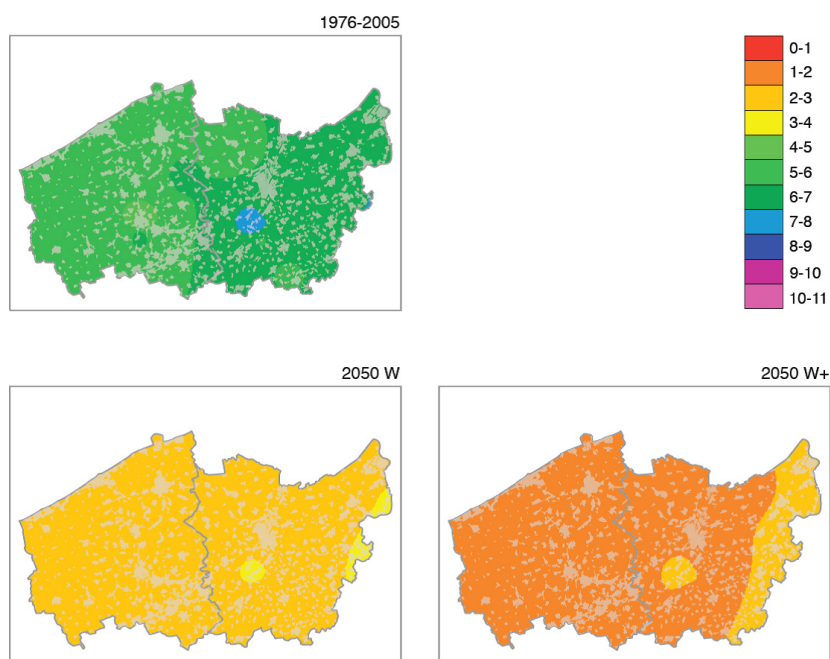
Als besluit willen we het belang voor wetenschappers, stedenbouwkundigen en beleidsmensen om nog meer samen te werken om tot een beter begrip en een betere beheersing van de interactie tussen de stedelijke gebieden en de klimaatverandering te komen, onderstrepen en zodoende passende aanpassings- en afzwakingsstrategieën uit te werken. Specifiek om de kwaliteit van het leven in de steden te behouden of te verbeteren, moeten stedenbouwkundigen over gedetailleerde informatie over het toekomstige stadsklimaat op residentiële schaal kunnen beschikken. Echter, gezien de ondoordringbare oppervlaktes slechts minder dan een procent van de totale wereldoppervlakte beslaan, zijn de meeste klimaatmodellen die wereldwijd gerund worden en vervolgens gebruikt worden voor onderzoek naar klimaatverandering niet gedetailleerd genoeg om het verschil te maken tussen een stedelijke en een landelijke omgeving. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) erkent het toenemende belang van het stedelijk klimaat, alsook zijn eigenaardigheden, die nog niet voldoende opgenomen werden in de simulaties van de klimaatmodellen. Het KMI wil dan ook een bijdrage leveren aan de ontwikkeling van het onderzoek op dit belangrijk gebied en de hierboven beschreven toepassingen zijn daar een voorbeeld van.

4.2.2 Het klimaat in ons land

Voorbeeld van klimaatscenario's

Het KMI heeft onlangs deelgenomen aan een project om de gevolgen van de klimaatverandering in de provincies Oost- en West-Vlaanderen (Klimaateffectedschetsboek West- en Oost-Vlaanderen, 2012) te bestuderen. In deze studie werden de scenario's 2006 van het KNMI gebruikt om de veranderingen in bepaalde klimaatindicatoren voor het klimaat in 2050 (statistieken voor de periode 2035-2064) in te schatten. De bewuste scenario's vertonen een jaarlijkse opwarming van 2°C van de mondiale gemiddelde temperatuur en een van hen houdt rekening met een mogelijke verandering in de algemene circulatie van de atmosfeer. De berekening van de waarden van de meteorologische variabelen (neerslag, temperatuur) voor de toekomstige klimatologische omstandigheden is verricht vanuit de historische gegevens van het netwerk van meteorologische meetpunten van het KMI, waarop een wiskundige transformatie wordt toegepast. Deze transformatie brengt de scenariogegevens over in tijdreeksen die werden waargenomen tussen 1976 en 2005 om zo tijdreeksen voor de toekomst te produceren. We geven hier twee voorbeelden van verkregen resultaten:

Figuur 4.4 toont de verandering in het aantal winterse dagen (dagelijkse maximumtemperatuur onder nul, dit wil zeggen dat het de hele dag door vriest) met de voorwaarden van scenario W (zonder verandering van circulatie) en W+ (met verandering van circulatie). Er wordt een daling met een factor twee van het aantal dagen geregistreerd.



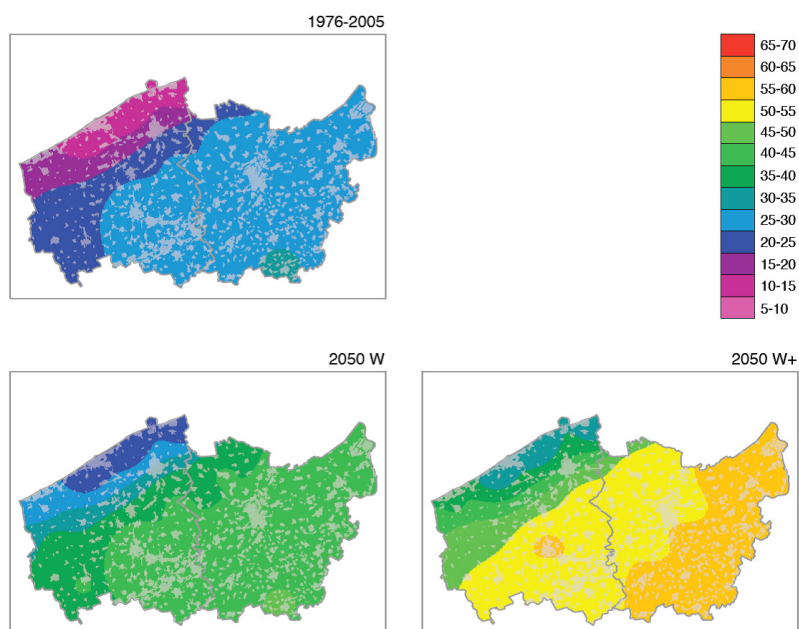
Figuur 4.4. Jaarlijks aantal winterse dagen ($T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$) voor de provincies West- en Oost-Vlaanderen voor het huidige klimaat (1976-2005), met een scenario voor 2050 zonder verandering van circulatie (W) en met verandering van circulatie (W+).

De veranderingen in het aantal zomerse dagen (maximumtemperatuur ten minste 25°C) worden getoond in figuur 4.5. Het contrast tussen de kust en het binnenland is duidelijk zichtbaar in de drie gevallen: het huidige klimaat, het scenario W en het scenario W+. Dit contrast wordt groter in het W+-scenario. De veranderingen tussen de huidige omstandigheden en de scenario's zijn als volgt:

+ 10 dagen (met W) en +20 dagen (met W+) voor de kust,

+15 dagen (met W) en + 30 dagen (met W+) voor het binnenland.

De zelfde veranderingen doen zich ook voor bij de andere indicatoren verbonden aan de temperatuur: intensivering van de zomerse hitte en afzwakking van de winterse koude.



Figuur 4.5. Aantal zomerse dagen ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) voor de provincies West- en Oost-Vlaanderen.

Wat de neerslag betreft, zijn de resultaten meer uiteenlopend. Bijvoorbeeld, het aantal dagen met meer dan 15 mm neerslag, zou in de winter verhogen volgens de beide scenario's W en W+. Daartegenover voorspelt het W-scenario voor de zomer een toename van het aantal regendagen terwijl het W+-scenario dan een verlaging voorziet. Deze verschillen illustreren nogmaals duidelijk de onzekerheid in verband met de scenario's voor de betreffende klimaatverandering.

Studie over de hydrologische impact

Klimaatveranderingen kunnen aanzienlijke gevolgen hebben op verschillende domeinen en hun invloed op de fauna en de flora is ook niet te onderschatten. Maar vooral de effecten van klimaatverandering op de waterkringloop zouden invloed kunnen hebben op een groot aantal domeinen van de samenleving. Deze mogelijkheid wordt aangekaart telkens wanneer herhaaldelijke overstromingen of langere periodes van droogte zich voordoen. Het KMI voert reeds gedurende verschillende jaren onderzoek binnen dit domein en we stellen hier dan ook enkele onderzoeksresultaten voor.

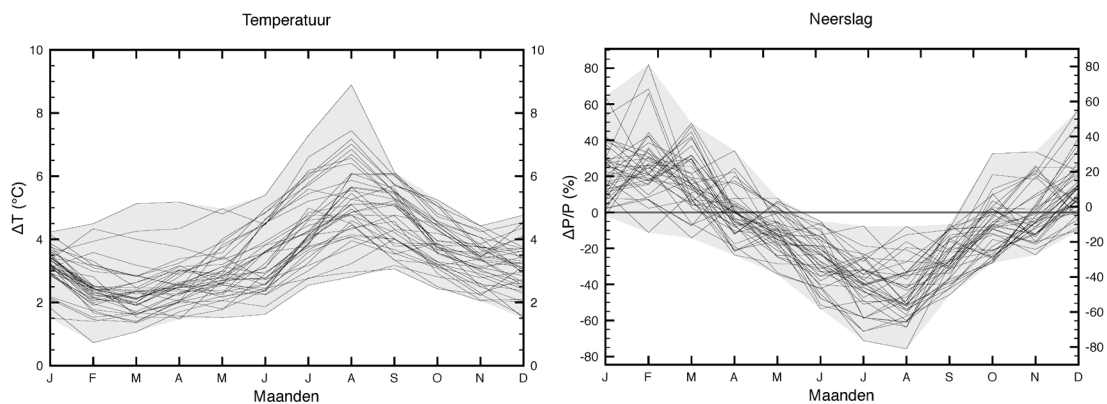
Gezien de reeds eerder aangegeven opeenstapeling van onzekerheden die samenhangen met toekomstvoorspellingen, spreekt het voor zich dat het antwoord op dit probleem niet voor onmiddellijk is. Niettemin is het mogelijk om de gevoeligheid van een hydrologisch model voor de door de klimatologen voorgestelde scenario's te onderzoeken. Deze analyse kan enkel uitgevoerd worden door gebruik te maken van aangepaste hydrologische modellen, die toelaten om de belangrijkste kenmerken van de waterkringloop en diens forcering door de meteorologische variabelen te beschrijven. De gebruikte informatie bestaat over het algemeen uit de verschillen tussen de toekomstprognoses van de modellen en het huidige klimaat voor wat de maandelijkse gemiddelden van de temperatuur en de neerslag betreft. De verandering van andere variabelen, zoals het aantal uren zonneschijn of de windsnelheid, die invloed uitoefenen op de verdamping, worden eveneens in aanmerking genomen. Hiertoe wordt een hydrologisch model gebruikt omdat dit de waterkringloop beschrijft - dit is de accumulatie en het smelten van een eventuele sneeuwlaag, het opvangen van de regen door de vegetatie, de infiltratie in de bodem, de uitdroging en herbevochtiging van de bodem, de voeding van de waterhoudende lagen en de afvloeiing.

In eerste instantie wordt het model gebruikt met gegevens uit meteorologische waarnemingen. Het model maakt het dan mogelijk om het debiet van een rivier op een bepaald punt te berekenen, evenals de verschillende elementen van de waterkringloop in het stroomgebied gedurende een referentieperiode.

In een tweede fase wordt de reeks meteorologische waarnemingen veranderd, rekening houdende met de klimaatwijzigingen die door het scenario beschreven werden. Daaruit volgt een nieuwe reeks debieten en andere elementen van de waterkringloop. Vervolgens wordt de impact op de waterkringloop geanalyseerd door de resultaten van de twee simulaties, uitgevoerd met het hydrologisch model, te vergelijken. Gezien het hydrologisch model niet gekoppeld wordt aan het klimaatmodel, is deze benadering zuiver statisch. Ook dit is een beperking die belangrijke gevolgen kan hebben, zoals we eerder al besproken hebben.

Een van de allereerste wetenschappelijke publicaties over dit onderwerp op internationaal vlak, toont aan dat het KMI zich vanaf de jaren 80 interesseerde voor de mogelijke impact van klimaatwijzigingen op de hydrologie (Bultot *et al.*, 1988, 1990). De hierboven beschreven methode was toonaangevend en het eerste rapport van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) van 1990 verwees ernaar. Daarna kon via verschillende projecten, waarvan sommige werden gefinancierd door het Belgische Federale Wetenschapsbeleid, worden aangetoond dat de respons van de stroomgebieden varieerde naargelang hun eigen kenmerken en dan hoofdzakelijk het infiltratie- en accumulatievermogen in waterhoudende lagen (aard van de bodems, topografie...). Inderdaad, de absorptie en de geleidelijke restitutie van de aanwas van hoeveelheden regenwater of omgekeerd, de ondersteuning van het debiet in de zomer door een watervolume dat in de winter werd verzameld, kunnen de effecten van de veranderingen in het neerslagstelsel temperen. Uiteindelijk werd de gevoeligheidsanalyse van de waterkringloop veralgemeend voor de bekkens van de Maas en de Schelde, zowel in België als stroomopwaarts in Frankrijk.

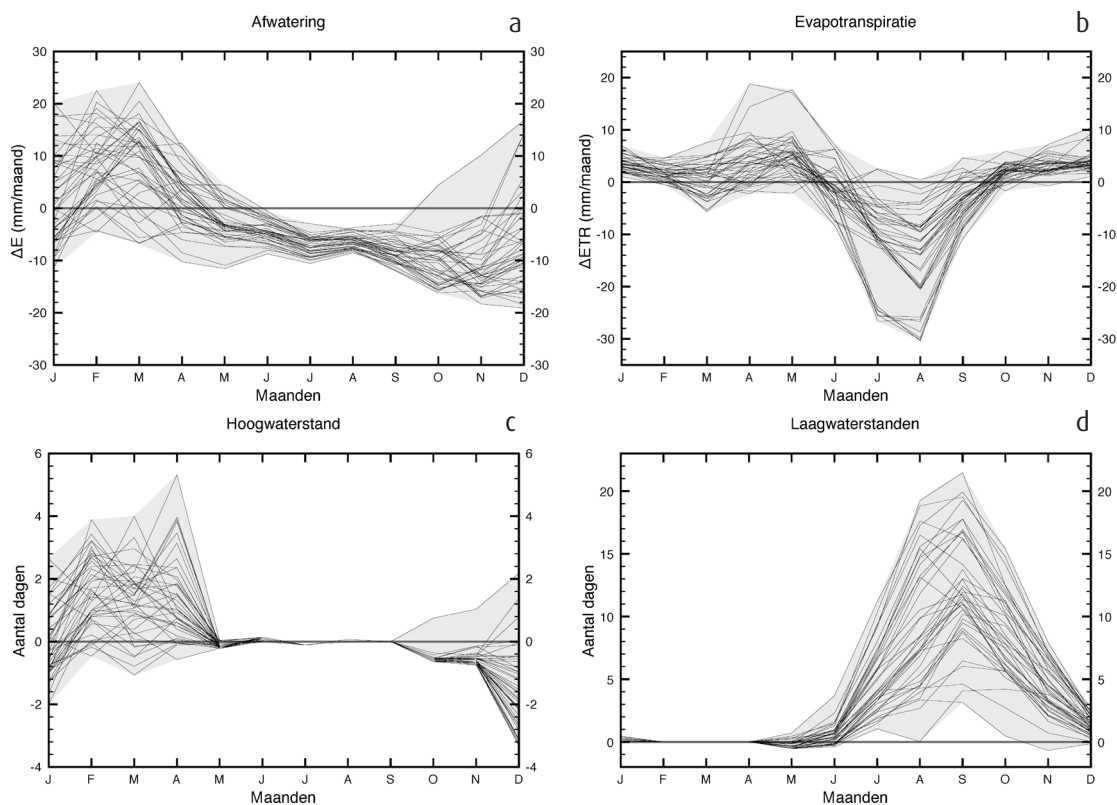
De meest recente analyse (2005-2010) werd uitgevoerd in het kader van het programma «Wetenschap voor een duurzame ontwikkeling» van het Federaal Wetenschapsbeleid, waarbij het een van hun doelstellingen is om wetenschappelijke ondersteuning te bieden aan de nationale autoriteiten. Tijdens dit project (CCI-HYDR, in samenwerking met de KU Leuven), werden de gebruikte klimaatscenario's ontwikkeld op basis van de resultaten van de klimaatsimulaties van het Europese project PRUDENCE (Baguis *et al.*, 2010). Deze simulaties werden uitgevoerd vanuit de hypothese van twee emissiescenario's van de uitstoot van broeikasgassen (SRES) gedefinieerd door het IPCC (2000) met tien regionale klimaatmodellen (RCM), waarvan de reken-domeinen genesteld zijn in vier wereldwijde circulatiemodellen (GCM). Figuur 4.6 vergelijkt de veranderingen in temperatuur en neerslag voor Midden-België voor de periode 2071-2100 ten opzichte van een referentieperiode (1961-1990). Deze scenario's simuleren een stijging van de temperatuur, ongeacht het seizoen. Op basis van deze scenario's vermindert de neerslag in de zomer ten opzichte van de referentieperiode en verhoogt hij in de winter.



Figuur 4.6 Scenario's ontwikkeld op basis van het PRUDENCE-project voor veranderingen in de temperatuur (ΔT in $^{\circ}C$, links) en relatieve veranderingen in neerslag (in $\Delta P/P$ in %, rechts). Deze projecties zijn representatief voor België tijdens de periode van 2071 tot 2100. De curven stemmen overeen met de resultaten van 41 simulaties verkregen uit tien verschillende regionale klimaatmodellen en uitstootscenario's SRES A2 en B2.

Figuur 4.7 geeft een idee wat de impact van dergelijke klimaatveranderingen op de waterkringloop voor het Maasbekken stroomopwaarts van Wezet, zou kunnen zijn. De impact op het gemiddelde maandelijkse debiet (afwatering) wordt berekend als het verschil tussen enerzijds de maandelijkse gemiddelden van de debieten die worden gesimuleerd door het hydrologische model met waargenomen meteorologische gegevens, en anderzijds de gemiddelden van de debieten die worden gesimuleerd met gegevens die zijn gewijzigd op basis van de scenario's van figuur 4.6. In de zomer bestaat de impact duidelijk uit een daling van het gemiddelde debiet, maar in de winter is de impact niet eenduidig. Figuur 4.7b toont ook de impact op de evapotranspiratie, dat is de hoeveelheid water die verdampt vanaf de bodem of die wordt afgegeven door de vegetatie. De verdampte hoeveelheid water zou het hele jaar lang groter zijn (omdat het warmer zou zijn), behalve in de zomer, aangezien de waterreserves van de bodem volgens het hydrologisch model gedaald zouden zijn.

Om deze risicoanalyse te vervolledigen, werd de impact van de scenario's op de frequentie van hoog- en laagwaterstanden geschat door de gesimuleerde debietreeksen voor het huidige klimaat te vergelijken met deze voor een gewijzigd klimaat. Nadat een drempel voor hoogwaterstand op basis van de 95ste percentiel werd vastgelegd (de p-de percentiel van de dataset is de waarde die de eerste p% van de gesorteerde gegevens onderscheidt), werd het aantal dagen waarop die drempel in de gesimuleerde reeksen voor klimaatveranderingen werd overschreden, vergeleken met het overeenkomstige aantal dagen voor het huidige klimaat. Dit verschil wordt afgebeeld in figuur 4.7c. Op vergelijkbare wijze werd een drempel voor laagwaterstand op basis van het 5de percentiel gedefinieerd en de impact ervan wordt door middel van het verschil in aantal dagen getoond in figuur 4.7d. We merken op dat het aantal dagen met laagwater duidelijk is toegenomen, ongeacht welk scenario er werd gebruikt. De impact op het aantal dagen met hoogwater is minder eensgezind: de meerderheid van de scenario's toont een daling in december en een stijging van februari tot en met april. De resultaten voor het stroomgebied van de Schelde zijn zeer vergelijkbaar met de voorgestelde resultaten in figuur 4.7.



Figuur 4.7. Hydrologische impact van de klimaatscenario's, berekend in het KMI op de afwatering (debiet omgerekend naar het oppervlak van het stroomgebied), de evapotranspiratie, het aantal dagen met hoogwater en het aantal dagen met laagwater van de Maas.

Deze gevoeligheidsanalyse brengt grote onzekerheden aan het licht. Nochtans weerspiegelen de gebruikte klimaatscenario's niet de volledige onzekerheid wat de toekomst betreft. Zo definieerde het IPCC ook nog andere emissiescenario's. Daarnaast zijn er ook andere GCM's die niet in het PRUDENCE-project opgenomen werden. Tot slot is ook de hydrologische modellering niet zonder onzekerheid over de modelstructuur en de gehanteerde parameterwaarden.

De klimaatveranderingsscenario's van het PRUDENCE-project lieten ons toe om het hydrologische gedrag van de Belgische rivieren in termen van extreme hoogwaterstanden te bestuderen (Willems *et al.*, 2010). We zijn heel specifiek geïnteresseerd in de hoogwaterstanden die zich eens per eeuw voordoen. We zeggen dan dat ze een terugkeerperiode van 100 jaar hebben. Op basis van de statistische theorie van de extremen hebben we de hoogwaterstanden met dezelfde terugkeerperiode (100 jaar) en met de voorwaarden van de scenario's, alsook met de frequentie van een 'honderdjarige' hoogwaterstand van vandaag, geschat in het toekomstige klimaat van het PRUDENCE-project. We kunnen uit deze analyse besluiten dat het debiet van de 'honderdjarige' hoogwaterstand zou kunnen verhogen voor de Maas, maar niet voor de Schelde. Aan de andere kant zou een hoogwaterstand van de Maas die een keer tijdens de laatste 100 jaar verscheen, dubbel zoveel kunnen voorkomen in het klimaat van het einde van deze eeuw. In het geval van de Schelde zou deze frequentie kunnen verlagen, wat betekent dat de zeldzame hoogwaterstanden in de Schelde van vandaag, nog schaarser worden in de toekomst. Er bestaan echter grote onzekerheden over deze schattingen en een meer gedetailleerde analyse moet deze regionale verschillen verklaren.

4.3 Weer en beslissingsondersteuning in geval van extreme gebeurtenissen

Een mogelijkheid om te anticiperen op toekomstige problemen in verband met klimaatverandering bestaat eruit om extreme weersomstandigheden die zich vandaag al geregeld voordoen en die soms zeer grote schade kunnen veroorzaken zo goed mogelijk te beheeren.

Het KMI heeft als nationaal meteorologisch centrum heel wat ervaring en expertise op het gebied van toezicht op en het voorspellen van het weer, opgebouwd. Heel specifiek werden er operationele waarschuwingsprocedures in het leven geroepen. Deze procedures worden regelmatig verbeterd of nieuwe procedures worden ontwikkeld op basis van de vorderingen in het onderzoek of verzoeken voor specifieke producten en diensten.

De grenzen van de meteorologische voorspelbaarheid door zuiver deterministische methoden, zowel in termen van tijd als van resolutie, verschuiven. De nieuwe meteorologische methoden, de zogenaamde «ensemble prognoses¹⁵» kunnen de beleidsvormers extra hulp, die in sommige gevallen zeer nuttig kan zijn, bieden om het proces van besluitvorming op langere termijn dan enkele dagen te verbeteren. Zoals we in de inleiding van dit hoofdstuk reeds aangaven, is het nog steeds nodig dat ook hier, tussen de aanbieders van prognoses en de beleidsmakers, de relaties die vanuit een zuiver sequentieel patroon ontstaan zich ontwikkelen naar een patroon van «stakeholders» (zie de inleiding van dit hoofdstuk).

We bekijken dit meer concreet voor de meteorologie en de waarschuwingen in het bijzonder

Traditioneel gezien zal een beslissing in het kader van «gevoeligheid voor weersomstandigheden» gemaakt worden op basis van verschillende parameters waaronder ook de weervoorspellingen. Deze voorspellingen zijn gebaseerd op de kennis van het gedrag van de atmosfeer, onderdeel van de basiswetenschappen. Binnen het sequentieel schema (zie eerste schema onder 4.1) stelt een gebruiker de klassieke vraag: «*Welk weer mogen we in de nabije toekomst verwachten (een paar uur tot een paar dagen)?*». De meteoroloog antwoordt op basis van de beschikbare gegevens, waarop de gebruiker een consistente beslissing neemt om een geplande activiteit al dan niet te laten doorgaan. Meestal wordt dit besluit genomen buiten medeweten van de meteoroloog.

In de 20ste eeuw kenden de basiswetenschappen, die de operationele voorspelling ondersteunen, net zoals de technologische hulpmiddelen die informatie verzamelen en verspreiden, een aanzienlijke vooruitgang en dit proces vordert nog steeds elke dag. Enkele recente ontwikkelingen zijn nu binnen het bereik van verschillende gebruikers. Enerzijds door zijn toevlucht te nemen tot steeds meer real-time observaties, of door een combinatie van verschillende voorspellingsmethoden (deterministische en ensemble), maar ook, en misschien nog wel meer, door de groeiende interactie tussen de gebruiker en de aanbieder die mogelijk wordt gemaakt door de huidige informatie- en communicatietechnologieën.

De vraag van de gebruikers in een 'stakeholders' schema (zie tweede schema onder 4.1) klinkt als volgt: «*Welke vragen kunnen meteorologen beantwoorden om me te helpen om de risico's gedurende het hele beslissingsproces in te schatten?*». Afhankelijk van de situatie kunnen real-time observaties, hun extrapolaties op zeer korte termijn (enkele uren), modellen op korte termijn, modellen op middellange termijn (15 dagen), historische klimatologie, of een combinatie van verschillende methoden geïntegreerd in elkaar, de besluitvormers ondersteunen tijdens het beslissingsproces om de schadelijke effecten van weerfenomenen te beperken. Regelmatige interacties tussen voorspellers en gebruikers zullen mogelijk en soms zelfs onmisbaar zijn binnen dit schema.

We stellen hieronder enkele voorbeelden voor van de bijdragen die het KMI kan leveren aan externe gebruikers op het gebied van weersverwachtingen en waarschuwingen bij risicovolle weersituaties.

Hulp in real-time monitoring van het niveau van de waterlopen voor regionale hydrologische diensten

Een belangrijke rol van de regionale hydrologische diensten bestaat uit het verspreiden van pre-meldingen en waarschuwingen voor het aanzwellende waterniveau van rivieren en voor overstromingsrisico. Hiervoor is het verzamelen van neerslaggegevens in real time, in aanvulling op de neerslagvoorspellingen, van essentieel belang en de regionale diensten beschikken, net zoals het KMI, over automatische neerslagmeetpunten op verschillende plaatsen van het land.

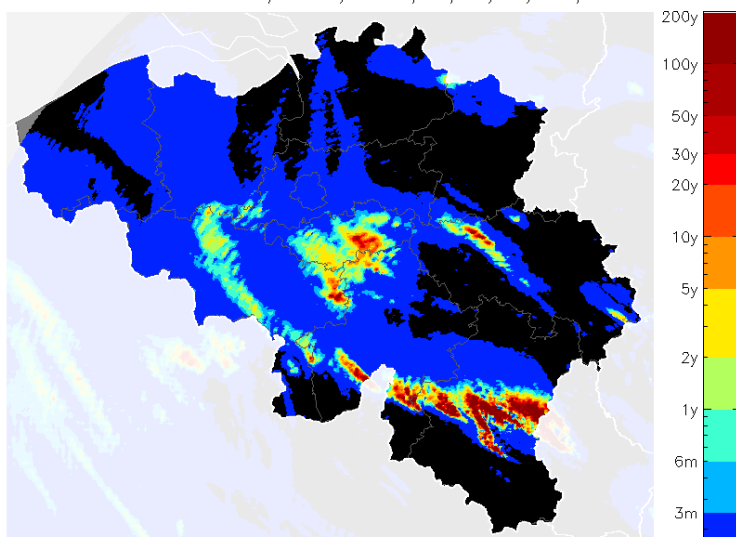
Van haar kant bezit het KMI ook twee hydrometeorologische radars die de verdeling van de neerslag bij hoge ruimtelijke resolutie in het hele land, ook in real-time, kunnen inschatten. De eerste radar werd geïnstalleerd in 2000 in Wideumont (Libramont) op de Ardense hoogten, en de tweede in 2012 in Jabbeke, niet ver van de Belgische kust.

De combinatie van de neerslagwaarnemingen aan de grond en de radarschattingen laat vandaag een relatief betrouwbare kennis van de positionering van de neerslaggebieden en hun intensiteit toe. Wat neerslagwaarnemingen betreft, werken het KMI en de regionale hydrologische diensten reeds geruime jaren samen om dankzij het wederzijds ter beschikking stellen van de neerslaggegevens van hun netwerken zoveel mogelijk informatie over de neerslag in alle gebieden van het land te verzamelen.

Op verzoek van de hydrologische dienst van het Waalse Gewest heeft het KMI in 2008 een tool ontwikkeld voor de analyse in real-time van de neerslag die over het hele land valt. De neerslag, geschat door de weerradar van Wideumont voor verschillende tijdsperiodes (bijvoorbeeld de laatste 10 minuten, 60 minuten, 24 uur), wordt vergeleken met de statistieken van de neerslaggegevens die beschikbaar zijn voor dezelfde periodes. Dit helpt visueel om snel het niveau van de afwijking, en dus het potentieel gevaar, van de recente regenval te beoordelen (zie figuur 4.8).

15 De 'ensemble prognoses' zijn gebaseerd op het principe van de gevoeligheid voor beginvoorwaarden beschreven in hoofdstuk 3.

Maximum return period for 02/06/2008 15:30 UT (end) Radar Wideumont
Used accumulations: 10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 6h, 12h, 24h



Figuur 4.8. Dit beeld is een combinatie van klimatologische statistieken (IDF-curves) en radarschattingen voor de neerslaghoeveelheid. Dit maakt het mogelijk om in real-time de gemiddelde terugkeerperiode van een aan de gang zijnde regenval, te beoordelen. Het product «RAD-IDF» werd ontwikkeld in opdracht van «La Direction de la Gestion hydrologique intégrée (DGO Mobilité et Voies hydrauliques)» van de «Service public de Wallonie».

Hulp aan instanties die belast zijn met de volksgezondheid bij hitte

Het KMI, de Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu (IRCEL, verantwoordelijk voor het monitoren en voorspellen van de luchtkwaliteit) en de verschillende diensten die belast zijn met de volksgezondheid (federaal, gemeenschappen en gewesten), hebben de historische hitteperiodes (bijvoorbeeld 1976, 2003, 2006) en hun impact op de gezondheid van gevoelige personen geanalyseerd.

Deze diensten, die respectievelijk hun informatie onderling uitwisselen, zijn binnen een werkgroep overeengekomen om het «hitte-ozonplan» te baseren op drempels van verhoogde waakzaamheid en waarschuwingen te geven volgens afgesproken codes, waarbij elk op zich een reeks beslissingen (mobilisatie van zorgverleners, verspreiding in de media, signalisatieborden...) die de schade beperken, kan nemen. In verband met dit plan heeft het KMI in de afgelopen jaren «hitte»-waarschuwingen ingesteld die per provincie en voor de kust informatie geven over de ernst (in termen van gevolgen voor de gezondheid) van de hoge temperaturen voor de komende uren en dagen (zie figuur 4.9).

Regio	Dagen			
	16 Aug	17 Aug	18 Aug	19 Aug
Kust				
West-Vlaanderen				
Oost-Vlaanderen				
Antwerpen				
Limburg				
Brabant				
Luik				
Henegouwen				
Namen				
Luxemburg				

Figuur 4.9. Een voorbeeld van een «hitte»-waarschuwing, uitgegeven door het KMI op 16/08/2012. Deze waarschuwingen zijn gebaseerd op een 4-kleuren-code (groen, geel, oranje en rood). De kleur toont de meest ernstige situatie, afhankelijk van het aantal dagen dat het fenomeen aanhoudt en de waarden (op 1 dag) of gemiddelde waarden (op 2 of 3 dagen) van de minimum- en maximumtemperaturen gemeenten of voorspeld voor de betreffende periode. Het rode niveau (het meest ernstige) wordt alleen gebruikt na overleg tussen het KMI en IRCEL en na analyse van de voorspellingen voor de concentratie van ozon in de lagere atmosfeer.

Hulp aan de beheerders van stormbekkens bij hevige en overvloedige regen

Gebaseerd op de kwetsbaarheid van een bepaalde plaats, zou het ideaal zijn om samen met ontwerpers van een ontwikkelingsproject, buurtbewoners, overheden..., de gevreesde extreme gebeurtenis te definiëren. Voor dit doel baseert men zich onder meer op de beschikbare archieven (dat wil zeggen die van de regenval in het gebied), maar ook op ervaring van de gebruiker, op kennis van de huidige configuratie van de site en de verwachte configuratie in een nabije toekomst. Vervolgens beoordeelt men het vermogen van de numerieke modellen om het risico te meten binnen bepaalde nuttige operationele termijnen en men bepaalt, via overleg tussen de belanghebbenden drempels voor een pre-alarm en/of alarm. Tenslotte wordt een operationeel systeem opgesteld dat opvolging voorziet en mogelijke interacties tussen de belanghebbenden omvat.

In het geval van intense en zware regenval, vaak onweerachtig, heeft de gebruiker-besliser in overleg met het KMI bijvoorbeeld een pre-alarm drempel binnen een termijn van enkele dagen afgesproken. De ensemble-voorspellingen laten toe om meerdere dagen op voorhand de kans op overschrijding van een drempelwaarde van neerslag met schadelijke gevolgen te ontdekken. Daarna kan, naar gelang de gebeurtenis dichterbij nadert, het risico geleidelijk aan verduidelijkt worden, hetzij door bevestiging van de oorspronkelijk aankondiging, hetzij door bijstelling naar boven of naar beneden (zie figuur 4.10). Direct contact tussen de gebruiker en het KMI maakt aanpassingen aan geplande of reeds genomen besluiten gedurende de daarop volgende uren en dagen mogelijk.

Kans op extreem zware regenval (> 40 mm/6 u) over het Brussels Gewest

Verzendingsdatum: 27/07/2012 04:24

Begin van verschijnsel: 27/07/2012 06:00

+0	+6	+12	+18	+24	+30	+36	+42
27/07/2012 06:00 - 27/07/2012 12:00	27/07/2012 12:00 - 27/07/2012 18:00	27/07/2012 18:00 - 28/07/2012 00:00	28/07/2012 00:00 - 28/07/2012 06:00	28/07/2012 06:00 - 28/07/2012 12:00	28/07/2012 12:00 - 28/07/2012 18:00	28/07/2012 18:00 - 29/07/2012 00:00	29/07/2012 00:00 - 29/07/2012 06:00

Commentaar: Een vrij actieve regenzone trekt vanavond en volgende nacht over ons land. Onweersbuien kunnen al deze namiddag uitbreken. Nog meer onweersbuien worden verwacht tijdens de avond en in de nacht. De onweders kunnen soms vrij hevig zijn met heel veel regen.

Figuur 4.10. Voorbeeld van een risico-waarschuwing voor «kritieke» regenval (meer dan 40 mm in 6 uur) die aanleiding kan geven tot lokale overstromingen. Deze waarschuwingen worden via telefoon, sms en e-mail naar de gebruiker verzonden wanneer dergelijke gevaarlijke stormachtige situaties in de Brusselse regio verwacht worden. De voorspelling is verdeeld in tijdssegmenten van 6 uur. De risicosegmenten zijn rood gekleurd, de andere groen. Een korte verklarende commentaar is onder de tabel beschikbaar.

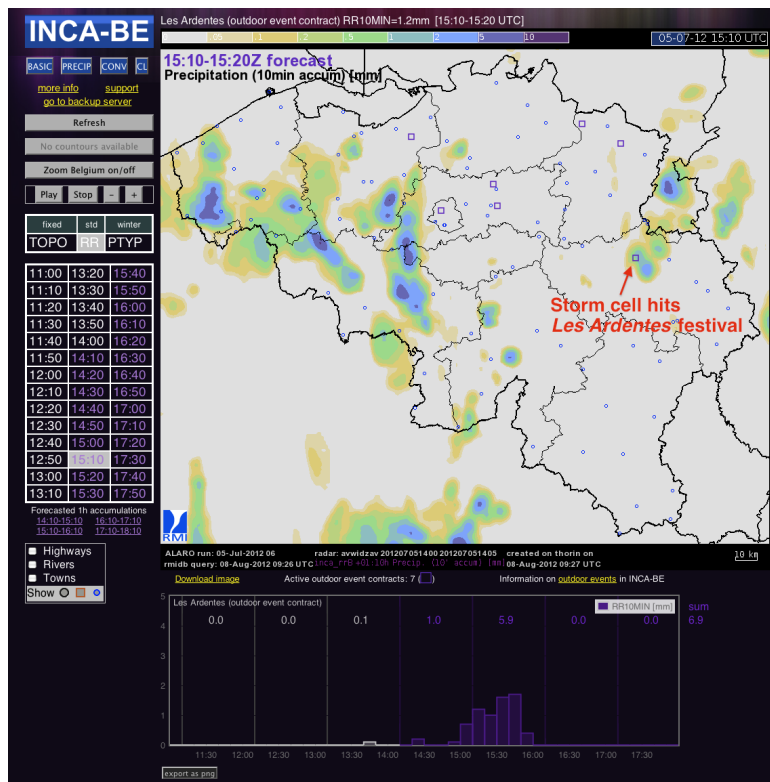
Hulp voor organisatoren van buitenactiviteiten bij zware onweders

Het Belgische grondgebied wordt de klok rond bewaakt door de teams van weervoorspellers van het weerbureau van het KMI. Bij onweerachtige omstandigheden leveren de weerradars en het bliksemdetectiesysteem van het KMI in real-time onontbeerlijke informatie over de toestand van de atmosfeer. Dit wordt nog belangrijker tijdens het «mooie» seizoen, wanneer de vele outdoor-activiteiten hele massa's volk bij elkaar krijgen.

Het KMI en de overheden hebben lessen geleerd uit de recente, soms ongelukkige, ervaringen. We zullen ons nog lang de omstandigheden herinneren die het Pukkelpopfestival in augustus 2011 in rouw onderdompelden. Hoewel de voorspellingen en waarschuwingen voor deze periode naar behoren werden vastgesteld en verspreid, was het niet mogelijk om de rampzalige gevolgen te voorkomen. Deze zaak, die een schoolvoorbeeld is geworden, heeft geleid tot een heroverweging van de relaties tussen het KMI, het crisiscentrum en de festivalorganisatoren en het verbeteren van veiligheids- en voorzorgsmaatregelen die de autoriteiten toelaten om alsnog dergelijke activiteiten te organiseren. Hoewel het risico op ongevallen ten gevolge van het weer tijdens onweerachtige of andere omstandigheden nooit volledig uitgesloten zal zijn, is het wel zeker dat het mogelijk is deze risico's te beperken door het inzetten van de meest geschikte preventieve maatregelen.

Vandaag de dag worden de gegevens van buitenactiviteiten waarvan de organisatoren zich bekend gemaakt hebben, geregistreerd en in kaart gebracht. Op verzoek van de organisator bezorgt het KMI hem net voor en tijdens het evenement diverse nuttige weersinformatie en geeft hem de mogelijkheid om direct contact op te nemen met de voorspellers van het KMI indien hij dit noodzakelijk acht.

Om de zeer kortetermijnvoorspellingen op een specifieke locatie te bekijken en te analyseren, maken de voorspellers nu gebruik van het INCA-BE-systeem. Het is een voorspellingssysteem op zeer korte termijn (tot 4 uur voor meerslag) dat verschillende observatiesystemen en de resultaten van het numerieke weervoorspellingsmodel ALARO van het KMI combineert. De waarnemingen worden verstrekt door de weerradars, de satelliet Meteosat, de automatische grondstations van het KMI en de aangrenzende meteorologische diensten. Door nauwe samenwerking met de regionale hydrologische diensten van Vlaanderen, Wallonië en Brussel zijn ook de neerslaggegevens van deze diensten in real-time geïntegreerd in het voorspellingssysteem. Figuur 4.11 toont een toepassingsvoorbeeld van het INCA-BE systeem.



Figuur 4.11. Vooruitzichten voor de neerslag in het land tussen 15.10u en 15.20u UTC door het voorspellingsysteem van het KMI op zeer korte termijn, (INCA-BE), voor de onweersachtige periode van 5 juli 2012 (de kaart werd gemaakt om 14u UTC). Voor het terrein van het festival "Les Ardentes", dat die dag in Luik doorging, toont het onderste deel van de afbeelding met intervallen van 10 minuten, ook de regenval (in mm) gemeten vóór 14u en de voorspelling tot 18u.

Een onderzoeksproject in uitvoering: het project PLURISK

De impact van onweders en zware regenval is vooral voelbaar in de stad waar het rioolstelsel snel verzadigd kan zijn. De toenemende verstedelijking dreigt de kwetsbaarheid voor deze weersomstandigheden nog te verhogen. In dit perspectief draagt het KMI bij aan het project PLURISK dat zich specifiek toelegt op voorspellingen en beheer van risico's ten gevolge van hevige regenval in stedelijke gebieden. Dit vierjarig project wordt gefinancierd door het Federaal Wetenschapsbeleid in het kader van het programma «Wetenschap voor een duurzame ontwikkeling» en wordt uitgevoerd in samenwerking met twee universiteiten, de KU Leuven en de ULg. De bijdrage van het KMI bestaat er in om de voorspellingen van intense lokale regenval op korte termijn te verfijnen door het ontwikkelen van een systeem dat het lokaliseren en opvolgen van de onweersbuien toelaat. Een belangrijk onderdeel van het project omvat tevens een beoordeling van de sociaaleconomische effecten van deze overstromingen en het voorstellen van manieren om de negatieve effecten terug te dringen. De communicatie over de risico's en het waarschuwingsproces worden ook nader besproken.

De beheersdiensten van water uit verschillende steden en stedelijke gemeenschappen zijn betrokken bij het project als lid van het toezichtscomité. Het voorspellingsysteem zal dus ook worden getest op proeflocaties in nauwe samenwerking met de eindgebruikers. Bijgevolg is dit project een goed voorbeeld van een interactieve operatie waarbij belanghebbenden bij de ontwikkeling van het project betrokken worden vanaf het begin.

4.4 Besluit

De veranderende relatie tussen wetenschap en samenleving impliceert een intensieve samenspraak tussen alle sociale actoren die in de wetenschappelijke methode een middel om relevante besluiten op basis van kennis te nemen zien. Deze interactie, die we aanraden en die we geleidelijk aangaan met verschillende publieke en private partners, is zich volgens ons meer aan het verspreiden op veel wetenschappelijke gebieden. In dit hoofdstuk hebben we deze aanpak geïllustreerd met behulp van enkele voorbeelden op meteorologisch en klimatologisch gebied.

Bibliografie

Baguis, P., Roulin, E., Willems, P. and Ntegeka, V.: Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium, *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 273-286, 2010.

Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G.L., Gellens D. and Meulenberghs, F.: Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance - A case study for Belgium. *J. Hydrol.*, 99, 319-347, 1988.

Bultot, F., Dupriez, G. and Gellens, D.: Simulation of land use changes and impacts on the water balance - A case study for Belgium. *J. Hydrol.*, 114, 327-348, 1990.

Hamdi, R.: Estimating urban heat island effects on the temperature series of Uccle (Brussels, Belgium) using remote sensing data and a land surface scheme. *Remote Sens.*, 2, 2773-2784, 2010.

Hamdi, R., Termonia, P. and Baguis, P.: Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region : A case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. *Int. J. Climatol.*, 31, 1959-1974, 2011.

Hamdi, R., Degrauwe, D. and Termonia, P.: Coupling the Town Energy Balance (TEB) scheme to an operational limited area NWP model : Evaluation for a highly urbanized area, Belgium. *Weather and Forecasting*, 27, 323-344, 2012.

Hamdi, R., Van de Vyver, H., De Troch, R. and Termonia, P.: Assessment of three dynamical urban climate downscaling methods : Brussels's future urban heat island under an A1B emission scenario. *Int. J. Climatol.*, 34, 978-999, 2014.

Hamdi, R., Deckmyn, A., Termonia, P., Demarée, G.R., Baguis, P., Vanhuyse, S. and Wolff, E.: Effects of historical urbanization in the Brussels Capital Region on surface air temperature time series : A model study. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2181-2196, 2009.

IPCC: Special Report for Emission Scenarios (SRES), 2000.

Klimaateffectschetsboek West- en Oost-Vlaanderen. IRM-KMI, Bodemkundige dienst van België, KNMI en DHV, in opdracht van de provincies West- en Oost Vlaanderen, 2012.

Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E. and Willems, P.: Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *J. Hydrol.*, 508C, 307-321, 2014.

Vanhuyse, S., Depireux, J. et Wolff, E.: Etude de l'évolution de l'imperméabilisation du sol en Région de Bruxelles-Capitale. IGEAT, ULB, Brussels, Belgium, 60 pp, 2006.

Willems, P., Baguis, P., Ntegeka, V. and Roulin, E.: Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems in Belgium «CCI-HYDR». Final Report, Brussels, Belgian Science Policy, Research Programme Science for a Sustainable Development, 110 p., 2010.