

Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

Oog voor het klimaat

2015

KMI

Dankwoord

Bij het publiceren van dit werk brengen we graag hulde aan de opeenvolgende generaties waarnemers van het KMI of elders in het land, waaronder de vele vrijwilligers van het klimatologisch netwerk die met veel enthousiasme bijgedragen hebben aan het operationele en wetenschappelijke werk van onze federale instelling.

Auteurs

Coördinator: Christian Tricot

Hoofdstuk 1: Christian Tricot, Marc Vandiepenbeeck, Hans Van de Vyver, Luc Debontridder.

Hoofdstuk 2: Steven Dewitte, Hugo De Backer, Roeland Van Malderen, Alexander Mangold, Joseph Hus.

Hoofdstuk 3: Stephane Vannitsem, Rozemien de Troch, Rafiq Hamdi.

Hoofdstuk 4: François Brouyaux, Rozemien de Troch, Rafiq Hamdi, Emmanuel Roulin, Christian Tricot.

De coördinator bedankt de vele collega's die de teksten gedurende het schrijfproces telkens weer herlezen en becommentarieerd hebben, en heel in het bijzonder mevrouw An Willems en mevrouw Carine Beetens.

INHOUD

Inleiding ... 2

Hoofdstuk 1. De evolutie van het klimaat in België ... 4

1.1 Inleiding ... 4

1.2 Klimatologische tendensen ... 5

1.2.1 Temperaturen ... 5

1.2.2 Neerslag ... 14

1.2.3 Wind ... 21

1.2.4 Zonnestraling ... 24

1.3 Samenvatting ... 25

1.4 Perspectieven ... 26

Hoofdstuk 2. Waarnemingen die bijdragen tot het onderzoek naar de mechanismen achter de klimaatverandering ... 28

2.1 Inleiding ... 28

2.2 Zonnestraling ... 28

2.3 Het KMI en Ozon ... 37

2.4 Waterdamponderzoek aan het KMI ... 41

2.5 Onderzoek in Antarctica door het KMI ... 43

2.6 Andere klimaatgegevens gemeten door het KMI ... 46

Hoofdstuk 3. Onderzoek over klimaatvoorspelling en klimaatmodellering ... 50

3.1 Inleiding ... 50

3.2 Voorspelling van het weer en het klimaat - Algemeen ... 52

3.3 Fundamentele benadering van de dynamica van de atmosfeer en het klimaat ... 54

3.4 Regionale klimaatmodellering ... 58

3.5 Algemene conclusies ... 67

Hoofdstuk 4. Hulp bij het beslissingsproces in meteorologie en klimatologie ... 69

4.1 Inleiding ... 69

4.2 Klimatologisch domein ... 70

4.2.1 Het stedelijk klimaat ... 70

4.2.2 Het klimaat in ons land ... 74

4.3 Weer en beslissingsondersteuning in geval van extreme gebeurtenissen ... 78

4.4 Besluit ... 84

INLEIDING

Naast de door het publiek welgekende missies zoals de meteorologische voorspellingen en de opvolging van atmosferische fenomenen, is het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België ook betrokken bij de monitoring en de studie van het klimaat, zoals alle nationale meteorologische diensten in de wereld. Als de meteorologie de wetenschap is die dagelijks de toestand van de atmosfeer bestudeert, is de klimatologie de studie van de statistische eigenschappen van het weer op een bepaald grondgebied, zowel voor het verleden als voor de toekomst.

De analyse van lange series van observaties maakt de opsporing van eventuele wijzigingen in het klimaat mogelijk. Zo observeert men in het bijzonder een opwarming aan het station van Ukkel sinds het begin van de 20ste eeuw, en de 18 warmste jaren hebben plaatsgevonden gedurende de laatste 26 jaar. Het jaar 2014 was het warmste jaar ooit sinds het begin van de waarnemingen in Brussel-Ukkel in 1833, gevolgd door 2011, 2007 en 2006.

In 1979 organiseerde de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) de eerste «Wereldconferentie over het Klimaat» in Genève. De conferentie concludeert dat de antropogene emissies van broeikasgassen een langetermijnimpact hebben op het klimaat en de intergouvernementele groep van deskundigen over de evolutie van het klimaat (IPCC in het Engels) wordt in dit kader in 1988 opgericht. De opdracht van de IPCC is regelmatig een staat te maken van de wetenschappelijke kennis, gelinkt met het huidig klimaat en de evolutie ervan.

In november 2014 heeft de IPCC in Kopenhagen het syntheseverslag gepresenteerd van de 3 delen van zijn 5de evaluatierapport, respectievelijk gewijd aan de wetenschappelijke bewijzen, aan de impacts en de adaptatie, en aan de oplossingen voor mitigatie. Dit 5de rapport illustreert, zoals de vorige, de invloed van de mens op het klimaatsysteem, de reeds waargenomen wijzigingen en de impacts op de fysische, biologische, menselijke systemen, de toekomstige risico's en de middelen om deze aan te pakken door de combinatie van mitigatie- en adaptatie acties[1].

België heeft ook aandacht voor het belang van de klimaatproblematiek. In 2009 heeft ons land een Nationaal Klimaatplan goedgekeurd. In dit kader, heeft de Nationale Klimaatcommissie (NKC) een werkgroep opgericht, die belast is met het definiëren van een nationale adaptatiestrategie. Deze werd in 2010 goedgekeurd door de NKC en heeft 3 objectieven : een betere coherentie tussen de adaptatie activiteiten in België ; een betere communicatie op nationaal, Europees en internationaal niveau en de uitwerking van een Nationaal Adaptatieplan.

In 2009 heeft de derde wereldconferentie over het klimaat in Genève, gezien het groeiend belang van de klimaatproblematiek, het globaal kader voor de klimaatdiensten (GFCS in het Engels) gelanceerd. Het doel is om aan de beslissers en aan de andere gebruikers, gegevens en kwalitatieve klimatologische informatie te leveren, aangepast aan hun noden, om ze te helpen het hoofd te bieden aan de risico's die gelinkt zijn met het klimaat en om met kennis van zaken beslissingen te kunnen nemen. Het globaal kader is een VN-initiatief, geleid door de WMO, die specifiek oogt op de coördinatie van de wereldwijde inspanningen teneinde de doelstellingen te bereiken.

In dit kader wordt, op Belgisch niveau, de oprichting van een Klimaat-excellentiecentrum overwogen om de verbintenissen, die genomen werden door België, te kunnen beantwoorden, alsook om aan deze duidelijk geïdentificeerde nood te kunnen beantwoorden. Het KMI is van plan om haar deskundigheid aan te bieden, zowel op het niveau van de burgers, wetenschappers, beslissingnemers, economische of institutionele actoren.

Het belang van de klimaatproblematiek dat sinds meerdere jaren toeneemt, gekoppeld met de groeiende mediatisering ervan en de terechte bevragingen die dit met zich meebrengt, had het KMI in 2008 ertoe gebracht een eerste rapport te publiceren over haar activiteiten op het gebied van het klimaat, genaamd «Oog voor het klimaat». Het document had vooreerst als doel het informeren van het grote publiek *«over de wetenschappelijke en operationele inbreng van het KMI aan de collectieve internationale inspanningen die van belang zijn voor de studie van het klimaat alsook over het groeiende begrip van de natuurkundige grondbeginselen van ons klimaat»*. Het huidig document heeft dezelfde doelstellingen en is een complete update van het verslag van 2008.

1 Met *mitigatie* bedoelt men de metingen die als doel hebben het verminderen van de antropogene druk op het klimaat, namelijk de vermindering van de broeikasgasemissies. Met *adaptatie* worden de strategieën bedoeld, die de menselijke systemen toelaten de schadelijke effecten van de klimaatverandering en de voordelige opportuniteiten ervan te benutten.

De inhoud van de verschillende hoofdstukken van deze brochure wordt als volgt voorgesteld:

1. De beschrijving van de voornaamste evoluties van het klimaat, detecteerbaar in België door middel van de analyse van de langste series van klimaatgegevens, aan de oppervlakte waargenomen (hoofdstuk 1) ;

2. De waarnemingen en het onderzoek door het KMI ondernomen op internationaal niveau over de zonnestraling, de stralingsbalans aan de top van de atmosfeer, de waterdamp, de atmosferische ozon, de aerosols, het magnetisme, de kosmische stralen (hoofdstuk 2) ;

3. Het onderzoek in klimatologische dynamica en de regionale klimaatmodellering uitgevoerd door het KMI in het kader van internationale onderzoeksprogramma's (hoofdstuk 3) ;

4. Een aantal voorbeelden betreffende de inbreng van het KMI bij beslissingshulp in meteorologie en klimatologie, pertinent in het kader van het voorkomen van de extreme fenomenen of in het kader van de aanpassing van onze maatschappij aan de evoluties van het klimaat en de veranderlijkheid ervan (hoofdstuk 4).

In de hoop dat dit verslag u op nuttige wijze zal informeren over een wetenschappelijk onderwerp dat geregeld in de actualiteit naar voor komt, wensen we u een aangename lectuur ervan.

Daniel Gellens
Directeur-Generaal a.i. van het KMI

HOOFDSTUK 1. DE EVOLUTIE VAN HET KLIMAAT IN BELGIË

1.1 Inleiding

Is het klimaat van ons land in het verleden veranderd? Verandert ons klimaat nu? Zijn de neerslaghoeveelheden bij onweerstijd overvloediger, komen zij meer voor? Zijn er meer hittegolven? Dit zijn enkele van de vele vragen die dagelijks aan het KMI worden gesteld sinds de problematiek van de klimaatveranderingen regelmatig opduikt in de media.

In een poging om op deze vragen een antwoord te geven, stellen wij in dit hoofdstuk de resultaten voor van meerdere trendanalyses tijdens de 20ste eeuw, uitgevoerd op een reeks klimatologische parameters. De studie van het klimaat van een bepaalde regio en de evolutie ervan is niet mogelijk tenzij men over reeksen waarnemingen van hoge kwaliteit beschikt die over een voldoende lange periode werden uitgevoerd. Daarom zullen we, voor we een reeks resultaten van de trendanalyses van het klimaat in ons land voorstellen, eerst het netwerk van de waarnemingen dat door de wetenschappers gebruikt kan worden, beschrijven.

De langste reeksen klimatologische waarnemingen in België zijn die van de regio Brussel, die al sinds 1833 op regelmatige basis uitgevoerd worden. Eerst in Sint-Joost-ten-Node (op de oude site van de Sterrenwacht van België) en daarna in Ukkel vanaf 1886. Toen moest de Sterrenwacht naar de zuidelijke rand van de stad verhuizen om een betere omgeving te hebben voor de astronomische waarnemingen. We beschikken dus over reeksen metingen van meer dan 100 jaar voor de temperatuur, de luchtvochtigheid, de hoeveelheid en het aantal dagen neerslag, de luchtdruk, de windsnelheid, de zonneschijnduur, het aantal dagen met sneeuw en de sneeuwbedekking van de bodem.

Het KMI heeft studies van hoge kwaliteit uitgevoerd op de waarnemingen van Sint-Joost-ten-Node/Ukkel om ze zo goed mogelijk te “homogeniseren”. Deze homogenisering werd dikwijls enkel voor de maandelijkse waarden van de parameters uitgevoerd. Om een klimatologische reeks te homogeniseren moeten de tijdelijke tendensen, die in een reeks voorkomen door niet-klimatologische factoren[2], geëlimineerd worden. De verplaatsing van het station van Sint-Joost-ten-Node naar de waarnemingsplaats van Ukkel, bijvoorbeeld, heeft gezorgd voor een wijziging in de temperatuurwaarden door de verandering van de eigenschappen van de omgeving (hoogte, openheid van het meetpunt, ...). Om dit probleem op te lossen werd tussen 1886 en 1890 de temperatuur op beide waarnemingsplaatsen tegelijkertijd gemeten. Na de analyse van de verschillen tussen de twee metingen, werden de gemiddelde maandtemperaturen, gemeten in Sint-Joost-ten-Node tussen 1833 en 1885, “verbeterd” om ze “aan te passen” aan de metingen die daarna in Ukkel uitgevoerd werden. Dankzij dit werk hebben we nu een thermometrische reeks van meer dan 180 jaar waaruit we, door analyse, kunnen afleiden of er tijdens die periode eventueel een thermometrische tendens was in de regio Brussel.

Voor de studie van het regionale klimaat en zijn evolutie worden er heel nuttige data gehaald uit de meetgegevens die het Belgisch klimatologische netwerk ter beschikking stelt. Dit netwerk, met vandaag al meer dan 250 meetpunten, werd opgericht in de jaren 1870. Het bestaat uit quasi vrijwillige waarnemers die elke ochtend rond 8 uur, nauwgezet een aantal waarden opmeten. Deze waarden zijn bijvoorbeeld de hoeveelheid neerslag in 24 uur en enkelen onder hen meten ook de minimum- en maximumtemperaturen. De bedoeling van dit netwerk is metingen te hebben van het hele Belgische grondgebied, maar de homogeniteit van die reeksen is minder zeker dan in Ukkel en het aantal stations dat reeksen metingen heeft van meer dan 50 jaar is vrij beperkt.

Op de vliegvelden van de Luchtmacht (militaire luchtvaart) en Belgocontrol (burgerluchtvaart) volgen ook professionele waarnemers de evolutie van het weer en geven deze waardevolle informatie door aan het KMI. Deze vijftiental stations zijn bijna allemaal al verschillende decennia operationeel; hun waarnemingsplaats is dikwijls zeer open zodat er geen hinderlijke invloed is van obstakels die zich in de buurt bevinden.

2 Men zegt dat deze factoren aan de basis liggen van de “heterogeniteit” van de reeks.

1.2 Klimatologische tendensen

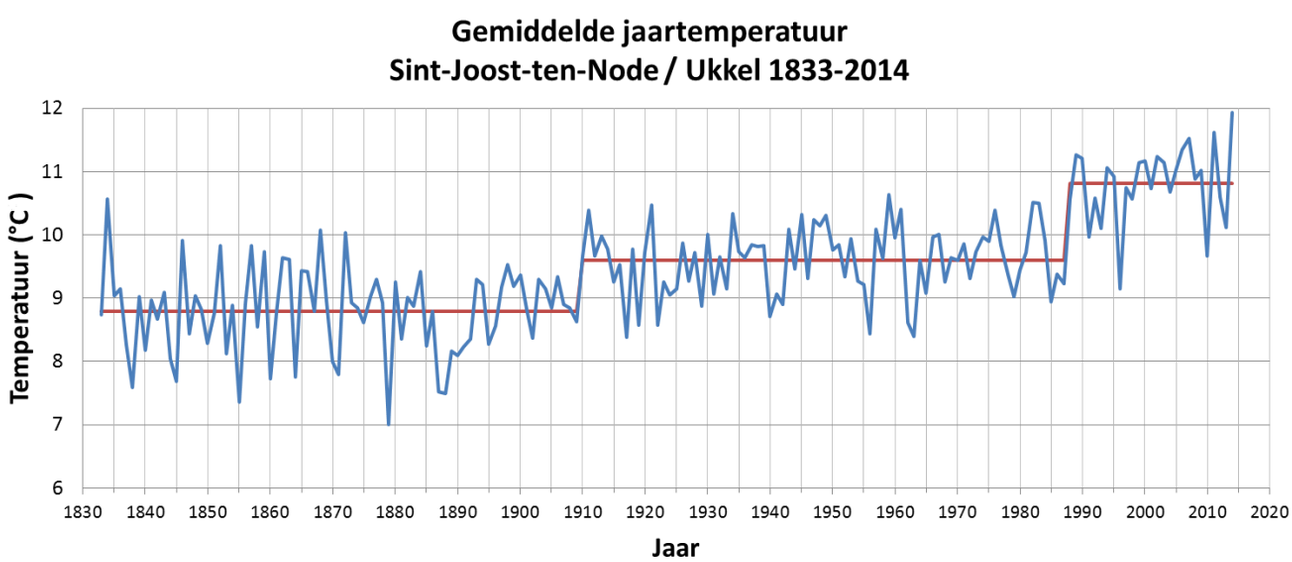
De statistische analyse van de langste klimatologische reeksen van Sint-Joost-ten-Node/Ukkel en van de gegevens van enkele andere stations in het land laten het KMI toe het Belgische klimaat te "surveilleren" en zijn evolutie te analyseren. In de actuele context van de studie van de klimaatveranderingen op planetaire schaal[3] zullen wij, als dit mogelijk is, antwoorden op de vaakst gestelde vragen van het publiek en de media wat de evolutie van het Belgische klimaat betreft.

1.2.1 Temperaturen

Stijgen de temperaturen?

De temperaturen en hun evolutie zijn interessant voor verschillende domeinen of activiteitensectoren, zoals de landbouw, de energieconsumptie, het hogere sterftecijfer bij risicobevolkingen en de geografische spreiding van de fauna.

Om te antwoorden op de gestelde vraag kunnen we best de lange homogene reeksen met temperaturen van Sint-Joost-ten-Node en Ukkel bestuderen. Figuur 1.1 geeft eerst en vooral de evolutie van de gemiddelde jaartemperatuur tussen 1833 en 2014. Voor de beschouwde periode werd de temperatuur aangepast volgens deze gemeten in een standaard gesloten thermometerhut. We zien dat er een globale opwarming is van ongeveer 2°C in die periode. De stijging van de temperaturen was niet gelijkmatig. Zij deed zich voor in twee relatief abrupte etappes: er was een eerste zeer significante[4] stijging rond 1910 en een tweede, eveneens zeer opmerkelijke, aan het einde van de jaren 1980. In beide gevallen bedroeg deze stijging ongeveer één graad. De verschillende periodes van relatieve stabiliteit van de temperatuur zijn voorgesteld in figuur 1.1 door horizontale segmenten, die de gemiddelde jaartemperatuur weergeven voor elke periode.



Figuur 1.1. Gemiddelde jaartemperatuur (in °C) in Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1833-2014.

3 Voor dit onderwerp verwijzen wij de lezers naar de laatste rapporten van de intergouvernementele experten van het IPCC verschenen in 2014 op de website http://www.ipcc.ch/

4 In het vervolg van de tekst zal men zeggen dat de tendens of de evolutie van een parameter "significant", "opmerkelijk" of "duidelijk" is als het statistisch resultaat van de waarnemingsreeks van die parameter aangeeft dat de tendens statistisch "significant" is. Indien de verandering van een parameter "zeer significant" is zullen we zeggen dat de tendens "zeer significant", "zeer opmerkelijk" of "zeer duidelijk" is. In de andere gevallen zal men zeggen dat de parameter geen enkele significante tendens vertoont of dat hij "stabiel" is. Voor bijkomende details verwijzen wij de lezer naar de kader "Statistische detectie van een klimaatverandering".

Het onderzoek van de reeksen met de seizoentemperaturen toont aan dat de gemiddelde temperatuur in de winter en in de lente, net zoals de jaarlijkse gemiddelde temperatuur, ook een eerste, vrij abrupte en zeer opmerkelijke opwarming heeft gekend rond 1910 en een tweede tegen het einde van de jaren 1980. De zomer en de herfst hebben ook twee zéér opmerkelijke periodes van opwarming meegemaakt, maar de eerste manifesteerde zich rond 1925-1930 en de tweede rond het begin van de jaren 1980.

Samengevat kunnen we dus besluiten dat er een onweerlegbare stijging is in de jaar- en seizoentemperaturen vanaf de 19de eeuw. Deze stijging is in twee etappes gebeurd: eerst een eerste opwarming in het begin van de 20ste eeuw en dan een tweede, van een gelijkaardige amplitude, tijdens de jaren 1980. De analyse van de gegevens van andere meetpunten, digitaal beschikbaar sinds het midden van de jaren 1950, toont aan dat de opwarming van de jaren 1980 overal in het land gebeurd is.

Sinds het einde van de jaren 1980 bedraagt de gemiddelde jaarlijkse temperatuur 10,8°C, dus ongeveer 2,0°C meer dan het gemiddelde van de periode 1833-1910, d.i. voor de eerste significante opwarming waargenomen te Brussel-Ukkel. Wat betreft het meest recente verleden, was het jaar 2014 het warmst sinds het begin van de waarnemingen te Brussel-Ukkel (de temperatuur bedroeg 11,9°C). De andere zes warmste jaren zijn respectievelijk : 2011 (11,6°C), 2007 (11,5°C), 2006 (11,4°C), 1989 (11,3°C), 2002 en 1990 (11,2°C). De 4 warmste jaren deden zich voor na 2005 en de 18 warmste jaren na 1988, of met andere woorden, tijdens de loop van de laatste 26 jaar.

Statistische detectie van een klimaatverandering

Om de klimaatveranderingen te kunnen bestuderen, is er een analyse van de interne structuur van de klimatologische tijdsreeksen zonder heterogeniteiten nodig. Twee testen zijn gezamenlijk nuttig in deze studie om het gedrag van de bestudeerde reeksen te bepalen: de test van *Pettitt* en de test van *Mann-Kendall* (voor meer informatie verwijzen we de lezer naar de bibliografie aan het einde van het hoofdstuk).

De veranderingen in een reeks kunnen te wijten zijn aan, hetzij een heterogeniteit te wijten aan een wijziging van de waarnemingsplaats, de gebruikte instrumenten of de waarnemingsmethode, hetzij aan een verandering van de weertypes waarvan de gemiddelden en de extremen het klimaat van een regio bepalen. In het laatste geval kunnen de klimaatveranderingen, schematisch beschouwd, zich onder verschillende vormen (of combinaties ervan) voordoen:

- Progressief (min of meer lineaire tendens naar boven of naar onder),
- Abrupt (een of meerdere sprongen, naar boven of naar onder in de tijdsreeks),
- Cyclisch (opeenvolgende en progressieve tendensen, naar boven of naar onder).

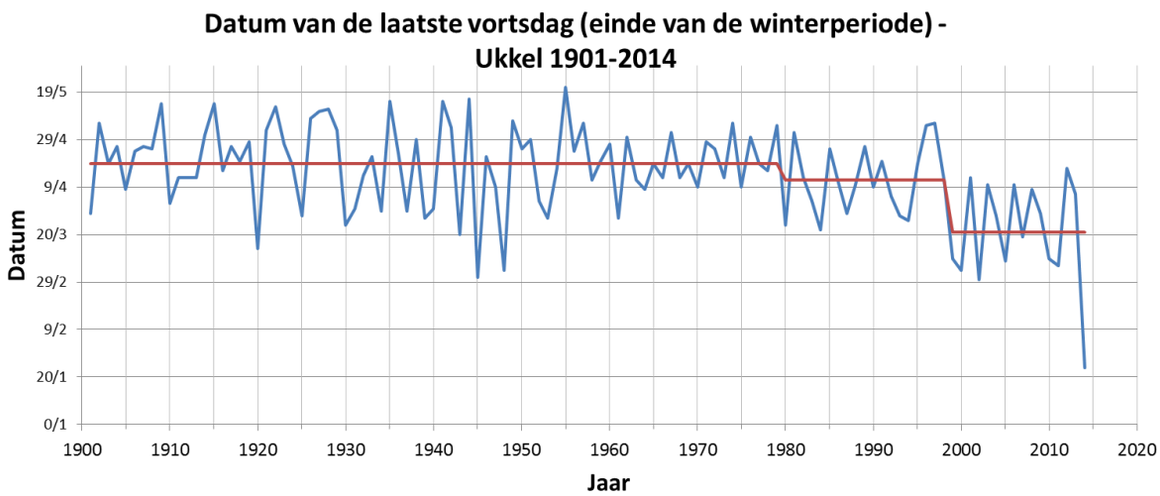
Meestal kan de reeks dalende of stijgende tendensen vertonen over de ganse bestudeerde periode. In de discussies over de trendanalyse zullen we soms verplicht zijn een onderscheid te maken tussen tijdelijke tendensen tijdens de beschouwde periode en een globale trend over de gehele periode.

Als we statistische testen toepassen, bepalen we een drempel vanaf welke we denken dat er in de reeks een duidelijke verandering waarneembaar is. Meestal neemt men een sleutelwaarde van de statistische test die overeenkomt met de waarschijnlijkheid om deze statistische waarde te bekomen in afwezigheid van een verandering (meestal 5 of 10%). In dit hoofdstuk zal een resultaat als statistisch significant of zeer significant worden beschouwd als de waarschijnlijkheid dat de verandering op een foutieve manier is verkregen maximum 10 of 5% bedraagt (dit wil zeggen dat het kanspercentage dat de verandering te wijten is aan toeval en niet aan een echte klimaatverandering maximaal respectievelijk 10% en 5 % bedraagt).

Als we de reeksen met extreme temperaturen in Ukkel sinds 1901 bekijken, valt het op dat de opwarming tijdens de eerste helft van de 20ste eeuw vooral te wijten was aan een zeer significante stijging van de maximale temperaturen, terwijl de opwarming tijdens de jaren 1980 te wijten was aan een zeer opmerkelijke stijging van zowel de maximale als de minimale temperaturen. Het zou interessant zijn om na te gaan of de klimaatmodellen die de evolutie van het klimaat sinds het begin van de 20ste eeuw simuleren, boven onze regio's hetzelfde gedifferentieerd gedrag vertonen en of ze toelaten dit fysisch te kunnen verklaren.

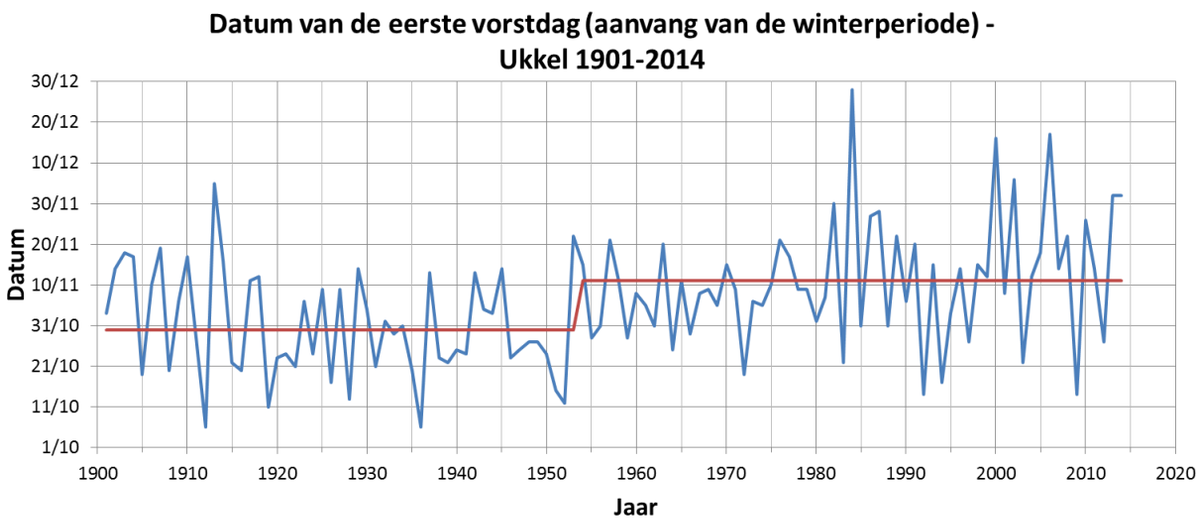
De stijging van de minimumtemperaturen tijdens de 20ste eeuw weerspiegelt zich eveneens in de datums van de eerste en de laatste vorstdag in de loop van een jaar. We gebruiken hier de minimale dagtemperaturen die sinds 1901 gemeten worden in een halfopen thermometerhut in het klimatologisch park van het KMI. Deze reeks is de meest homogene wat betreft de overzichten van dagelijkse extreme temperaturen.

In figuur 1.2 zien we de evolutie sinds 1901 van de laatste vorstdag in Ukkel, aan het einde van de winterperiode. De laatste decennia vertoont het einde van de vorstperiode de tendens zich vroeger in het jaar te manifesteren. De statistische analyse van de waarnemingsreeks toont aan dat deze tendens hoofdzakelijk te wijten is aan twee relatief abrupte stijgingen. De eerste opmerkelijke sprong rond 1980 en de tweede zeer opmerkelijke sprong rond 2000. In 2014 was het einde van de vorstperiode uitzonderlijk vroeg.



Figuur 1.2. Datum van de laatste vorstdag (minimumtemperatuur lager dan 0°C) op het einde van de winter in Ukkel tussen 1901 en 2014.

Vergelijkbaar hiermee toont figuur 1.3 de jaarlijkse evolutie sinds 1901 van de datum van de eerste vorstdag bij de aanvang van de winterperiode die eveneens coherent is met de stijging van de temperaturen. In de loop van de 20ste eeuw vertoont de aanvang van de vor stperiode op het einde van het jaar de tendens zich later te manifesteren. Zoals de trendanalyse het aangeeft, is deze evolutie hoofdzakelijk te wijten aan een relatief abrupte en zeer opvallende sprong rond 1955.



Figuur 1.3. Datum van de eerste vorstdag (minimumtemperatuur lager dan 0°C) bij de aanvang van de winter in Ukkel tussen 1901 en 2014.

Het gevolg van de evolutie van deze data van aanvang en einde van de vorstperiodes in de loop van het jaar is een verlenging tijdens de 20ste eeuw van de maximale duur van het aantal opeenvolgende dagen zonder vorst. Twee abrupte sprongen worden gedetecteerd: de eerste, significant, rond 1955 en de tweede, zeer duidelijk, nabij het einde van de jaren 1990.

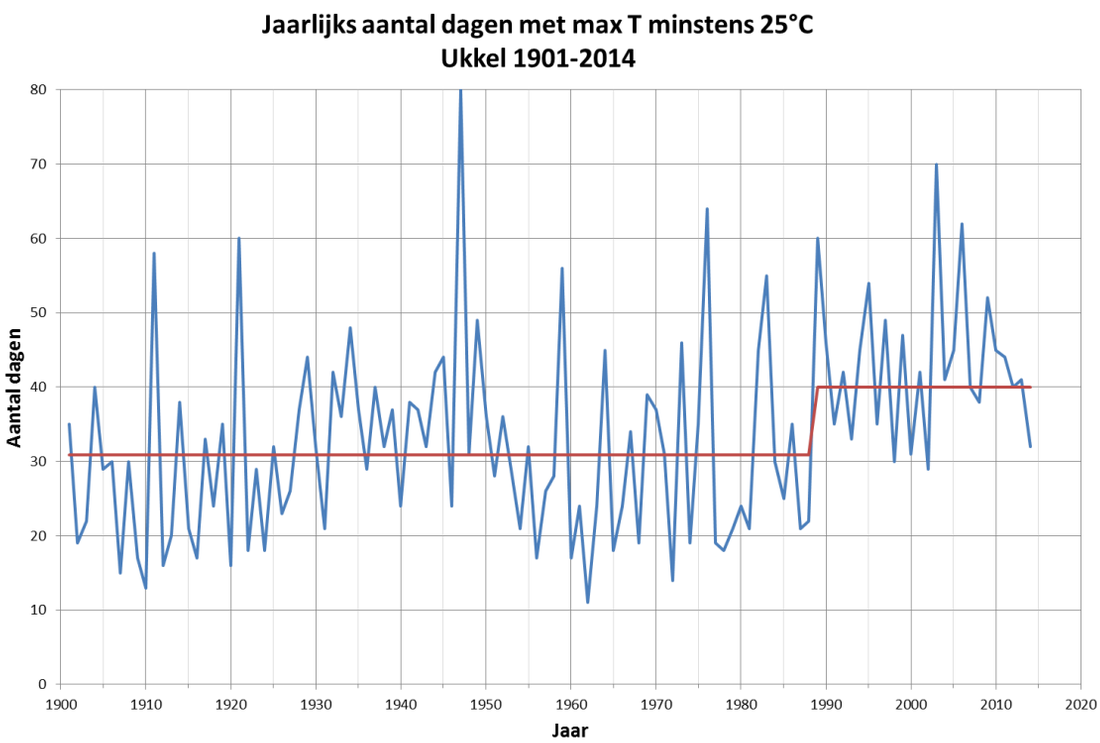
Om te eindigen kan men zich afvragen of de verstedelijking van Brussel niet, althans voor een deel, bijgedragen heeft aan de opwarming die we in Ukkel tijdens de 20ste eeuw konden vaststellen. Recente theoretische studies uitgevoerd op het KMI tonen aan dat de toename van de totale ondoordringbare oppervlakten in de Brusselse agglomeratie sinds de jaren 1960 geleid heeft tot een grotere opwarming dan in rurale gebieden (Hamdi *et al*, 2009; Hamdi and Van de Vyver, 2011). Wij stellen enkele resultaten van deze studies voor in hoofdstuk 4, die meer bepaald een grotere impact van de urbanisatie illustreren op de minimumtemperaturen.

Zijn er meer hittegolven?

Om na te gaan of er een evolutie is in de frequentie en de intensiteit van de hittegolven, beschikken we in het station in Ukkel over verschillende reeksen met dagelijkse thermometrische metingen over min of meer lange perioden. We gebruiken ook hier de extreme dagtemperaturen die sinds 1901 gemeten worden in een halfopen thermometerhut, gelegen in het klimatologische park van het KMI.

Laten we eerst en vooral de evolutie bekijken van het aantal dagen per jaar dat de maximale temperatuur minimum 25°C bereikt (zie figuur 1.4), deze worden *zomerdagen* genoemd.

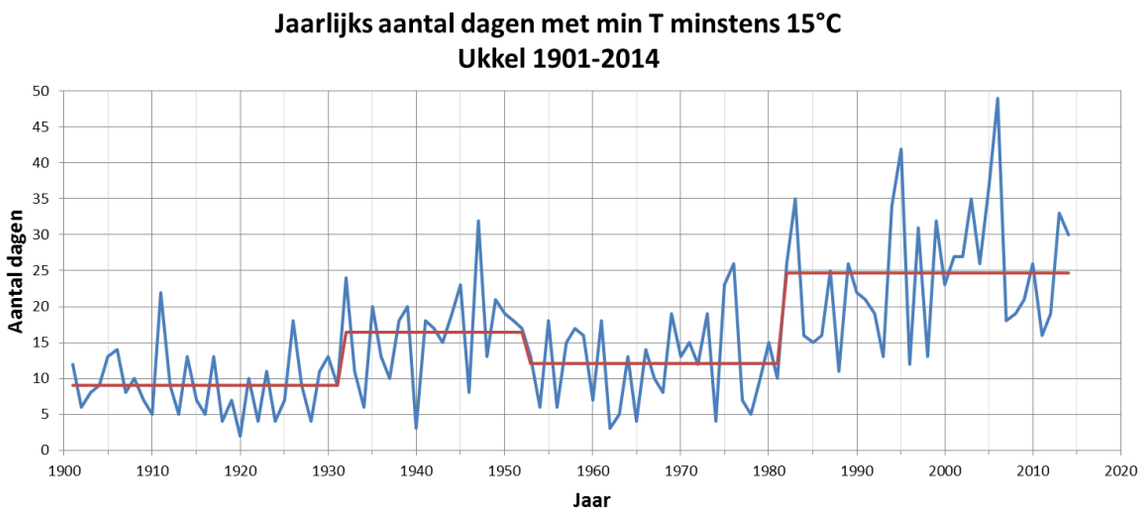
De figuur 1.4 toont aan dat na de opwarming tijdens de zomer in de jaren 1980 het aantal zomerdagen is toegenomen. Deze toont eveneens aan dat waarden vergelijkbaar met de hoogste opgemeten waarden uit het begin van de 21ste eeuw, reeds in het verleden waargenomen werden zij het op een meer punctuele wijze (het absolute record dateert van 1947). Men stelt een belangrijke variabiliteit vast op een schaal van enkele decennia: na een relatief abrupte stijging van deze parameter rond het einde van de jaren 1920, werd een daling waargenomen aan het begin van de jaren 1950 en, uiteindelijk, doet zich in de jaren 1980 een nieuwe zeer significante stijging voor die tot op heden verder gaat. 2014 onderscheidt zich door een relatief lage waarde voor deze parameter.



Figuur 1.4. Jaarlijks aantal zomerdagen (maximumtemperatuur ≥ 25°C) in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

Een gelijkaardige vaststelling is toepasselijk op het *jaarlijkse aantal hittedagen* (d.w.z. aantal dagen per jaar dat de maximale temperatuur hoger dan of gelijk is aan 30°C).

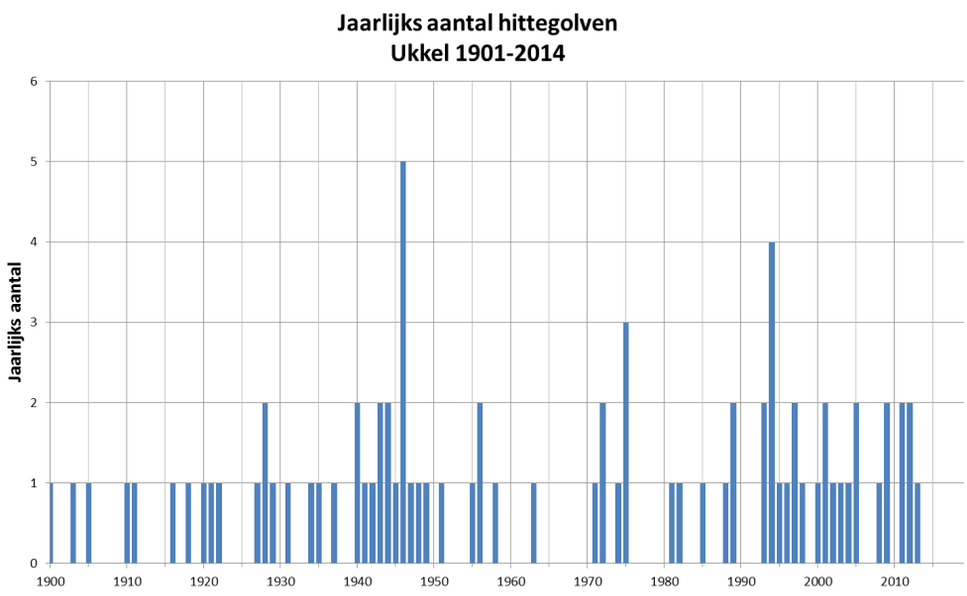
Zoals voor de hoogste maximumtemperaturen zijn hoge nachtelijke temperaturen eveneens niet zonder gevolg voor de gezondheid van risicogroepen. Figuur 1.5 toont de evolutie sinds 1901 van het jaarlijkse aantal dagen waarop de dagelijkse minimumtemperatuur minstens 15°C bereikte. De stijgende tendens van deze parameter tijdens de 20ste eeuw staat buiten discussie, met een eerste zeer opmerkelijke "sprong" naar omhoog vastgesteld rond het midden van de jaren 1930 en, vooral, een tweede sprong omhoog, eveneens zeer opmerkelijk, in het begin van de jaren 1980. Het is eveneens opmerkelijk dat de waarden die de laatste jaren werden bereikt zeer hoog zijn.



Figuur 1.5. Jaarlijks aantal dagen met een minimumtemperatuur ≥ 15°C in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

Laten we nu de evolutie van het aantal hittegolven onderzoeken. Wij zullen hier op een eenvoudige manier een hittegolf definiëren als zijnde een periode van vijf opeenvolgende dagen tijdens welke aan de twee volgende criteria gelijktijdig wordt voldaan:

- De maximumtemperatuur bereikt of overtreft elke dag 25°C,
- De maximumtemperatuur bereikt of overtreft 30°C tenminste gedurende drie dagen van de beschouwde periode.



Figuur 1.6. Jaarlijks aantal hittegolven in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

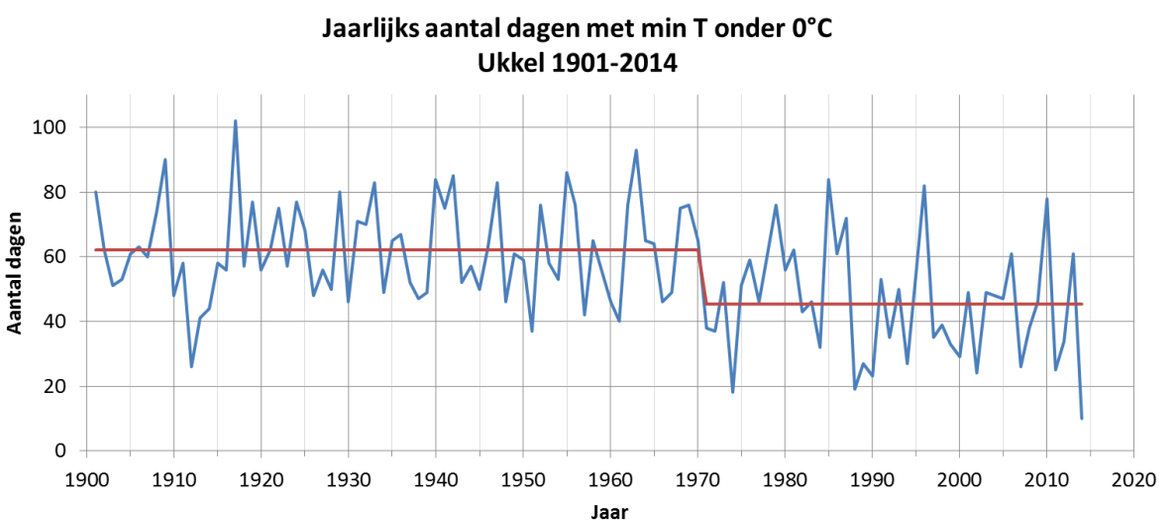
Figuur 1.6 illustreert de evolutie van het jaarlijkse aantal hittegolven te Ukkel sinds 1901. Wij merken een grote variabiliteit van het ene jaar naar het andere. Sinds het begin van de 20ste eeuw stellen wij vast dat er gemiddeld ongeveer elke twee jaar minstens één hittegolf is. De trendanalyse geeft een significante stijging aan van deze parameter rond het begin van de jaren 1990. Men merkt op dat de hittegolven frequenter waren tijdens de jaren 1940 en dit sinds een twintigtal jaren opnieuw zijn.

Zijn er minder koudegolven?

Hiervoor gebruiken we ook de dagelijkse extreme temperaturen, sinds 1901 gemeten in een halfopen thermometerhut gelegen in het klimatologische park van het KMI.

Voordat we proberen een antwoord op deze vraag te vinden, gaan we eerst de evolutie sinds 1901 van het aantal dagen per jaar dat de minimumtemperatuur onder 0°C lag, bekijken (zie figuur 1.7). Dit noemen wij het *jaarlijkse aantal vorstdagen*.

Sinds het begin van de 20ste eeuw wordt er een onbetwistbare daling van deze parameter waargenomen. Rond 1970 vond er een, statistische zeer opvallende, abrupte daling plaats. De laagste waarde werd in 2014 waargenomen.



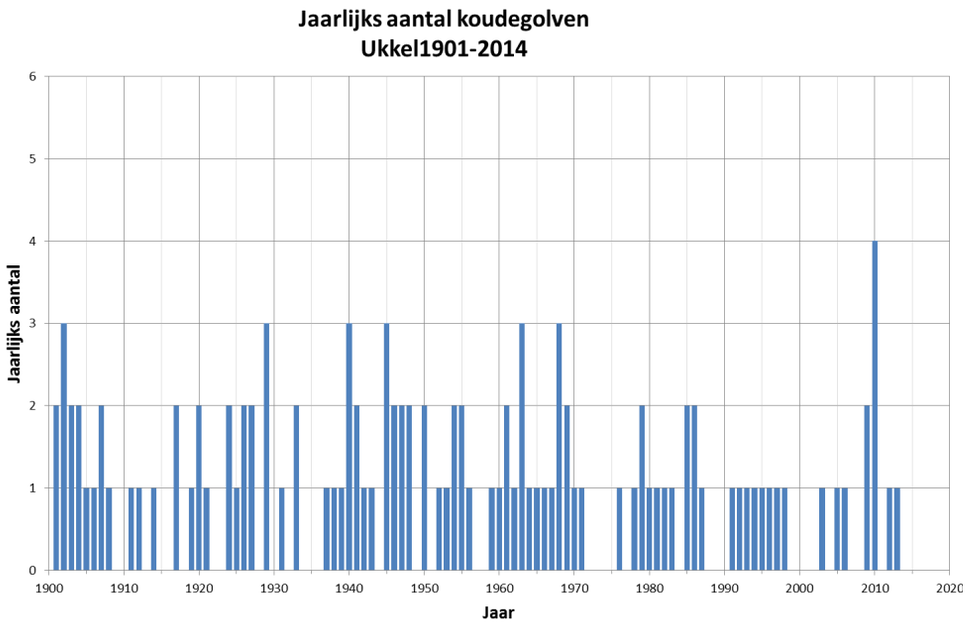
Figuur 1.7. Jaarlijks aantal vorstdagen (minimumtemperatuur < 0°C) in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

Laten we nu de vraag van de koudegolven onderzoeken. Zoals een hittegolf zullen we hier op een eenvoudige manier een koudegolf definiëren: een periode van vijf opeenvolgende dagen tijdens welke aan de twee volgende criteria gelijktijdig wordt voldaan:

- De minimumtemperatuur is elke dag negatief (dit wil zeggen dat elke dag een vorstdag is),
- De maximumtemperatuur is tijdens de beschouwde periode minstens drie keer negatief (dat wil zeggen dat er minstens drie winterdagen zijn tijdens de periode en dat het dus permanent vriest).

Figuur 1.8 illustreert de evolutie van het aantal koudegolven in Ukkel sinds 1901. Wij merken op dat er een grote variabiliteit is van het ene jaar naar het andere; sinds het begin van de 20ste eeuw was er gemiddeld bijna elk jaar minstens één koudegolf. De trend-analyse vertoont een afname van de frequentie van de koudegolven met een opvallende sprong naar beneden rond het begin van de jaren 1970.

Het is interessant op te merken dat de opwarming die zich heeft voorgedaan tijdens de winter en in de lente in het begin van de 20ste eeuw niet direct aanleiding heeft gegeven tot een afname van het aantal koudegolven, terwijl de afname van het verschijnsel duidelijk verbonden is aan de opwarming aan het einde van de 20ste eeuw.



Figuur 1.8. Jaarlijks aantal koudegolven in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

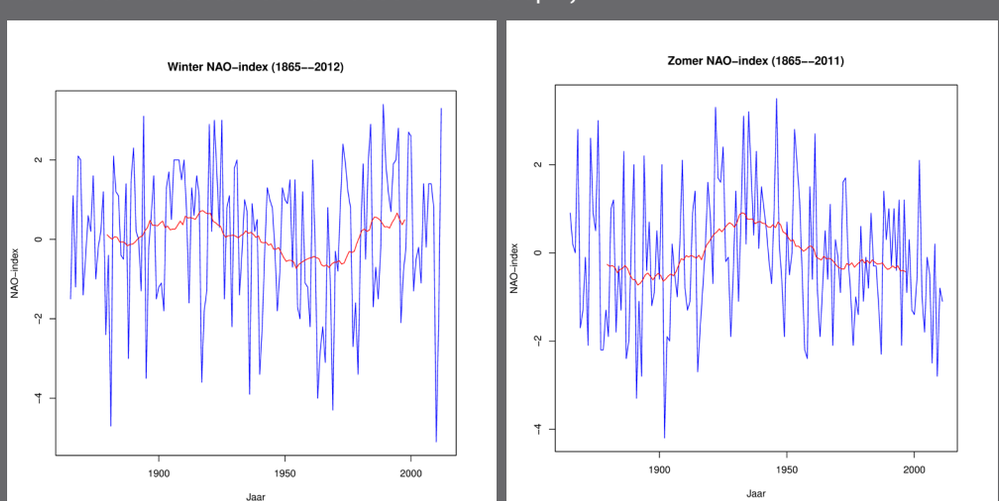
Hoe evolueren de dagelijkse extreme temperaturen?

Een recente studie heeft de evolutie sinds 1950 van de extreme temperaturen waargenomen in het Belgisch klimatologisch netwerk, bestudeerd (Van de Vijver, 2012). Meer bepaald heeft men bestudeerd hoe de hoogste dagelijkse maximumtemperatuur en de laagste dagelijkse minimumtemperatuur jaarlijks evolueerden tijdens de laatste zes decennia, dus vanaf het moment wanneer het KMI beschikte over digitale gegevens hierover in haar databanken. In totaal werden waarnemingen, afkomstig van negen stations verspreid over België, die voldoen aan de hoogste kwaliteitsnormen, bestudeerd.

In eerste instantie werden er statistische relaties gevonden tussen temperatuurextremen en grootschalige atmosferische circulatiepatronen zoals de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO, zie kader). Een belangrijk resultaat uit de extremewaardenanalyse is dat er fundamentele verschillen bestaan tussen de manier waarop warme en koude extremen veranderen.

NAO

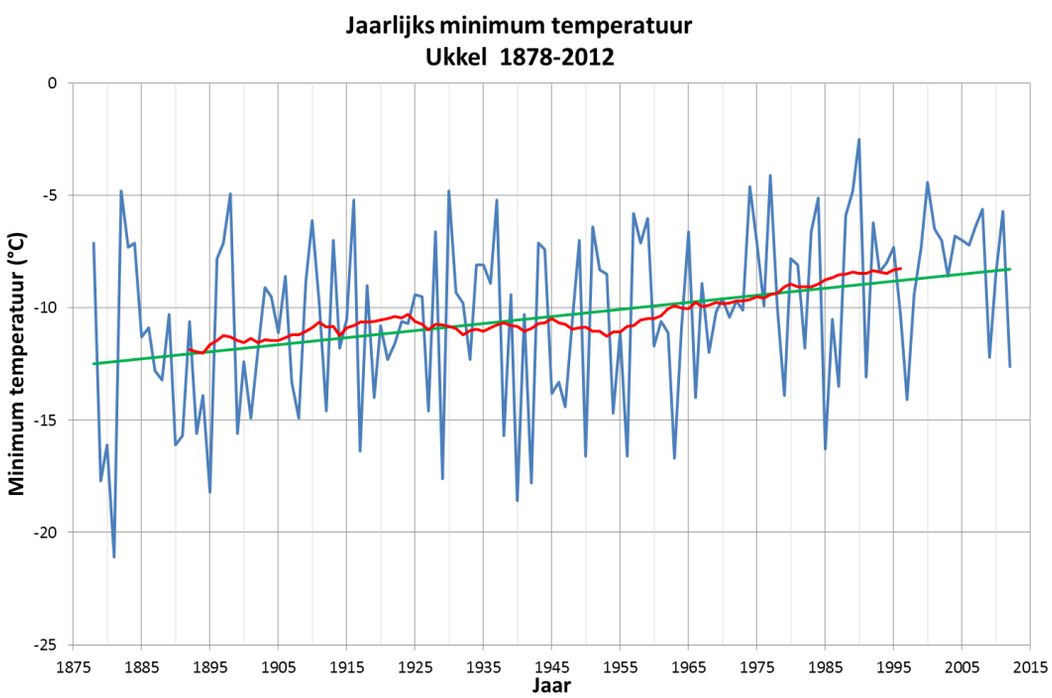
De Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) is een grootschalig atmosferisch circulatiepatroon welk van belang is voor het weer in West-Europa, vooral in de winter, maar in mindere mate ook voor de zomer. De NAO-index is een maatstaf voor het verschil in luchtdruk tussen de depressie bij IJsland en het hogedrukgebied bij de Azoren (Hurrell, 2012). In België is de temperatuur relatief laag bij een lage NAO-index en hoog bij een hoge index. De NAO-index index bevat onregelmatige cyclische schommelingen met een tijdschaal van hoogstens 10 jaar. Vandaar dat we soms periodes hebben met een hele serie zachte winters en dan weer een aantal koudere winters op rij.



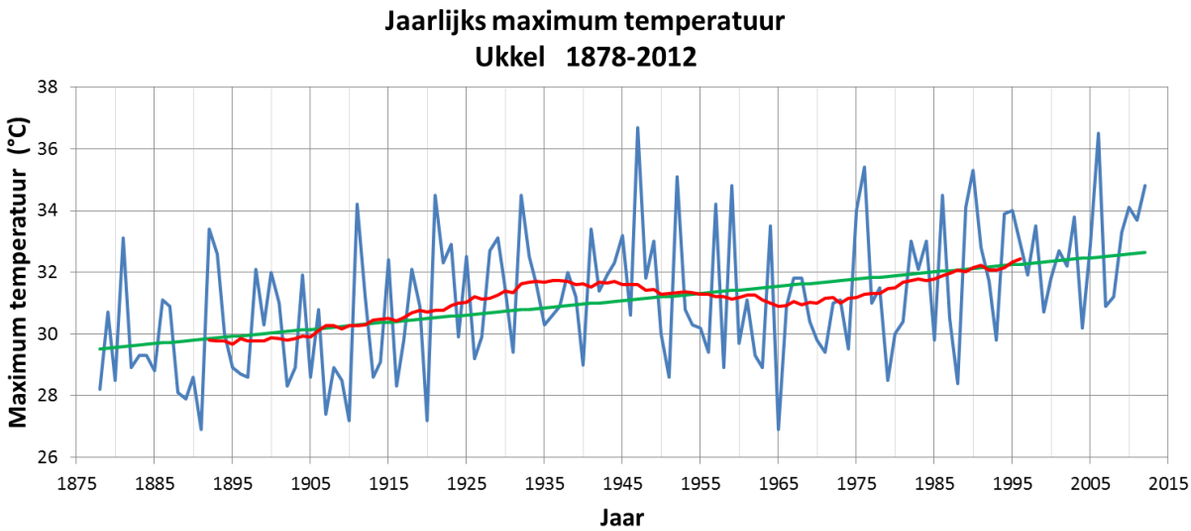
Figuur 1.9. Blauw: gemiddelde NAO-index van winter (links) en zomer (rechts) - Rood: glijdende 30-jaar gemiddelde.

Zo werd er een lineaire groei in de jaarlijkse maxima gedetecteerd van gemiddeld 0,4°C per decennium. Deze lineaire trend kon niet gerelateerd worden met de zomerse NAO-index (die op zich geen trend vertoont in de bestudeerde periode), en zou eventueel kunnen toegeschreven worden aan externe factoren zoals broeikasgas-activiteiten.
Dit is echter niet het geval voor de koude extremen die, naar analogie met de NAO-index, een veel variabeler en grilliger gedrag vertonen, wat het bekomen van een duidelijk signaal voor klimaatverandering aanzienlijk bemoeilijkt. Ruwweg geschetst zijn er hier significante oscillaties, met vooral erg koude winterse extremen in de jaren 1960 en 1980, maar zijn de extremen sedert de jaren 1950 tot op heden, gemiddeld gezien, toch gestegen. De mildere koude extremen houden grotendeels verband met de toegenomen winterse NAO-index.
Spectaculaire veranderingen van de temperatuurextremen (zomer en winter) vonden vooral plaats in de jaren 1980 tot eind jaren 1990. Sindsdien zijn er geen aanwijsbare veranderingen meer gebeurd en lijkt de opwarming een relatieve rustpauze in te lassen.

Om de evolutie van het klimaat in het breder kader te plaatsen, moeten we veel langere reeksen bestuderen. Immers, de voorgaande studie beslaat slechts 60 jaar. In Ukkel bestaan er meerdere langdurige reeksen (vanaf 1833), maar deze vertonen veel gebreken in homogeniteit. In Demarée *et al* (2002) werd gepoogd een langdurige homogene dagelijkse reeks te construeren voor centraal België (CBT). In de figuren 1.10 en 1.11 hebben we de jaarlijkse extreme temperaturen (minima en maxima) in Ukkel getekend voor de periode 1878-2012. Naast de korte oscillaties van de NAO is er nog een natuurlijke fluctuatie te zien met een veel grotere periode. Dit is de zogenaamde Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) met een periode van vele decennia (tot 70 jaar), en is vrij recent ontdekt door Schlesinger and Ramankutty (1994). Het is zeker niet uit te sluiten dan de huidige stagnatie van de mondiale temperatuur sinds het einde van de jaren 1990 te wijten is aan deze AMO. Hoe dan ook, los van deze natuurlijke schommeling vertonen de extremen een significante lineaire groei over de volledige periode.

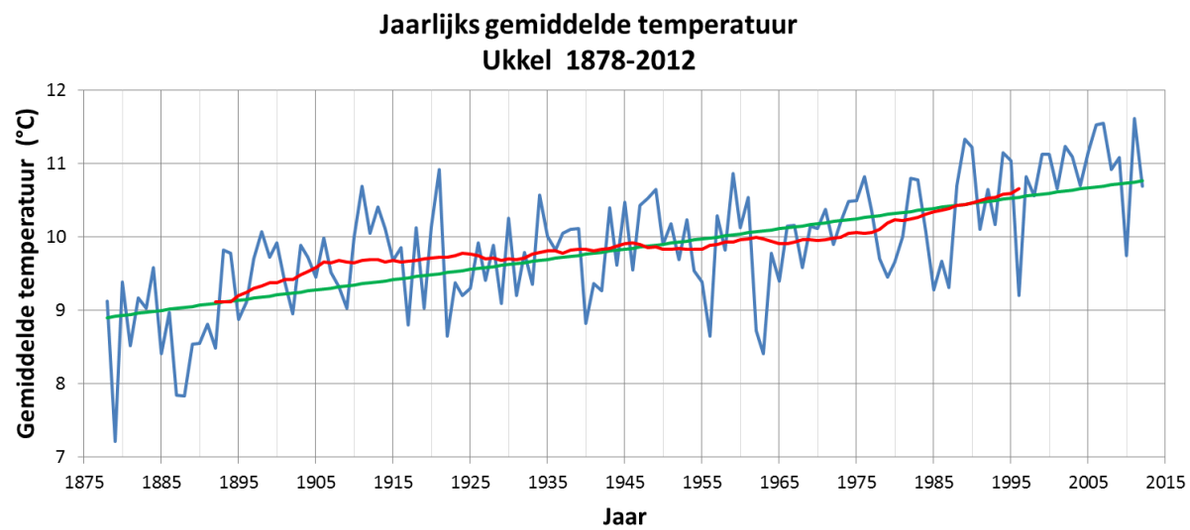


Figuur 1.10. Evolutie van de jaarlijkse extreme minimum temperatuur te Ukkel tijdens de periode 1878-2012. Rood: glijdend 30-jaar gemiddelde. Groen: trendlijn.



Figuur 1.11. Evolutie van de jaarlijkse extreme maximum temperatuur te Ukkel tijdens de periode 1878-2012. Rood: glijdend 30-jaar gemiddelde. Groen: trendlijn.

Vergelijkbare resultaten werden eveneens verkregen door Brabson and Palutikof (2002) bij het analyseren van lange temperatuurreeksen gereconstrueerd voor centraal Engeland (1772-heden). In Ukkel ligt sinds 1878 de stijging van de jaarlijkse minima en maxima gemiddeld op respectievelijk 0,3°C en 0,2°C per decennium. Ter vergelijking: de gemiddelde jaartemperatuur is toegenomen met gemiddeld ongeveer 0,15°C per decennium in dezelfde periode (zie figuur 1.12), wat lager is dan de groei van jaarlijkse uitersten.



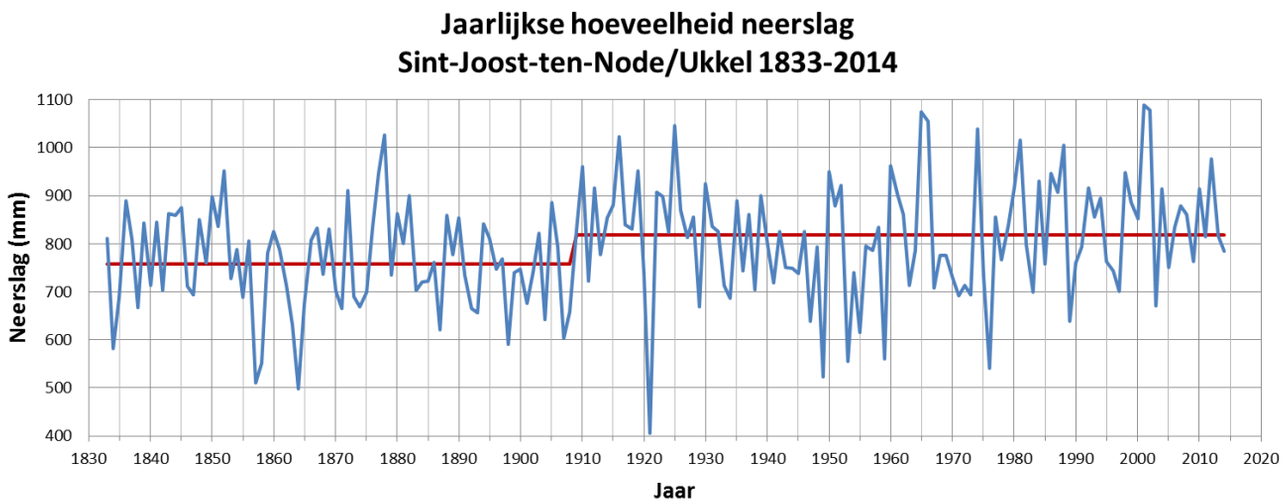
Figuur 1.12. Evolutie van de gemiddelde jaarlijkse temperatuur in Ukkel tijdens de periode 1878-2012. Groen: de trendlijn. Rood: het glijdende gemiddelde gedurende 30 jaar voor deze parameter.

1.2.2 Neerslag

Regent het meer of minder?

De neerslaghoeveelheden en hun evolutie zijn interessant voor talrijke instanties, zoals deze die zich bezig houden met het voorkomen van hoogwaterstanden en overstromingen, de dimensionering van de rioleringsnetwerken, de voorziening van drinkwater en de landbouw.

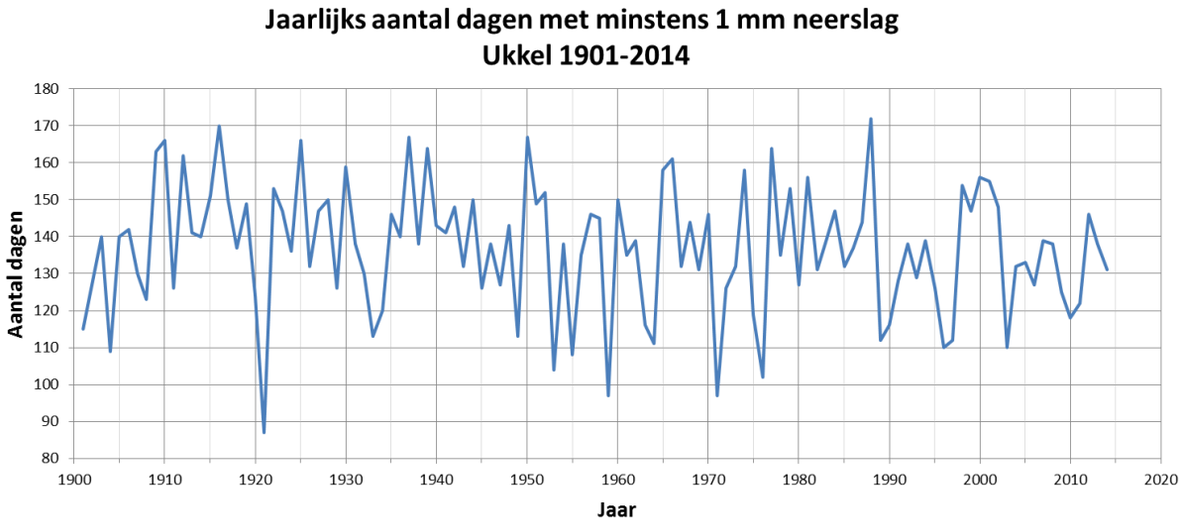
We beginnen met het bestuderen van de evolutie van het jaarlijks pluviometrisch totaal, dat eerst opgemeten werd in Sint-Joost-ten-Node en later in Ukkel. Figuur 1.13 geeft de jaarlijkse neerslaghoeveelheden sinds het begin van de regelmatige metingen in 1833. De analyse van de reeks toont een zeer significante sprong naar omhoog, gekenmerkt door een stijging in de orde van 7%, rond 1910. Op het niveau van de seizoenen vertonen de winterneerslag en de lenteneerslag eveneens een stijging in de orde van 15%, respectievelijk zeer opvallend rond 1910 en opmerkelijk rond 1965. We nemen echter geen significante evolutie waar voor de neerslaghoeveelheden tijdens de zomer en de herfst.



Figuur 1.13. Jaarlijkse hoeveelheid neerslag te Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1833-2014.

We kunnen ons ook afvragen of de frequentie van het aantal dagen met neerslag veranderd is sinds het begin van de 20ste eeuw. Figuur 1.14 geeft de evolutie van het *jaarlijks aantal dagen met neerslag* waargenomen in Ukkel sinds 1901. Een *dag met neerslag* is een dag waarop minstens 1 mm neerslag werd waargenomen (zo kunnen we de dagen met een heel kleine gemeten neerslaghoeveelheid elimineren). We observeren geen duidelijke tendens van deze parameter sinds het begin van de 20ste eeuw. Recent valt het wel op dat er tijdens de jaren 1990 en de jaren 2000 gemiddeld relatief weinig neerslag is gevallen.

Voor de seizoenen tonen gelijkaardige trendanalyses eveneens geen merkbare evolutie aan sinds 1901, met uitzondering van de lente waar een significante stijging werd waargenomen van het aantal neerslagdagen in het midden van de jaren 1960.

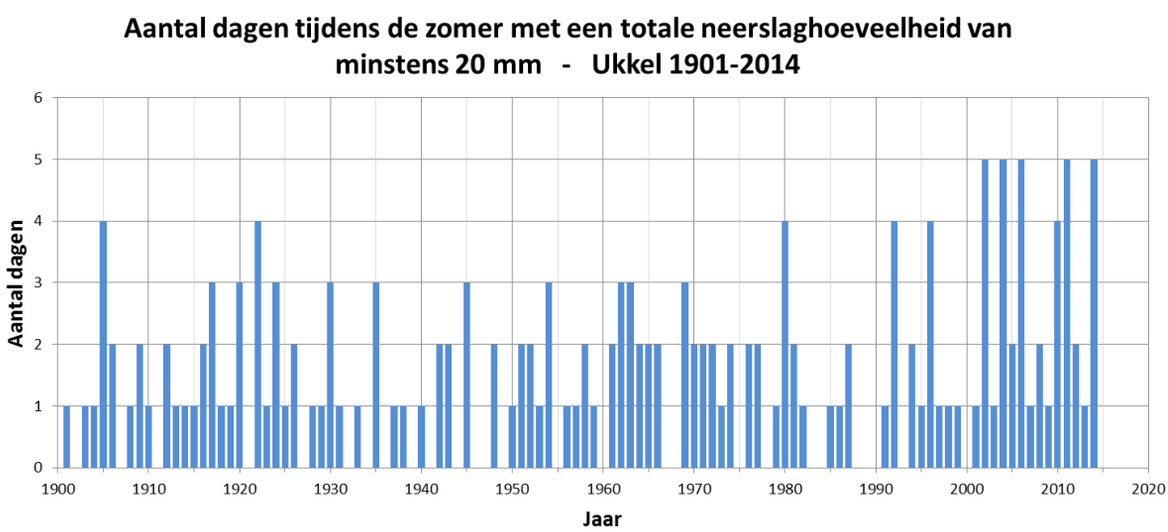


Figuur 1.14. Jaarlijks aantal neerslagdagen (neerslaghoeveelheid van minstens 1 mm), te Ukkel, tijdens de periode 1901-2014.

Komen intense neerslaghoeveelheden vaker voor?

Om op dit soort vragen te antwoorden, moeten we eerst kijken of het aantal dagen met overvloedige neerslag al dan niet gestegen is. Figuur 1.15 toont voor het station in Ukkel de evolutie tussen 1901 en 2014 van het aantal dagen met een dagelijkse neerslaghoeveelheid van meer dan 20 mm tijdens de zomer (periode juni-juli-augustus). Tijdens de zomer worden deze hoeveelheden meestal veroorzaakt door intense onweersbuien die in een korte tijdsspanne vallen (maximaal enkele uren).

Figuur 1.15 toont aan dat er sinds de jaren 2000 een verhoogde tendens is voor deze parameter. Inderdaad, de vijf hoogste waarden van de reeks hebben we kunnen waarnemen tijdens de laatste dertien jaren. Statistisch gezien is de recente verhoging van de frequentie van dit soort neerslag nog niet significant gezien de te korte periode, maar de tendens is wel duidelijk. Het valt af te wachten of deze zich verder zet in de komende jaren. Als besluit kunnen we dus stellen dat we niet op een onbetwistbare manier kunnen bevestigen of de overvloedige neerslaghoeveelheden tijdens onweders tegenwoordig frequenter voorkomen dan in het verleden.



Figuur 1.15. Aantal dagen tijdens de zomer met een dagelijkse neerslaghoeveelheid van minstens 20 mm in Ukkel, tijdens de periode 1901-2014.

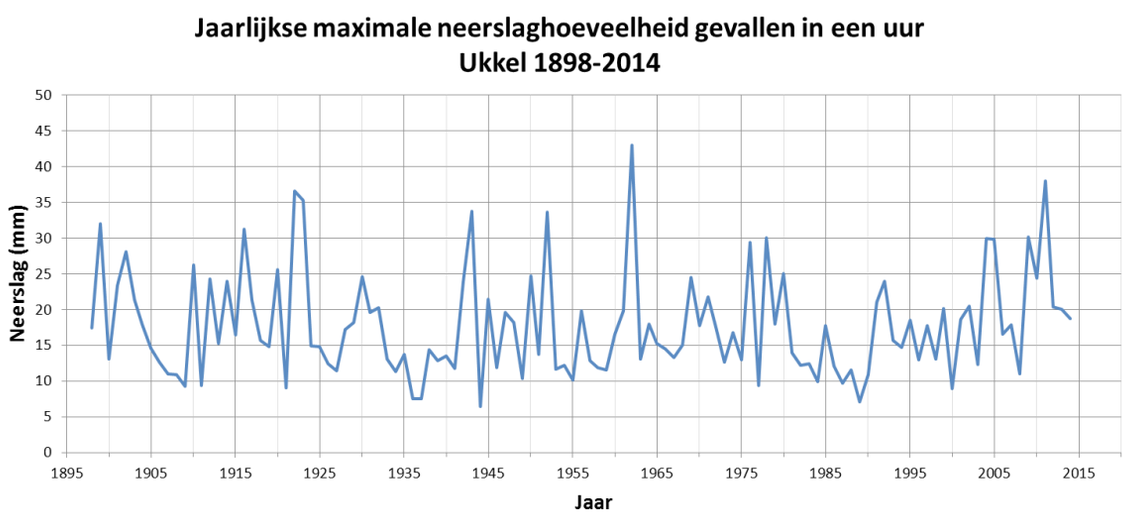
Zijn de extreme neerslaghoeveelheden overvloediger?

In Ukkel

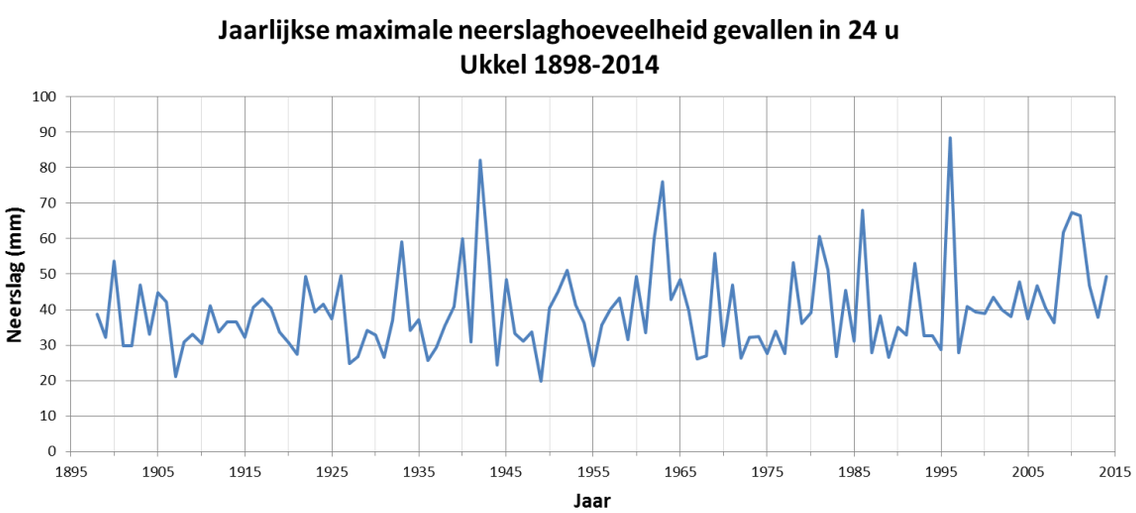
Met de gegevens van de pluviograaf van Ukkel tijdens de periode 1898-2014 kunnen we de evolutie van de dagelijkse extreme neerslaghoeveelheden bestuderen gedurende tijdsintervallen van 10 minuten tot meerdere dagen. Als voorbeeld illustreren de figuren 1.16 en 1.17 respectievelijk de evolutie sinds 1898 in Ukkel van de maximale uurlijkse neerslaghoeveelheid die ieder jaar gemeten wordt en deze van de maximale hoeveelheid gedurende 24 uur elk jaar. De figuren laten zien dat wat de uurlijkse en dagelijkse neerslag betreft er, naast natuurlijke variaties, geen merkbare trend in de jaarlijkse maxima binnen deze periode waar te nemen valt. Deze natuurlijke fluctuaties werden door analyse van de zelfde reeks gegevens ook al vastgesteld in de studie van Ntegeka and Willems (2008).

Zelfs als we sinds het begin van de 21ste eeuw een lichte tendens tot verhoging van deze twee jaarlijkse hoeveelheden vaststellen, is de periode te kort opdat deze tendens statistisch opmerkelijk zou zijn.

Ook hier kunnen we besluiten dat de hierboven beschreven resultaten het gevoel dat onweersbuien, die één of meerdere uren kunnen duren , recentelijk intenser en overvloediger geworden zijn, niet bevestigen. Echter, de evolutie van de gegevens in de komende jaren, zal er ons misschien toe leiden om deze visie te herzien.

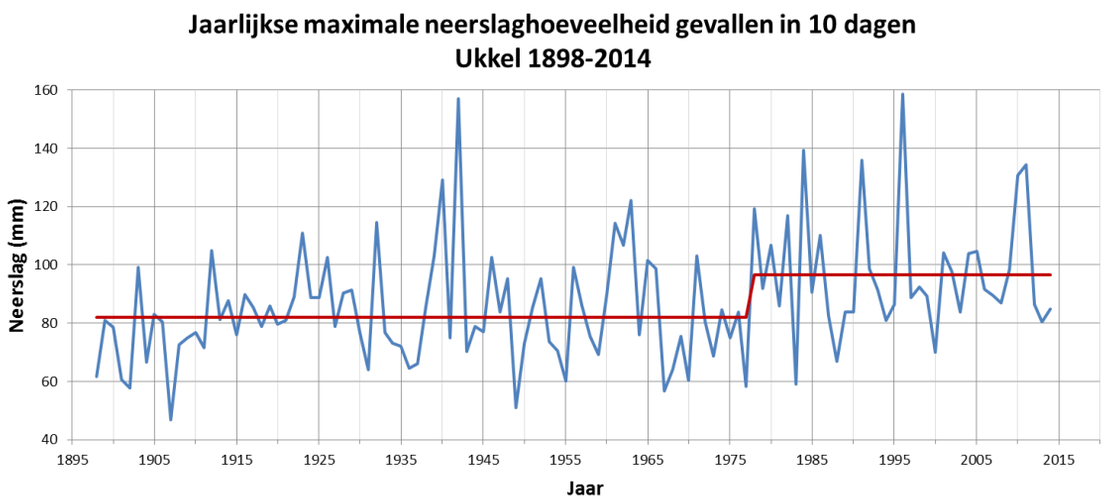


Figuur 1.16. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in een uur in Ukkel tijdens de periode 1898-2014.



Figuur 1.17. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in 24 uur (in mm) in Ukkel tijdens de periode 1898-2014.

In Ukkel zien we dat de jaarlijkse extremen over een periode langer dan een week een zéér significante stijging vertonen, gekenmerkt door een abrupte sprong aan het einde van de jaren 1970. Dit type jaarlijkse extreme waarde komt meestal voor in de winter. Figuur 1.18 toont de evolutie in Ukkel voor de jaarlijkse maxima van de 10-daagse neerslag die sinds het einde van de 19de eeuw groeit met gemiddeld 2mm/decennium. In elk geval is er wel een stijgende trend voor deze parameter sedert het einde van jaren 1970 zoals hierboven reeds vermeld.



Figuur 1.18. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in 10 dagen (in mm) in Ukkel tijdens de periode 1898-2014.

Elders in het land

Verschillende analyses van pluviometrische gegevens van het Belgisch klimatologisch netwerk werden de voorbije jaren op het KMI uitgevoerd. In deze stations wordt door de waarnemers dagelijks om 8u 's morgens de totale hoeveelheid neerslag die gevallen is sinds 8u de dag voordien, gemeten. Deze gevalideerde gegevens laten dus niet toe om een 24u-analyse uit te voeren, maar zijn wel beschikbaar in digitale vorm in de databanken van het KMI vanaf het begin van de jaren 1950. We geven hier twee voorbeelden van reeds uitgevoerde studies.

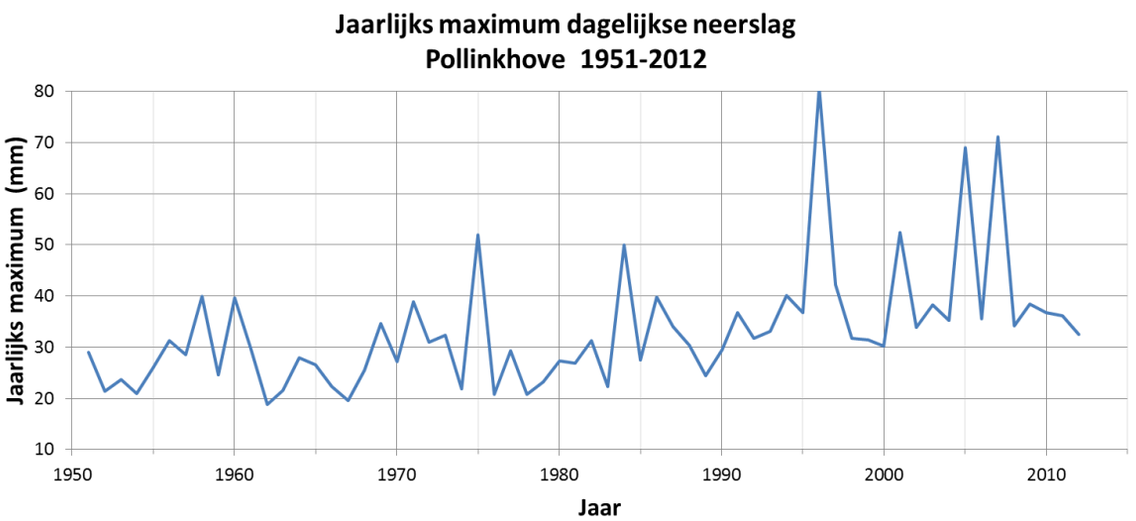
In een eerste studie geeft Gellens (2000) aan dat de winterse neerslag die minstens gedurende een paar dagen gevallen is, in verschillende stations in het land, een tendens tot verhogen toont sinds het begin van de jaren 1950. Dit resultaat is vergelijkbaar met het resultaat dat eerder in de tekst voorgesteld werd voor Ukkel voor de 20ste eeuw. Uit deze studie bleek ook dat er geen waarneembare evolutie van intensere neerslaghoeveelheden was tijdens de zomer, d.w.z. onweerachtige neerslag, tijdens het tweede deel van de 20ste eeuw. Dit resultaat is dan ook coherent met de resultaten van Ukkel voor de hele 20ste eeuw, die hierboven werden voorgesteld.

Het zou interessant zijn om te proberen de stijging van de winterse neerslag over verschillende dagen, gedurende de laatste decennia, in relatie te brengen met de verschillende overstromingen in ons land. Tijdens de jaren 1990 waren er meer grote overstromingen dan tijdens de jaren 1980 en zeker meer dan tijdens de jaren 1970. De historische gegevens van voor de jaren 1970 zijn minder precies, zelfs al weten we bijvoorbeeld dat de jaren 1950 gekend waren voor verschillende belangrijke overstromingen. Tijdens de meer recente jaren hebben zich aan het begin van de jaren 2000 relatief frequente en uitgestrekte winteroverstromingen voorgedaan, maar hun intensiteit was lager dan in de jaren 90. De laatste jaren is het vooral het aantal lokale overstromingen, soms gekoppeld aan onweersbuien, dat een zekere stijging vertoont. Natuurlijk moeten we in de studie van de evolutie van de frequentie (en de intensiteit) van de overstromingen ook rekening houden met andere factoren zoals de ruimtelijke ordening.

In een tweede, meer recentere, studie probeert men een meer geografische evolutie van de jaarlijkse extreme neerslaghoeveelheden sinds de jaren 1950 weer te geven door de analyse van de pluviometrische gegevens van een dertigtal meetpunten in het land (Van de Vyver, 2012). De veranderingen in extreme neerslag zijn moeilijker in kaart te brengen omdat er onderling veel verschillen in trends bestaan. Dit in tegenstelling tot de verandering in temperatuurextremen die gedurende de laatste decennia overal vrijwel gelijkmatig verloopt.

In deze studie definiëren we de extremen als de jaarlijkse maxima van dagelijkse en 10-daagse neerslag. Door de opwarming van het zeewater is het aannemelijk te veronderstellen dat een sterke stijging van neerslaghoeveelheden zich vooral aan de kust situeert. De trend in de extremen van de dagelijkse neerslag is echter niet meer statistisch significant in gebieden verder dan 50 km van de kust, terwijl dit 100 km is voor 10-daagse neerslag. De invloed van de stijgende zeewatertemperatuur reikt dus veel verder voor 10-daagse neerslagextremen.

Als illustratie tekenen we in figuren 1.19 en 1.20 de jaarlijks maxima van dagelijkse en 10-daagse neerslag (1951-2012) van het meetpunt in Pollinkhove, dat zich op ongeveer 15 km van de kust bevindt. In beide gevallen is er een sterke stijging in de jaarlijkse maxima die, ruwweg geschetst, start in de jaren 1980.



Figuur 1.19. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in een dag te Pollinkhove tijdens de periode 1951-2012.



Figuur 1.20. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in 10 dagen te Pollinkhove tijdens de periode 1951-2012.

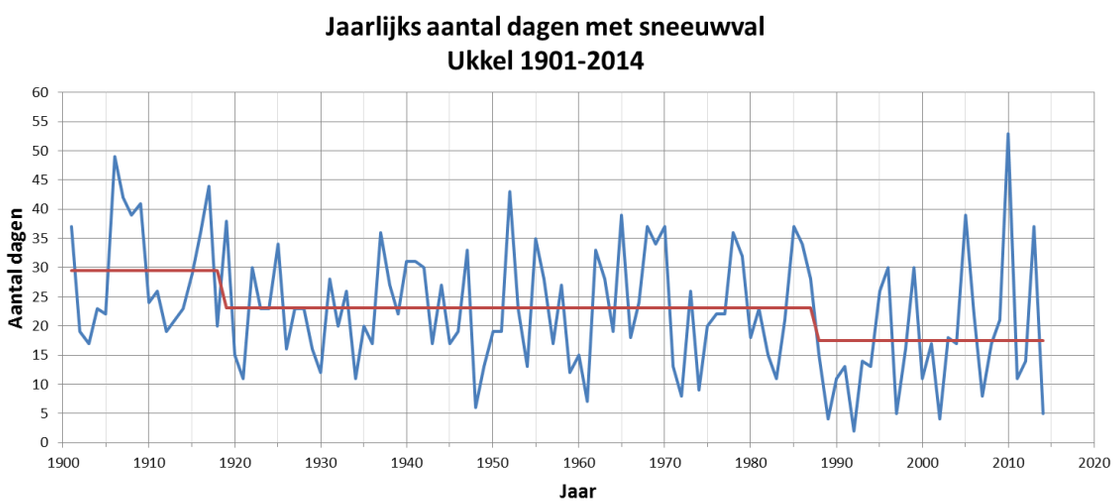
Als algemene conclusie kunnen we dus stellen dat het onderzoek van de neerslaggegevens heeft geleid tot veel minder opvallende resultaten dan bij de studie van de temperaturen. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door de zeer grote variabiliteit van de neerslaghoeveelheden in onze streken.

Toch kunnen we onthouden dat de jaarlijkse gecumuleerde neerslaghoeveelheden en de hoeveelheden tijdens de winter en de lente licht zijn toegenomen in Ukkel sinds de 19de eeuw en dat we hetzelfde patroon zien in verschillende streken van het land voor de jaarlijkse extremen van de gecumuleerde neerslaghoeveelheden over verschillende dagen (die zich meestal tijdens de winter voordoen) sinds de jaren 1950. Bij de jaarlijkse extremen van de totale neerslaghoeveelheden op kortere tijd (van 1 uur tot 1 dag) echter zien we geen opmerkelijke tendens, behalve voor de stations nabij de kust waar, volgens een recente studie, de jaarlijkse extreme waarden van de dagelijkse totale neerslaghoeveelheid duidelijk gestegen zijn vanaf het begin van de jaren 1980.

Dat de neerslag van korte duur niet toegenomen is, toch niet in het binnenland, strookt helemaal niet met de indruk die bij het publiek leeft. We zijn, vooral de laatste jaren[5], immers getuige geweest van schade veroorzaakt door intense onweders. We moeten dus besluiten dat, indien de kwetsbaarheid van de stedelijke woongebieden ten opzichte van de onweersbuien gestegen is, dit waarschijnlijk ook het gevolg is van andere omgevingsfactoren, zoals de dichtheid van de bebouwing en de ondoordringbaarheid van de bodem. Wij benadrukken echter het feit dat deze bemerkingen geen voorlopige oordelen zijn betreffende de toekomstige evolutie van de onweersachtige neerslag in ons land en de hieraan verbonden lokale overstromingen.

Valt er minder sneeuw?

In het station te Ukkel beschikken we over een reeks waarnemingen met het aantal dagen met sneeuwval[5] sinds 1901. Figuur 1.21 illustreert de evolutie van het jaarlijkse aantal dagen met neerslag onder de vorm van sneeuw sinds 1901. We merken op dat de waarde van deze parameter heel variabel is van het ene naar het andere jaar en dat het sinds de opwarming aan het einde van de jaren 1980 zeer duidelijk minder sneeuwt in Ukkel tijdens de jaren 1990 dan in het verleden. Er was al een eerste, zeer opvallende daling rond 1920, als gevolg van de opwarming in het begin van de 20ste eeuw. Hiertegenover staat dat men tijdens de laatste tien jaren een grote variabiliteit waarneemt van het ene jaar tegenover het andere, met daarbij een aantal zeer sneeuwrijke jaren. 2010 was trouwens het jaar met de meeste sneeuw in Ukkel sinds het begin van de 20ste eeuw.



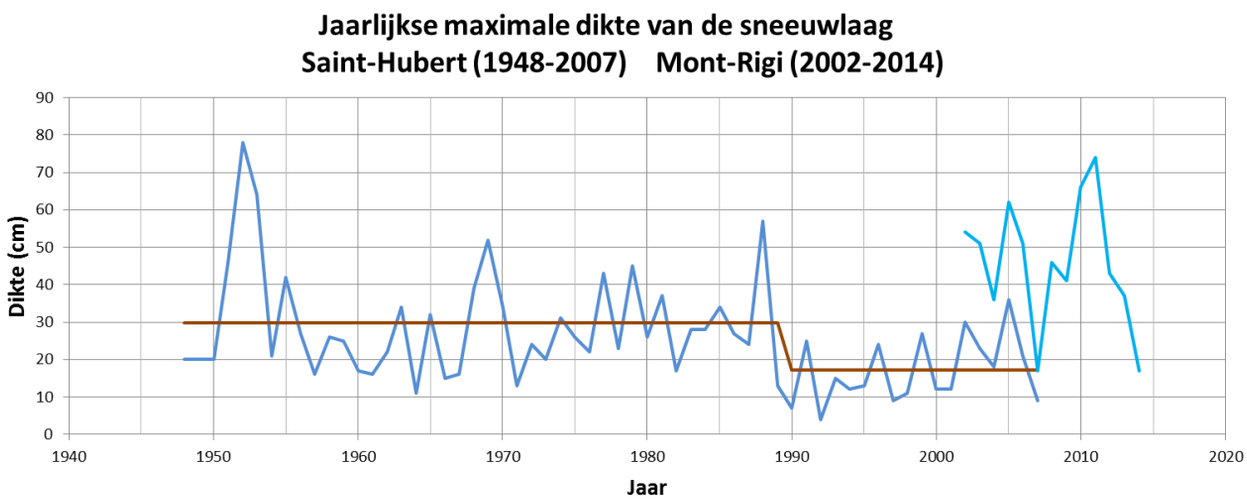
Figuur 1.21. Aantal dagen met neerslag onder de vorm van sneeuw in Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

De dikte van de sneeuwlaag wordt in Ukkel sinds het einde van de 19de eeuw gemeten. De jaarlijkse maximale waarde vertoont een zeer grote variabiliteit van het ene jaar naar het andere. Ook al zijn de waarden gemeten sinds de opwarming tijdens de jaren 1980 vrij laag, toch kunnen we geen duidelijke tendens vaststellen voor die parameter gedurende de 20ste eeuw. Hetzelfde geldt voor het jaarlijkse aantal dagen met sneeuw op de bodem, sinds de jaren 1980 in het algemeen vrij laag in Ukkel, maar sinds het begin van de 20ste eeuw werd er geen merkbare tendens ontdekt.

5 Met 'sneeuwval' bedoelt men hier elke soort neerslag die bestaat uit sneeuw (dat kan bijvoorbeeld een paar sneeuwvlokken zijn met tegelijkertijd regen of meer klassieke sneeuwval).

Elders in het land zijn de reeksen met sneeuwmetingen veel korter en vaak minder nauwkeurig. We hebben wel sinds 1948 een heel waardevolle reeks met de dikte van de sneeuwlaag waargenomen in het station van Saint-Hubert, gelegen op het Ardens plateau en eigendom van Belgocontrol. In dit station zien we, na de opwarming van de jaren 1980, een zeer opvallende daling van de jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag, vooral tijdens de jaren 1990 (zie figuur 1.22). Spijtig genoeg zijn de sneeuwobservaties onderbroken sinds 2008. Een relatief homogene reeks gegevens over de sneeuwdikte is sinds de winter 2002 beschikbaar voor het station Mont-Rigi, op het plateau van de Hoge Venen (zie figuur 1.22).

We kunnen voorzichtig concluderen dat het geheel van de maximale sneeuwdikte in de Ardennen relatief zwak en stabiel blijft tijdens de jaren 1990, na de opwarming aan het eind van de jaren 1980. Toch lijkt de jaarlijkse maximale sneeuwdikte vanaf het midden van de jaren 2000 een lichte verhoging te vertonen. Het zal interessant zijn om de komende jaren de situatie betreffende de sneeuwval, verder op te volgen.



Figuur 1.22. Jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag in Saint-Hubert tijdens de periode 1948-2007 en in Mont-Rigi tijdens de periode 2002-2014. De jaarlijkse maximale dikte is de maximale dikte die waargenomen werd tussen december en februari en het aangeduid jaar komt overeen met de maanden januari en februari.

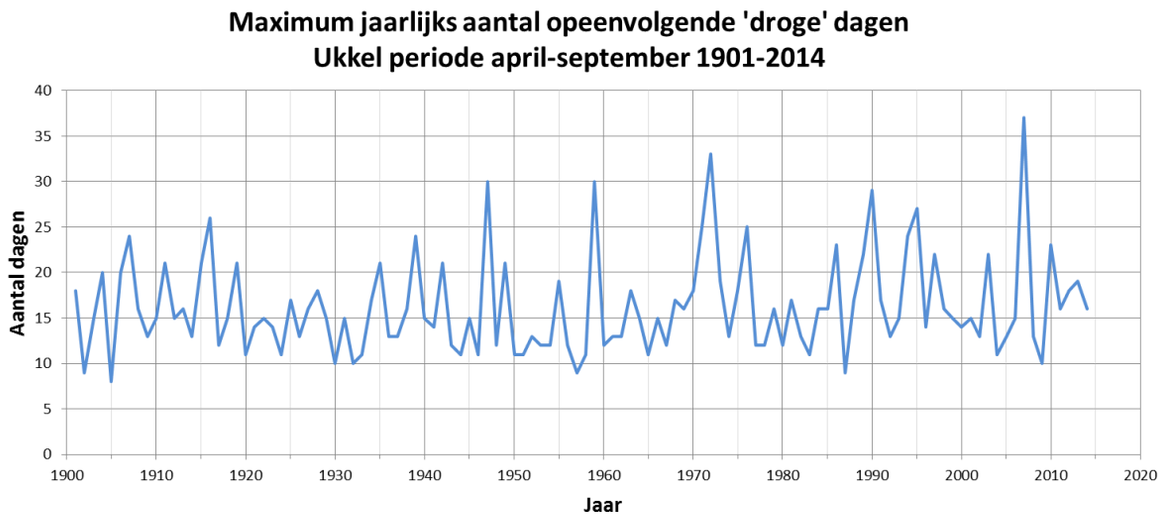
Zijn er meer droogteperiodes?

Een lange periode zonder neerslag, of met nagenoeg geen neerslag, kan schadelijke gevolgen hebben voor verschillende sectoren van onze samenleving. Zo verstoort bijvoorbeeld te weinig neerslag tijdens de winterperiode de aanvulling van de watervoorraad in de ondergrondse waterreserves. In de lente en in de zomer verstoort een watertekort het landbouwrendement. Een te lange droogteperiode werkt branden in de Hoge Venen tijdens de lente in de hand.

Het begrip *droogte* is niet op een eenvoudige en algemene manier definieerbaar. Zoals we al illustreerden hangt zij af van het domein waarin wij ons vooral interesseren. In elk geval speelt het neerslagtekort, beschouwd over een min of meer langere periode, een cruciale rol, maar andere parameters (zoals de wind, de temperatuur, de hoeveelheid water aanwezig in de bodem, ...) spelen eveneens een rol in het karakteriseren van de ernst van de droogte en helpt ons de omvang en de impact ervan in te schatten.

Wij zullen hier enkel de evolutie van de langste periodes zonder significante dagelijkse neerslag[6] in de loop van de 20ste eeuw onderzoeken. Figuur 1.23 illustreert sinds 1901 voor de zes warmste maanden van het jaar de duur van de langste periode zonder significante neerslag. De trendanalyse toont geen significante evolutie van deze parameter sinds het begin van de 20ste eeuw. Merk op dat het absolute record dateert uit 2007, met 37 opeenvolgende dagen zonder significante neerslag te Ukkel tussen 30 maart en 5 mei.

6 Onder "significante neerslaghoeveelheid" verstaan wij hier een dagelijkse neerslaghoeveelheid die tenminste 0,5 mm bereikt. Dit laat ons toe om onder een droge dag een dag te verstaan als zijnde een dag waarop de gevallen neerslaghoeveelheid zeer klein was. Dit laat ons eveneens toe het soms delicate probleem van de meting van kleine neerslaghoeveelheden te omzeilen.



Figuur 1.23. Duur (in dagen) van de langste periode zonder significante neerslag (dagelijkse hoeveelheden kleiner dan 0,5 mm) gedurende de zes warmste maanden van het jaar te Ukkel tijdens de periode 1901-2014.

Een gelijkaardig resultaat wordt bekomen wanneer we de evolutie van de langste duur van een periode zonder significante dagelijkse neerslaghoeveelheden tijdens de koudste periode van het jaar bestuderen. Geen enkele significante evolutie van deze parameter werd waargenomen sinds het begin van de 20ste eeuw.

Als conclusie kunnen wij stellen dat, rekening houdend met het feit dat de duur van de periodes zonder significante neerslaghoeveelheden een aanwijzing zijn voor het karakteriseren van de intensiteit van droogteperiodes, de resultaten van de uitgevoerde analyses geen indicatie geven dat de droogteperiodes intenser zijn geworden gedurende de laatste 114 jaren.

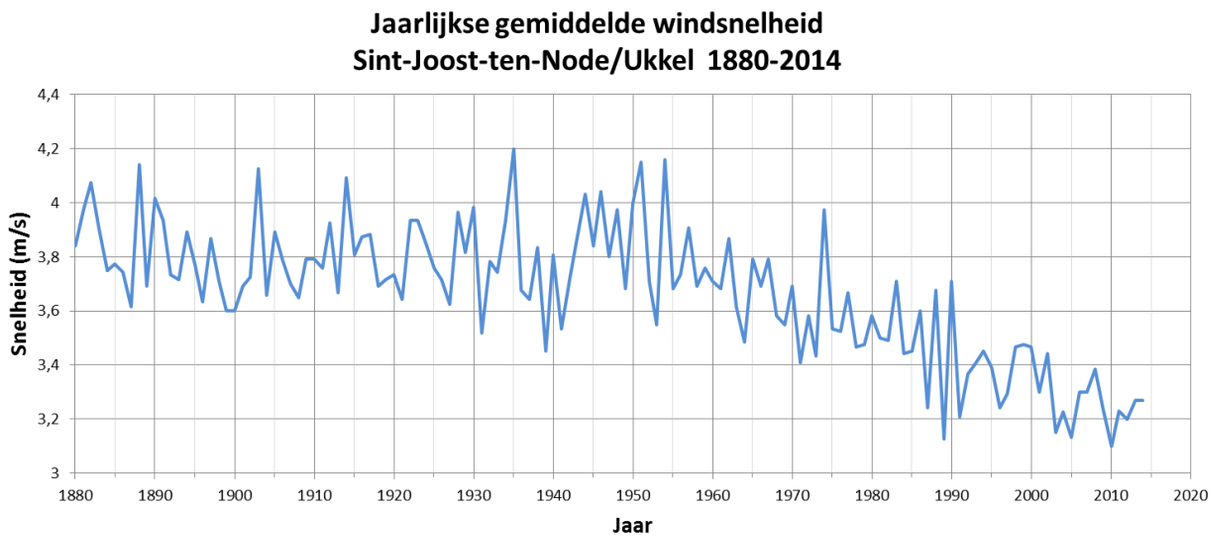
Wij moeten echter benadrukken dat deze algemene conclusies niet noodzakelijk van toepassing zijn op alle soorten droogtes en dat complementaire studies nodig zullen zijn om de eerste resultaten die hier werden beschreven te vervolledigen. Bijvoorbeeld bij de bevoorrading van ondergrondse waterreserves moeten de neerslagtekorten meestal geanalyseerd worden over langere periodes (van een seizoen tot enkele jaren) en de droogte-indicatoren die in deze studie worden gedefinieerd zijn bijgevolg niet van toepassing in dat domein.

1.2.3 Wind

Zijn er meer stormen?

De windmetingen worden sterk beïnvloed door de karakteristieken van de omgeving rond de anemometrische meetmast (bijvoorbeeld obstakels te dichtbij zoals gebouwen of bomen), maar ook door de ruwheid en de topografie van de omgeving. Elke verandering van deze omstandigheden kan dus de trendanalyse van de anemometrische reeksen bemoeilijken.

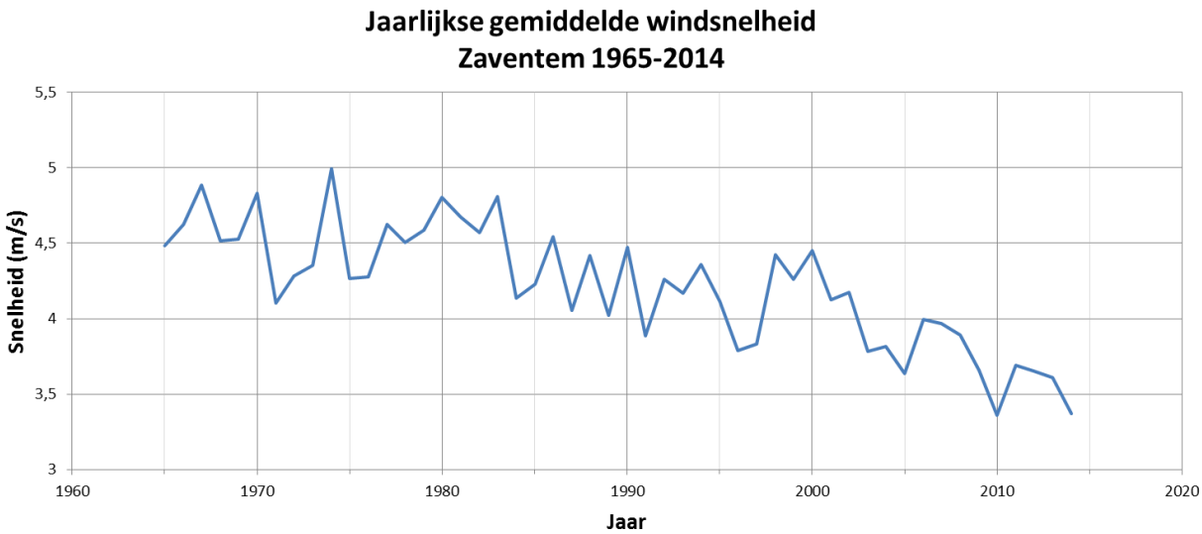
We zullen eerst de algemene evolutie van de windsnelheid bestuderen. De langste reeks windmetingen beschikbaar in ons land is de waarnemingsreeks van de klimatologische meetmast te Sint-Joost-ten-Node, daarna te Ukkel. Figuur 1.24 illustreert de evolutie van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid vanaf 1880. De analyse van deze gegevens duidt aan dat de gemiddelde windsnelheid in de streek van Brussel relatief stabiel is gebleven tot ongeveer 1960, waarna zij op een relatief regelmatige wijze afneemt met meer dan 15% tot op heden, met relatief gelijkaardige waarden die tijdens de laatste jaren waargenomen werden. Toch moet dit resultaat a priori met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Er werd immers tijdens de homogenisering van deze reeks wel rekening gehouden met de constructie van een gebouw in de nabijheid van de meetmast in de jaren 1960 en met de recente verandering van het type anemometer, maar niet met de evolutie van de vegetatie rondom de waarnemingsplaats.



Figuur 1.24. Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid in Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1880-2014 (in m/s).

Er bestaan ook andere anemometrische reeksen in België maar over kortere periodes. Een recente studie van het KMI heeft de waarnemingsplaatsen van de stations onderzocht en zo goed mogelijk de historiek van de metingen beschreven (Delcloo and Tricot, 2007). Zo kunnen we ervan uitgaan dat de metingen uitgevoerd in Zaventem vrij homogeen zijn sinds het midden van de jaren 1960. Figuur 1.25 toont de evolutie van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid op die plaats vanaf 1965. De windsnelheid is eerst relatief stabiel tot het begin van de jaren 1980; daarna, rond 1983, werd een duidelijke, vrij onverwachte daling merkbaar en een nieuwe daling lijkt zich in het begin van de jaren 2000 in te zetten. De vermindering van de windsnelheid tussen de eerste jaren van de reeks en de recentere jaren bedraagt ongeveer 10%. Dit resultaat is globaal gezien coherent aan het resultaat dat we verkregen uit de metingen gedaan in Ukkel (zie figuur 1.24) en aan het resultaat van het station te Saint-Hubert, in de Ardennen, waar de omgeving, net als in het station te Zaventem, redelijk onveranderd is gebleven sinds het midden van de jaren 1960.

Wanneer we de evolutie van de wind op schaal van de seizoenen sinds 1965 bestuderen, vinden we relatief coherente resultaten voor de drie hier besproken stations: met uitzondering van de winter (en eveneens de herfst in Ukkel) kenden we in de drie stations tijdens de andere seizoenen een relatief brutale en zeer opvallende afname van de windsnelheid sinds de jaren 1980. Er werd echter geen duidelijke tendens waargenomen tijdens de winter, met andere woorden tijdens het seizoen waarin de windsnelheden meestal het hoogst zijn.

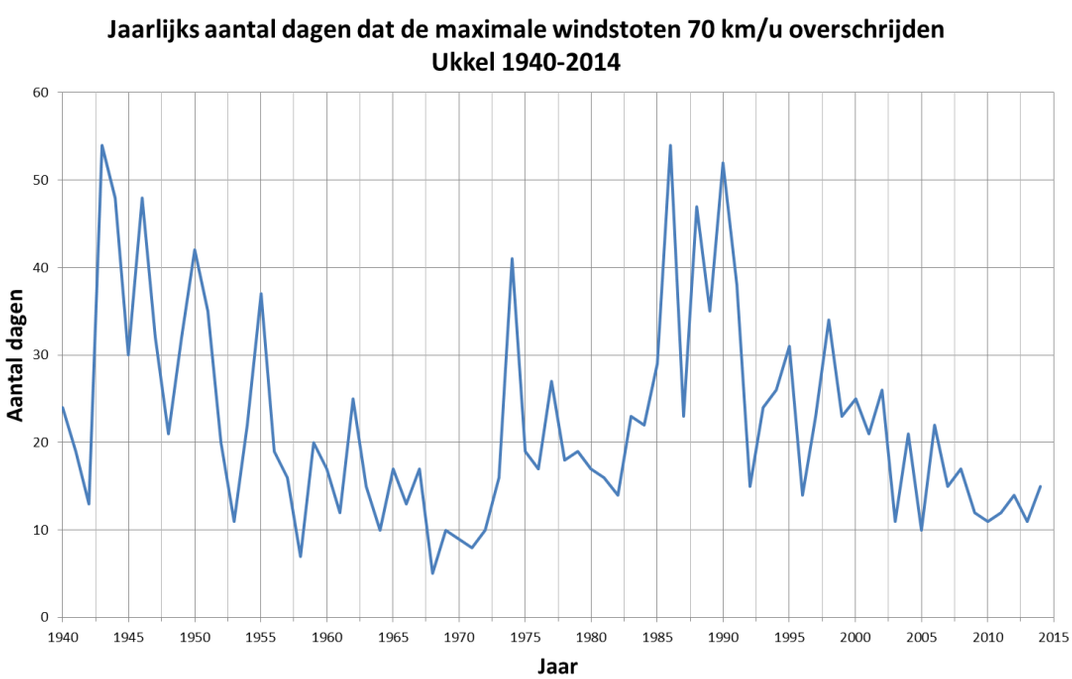


Figuur 1.25. Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid, te Zaventem tijdens de periode 1965-2014 (in m/s).

Laten we nu de hoogste windsnelheden eens bekijken, die meestal voorkomen tussen oktober en april en die soms de oorzaak kunnen zijn van belangrijke schade in ons land.

Hier zullen we een *stormdag* op een gemakkelijke manier definiëren als een dag tijdens welke de windstoten minstens de drempelwaarde van 70 km/u overschrijden.

Figuur 1.26 toont de evolutie van jaarlijks aantal stormdagen te Ukkel tijdens de periode 1940–2013. Tijdens deze periode bedraagt het gemiddelde van deze parameter 24 dagen. De analyse van de evolutie van deze parameter leidt ons er toe te besluiten dat, globaal bekeken, er geen duidelijke evolutie van deze parameter tijdens de bestudeerde periode is. Bovendien kunnen we hier opnieuw een belangrijke variabiliteit van de waarde van deze parameter waarnemen op de schaal van enkele jaren: in het bijzonder zien we een hoge frequentie van het aantal stormdagen rond de jaren 1947 en 1989 en lagere waarden tijdens de jaren 1960 en in het begin van de jaren 1970. De recentste jaren worden eveneens gekenmerkt door relatief lage waarden van de frequentie van het aantal stormdagen.



Figuur 1.26. Jaarlijks aantal stormdagen (maximale windstoot hoger dan 70 km/u) te Ukkel tijdens de periode 1940-2014.

De analyse van de beschikbare gegevens in de andere anemometrische stations sinds 1985, toont ons hetzelfde resultaat als dat van Ukkel: de terugkeerfrequentie van de stormen (als we deze definitie hanteren) is niet gestegen tijdens de laatste 25 jaar.

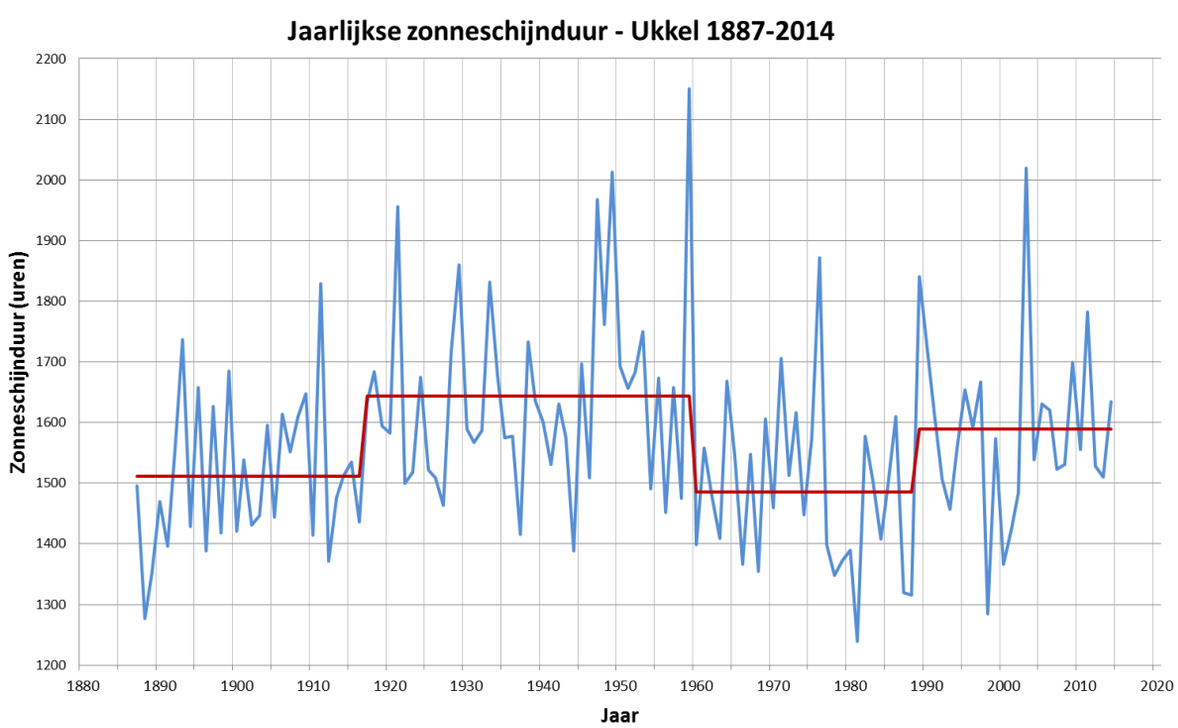
Dezelfde vaststelling van een globale stabiliteit, niettegenstaande een variabiliteit op schaal van enkele jaren, is van toepassing op de reeks waarnemingen van de maximale windstoten te Ukkel (sinds 1940) en in de andere stations (sinds 1985). In het bijzonder stellen wij vast dat de maximale windstoten relatief laag zijn geweest tijdens de laatste 20 jaren, na een verzameling van hoge waarden tussen 1983 en 1990. Wij kunnen dus besluiten, ons baserend op het geheel van de verkregen resultaten, dat de intensiteit van de stormen in ons land dus niet is toegenomen tijdens de laatste decennia, en in het bijzonder niet tijdens de laatste 20 jaar.

Om te eindigen merken we nog op dat in de zomer, tijdens de onweders, de winden soms ook *lokaal* heel hevig kunnen zijn; wat dit betreft herinneren wij de catastrofe die het Pukkelpop-festival in augustus 2011 trof. In het bijzonder kunnen in sommige gevallen tornado's ontstaan uit een onweerwolk en bij deze gelegenheid soms min of meer aanzienlijke schade aanrichten, zoals in Oostmalle in 1967 en in Léglise in 1982. Dit soort meteorologisch fenomeen maken we gemiddeld enkele keren per jaar mee in België. Het KMI beschikt over veel informatie over de tornado's die ontstaan zijn in ons land sinds meer dan een eeuw, maar alleen met een grondige analyse van die informatie en een controle van hun kwaliteit kunnen we misschien vaststellen dat de frequentie van dit extreme fenomeen gestegen is sinds het begin van de 20ste eeuw. Dit soort studie is bijzonder delicaat, rekening houdend met de moeilijkheid van het opmaken van homogene waarnemingsreeksen.

1.2.4 Zonnestraling

Is de zonneschijnduur veranderd?

De zonneschijnduur wordt in Ukkel gemeten sinds 1887. Ze is nauw gecorreleerd met de hoeveelheid wolken in de lucht, één van de belangrijkste klimatologische parameters, maar waarvan de waarneming relatief delicaat is. Figuur 1.27 illustreert de evolutie van de jaarlijkse zonneschijnduur in Ukkel sinds het begin van de waarnemingen (de oude gegevens werden bijgesteld om overeen te stemmen met het nieuwe meetapparaat dat sinds enkele jaren gebruikt wordt). Er is geen globale tendens te zien in deze periode van 128 jaar, maar we hebben wel een belangrijke variabiliteit opgemerkt op meerjaarlijkse schaal, met meestal hogere waarden tussen de jaren 1920 tot 1950 en meestal lagere waarden tussen de jaren 1960 tot 1990. Tijdens de laatste 25 jaar situeren de waarden van de zonneschijnduur zich rond jaarwaarden die rond de gemiddelde waarde schommelen.



Figuur 1.27. Jaarlijkse zonneschijnduur (in uren) in Ukkel tijdens de periode 1887-2014.

Als we de tendensen op schaal van de seizoenen bekijken, zien we dat daar ook geen globale tendens detecteerbaar is sinds 1887. We zien dat er tijdens de lente, meer dan tijdens de andere seizoenen, duidelijke groeperingen zijn van relatief opvallende waarden, met waarden meestal boven het gemiddelde tussen 1910 en 1960 en waarden meestal onder het gemiddelde tussen 1960 en 1990. Na de zomer van 1976, die bijzonder zonnig was, was de zonneschijnduur veel lager voor de volgende tien zomers, met waarden die meestal onder het seizoengemiddelde lagen. Vervolgens vertoont de zomerse zonneschijnduur, sinds de jaren 1990, de tendens hogere waarden te hebben dat het seizoengemiddelde.

Tenslotte voegen we hier nog aan toe dat de evolutie van de globale zonnestraling aan het aardoppervlak, gemeten te Ukkel tijdens de laatste decennia, verder in de tekst voorgesteld en besproken zal worden (zie hoofdstuk 2). De resultaten van de periode 1887-2013 voor de zonneschijnduur die hier verkregen werden, zijn coherent met de resultaten voor de zonne-energie die het aardoppervlak bereikt.

1.3 Samenvatting

De regelmatige meteorologische metingen zijn begonnen in 1833 in de regio Brussel, in Sint-Joost-ten-Node, en werden dan vanaf 1886 voortgezet in Ukkel wanneer de sterrenwacht naar de actuele waarnemingsplaats van het KMI verhuisde. De lange waarnemingsreeksen uitgevoerd te Brussel hebben ons toegelaten de vraag over de evolutie van het Belgische klimaat tijdens de laatste 180 jaar te behandelen. Er werd ook nuttige, bruikbare data geleverd door andere waarnemingsstations, maar over kortere periodes, die pas begonnen zijn tijdens de tweede helft van de 20ste eeuw.

Uit het geheel van geanalyseerde gegevens blijkt dat het Belgische klimaat geëvolueerd is in de loop van de 20ste eeuw. Meer in het bijzonder deden er zich twee opmerkelijke en vrij plotse stijgingen voor in zowel de seizoentemperaturen als de jaartemperaturen (in de orde van 1°C), de eerste in de eerste helft van de 20ste eeuw en dan tijdens de jaren 1980. In Ukkel is het jaar 2014 het warmste jaar ooit sinds het begin van de waarnemingen in 1833 en het verbreekt zelfs het vorige record van 2011. Bovendien hebben de 18 warmste jaren plaatsgevonden gedurende de laatste 26 jaar .

De frequentie van de hittegolven vertoont een significante stijgende trend in het begin van de jaren 1990. De variabiliteit van deze parameters is nochtans belangrijk tijdens de hele 20ste eeuw en de kenmerken van de hittegolven van de recentste jaren zijn relatief gelijkaardig aan deze waargenomen tijdens de jaren 1940, als gevolg van de zomerse opwarming tijdens het eerste deel van de 20ste eeuw. De gevoeligheid van de verkregen resultaten, afhankelijk van de door ons weerhouden definitie in deze studie om een hittegolf te karakteriseren, lonen zeker de moeite om verder onderzocht te worden.

De frequentie van de koudegolven lijkt echter op significante manier te zijn afgenomen in het begin van de jaren 1970. Ook hier zou het interessant zijn om de gevoeligheid van de verkregen resultaten in functie van de exact gehanteerde definities verder te onderzoeken.

De algemene stijging van de minimumtemperaturen tijdens de 20ste eeuw ligt ook aan de basis van de verlenging van de maximale jaarlijkse periode zonder vorstdagen. Inderdaad, de laatste vorstdag aan het einde van de winterperiode heeft de tendens zich steeds vroeger voor te doen, terwijl de eerste vorstdag bij de aanvang van de winterperiode de trend vertoont zich later te manifesteren.

Voor de neerslag tussen het begin van de waarnemingen in 1833 en het begin van de 21ste eeuw zien we voor de Brusselse regio een stijging van de totale jaarlijkse hoeveelheid (in de orde van 7%) en van de totale hoeveelheid in de winter en de lente (in de orde van 15%).

Bovendien nemen we in vele klimatologische stations van ons land tijdens de laatste zestig jaar een stijgende tendens waar, die significant tot zeer significant is voor de jaarlijkse extreme neerslaghoeveelheden gecumuleerd over verschillende dagen; deze extreme neerslaghoeveelheden komen meestal voor tijdens de winter. De jaarlijkse maxima op 24 uur (of zelfs voor kortere tijdsduren) echter zijn meer stabiel, behalve in het westen van het land waar, volgens een recente studie, in de jaarlijkse dagelijkse maxima al een opmerkelijke stijging aanwezig is.

In Ukkel blijkt, uit de analyse van de jaarlijkse maxima sinds 1898 van de neerslaghoeveelheden in een periode van 1 uur tot 24 uren, dat er geen duidelijke evolutie voor deze parameters merkbaar is. Bovendien, niettegenstaande enkele recordwaarden tijdens de recentste jaren, vertoont de jaarlijkse frequentie van het aantal dagen waarop de neerslaghoeveelheid meer dan 20 mm bedroeg, tot op heden ook geen significante evolutie in Ukkel.

Tenslotte kunnen we uit het geheel van de geanalyseerde neerslaggegevens tot de conclusie komen dat noch de intensiteit, noch de frequentie van onweersbuien in de Brusselse regio een statistisch significante stijging vertonen sinds het begin van de 20ste eeuw. Indien er de laatste jaren een tendens tot verhoging van deze parameters op korte termijn waargenomen werd, zal dit zich moeten bevestigen in de komende jaren om van een opmerkelijke evolutie te kunnen spreken voor de onweersbuien die ons land treffen. Deze vaak intense en overvloedige buien kunnen enkele uren aanhouden.

Vanuit de analyse van de jaarlijkse maxima van de dagelijkse neerslag, welke vaak een onweerachtige oorsprong heeft, opgemeten in het Belgisch klimatologisch netwerk, kunnen we eveneens besluiten dat er geen duidelijke tendens op schaal van ons land bestaat voor de 60 laatste jaren. Dit met uitzondering voor het westen van het land (tot op enkele tientallen kilometers van de kust) dat een verhoging van de jaarlijkse dagmaxima vertoont.

Een volledige studie van de evolutie van de droogtes in België zou talrijke analyses vereisen die niet uitvoerbaar waren in het kader van dit werk. Het hoofdresultaat van deze eerste studie duidt aan dat de duur van de langste periodes zonder significante neerslag geen enkele significante evolutie vertonen sinds het begin van de 19de eeuw.

Nauw verbonden met de stijging van de temperaturen in het begin en op het einde van de 20ste eeuw, is de neerslag onder de vorm van sneeuw zeer duidelijk minder frequent geworden in Ukkel. De hoeveelheid sneeuw op de bodem is heel veranderlijk van het ene jaar op het andere en we kunnen geen duidelijke evolutie ontdekken in de regio Brussel, zelfs al zijn de hoeveelheden gevallen sneeuw de laatste jaren meestal klein. Op het Ardens plateau, in de regio van Saint-Hubert, is er echter een zeer duidelijke daling te zien in de jaarlijkse maximale sneeuwdikte sinds de winterse opwarming van het einde van de jaren 1980.

In Ukkel nemen we een zeer duidelijke daling van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheden waar in de tweede helft van de 20ste eeuw. Maar door de ontwikkeling van vegetatie gedurende al die jaren rondom het meetpunt, kunnen we niet met zekerheid zeggen dat deze trend enkel het gevolg is van een klimatologisch effect.

Elders in het land, in enkele meetpunten, bestaan er sinds het midden van de jaren 1960 windmetingen die waarschijnlijk, klimatologisch gezien, betrouwbaarder zijn. De analyse van die gegevens vertoont een vrij plotse daling in de windsnelheid in de jaren 1980, en vervolgens een lichte toename van deze tendens. Dit opmerkelijke gedrag is ook zichtbaar op schaal van de seizoenen, behalve tijdens de winter wanneer de wind, hoewel heel veranderlijk van het ene jaar op het andere, over de gehele periode toch “stabieler” is.

Wat de stormen betreft hebben de analyses, die tot nu toe werden uitgevoerd op de hogere windstoten in Ukkel sinds 1940 en elders in ons land sinds 1985, nog geen specifieke trend aangetoond, noch wat betreft de *intensiteit* van de jaarlijkse maximale windstoten, noch voor de *frequentie* van de maximale windstoten. Ook uit de analyse van de seizoengebonden en jaarlijkse zonneschijnduur, gemeten in Ukkel, kunnen we geen globale tendens halen voor deze parameters sinds het begin van de metingen in 1887, maar we ontdekken wel een algemene belangrijke variabiliteit op schaal van enkele jaren.

1.4 Perspectieven

Wij moeten vermelden dat deze studie van het klimaat van België op schaal van de 20ste eeuw niet volledig is en dat er nog onderzoek in dit domein nodig is. Zo zou bijvoorbeeld het project voor het coderen van de lange reeksen waarnemingen van het klimatologische netwerk ons moeten toelaten de resultaten van de uitgevoerde analyses voor die reeksen te vergelijken met de reeds bekomen resultaten van het station te Ukkel.

Vervolgens zou het nuttig zijn om de evolutie van andere klimatologische parameters te onderzoeken die hier nog niet be-studeerd werden, hetzij door gebrek aan tijd, hetzij bij gebrek aan reeksen beschikbaar onder digitale vorm, zoals de bewolkingsgraad maar eveneens de gecombineerde evolutie van verschillende parameters. Het zou bovendien ook bijzonder interessant zijn om de hier besproken veranderingen te linken aan waargenomen veranderingen in de atmosferische circulatie en de frequentie van de weertypes.

Tenslotte zou de analyse van de evolutie van de verschillende klimaatindexen, die verschillende klimatologische parameters combineren, uitgevoerd kunnen worden in samenwerking met personen of groepen die geïnteresseerd zijn in de studie van de impact van de klimaatveranderingen op verschillende domeinen (landbouw, bosbouw, fauna en flora, hydrologie, gezondheid, energie, verzekeringen, ...).

Wij hebben in dit hoofdstuk een geheel van resultaten gebundeld afkomstig van de analyses van de lange klimatologische waarnemingsreeksen uitgevoerd te Ukkel. Het volgende hoofdstuk illustreert de bijdrage van het KMI in onderzoekdomeinen die de opvolging van het klimaatsysteem betreffen, vertrekkende vanuit recentere meettechnieken. Als aanvulling van dit hoofdstuk zal de evolutie van andere klimatologische parameters, die eveneens te Ukkel worden gemeten (bvb ozon, zonnestraling, aerosolen) worden voorgesteld, maar over kortere periodes.

Bibliografie

Brabson, B.B. and Palutikof, J.P.: The evolution of extreme temperatures in the Central England temperature record. Geophys. Res. Lett., 29, 2163, 2002.

Delcloo, A. and Tricot, Ch.: Reference meteorological stations and wind data. In «Improved prediction of wind power in Belgium», project CP/54 SPSD II (Y. Cabooter et al.), Final Report, published by the Belgian Science Policy, 11-62, 2007.

Demarée, G.R., Lachaert, P.J., Verhoeve T. and Thoen, E.: The Long-Term Daily Central Belgium Temperature (CBT) Series (1767--1998) and Early Instrumental Meteorological Observations in Belgium. Climate Change, 53, 269-293, 2002.

Gellens, D.: Trend analysis of k-day extreme precipitation over Belgium by means of nonparametric tests and principal components. Theor. Appl. Climatol., 66, 117-129, 2000.

Gellens, D.: Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium. J. Hydrol., 268, 113-126, 2002.

Hamdi, R. and Van de Vyver, H.: Estimating urban heat island effects on near-surface temperature records of Uccle (Brussels, Belgium) : An observational and modeling study. Advances in Science and Research, 6, 27-34, 2011.

Hamdi, R., Deckmyn, A., Termonia, P., Demarée, G.R., Baguis, P., Vanhuysse, S. and Wolf, E: Effects of historical urbanization in the Brussels Capital Region on surface air temperatures series : A model study. J. Appl. Meteorol. Climatol., 48, 2181-2196, 2009.

Hurrell, J. (2012). NAO/NAM climate indices. Available at http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html.

IPCC: Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.

Mann, H.B.: Non parametric test against trend. Econometrika, 13, 245-259.

Ntegeka, V. and Willems, P.: Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100-year time series of 10 min rainfall intensities at Uccle, Belgium. Water Resour. Res., 44, W07402, doi:10.1029/2007WR006471, 2008.

Pettitt, A.N.: A non parametric approach to the change-point problem. Appl. Statis., 28, 126-135.

Schlesinger, M. E. and Ramankutty, N.: An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. Nature 367, 723-726, 1994.

Sneyers, S.: On the statistical analysis of series of observations. Technical note, n°143, WMO N°415, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1990.

Van de Vyver, H.: Spatial regression models for extreme precipitation in Belgium. Water Resour. Res., 48, W09549, doi:10.1029/2011WR011707, 2012 a.

Van de Vyver, H.: Evolution of extreme temperatures in Belgium since the 1950s. Theor. Appl. Climatol., 107, 113-129, 2012 b.

Van de Vyver, H.: Practical return level mapping for extreme precipitation. IRM, Publication scientifique et technique, n°62, 30 p., 2013.

Vannitsem, S. and Naveau, P: Spatial dependences among precipitation maxima over Belgium. Nonlinear Processes Geophys., 14, 621–630, 2007.

HOOFDSTUK 2. WAARNEMINGEN DIE BIJDRAGEN TOT HET ONDERZOEK NAAR DE MECHANISMEN ACHTER DE KLIMAATVERANDERING.

2.1 Inleiding

Klimaatveranderingen zijn duidelijk meetbaar onder de vorm van temperatuurstijgingen in België (zie hoofdstuk 1) en op wereldschaal. Om te begrijpen waarom deze temperatuurstijgingen plaatsvinden, en om zo goed mogelijk te kunnen voorspellen hoe de temperatuur en ons klimaat in de toekomst zullen evolueren, is het belangrijk om de oorzaken van de temperatuursveranderingen zo goed mogelijk waar te nemen en te interpreteren. Over dit onderwerp is meer informatie beschikbaar in het volledige vijfde rapport van het IPCC van 2014.

Het is de bedoeling om in dit hoofdstuk een overzicht te geven van de bijdragen die het KMI levert in de waarneming en interpretatie van de mechanismen achter het klimaat en de klimaatverandering. Deze bijdragen situeren zich op het vlak van de waarneming van de zonnestraling en haar variaties, de zonnestraling aan de grond en aerosolen, de energiebalans van de aarde en in het bijzonder haar dagelijkse gang en de koppeling met het El Niño/La Niña-fenomeen, ozon, waterdamp, onderzoek in het Prinses Elisabeth Station in Antarctica, paleomagnetisme en de waarneming van kosmische straling.

2.2 Zonnestraling

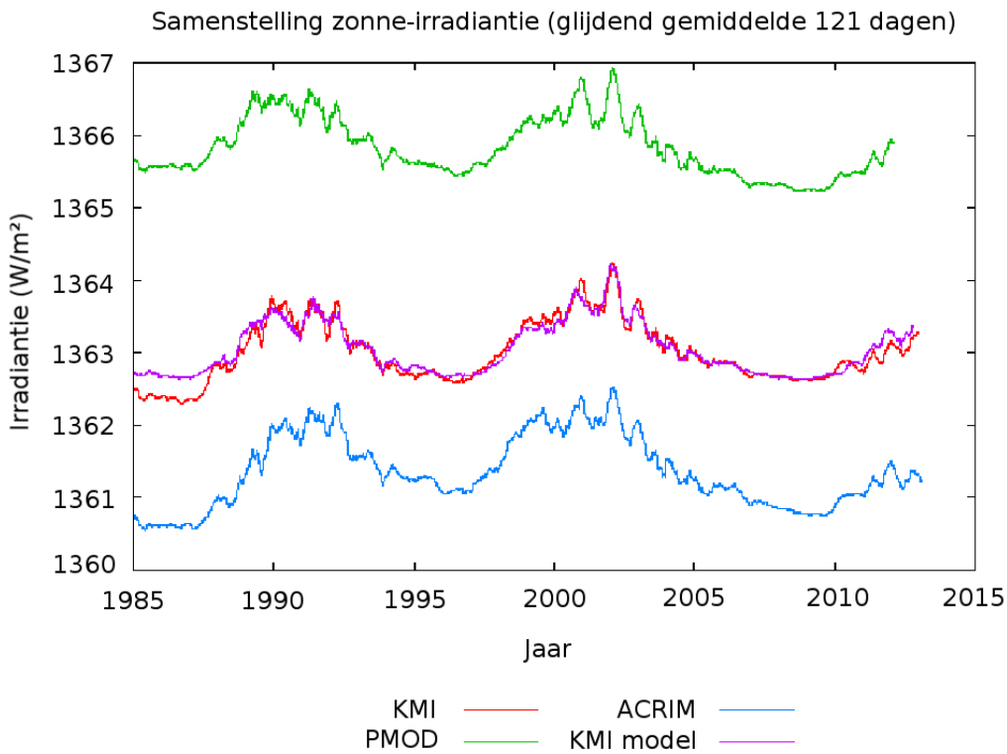
Totale zonnestraling

Het KMI vierde in 2013 niet alleen haar honderdjarig bestaan, maar ook de dertigste verjaardag van haar eerste instrument in de ruimte op Spacelab in 1983. In totaal maakte het KMI 11 ruimtevluchten met 6 verschillende instrumenten voor de meting van de totale zonnestraling. Momenteel hebben we een instrument actief in de ruimte, met name het DIARAD/Virgo-instrument op de SOHO-satelliet, dat sinds januari 1996 reeds 19 jaar trouwe dienst levert. Een volledig overzicht van onze ruimtevluchten is te vinden in de tabel hieronder.

Mission	*Instrument*	*Launch*	*Status*
Spacelab 1	Solcon 1	1983	Short-term
Atlas 1	Solcon 2	1992	Returned to ground
Eureca	Sova 1	1992	10 months data, returned to ground
Atlas 2	Solcon 2	1993	Returned to ground
Atlas 3	Solcon 2	1994	Returned to ground
SOHO	**Diarad/Virgo**	**1995**	**Ongoing**
Hitchhiker TAS	Sova 1	1997	Returned to ground
Hitchhiker IEH-3	Solcon 2	1998	Returned to ground
Freestar	Solcon 2	2003	Instrument lost during return
Columbus	Diarad/Sovim	2008	1 year data, failure of power supply
Picard	Sova-P	2010	Mission completed

Tabel 2.1. Ruimte-instrumenten van het KMI voor de meting van de totale zonnestraling.

De totale zonnestraling is het vermogen per eenheid oppervlakte – uitgedrukt in W/m² – van de energie onder de vorm van straling die de Aarde ontvangt van de zon. De gemiddelde waarde van de totale zonnestraling wordt ook de zonneconstante genoemd. De totale zonnestraling is de energiebron die de Aarde van warmte voorziet en die onze 'weer- en klimaatmachine' aandrijft. Mogelijke variaties van de zonnestraling zouden een rechtstreekse aanleiding voor klimaatveranderingen op Aarde zijn, daarom is haar nauwkeurige langetermijnwaarneming belangrijk.



Figuur 2.1. Samenstelling van de metingen van de variaties van de totale zonnestraling (in W/m² voor de laatste twee elf-jaarlijkse zonnecycli (cyclus 22, 23 en de start van cyclus 24)) door de drie internationale groepen KMI, PMOD en ACRIM. Het KMI-model is een regressiemodel dat gefit werd op de KMI-samenstelling van de metingen.

Op internationaal vlak is het KMI één van de drie groepen die een samenstelling van de metingen van de zonnestraling (zie figuur 2.1) maakten. De rode curve is onze samenstelling, de groene curve is de samenstelling door onze Zwitserse PMOD-collega's, en de blauwe curve is de samenstelling door onze Amerikaanse ACRIM-collega's. We zijn het erover eens dat op 'korte' termijn (kort op een klimaattijdschaal) de zonnestraling varieert met de elfjarige zonne-activiteitscyclus die bekend is uit de waarneming van zonnevlekken. De elf-jaarlijkse variaties van de inkomende zonnestraling zijn in de orde van 1 per duizend, en ze veroorzaken temperatuurvariaties in de orde van 0,1°C. Alhoewel deze variaties klein zijn, zijn ze niet te verwaarlozen en moeten ze in rekening gebracht worden om de temperatuurstijging ten gevolge van de broeikasgassen en de temperatuurdaling ten gevolge van de aerosolen correct in te schatten.

Sinds de lancering van het TIM/SORCE-instrument in 2003 werd het debat over de waarde van de zonneconstante, dat voordien definitief gesloten leek, heropend. Tegenover de consensuswaarde rond de 1366 W/m² van de zonneconstante, stelde TIM een nieuwe waarde rond de 1361 W/m² voor. In figuur 2.1 is het absolute niveau van de PMOD-samenstelling representatief voor de 'oude' consensuswaarde, en is het absolute niveau van de ACRIM-samenstelling representatief voor de 'nieuwe' TIM-waarde. Wij hebben onze absolute waarde kritisch herbekeken en we hebben, op een onafhankelijke wijze, een nieuwe waarde voor de zonneconstante (tijdens het minimum van de zonnecyclus) van ongeveer 1363 W/m² bekomen.

Naast de relatief kleine variaties op een tijdschaal van de elfjarige zonnecyclus blijft het een open vraag of er ook grotere variaties van de zonnestraling op een langere tijdsschaal bestaan. Het zon/klimaat-onderzoek werd tot nu toe gedomineerd door het van de sterrenkundige J.A. Eddy afkomstige idee uit 1976 dat er een overeenkomst bestaat tussen het Maunder Minimum van de zon (een langdurige periode van lage zonneactiviteit rond de periode 1650-1700) en de Kleine IJstijd op Aarde (een langdurige periode van lage temperaturen). Volgens de meest voor de hand liggende verklaring blijkt dat een langetermijnvariatie van de totale zonnestraling (Total Solar Irradiance = TSI), die de energie-input van de zon naar de Aarde kwantificeert, verantwoordelijk was voor de lage temperaturen. Om de Kleine IJstijd te kunnen verklaren, werden talrijke langetermijnreconstructies van de TSI, die het bestaan van een langetermijnvariatie van het zogenaamde 'kalme zon' TSI-niveau moesten postuleren, vooropgesteld.

Recente vooruitgang, ten eerste op het gebied van de meting van de TSI vanuit de ruimte, ten tweede in de langetermijnkarakterisatie van de zonneactiviteit aan de hand van de zonnevlekken, en ten derde door het onverwacht gedrag van de zon zelf tijdens de huidige zonnecylcus 24 die eind 2009 startte, geeft aanleiding om te geloven dat een verandering van paradigma in het zon/klimaat-onderzoek nodig is.

Het verschijnen van donkere vlekken op de zon werd door menselijke waarnemers reeds geregistreerd sinds de uitvinding van de telescoop en zijn eerste gebruik voor de waarneming van de zon in 1610 door Galileo. Onze collega's van de Koninklijke Sterrewacht van België (KSB) zijn verantwoordelijk voor het onderhoud van het 'Internationale Zonnevlekken Nummer', dat de langste reeks van directe waarnemingen van de manifestatie van magnetische activiteit op het zonne-oppervlak is. Sinds 2011 werden een aantal zonnevlekken workshops gehouden die hebben geleid tot de publicatie van een fundamenteel herziene tijdreeks van de zonnevlekken in 2014.

De actuele zonnecyclus (cyclus 24) die begonnen is in december 2008, is heel bijzonder in vergelijking met de laatste voorafgaande cycli (zie figuur 2.1). Deze karakteriseert zich door een langzame stijging van de zonne-activiteit voorgesteld door het aantal vlekken en deze bleef zwak tot het maximum bereikt werd in april 2014. De zonne-activiteit van cyclus 24 is één van de zwakste ooit waargenomen sinds het begin van de 20ste eeuw. Deze cyclus is momenteel in zijn dalende fase.

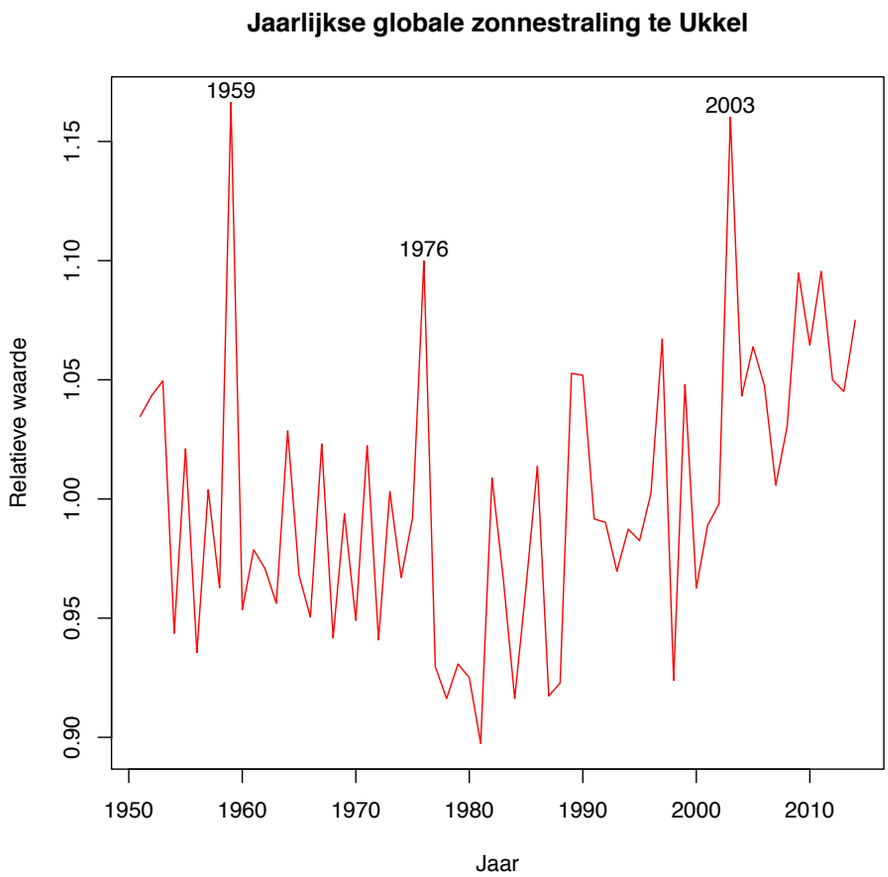
Tot slot denken wij dat het postulaat van de langetermijnvariatie van het TSI-niveau door 'Kalme Zon', niet langer gerechtvaardigd is. De laatste 300 jaar (sinds het Maunder Minimum) kent de zon in plaats van een langzaam stijgende activiteit, eerder een langetermijnmodulatie met periodes van ongeveer 100 jaar waarbij 'grote minima' bereikt werden rond 1810 en 1910.

Zonnestraling en aerosolen in Ukkel

Het KMI meet in Ukkel respectievelijk sinds 1951 en sinds 1985 de globale zonnestraling en de hoeveelheid aerosoldeeltjes in de atmosfeer. Informatie over de zonnestraling op langere termijn is zelfs beschikbaar via de metingen van de zonneschijnduur, die in Ukkel bestaan sinds 1887 (zie hoofdstuk 1).

De globale zonnestraling aan de grond is de hoeveelheid zonne-energie die invalt op een horizontaal vlak. Deze parameter hangt in de eerste plaats af van de hoeveelheid bewolking (een hoge zonnestraling komt overeen met een lage bewolking) en in de tweede plaats van de transmissie van de onbewolkte atmosfeer, die op zijn beurt afhangt van parameters zoals de hoeveelheid waterdamp, de hoeveelheid ozon en de aanwezigheid van aerosolen in de atmosfeer.

De langste meetreeks van de globale zonnestraling in België is deze van Ukkel, die in 1951 gestart werd. De rode curve in figuur 2.2 toont de relatieve waarde van de jaarlijkse cumulatieve waarde (relatief t.o.v. het gemiddelde over de volledige periode 1951-2014 van deze globale zonnestraling, i.e. 990 kWh/m^2).



Figuur 2.2. Relatieve variatie van de jaarlijkse globale zonnestraling in Ukkel tijdens de periode 1951-2014.

Uit de observaties komen de jaren 1959, 1976 en 2003 naar voren als jaren met een uitzonderlijk hoge zonnestraling. Een gedetailleerde analyse van halfuurlijkse stralingsmetingen waarbij het effect van de variabele bewolking gescheiden wordt van de variaties van de zonnestraling in een wolkeloze atmosfeer, toont aan dat de uitzonderlijk zonnige jaren 1959, 1976 en 2003 te wijten waren aan een uitzonderlijk lage bewolking in deze jaren.

Tijdens de periode van 1951 tot 1984 is er een afname van de zonnestraling met 6,3%, wat overeen komt met de 'global dimming'[7] die internationaal vastgesteld werd. Tijdens de periode van 1984 tot 2014 is er een toename van de zonnestraling met ongeveer 12%, en dit komt overeen met de recente globale stijging die internationaal door het BSRN (Baseline Surface Radiation Network) vastgesteld werd. Deze langetermijnveranderingen van de zonnestraling kunnen enkel verklaard worden door veranderingen in de hoeveelheid aerosolen (zie verder), die samenhangen met de luchtvervuiling. (zie [Wild, 2009] als referentie).

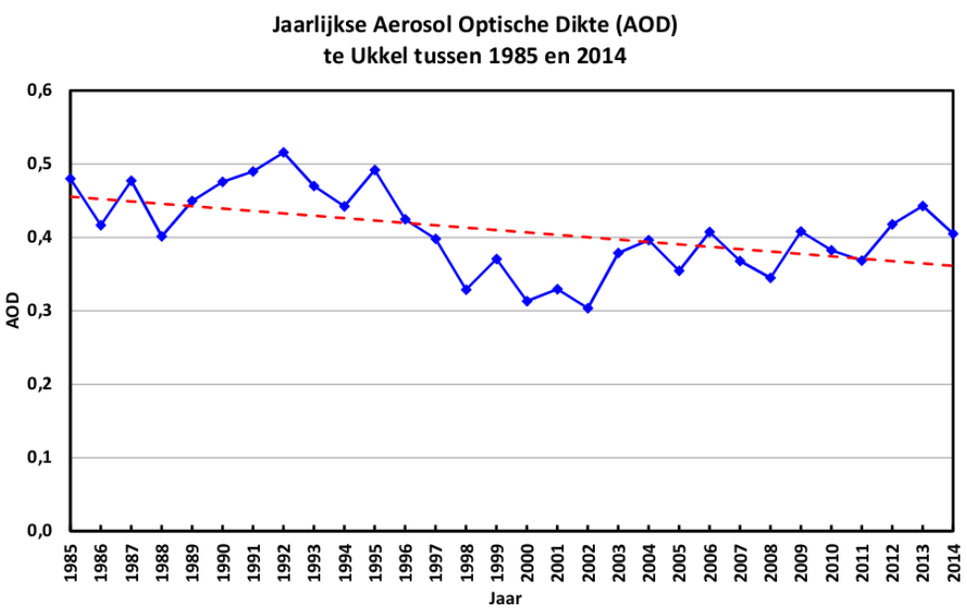
De gemiddelde temperaturen in Ukkel *(zie hoofdstuk 1, figuur 1.1)* tonen tijdens de periode van de global dimming geen systematische toename. De temperatuursprong in 1987-1988 en de warme anomalie in 2006-2007 (seizoenrecord voor drie opeenvolgende seizoenen van de herfst van 2006 tot de lente van 2007) gebeurden pas tijdens de periode van toenemende zonnestraling.

Sinds 1985 worden de aerosol optische dikten (AOD's) in het uv-B-golflengtegebied in Ukkel gemeten. De AOD karakteriseert de vermindering van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond door de aerosolen en is direct verbonden met het aantal deeltjes in de atmosfeer. Als de AOD groter is, zijn er meer deeltjes in de lucht en is de zonnestraling aan de grond lager.

7 Global dimming: de vermindering van de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt en die op verschillende plaatsen ter wereld werd vastgesteld aan het begin van de jaren 1950 tot ongeveer het midden van de jaren 1980.

De jaarlijkse gemiddelde waarden van de AOD's vanaf 1985 tot 2014 worden samen met een trendlijn in de onderstaande figuur 2.3 getoond. De totale trend is duidelijk negatief (-0,8 %/jaar), wat betekent dat de hoeveelheid aerosoldeeltjes in de atmosfeer gedurende deze periode afgenomen is. Dit verklaart de toename van de zonnestraling in Ukkel (zie figuur 2.2). De daling in AOD vond voornamelijk plaats tussen 1985 en 2002. Sindsdien lijken de AOD-waarden zich relatief gestabiliseerd te hebben.

De hoge AOD-waarden in 1992 zijn toe te schrijven aan de uitbarsting van de Pinatubo-vulkaan in 1991 in het zuidelijk halfrond, waarbij deze vulkaan een enorme hoeveelheid deeltjes in de atmosfeer geblazen heeft. Dit fenomeen illustreert het wereldwijde karakter van de verdeling van aerosolen en dus ook van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond.



Figuur 2.3. Aerosol Optische Dikte (AOD) in Ukkel tijdens de periode 1985-2014.

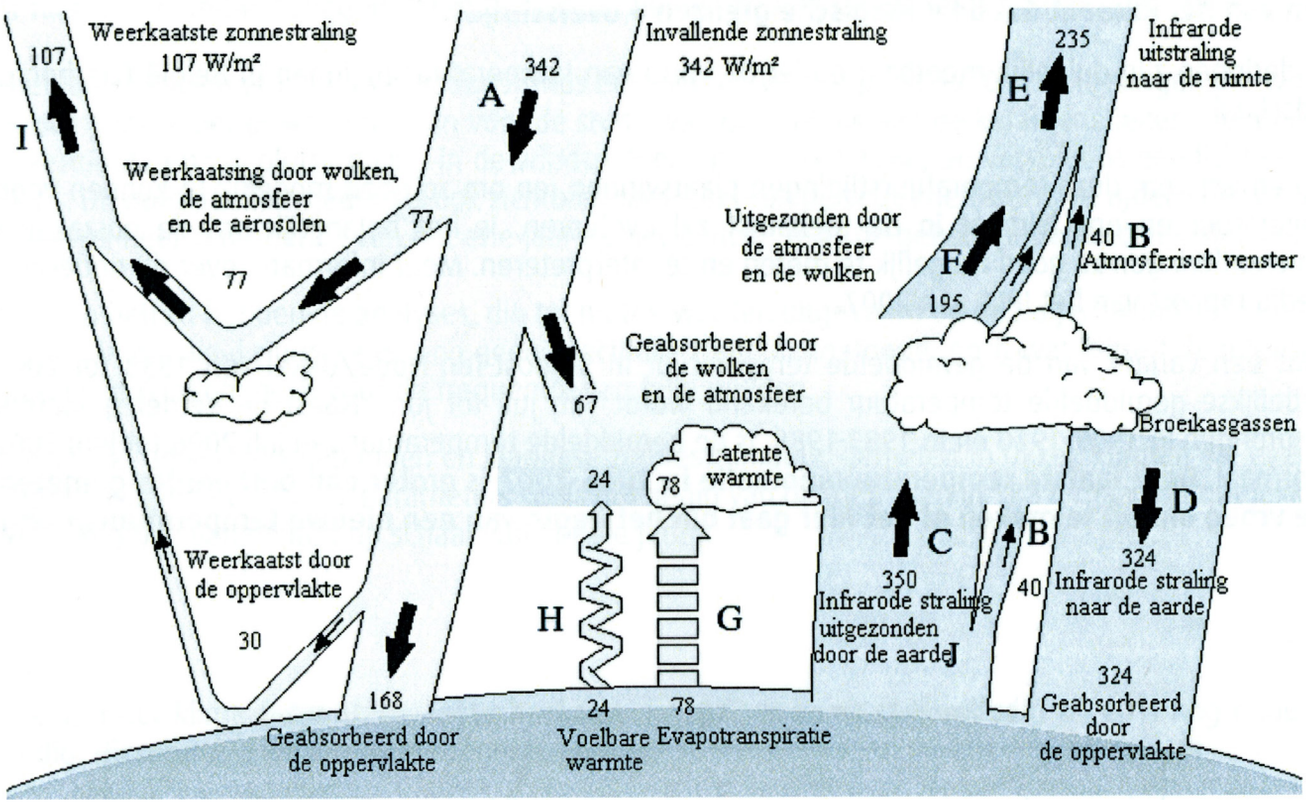
Bijgevolg kunnen we dus niet zonder meer énkel de toenemende broeikasgassen (zie IPCC) verantwoordelijk stellen voor de recente temperatuurstijging, maar moet ook de toenemende zonnestraling in rekening gebracht worden. In de periode van 1951 tot 1984 werd de opwarming door de toenemende broeikasgassen tegengewerkt door de afkoeling door de afnemende zonnestraling, wat de stabiliteit van de temperatuur over deze periode kan verklaren. In de periode van 1984 tot nu werd de opwarming door de toenemende broeikasgassen versterkt door de opwarming door de toenemende zonnestraling, hetgeen de recente opwarming kan verklaren.

De belangrijkste parameter die de langetermijnveranderingen van de hoeveelheid zonnestraling in Ukkel beïnvloedt, is de hoeveelheid aerosolen die waarschijnlijk veroorzaakt wordt door vervuiling van de atmosfeer. De menselijke activiteit heeft dus niet alleen een opwarmend effect door de toename van de broeikasgassen, maar ook een afkoelend effect door de aerosolen afkomstig van de vervuiling van de atmosfeer.

Door het gebrek aan informatie omtrent de verdeling van de aerosolen in de tijd en in de ruimte, zijn ze tot op heden nog steeds één van de grootste onzekerheden binnen de huidige klimaatstudies.

De energiebalans van de Aarde gemeten vanuit de ruimte

Het klimaat op Aarde wordt bepaald door het evenwicht aan de top van de atmosfeer tussen enerzijds opwarming door inkomende zonnestraling (middelste pijl bovenaan 'invallende zonnestraling' in figuur 2.4), en anderzijds afkoeling door reflectie van zonnestraling (linkse pijl 'Weerkaatste zonnestraling') en door uitzending van infrarode warmtestraling (rechtse pijl 'Infrarode uitstraling naar de ruimte'). De toename van broeikasgassen in de atmosfeer zorgt voor een netto opwarming van de Aarde doordat ze de uitgezonden infrarode warmtestraling vermindert.



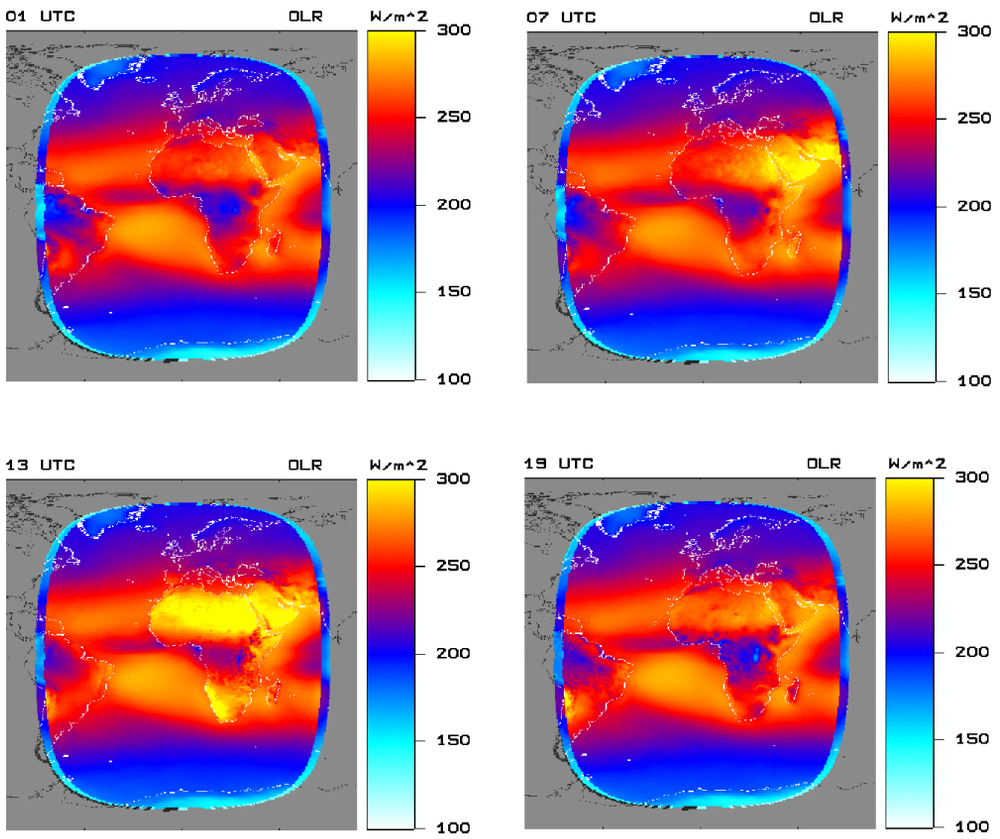
Figuur 2.4. De componenten van de energiebalans van de Aarde: de verschillende soorten energie-uitwisselingen en hun interacties met de atmosfeer en het aardoppervlak. De weergegeven getallen duiden de energiefluxen aan, uitgedrukt in W/m2 als jaargemiddelde waarde voor onze planeet.

Zowel de reflectie van zonnestraling als de uitzending van infrarode warmtestraling wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van wolken. Er bestaat nog een grote onzekerheid over de reactie van de hoeveelheid bewolking op de temperatuurstijging ten gevolge van de toegenomen broeikasgassen. Het is zelfs niet geweten of de bewolking zal toenemen en hierdoor de opwarming zal tegenwerken (tegenkoppeleffect), of dat de bewolking zal afnemen en hierdoor de opwarming zal versterken (meekoppeleffect). Om algemene conclusies te kunnen trekken, zijn satellietmetingen over een groot gebied en over een lange periode nodig.

Klimatologie GERB

Om de dagelijkse variatie van de uitgaande straling van de Aarde te meten, werd het Geostationary Earth Radiation Budget (GERB)-instrument ontwikkeld door het Verenigd Koninkrijk, België en Italië. Het belangrijkste deel van de gegevensverwerking gebeurt door het KMI. GERB maakt sinds 2003 metingen van de energiebalans boven Europa en Afrika vanaf de Europese geostationaire weersatellieten Meteosat 8 en Meteosat 9.

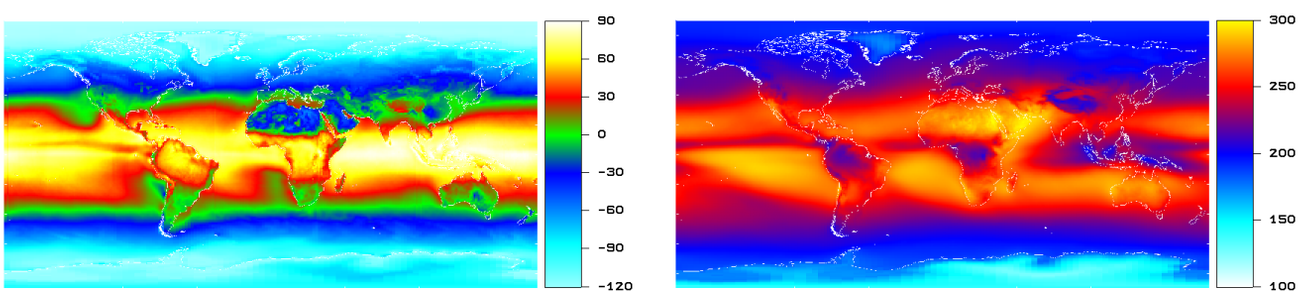
De onderstaande figuur 2.5 toont de door GERB gemeten uitgaande infrarode straling, uitgemiddeld over een periode van 7 jaar van februari 2004 tot en met januari 2011, voor 01:00 UTC, 07:00 UTC, 13:00 UTC en 19:00 UTC. De blauwe zone boven Centraal Afrika komt overeen met de lage infrarode straling van de koude wolkentoppen van tropische onweerswolken. De rood/gele zones op de breedtegraden rond 30° komen overeen met de hoge infrarode straling van de grotendeels onbewolkte subtropische hogedrukgebieden. In de loop van de dag warmt de aarde op (verandering van gele naar rode kleur) onder invloed van de zon die zich verplaatst van oost naar west (gele zone aan de oostkant om 07:00 UTC). Eerst krimpt de zone van de tropische onweerswolken doordat ze opgelost worden door de zonnestraling (kleine blauwe zone om 13:00 UTC), later ontstaat nieuwe convectie door het warme aardoppervlak (toegenomen blauwe zone om 19:00 UTC). Dit soort waarnemingen is van groot nut voor de validatie van de parameterisatie van tropische convectie in klimaatmodellen, die nog altijd problematisch zijn.



Figuur 2.5. Dagelijkse variatie van de uitgaande infrarode straling van de aarde gemeten met het Gerb-instrument. Top links: straling om 01:00 UTC. Top rechts: straling om 07:00 UTC. Onder links: straling om 13:00 UTC. Onder rechts: straling om 19:00 UTC. De uuraanduiding UTC (Universal Time Coordinated) is de internationale uurreferentie. In België, tijdens de zomerperiode, is het wettelijke uur 2 uur vooruit op de UTC-uuraanduiding en, tijdens de winterperiode, is deze 1 uur vooruit op de UTC-aanduiding.

Klimatologie CERES

Het KMI heeft eveneens de metingen van het CERES-instrument op de Terra-satelliet voor de periode van februari 2000 tot maart 2010, bestudeerd.



Figuur 2.6. 10 jaarlijkse CERES-klimatologie van de netto inkomende straling (links) en de uitgezonden thermische straling (rechts). De kleurenschalen duiden energiefluxen in W/m² aan.

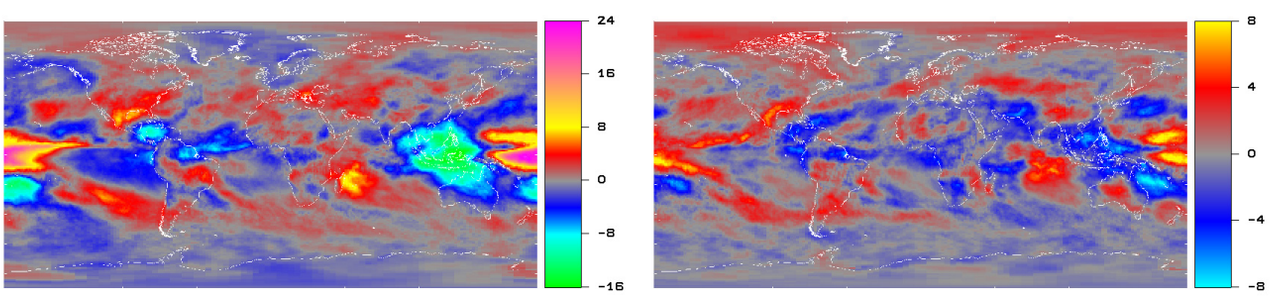
Figuur 2.6 (links) toont de klimatologie van de netto inkomende straling. De rode en gele kleuren in de buurt van de evenaar duiden een netto energietoevoer (opwarming) aan, terwijl de donker- en lichtblauwe kleuren in de buurt van de polen een netto energieafvoer (afkoeling) aanduiden. De algemene circulatie in de atmosfeer en in de oceanen werkt als een gigantische thermische motor die het surplus aan energie rond de evenaar afvoert naar de polen.

Figuur 2.6 (rechts) toont de klimatologie van de uitgezonden thermische straling, ook aangeduid als Outgoing Longwave Radiation (OLR). De blauwe kleuren rond de evenaar duiden de lage OLR-waarden aan die overeenkomen met de koude wolkentoppen van de tropische onweerswolken die vooral boven land gevormd worden en overeenkomen met stijgende luchtstromen. De omliggende gele kleuren duiden op hoge OLR-waarden in de subtropische hogedrukgebieden die overeenkomen met dalende luchtstromen. De zogenaamde Hadley-circulatie wordt gevormd door stijgende tropische luchtstromen en dalende luchtstromen in noordelijke en oostelijke richting. De zogenaamde Walker-circulatie wordt gevormd door stijgende tropische luchtstromen en dalende luchtstromen in westelijke en oostelijke richting.

De tropische convectie (onweer) wordt veroorzaakt door de dagelijkse golf van opwarming door de zon die rond de Aarde draait van oost naar west. Het land warmt sneller op dan de oceaan, waardoor de tropische convectie meestal boven land ontstaat. Twee stabiele maxima van convectie (herkenbaar als OLR-minima in figuur 2.6 (rechts)) bestaan boven de landmassa's van Zuid-Amerika en Centraal-Afrika. Een derde convectiemaximum bestaat rond Indonesië, met een westelijke tak boven de Indische Oceaan, en een oostelijke tak boven de Stille Oceaan. Aangezien er niet veel land in dit gebied aanwezig is, is het 'Indonesische' convectiemaximum niet stabiel; deze instabiliteit geeft aanleiding tot de welbekende El Niño[8]/La Niña[9]-variabiliteit, die de belangrijkste meerjaarlijkse klimaatvariabiliteit is.

Versterking van La Niña sinds 2000

We gebruiken de zogenaamde Multivariate ENSO Index (MEI) om de meerjaarlijkse El Niño/La Niña-variabiliteit te karakteriseren. Over de periode van februari 2000 tot maart 2010, toont de figuur 2.7 (links) de gemiddelde variatie aan tijdens een La Niña-jaar in vergelijking met een El Niño-jaar. Tijdens een La Niña-jaar komen de westelijke en de oostelijke tak van het Indonesische convectiemaximum bij mekaar, en de OLR-waarden verlagen rond Indonesië (zie de groene kleur in figuur 2.7 (links)). De hoge neerslag die overeenkomt met een lage OLR neemt toe en veroorzaakt overstromingen in Indonesië, Zuid-oost-Azië en Australië.



Figuur 2.7.
Links: veranderingen in Outgoing Longwave Radiation (OLR) in La Niña-jaren tegenover El Niño-jaren.
Rechts: langetermijnveranderingen in OLR van 2000 tot 2010. De kleurschalen duiden de fluctuatie in W/m² aan.

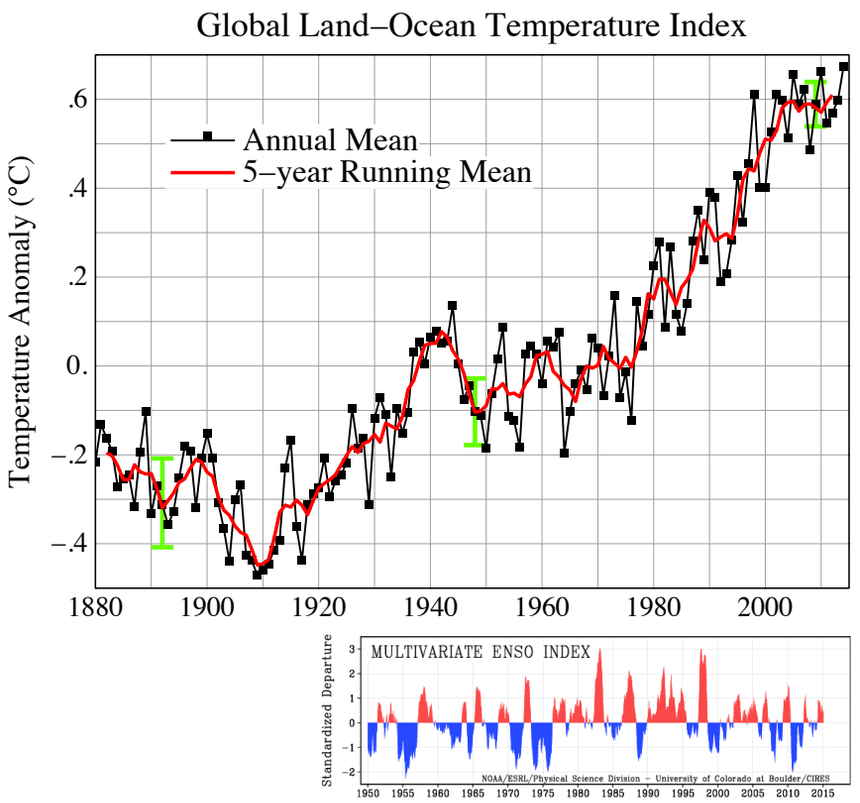
De Walker-circulatie zorgt voor een 'communicatie' tussen de drie convectiemaxima. Wanneer één maximum zich verplaatst, verschuiven de andere mee in een 'teleconnectie' patroon. Tijdens een La Niña-jaar neemt de OLR boven bepaalde gebieden (blauw en groen in figuur 2.7 (links)) af en boven andere gebieden (paars, geel en rood in figuur 2.7 (links)) toe. Bijvoorbeeld in de zuidelijke Verenigde Staten is er een toenemende OLR en dus een toenemende droogte tijdens La Niña.

Figuur 2.7 (rechts) toont de systematische variatie van de OLR over de periode van februari 2000 tot maart 2010. De variaties werden berekend door de vergelijking van de gemiddelde OLR over de vijf eerste jaren en de gemiddelde OLR van de vijf laatste jaren. Het algemene patroon van figuur 2.7 (rechts) is gelijkaardig aan dat van figuur 2.7 (links), dus we kunnen besluiten dat er van 2000 tot 2010 een gemiddelde versterking is van La Niña.

8 Een E*l Niño* jaar wordt gekenmerkt door oceaantemperaturen die in het oostelijke deel van de equatoriale Stille Oceaan hoger zijn dan normaal en door klimatologische verstoringen in de regio en op grotere schaal.

9 Een *La Niña* jaar wordt in tegenstelling daarvan gekenmerkt door oceaantemperaturen die in het oostelijke deel van de equatoriale Stille Oceaan zwakker zijn dan normaal, maar eveneens door klimatologische verstoringen.

De bovenste grafiek van figuur 2.8 toont de evolutie van de gemiddelde jaarlijkse temperatuur van de planeet gedurende de periode 1880-2014 volgens de berekeningen van de NASA (GISS). De onderste grafiek van de zelfde figuur toont de waarden van de MEI-index om de fasen van El Niño/ La Niña (zie hoger) aan te duiden voor de periode 1950-2014. De vergelijking van deze twee gegevensreeksen toont dat de gemiddelde versterking van La Niña sinds 2000 gepaard gaat met een ogenschijnlijke pauze in de opwarming van de Aarde.
Daartegenover staat de periode tussen 1976 en 2000 die gekenmerkt werd door een opmerkelijke stijging van de temperatuur en een reeks intense El Niño-fasen.



Figuur 2.8 Bovenste deel : Globale gemiddelde jaarlijkse temperatuursevolutie tussen 1880 en 2014. Onderste deel: Evolutie van de MEI-index die het fenomeen El Niño/La Niña karakteriseert tussen 1950 en 2014. Tijdens een El Niño-fase is de index hoog (rode waarden) en ze is zwak (blauwe waarden) tijdens een La Niña-jaar.

Er is een opvallende gelijkenis tussen de periode van 1945 tot 1980, en de periode na 2000: beide periodes kenden geen globale temperatuurstijging en sterke Las Niñas.

Voor de periode van 1945 tot 1980 weten we met grote waarschijnlijkheid (Wild, 2009) dat dit te wijten was aan de toename van 'Westerse' luchtvervuiling in de Verenigde Staten en Europa, die leidde tot een grotere reflectie van zonnelicht, dus minder absorptie van zonnewarmte.

Het lijkt alsof de geschiedenis zich herhaalt want recent is er een sterke toename van de luchtvervuiling boven Zuidoost-Azië die samengaat met de economische ontwikkeling van China en Indië en met een globale temperatuurstagnatie na 2000, gelijkaardig aan wat er gebeurd is met de Westerse economische ontwikkeling na 1945.

De grote vraag is wat is de oorzaak en wat is het gevolg van deze globale veranderingen. Wordt alles veroorzaakt door de luchtvervuiling of gaat het gewoon om een natuurlijke variatie?

De eerste hypothese is dat de relatieve afkoeling door minder absorptie van zonnestraling de oorzaak is van de langdurige versterkingen van het La Niña fenomeen en van de plateaus in de globale temperatuur tussen 1945 en 1980 en na 2000.

De alternatieve hypothese is dat de langdurige versterkingen van La Niña uitingen zijn van een natuurlijke oscillatie – genaamd Pacific Decadal Oscillation (PDO) – die gepaard gaat met uitwisselingen van energie tussen de oceaan en de atmosfeer. Tijdens La Niña wordt energie getransfereerd van de atmosfeer naar de oceaan – dus koelt de atmosfeer relatief af, terwijl tijdens El Niño energie getransfereerd wordt van de oceaan naar de atmosfeer.

De onderstaande figuur, overgenomen uit Wild (2012), toont de veranderingen van de zonnestraling aan de grond in verschillende delen van de wereld in de periodes 1950-1980, 1980-2000, en na 2000. Na 2000 is er een duidelijke daling van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond in China en in Indië wat te verklaren valt door de toegenomen luchtvervuiling.

	1950s – 1980s	1980s – 2000	Na 2000
VS	-6	5	8
Europa	-3	2	3
China / Mongolia	-7	3	-4
Japan	-5	8	0
India	-3	-8	-10

Figuur 2.9.Veranderingen in de zonnestraling aan de grond in verschillende regio's met een goede dichtheid van het meetnet gedurende 3 periodes. De periode 1950-1980 (linkse kolom) toont een overwegende daling ("dimming"), de periode 1980-2000 (middelste kolom)toont een gedeeltelijk herstel ("brightening") op verschillende plaatsen, met uitzondering van Indië en de recente ontwikkelingen na 2000 (rechtse kolom) tonen verschillende tendensen. De cijfers duiden op typische schattingen uit de literatuur voor de specifieke regio's en periodes en worden weergegeven in w/m² per decade.

2.3 Het KMI en Ozon.

Ozon is een gas dat zich in de atmosfeer bevindt en dat bestaat uit 3 atomen zuurstof (chemische formule O3), in tegenstelling tot de gewone moleculaire zuurstof die slechts uit twee atomen bestaat (O2). De grootste ozonconcentraties bevinden zich in de hogere luchtlagen (20-25 km hoogte).

Ozon ontstaat door de wisselwerking tussen gewone zuurstof, zonlicht en minderheidsbestanddelen in de atmosfeer. Eén van de bijzondere eigenschappen van ozon is de sterke absorptie van uv-straling uit het zonlicht. Door de sterke absorptie van de straling zorgt deze ozonlaag voor het specifieke temperatuurverloop met de hoogte: in de onderste luchtlagen (de troposfeer[10]) neemt de temperatuur af met de hoogte, terwijl dit daarboven (stratosfeer[11]) niet meer het geval is.

Ozon is een zeer onstabiele molecule waardoor zelfs kleine concentraties van bepaalde chemische stoffen grote verschuivingen in het evenwicht kunnen veroorzaken. Een voorbeeld hiervan zijn de chloorverbindingen die door het gebruik van freonen in spuitbussen en koelinstallaties in de stratosfeer terecht kwamen. Deze chloorverbindingen kunnen bij bepaalde omstandigheden de ozonlaag aantasten met als gevolg een toename van de intensiteit van de schadelijke uv-straling bij de grond. Na de verbanning van de freonen (Protocol van Montreal in 1987) zou op lange termijn de vroegere toestand van de ozonlaag hersteld moeten worden. Om na te gaan of dit effectief gebeurt, is het nodig de evolutie van de ozonlaag waar te nemen.

In de troposfeer stelt zich een ander probleem want ozon is een agressief gas dat bij grote concentraties bijvoorbeeld ademhalingsproblemen kan veroorzaken. Ozonconcentraties in de troposfeer variëren sterk, afhankelijk van de meteorologische omstandigheden en van de concentraties aan bepaalde chemische componenten (luchtvervuiling). In de troposfeer wordt erover gewaakt dat de ozonconcentraties niet te hoog oplopen.

10 Troposfeer : atmosferische regio waar de temperatuur afneemt met de hoogte (tussen de oppervlakte en 10 km hoogte). De top van de troposfeer wordt 'tropopauze' genoemd.

11 Stratosfeer : atmosferische regio boven de tropopauze, waar de temperatuur niet meer afneemt met de hoogte (ongeveer tussen 10 en 50 km hoogte).

Om de hoeveelheid ozon in de atmosfeer (“dikte van de ozonlaag”) te meten, maakt men gebruik van verschillende technieken:

- Van op de grond meet men de intensiteit van het zonlicht bij specifieke golflengten (in het uv-gebied) en uit de kennis van het absorptiespectrum van ozon leidt men de ozonconcentratie af. Pionierswerk hierover werd uitgevoerd door Dobson, naar wie niet alleen een instrument genoemd is, maar ook een eenheid voor de dikte van de ozonlaag: de Dobson-eenheid (DE). Deze stemt overeen met een dikte van een 100ste van een mm bij een druk van 1 atm (1013.25hPa) en 0°C. Boven onze streken varieert de dikte van de ozonlaag rond de 320 DE, wat dus correspondeert met een laagje van ongeveer 3 mm bij standaardvoorwaarden.

  Het KMI gebruikt het modernere Brewer-instrument (zie figuur 2.10) om de dikte van de ozonlaag op lange termijn te meten.



Figuur 2.10. Het Brewer-instrument op het dak van het KMI

- Een andere methode om informatie over ozon in de atmosfeer te verwerven, is een chemische sensor aan een ballon (zie figuur 2.11) te laten opstijgen door de verschillende luchtlagen en zo de verticale verdeling van ozon vast te stellen.



Figuur 2.11. Lancering van een meteorologische ballon met ozonsensor te Ukkel.

- Waarnemingen vanuit de ruimte geven dan weer een globaal beeld van de ozonverdeling.

Ozon bij de grond wordt meestal gemeten met toestellen die gebaseerd zijn op de uv-absorptie van het gas. Uiteraard geven de ozonpeilingen ook informatie over ozon in de troposfeer. De gevoeligheid van satellietmetingen voor troposferisch ozon is echter klein.

In het kader van internationale bewaking van de atmosfeer voert het KMI reeds geruime tijd ozonwaarnemingen vanaf de grond en met ballonpeilingen uit in Ukkel en hieronder worden enkele resultaten van deze ozonmetingen van het KMI voorgesteld:

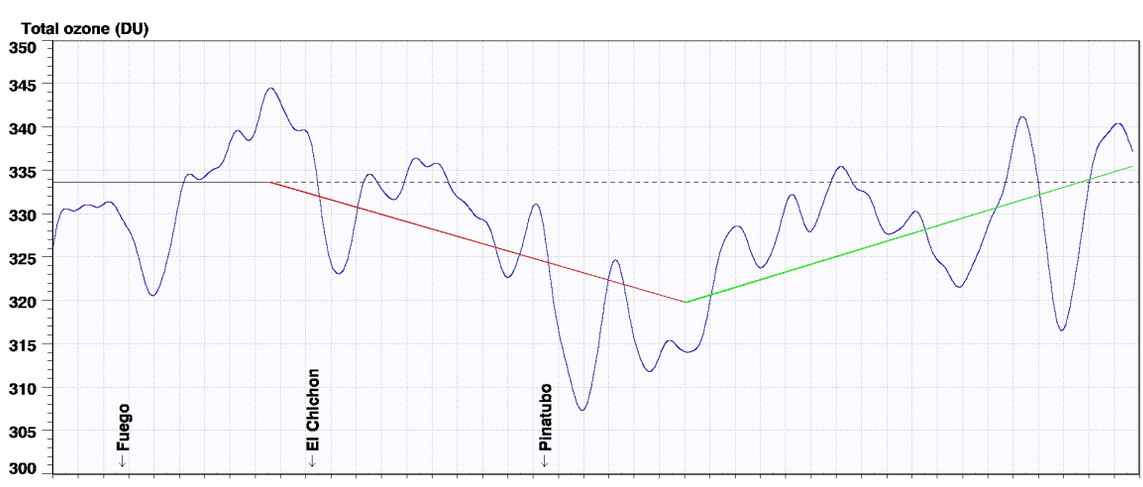
Een lange traditie in de waarneming van de ozonlaag

Sinds 1969 worden er in Ukkel ongeveer drie keer per week ozonpeilingen uitgevoerd. Deze ballonpeilingen leveren verticale profielen van druk, temperatuur, relatieve vochtigheid, wind en ozon tot een hoogte van ongeveer 32 km. Hierdoor beschikt het KMI, samen met Hohenpeißenberg (Duitsland) en Payerne (Zwitserland), over één van de langste tijdreeksen van ozonprofielen ter wereld. Daarnaast wordt sinds 1971 de totale dikte van de ozonlaag dagelijks gemeten met spectrofotometers. Dit soort tijdreeksen zijn fundamenteel voor het bestuderen van veranderingen in de atmosfeer op lange termijn. Echter, voor deze tijdreeksen bruikbaar zijn, moeten ze gecontroleerd worden op mogelijke instrumentele effecten die de kwaliteit van de waarnemingen negatief beïnvloeden. De tijdreeksen van Ukkel van zowel de peilingen als de spectrofotometers werden grondig nagekeken en verbeterd en zodoende gehomogeniseerd waardoor ze geschikt zijn voor klimatologische studies.

Evolutie van de dikte van de ozonlaag

Een analyse van de gehomogeniseerde tijdreeks van de totale dikte van de ozonlaag in Ukkel is te zien in figuur 2.12, die het jaarlijks glijdend gemiddelde (blauwe lijn) sinds het begin van de waarnemingen toont.

Uit metingen van de hoeveelheid ozonafbrekende stoffen (in het bijzonder de chloorfluorkoolwaterstoffen of CFK's), uitgevoerd door de Universiteit van Luik, blijkt dat de concentraties van deze stoffen rond het midden van de jaren 1990 een maximum bereikten. Als gevolg van de effectieve uitvoering van het protocol van Montreal[12], dat de productie van dergelijke stoffen verbood, is er nadien een lichte afname merkbaar. Daarom werd een stapsgewijze trendberekening voor verschillende periodes uitgevoerd. Tot 1980 werd er geen trend verwacht. Deze periode wordt dan ook gebruikt om een referentieniveau te berekenen, voorgesteld door de horizontale zwarte lijn in figuur 2.12. Daarop volgt er een neerwaartse tendens tot midden de jaren 1990 (-0,25% per jaar, rode lijn) met daarna een schijnbaar herstel (+0,28%/jaar, groene lijn).



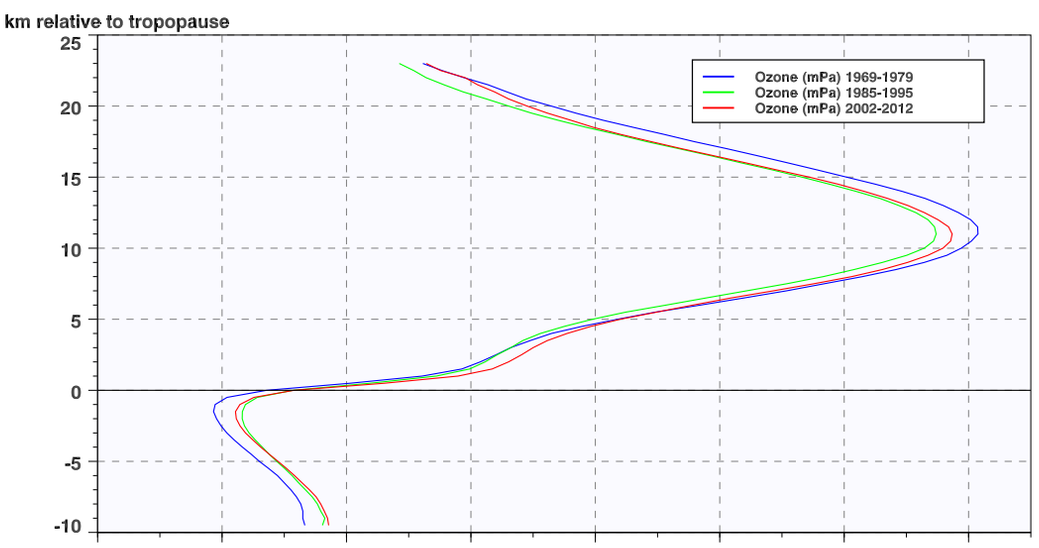
Figuur 2.12. Dikte van de ozonlaag (in DE) boven Ukkel met stapsgewijze trendberekening (1972-2014).

12 Het protocol van Montreal werd geratificeerd op 16/09/1987 en is in voege getreden op 01/01/1989.

Interpretatie

Men moet echter voorzichtig zijn met het interpreteren van het schijnbaar herstel van de ozonlaag in die laatste decade omdat die periode nog te kort is voor definitieve conclusies. Naast de mogelijke effecten ten gevolge van de maatregelen van het Protocol van Montreal, kan deze inversie in de trend ook veroorzaakt worden door natuurlijke schommelingen onder invloed van atmosferische omstandigheden. Het is algemeen bekend dat vulkaanuitbarstingen (enkele data van belangrijke uitbarstingen zijn aangeduid in figuur 2.12) een belangrijke invloed hebben op de hoeveelheid ozon in de atmosfeer. Gelijkaardige resultaten zijn te vinden in de internationale wetenschappelijke literatuur met gegevens van satellieten of door combinatie van data van meerdere stations. Hoewel hierdoor de statistische betrouwbaarheid van de berekeningen vergroot, blijken de resultaten zelfs dan nog niet helemaal statistisch overtuigend. Enkel verdere waarnemingen zullen al dan niet kunnen bevestigen of het om een definitief herstel van de ozonlaag, als gevolg van de beslissingen van het Protocol van Montreal, gaat dan wel om een voorbijgaande fluctuatie. Bovendien is ozon zelf een broeikasgas. De wisselwerking die er bestaat tussen de ozonconcentraties in de atmosfeer en de mogelijke opwarming van de aarde, maakt een voorspelling over het tijdstip van volledig herstel uiterst onzeker.

Aan de hand van de profielen kunnen we zien op welke hoogten deze veranderingen plaatsgrijpen. In figuur 2.13 worden de gemiddelden van drie perioden van 11 jaar met elkaar vergeleken. Het is duidelijk dat de vermindering van de totale hoeveelheid ozon volledig toe te schrijven valt aan de ozonlaag in de stratosfeer. Inderdaad, in de troposfeer is een tegengestelde tendens merkbaar (toename van ozon op leefniveau), die te wijten is aan fotochemische productie van ozon. De periode 2002-2012 vertoont zowel in de stratosfeer als in de troposfeer een toename t.o.v. periode 1985-1995.



Figuur 2.13. De verticale verdeling van ozon (in millipascal) als functie van de hoogte t.o.v. de tropopauze voor drie verschillende perioden van 11 jaar (1969-1979, 1985-1995 en 2002-2012).

Al deze waarnemingen gebeuren in het internationaal kader van de "Global Atmospheric Watch" van de Wereld Meteorologische Organisatie. Dit draagt bij tot studies van de veranderingen op lange termijn in de atmosfeer.

2.4 Waterdamponderzoek aan het KMI

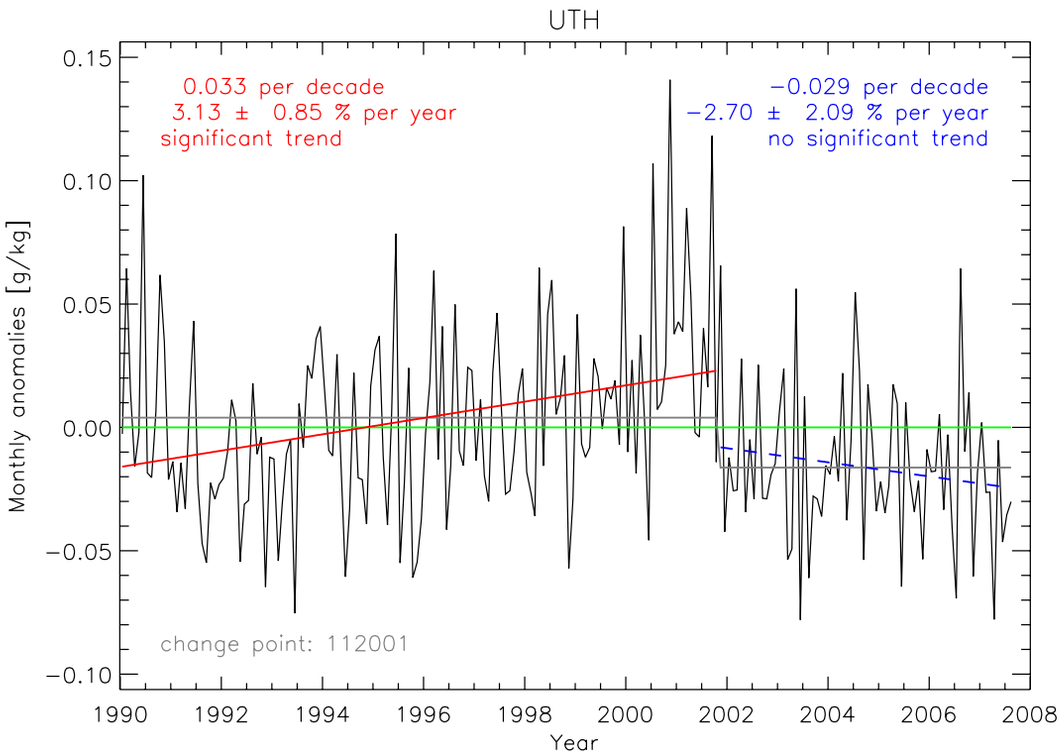
In het hele debat over de opwarming van de Aarde door de broeikasgassen zoals CO2, methaan, lachgas, ozon... vergeet men wel eens het voornaamste broeikasgas: waterdamp! Inderdaad, waterdamp houdt ook de warmte (ofwel thermische straling) die de Aarde uitstraalt, gedeeltelijk tegen. Dit zorgt voor een opwarming van de onderste luchtlagen. Waterdamp is alomtegenwoordig in de lagere atmosfeerlagen of de zogenaamde troposfeer die op een hoogte van ongeveer 11 km (in Ukkel) begrensd wordt door de tropopauze, die op haar beurt samenvalt met een lokaal minimum van de temperatuur. De waterdamp in de troposfeer wordt onder meer gevormd door de verdamping van het water uit de oceanen, zeeën en meren. Waterdamp in de atmosfeer is ook verantwoordelijk voor het ontstaan van wolken, die dan weer een gedeelte van de zonnestraling tegenhouden. Het netto effect van waterdamp is toch een opwarming van de aardoppervlakte, al zal het duidelijk zijn dat dit een complexe materie is. Het KMI doet onderzoek in twee domeinen van het waterdamponderzoek.

Waterdamp in de bovenste troposfeerlagen

In de bovenste troposfeerlagen, als het ware gevangen onder de tropopauze, bevinden zich relatief grote hoeveelheden waterdamp onder ideale omstandigheden (temperaturen) om een grote impact te hebben op de straling uitgezonden door de Aarde. Het is echter een hele uitdaging om de hoeveelheid waterdamp in deze lagen op te meten. Het KMI heeft een studie uitgevoerd (Van Malderen and De Backer, 2010) om de evolutie van de hoeveelheid waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in een periode van 18 jaar (van 1990 tot 2007) te onderzoeken. Voor deze periode beschikte het KMI over een homogene tijdreeks van waterdampmetingen in Ukkel met een bepaald type van radiosondes. Radiosondes zijn in feite mini-weerstations die aan een weerballon bevestigd worden en elke 2 seconden waarnemingen van de temperatuur, de druk, de hoogte, de relatieve vochtigheid en de windrichting en –snelheid uitvoeren. Deze radiosondes verschaffen zodoende verticale profielen van de temperatuur, waardoor ze ook informatie betreffende de locatie van de tropopauze boven Ukkel geven. Hierdoor werd het mogelijk om de bovenste troposfeerlagen relatief te definiëren t.o.v. de tropopauze en bijgevolg ook de hoeveelheid waterdamp in deze bovenste troposfeerlagen. Dit is een andere benadering dan de gebruikelijke absolute methode op basis van satellietwaarnemingen van waterdamp, waarbij de tropopauze niet precies kan gelokaliseerd worden.

Uit de studie blijkt dat de tijdsevolutie van de waterdamp in de atmosfeerlagen boven Ukkel gedurende de eerste decade (1990-2000) beïnvloed werd door de uitbarsting van de vulkaan Pinatubo op de Filipijnen in juni 1991. Inderdaad, door de uitstoot van vulkanische stofdeeltjes werd wereldwijd een deel van de zonnestraling afgeblokt, met een globale temperatuurdaling op het oppervlak tot gevolg. Dit had op zijn beurt weer gevolgen voor de hoeveelheid waterdamp die, ook in de bovenste troposfeerlagen en zelfs boven Ukkel, afnam tot ongeveer medio 1994 (zie figuur 2.14). Daarna herstelden zowel de temperatuur als de hoeveelheid waterdamp zich van de vulkaanuitbarsting en detecteerden we een stijging van beide elementen.

Echter, het meest markante feit uit het onderzoek, was de redelijk abrupte daling van de waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in Ukkel in de herfst van het jaar 2001 (zie opnieuw figuur 2.14). We konden concluderen dat deze plotse daling gelinkt was aan een plotse stijging van de hoogte van de tropopauze rond hetzelfde tijdstip en bijgevolg een daling van de temperatuur van de tropopauze. Tevens vonden we aanwijzingen dat deze beweging van de tropopauze op zijn beurt veroorzaakt werd door de dynamica van de onderliggende atmosfeerlagen. In de herfst van 2001 vond er immers een significante verticale uitrekking van de troposfeer plaats. Deze gebeurtenis is geen alleenstaand feit voor Ukkel, want ook in de radiosondewaarnemingen van omliggende stations deed zich hetzelfde effect voor!



Figuur 2.14. Tijdreeks van de maandelijkse anomalieën van de hoeveelheid waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in Ukkel, uitgedrukt in g/kg. Een maandelijkse anomalie wordt verkregen door elke maand het langetermijnmaandgemiddelde af te trekken van het maandgemiddelde. Deze techniek heeft het voordeel dat de seizoencyclus verdwijnt uit een tijdreeks. De sterke afname van de hoeveelheid waterdamp in de herfst van 2001 is duidelijk zichtbaar.

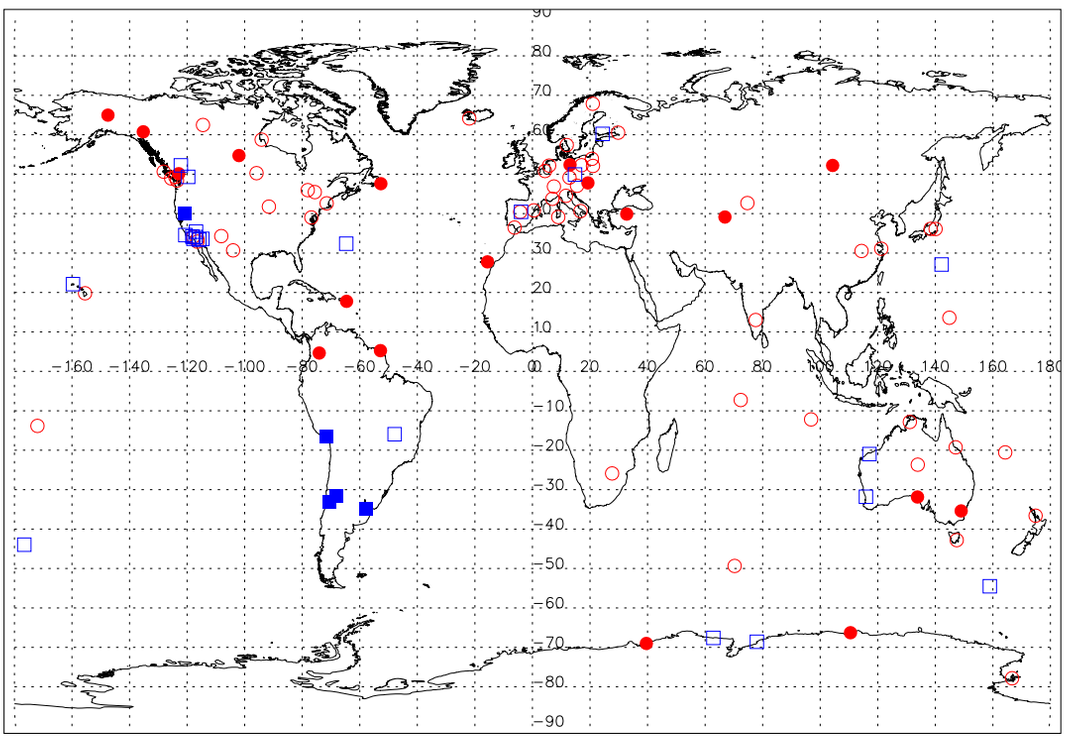
De totale kolomhoeveelheid waterdamp

Bij het KMI wordt, in het kader van een samenwerkingsverband tussen de 3 wetenschappelijke instellingen van het plateau gelegen in Ukkel (KMI, KSB, BIRA), onderzoek gedaan naar de wereldwijde verandering van de totale hoeveelheid waterdamp (in een kolom). Deze parameter is nog sterker gelinkt aan de oppervlaktetemperatuur op basis van een wet uit de fysica (de vergelijking van Clausius-Clapeyron) die stelt dat de toename van de totale hoeveelheid waterdamp globaal gebeurt naar ratio van 7% per temperatuurstijging van 1 °C. Om deze wet te toetsen aan de waarnemingen, of omgekeerd, heb je uiteraard een betrouwbare en bij voorkeur lange tijdreeks van waarnemingen van de totale hoeveelheid waterdamp nodig.

In de eerste fase van het onderzoek (Van Malderen *et al.*, 2014b) vergeleken we daarom, voor ongeveer 30 sites wereldwijd de metingen van de totale hoeveelheid waterdamp uitgevoerd door 5 verschillende instrumenten: radiosondes, een zonnefotometer, een gps-instrument en 2 satellietinstrumenten (één actief in het ultraviolet/visueel gedeelte van het licht, een ander in het infrarood). Het lijkt misschien vreemd om een gps-instrument te gebruiken om waterdamp te meten, maar toch is dit meer dan zinvol. De aanwezige waterdamp tussen de gps-zender van het station enerzijds en de satelliet in een baan om de aarde anderzijds, is immers verantwoordelijk voor een extra vertraging tussen het uitgezonden en het ontvangen signaal. Uit onze studie blijkt zelfs dat een gps-instrument één van de meest betrouwbare instrumenten is om de totale kolomhoeveelheid waterdamp op te meten! Bovendien levert het data op met een zeer hoge frequentie (om de 5 minuten) en wordt het niet gehinderd door weersomstandigheden, in tegenstelling tot de zonnefotometer en beide satellietinstrumenten die een (minstens gedeeltelijke) wolkeloze hemel vereisen.

Na de vergelijking van de absolute hoeveelheden totale waterdamp, onderzochten we in de tweede fase van het project ook of er verschillen in trends bestaan in de totale waterdamphoeveelheid gemeten door de meest betrouwbare instrumenten van onze selectie en of de trends globaal consistent zijn (satellietwaarnemingen) of consistent tussen verschillende stations wereldwijd (gps). Figuur 2.15 toont een voorbeeld van de trends in de totale kolomhoeveelheid waterdamp voor de 101 gps-stations met data beginnende in 1995-1996, waaruit toch enkele geografische ongerijmdheden blijken. Een gevoeligheidsstudie van de trends berekend uit de gps-waarnemingen én een vergelijking met trends op basis van de langste gehomogeniseerde tijdreeks van satellietwaarnemingen (beginnende in 1995), moet ons in staat stellen om uit te maken of deze geografische ongerijmdheden te wijten zijn aan de waarnemingen zelf, of inherent zijn aan de natuurlijke variabiliteit van waterdamp ten gevolge van

de wereldwijde oppervlaktetemperatuurschommelingen. Globaal gezien kunnen we echter vaststellen dat de totale hoeveelheid waterdamp is toegenomen sinds het midden van de jaren 1990.

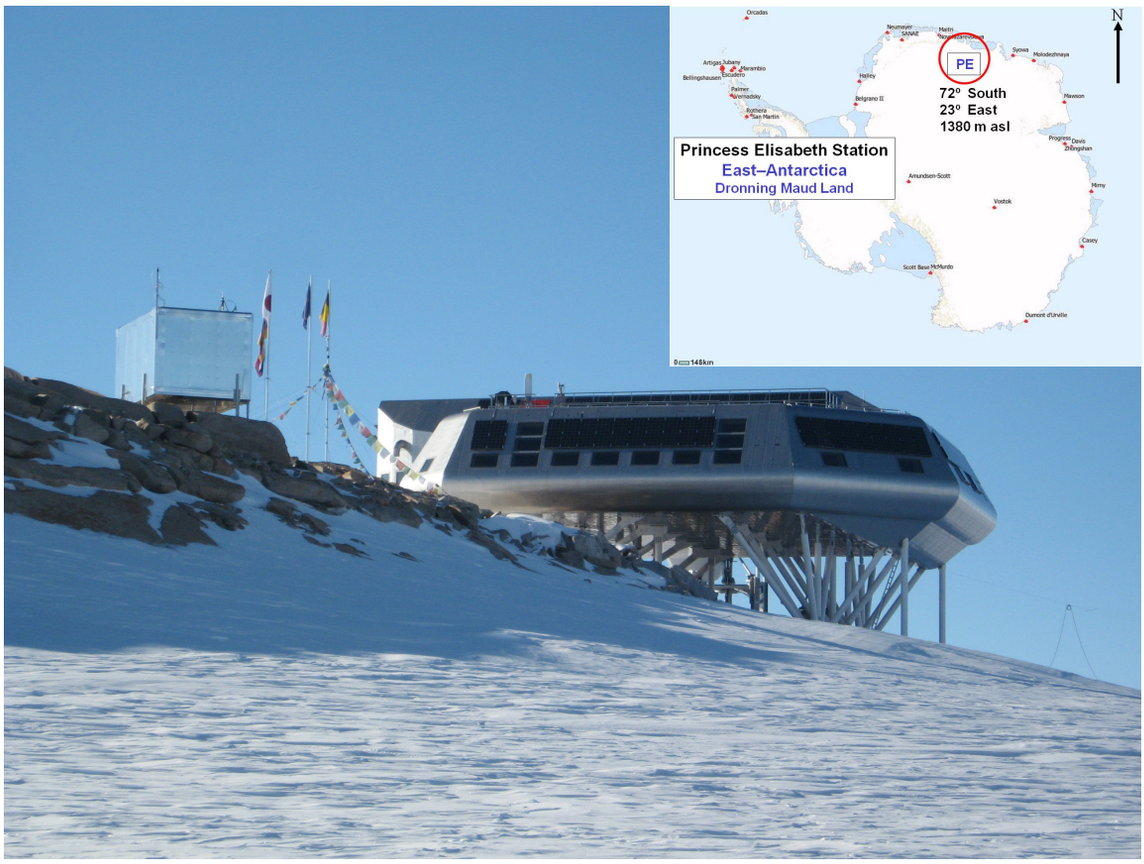


Figuur 2.15. Trends in de totale kolomhoeveelheid waterdamp voor de 101 gps-stations met data beginnende in 1995-1996. Rode cirkels duiden de stations aan met een toename in totale waterdamphoeveelheid, blauwe vierkanten staan voor de stations met een afname in waterdamp. Volle symbolen worden gebruikt voor statistisch significante trends.

2.5 Onderzoek in Antarctica door het KMI

Het KMI leidt het wetenschappelijk onderzoek in het Belgisch onderzoekstation in Antarctica, de Prinses Elisabethbasis in Utsteinen in de Sor Rondane Mountains in Dronning Maud Land, Oost Antarctica (zie figuur 2.16). Onder leiding van het KMI en samen met het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA) en de Universiteit van Gent, werd een atmosferisch observatorium voor permanent gebruik geïnstalleerd. Dit bestaat uit een reeks van 8 complementaire instrumenten op de grond die de fysische en optische eigenschappen van atmosferische aerosol, de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeerkolom, de totale zonnestraling die de oppervlakte bereikt en de inkomende uv-A- en uv-B-straling meten.

Onze waarnemingen van de samenstelling van de atmosfeer in Antarctica zijn vooral interessant in verband met klimaatonderzoek. Antarctica speelt een belangrijke rol in het klimaat van de Aarde. Het bevat 's werelds grootste zoetwaterreservoir en het smelten ervan zou de zeespiegel aanzienlijk doen stijgen. Haar rol als koudste plaats op Aarde stuurt de circulatiepatronen in de oceaan en de atmosfeer en dus ook de verdeling van de energie rond de Aarde.

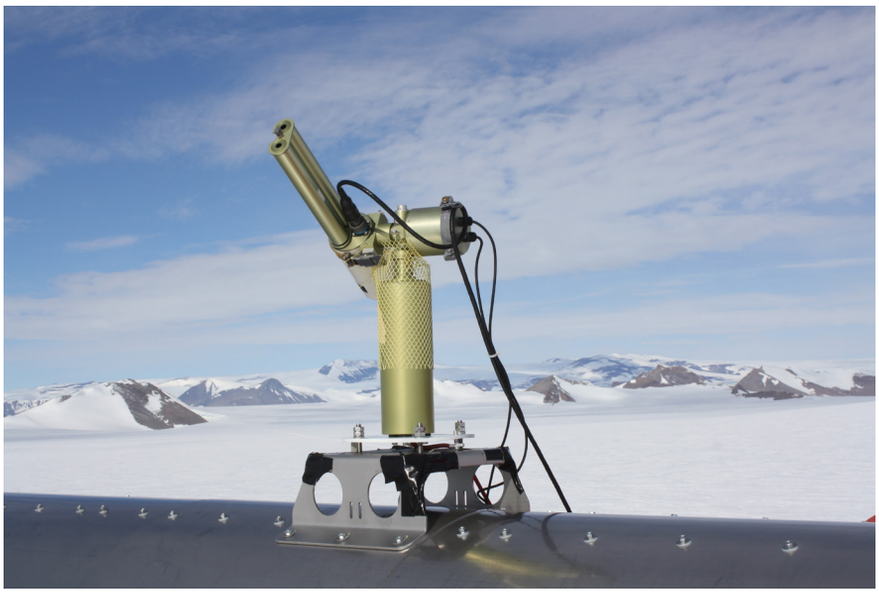


Figuur 2.16. Het Prinses Elisabeth Station op Antarctica. In de kleine container (op de foto links van het station) bevinden zich de instrumenten voor het meten van de kenmerken van de aerosolen. De ingevoegde geografische kaart toont de locatie van het station in Antarctica, evenals van de andere stations in bedrijf.

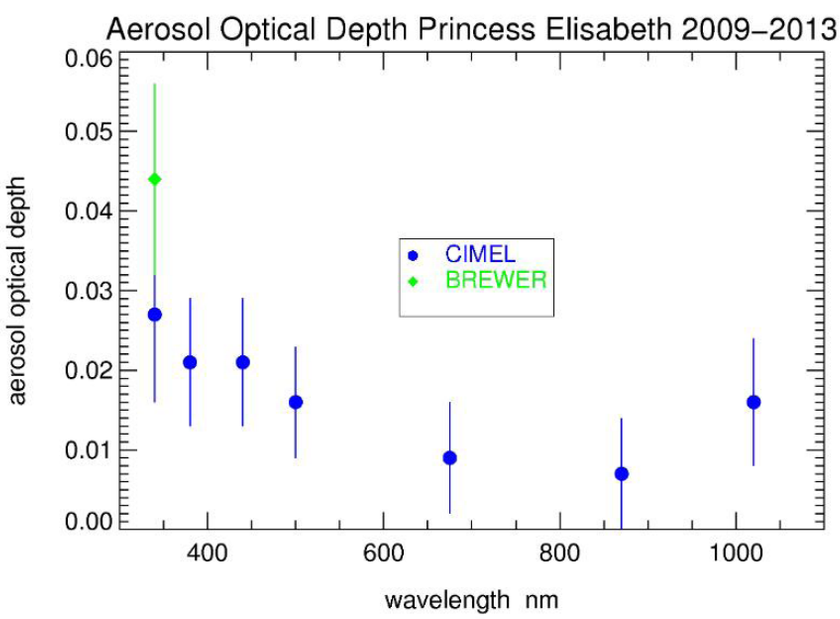
Wat het klimaat betreft, hebben aerosolen een enorm effect door het verzwakken, verspreiden en absorberen van het licht (dit is energie). De aerosolen herverdelen de energie afkomstig van de zon en beïnvloeden zo de temperatuur aan het oppervlak en in de atmosfeer. Bovendien zijn ze onmisbaar voor de vorming van regendruppels of ijskernen. Hierdoor hebben aerosolen een grote invloed op de evolutie en de levensduur van wolken en op de neerslag (en dus op de waterkringloop).

Ozon is een belangrijk atmosferisch gas dat de uv-straling vanaf de grond heel sterk absorbeert en daarom is het belangrijk om de precieze hoeveelheid te kennen. Bijkomend verschijnt elk jaar sinds meer dan 25 jaar tijdens de zuidelijke lente (september-november) het zogenaamde ozongat boven Antarctica en daarom is het belangrijk om de evolutie van de totale hoeveelheid ozon in Antarctica te volgen. Ozonvernietiging gebeurt net op die hoogteniveaus in de stratosfeer waar de ozonlaag een grote invloed heeft op de verticale temperatuurgradiënt. Hierdoor kunnen atmosferische circulatiepatronen op grote schaal beïnvloed worden.

De geïnstalleerde instrumenten in het Prinses Elisabeth Station stellen ons in staat om alle belangrijke fysische en optische eigenschappen van aerosoldeeltjes te bepalen (zie figuur 2.17). Samen met de stralingsmetingen kan de stralingsimpact van de aerosolen worden vastgesteld. Aangezien zowel de verspreidings- als de absorptiecoëfficiënten gemeten worden, kan de zogenaamde enkelvoudige albedoverspreiding rechtstreeks afgeleid worden. Dit is een belangrijke parameter voor stralingsoverdrachtberekeningen en in satelliet verbeterbare algoritmes en voor wereldwijde transport- en klimaatmodellen. Het definieert de verhouding in hoeveel van de zonnestraling geabsorbeerd wordt of verspreid wordt in andere richtingen, en daarom is het dus een indicatie voor het opwarmings- of afkoelingspotentieel van de atmosferische aerosolen.



Figuur 2.17. Zonnefotometer gemonteerd op het dak van het Prinses Elisabeth Station, met uitzicht naar het zuidoosten. Deze fotometer meet op verschillende golflengten de demping van het zonlicht door atmosferische aerosolen.



Figuur 2.18. Deze grafiek toont de gemiddelden (met foutenmarge) van het ultraviolet (340 nm) tot het dichtste infrarood (1020 nm) voor het 'Aerosol Optical Depth' '(AOD, demping van zonlicht door de aerosolen) gedetecteerd door de zonnefotometer op verschillende golflengten (blauwe stippen). De groene stip wordt verkregen uit de gegevens van een Brewer spectrofotometer die ook op het dak van het station staat. De gemiddelden werden getrokken uit de gegevens gemeten tijdens elke zuidelijke zomer (december-februari) tussen 2009 en 2013.

De zonnefotometer meet de demping van de zonnestraling door aerosolen in de atmosfeer (dit heet de 'Aerosol Optical Depth', AOD). Hoe meer aerosolen er in de atmosfeer aanwezig zijn, hoe meer de zonnestraling gedempt wordt. Gezien het instrument op verschillende golflengten meet, geeft dit ons informatie over de grootte van de aerosolen en laat ons toe om te bepalen of de deeltjes meer absorberend of reflecterend zijn (zie figuur 2.18). In vergelijking met metingen in ons land (zie figuur 2.3), stellen we duidelijk verminderde concentraties van aerosolen in Antarctica (met ongeveer een factor 10) vast en ze zijn meestal zeer reflecterend.

Op het dak van het polaire station is ook een Brewer-spectrofotometer geïnstalleerd. Dit instrument verschaft, naast het meten van de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeer, ook gegevens over de demping van zonnestraling door aerosolen in het ultraviolet (bij 340 nm, als een van de golflengten van de zonnefotometer) (zie ook AOD gemeten in Ukkel). In figuur 2.18 merkt men dat de AOD gemeten door de Brewer groter is dan die gemeten door de zonnefotometer; dit verschil kan grotendeels verklaard worden door de meettechnieken. Beide technieken bevestigen onafhankelijk van elkaar, dat de aerosolconcentratie in de atmosfeer in Antarctica zeer laag is.

De uitgebreide aerosolinstrumentatie maakt het ook mogelijk om aanvullende informatie over hun chemische aard af te leiden. Vervolgens kunnen deze gegevens gebruikt worden om de aerosolinvloed op wolken en neerslag te onderzoeken. Gezien dergelijke wolk- en neerslagwaarnemingen in het Prinses Elisabeth Station reeds bestaan, kan het aerosoleffect op wolken en neerslag worden onderzocht. Deze ensemblemetingen maken het mogelijk om verder te evalueren, te valideren en uiteindelijk regionale klimaatmodellen voor Antarctica die de oppervlaktestraling en de massabalans simuleren te verbeteren. Een beter inzicht in en modellering van de massabalans van de Antarctische ijskap is van essentieel belang met betrekking tot de wereldwijde klimaatmodellen.

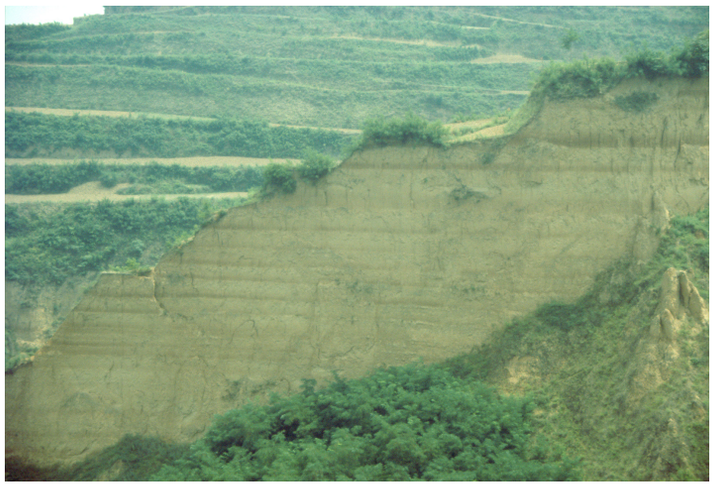
2.6 Andere klimaatgegevens gemeten door het KMI

Zoals reeds meerdere malen in dit document werd aangetoond, is het klimaat een complex en dynamisch fenomeen dat afhankelijk is van talrijke parameters en diverse terugkoppelingsmechanismen die de modellering van zijn evolutie bemoeilijken. Hierdoor is een betere kennis van de natuurlijke variabiliteit van het klimaat van de Aarde van fundamenteel belang om mogelijke toekomstige klimaatscenario's op te stellen.

Eén van de onderzoeksdomeinen van het Geofysisch Centrum van het KMI (GFC) dat in Dourbes (Viroinval) tussen Samber en Maas gelegen is, is de klimaatreconstructie tijdens het Kwartair (dat ongeveer 2 miljoen jaar geleden begon) zich baserend op de magnetische indicatoren in de continentale klimaatarchieven zoals meersedimenten en löss/paleobodem sequenties. Deze laatste komen veelvuldig voor in het centrale deel van Noord China, waar zich een dikke laag löss afzette door de wind die tijdens de voorbije drie miljoen jaar zand en stof vanuit de woestijnen ten noorden van het plateau naar het oosten en het zuiden blies. Er bestaan ook aanzienlijke lössafzettingen in Europa en meer bepaald in Midden-België.

Löss is een glaciaal sediment dat voornamelijk wordt afgezet tijdens koude en droge klimatologische periodes (ijstijden). Tijdens interglaciale periodes wordt löss blootgesteld aan nieuwe omgevingsvoorwaarden zoals een stijging van de temperatuur, een toename van de neerslag en een verhoogde biologische activiteit die het löss geleidelijk omvormen tot een bodem, die op zijn beurt tijdens de volgende glaciale periode weer bedekt wordt door een nieuwe laag van löss.

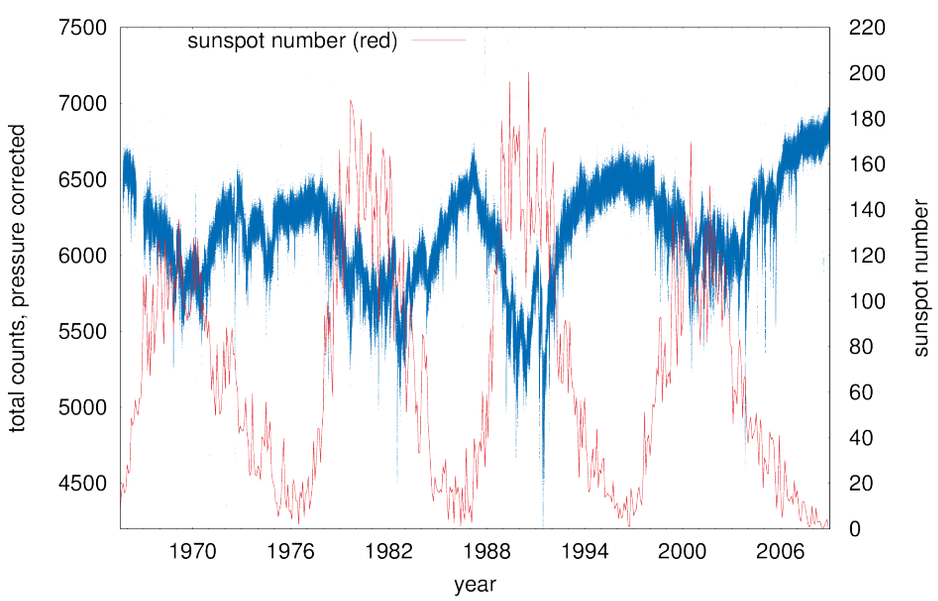
Op het Löss Plateau van China hebben de voormalige klimaatveranderingen gezorgd voor afwisselende lagen van löss en paleobodem, respectievelijk overeenkomend met koude droge en warme vochtige periodes (zie figuur 2.19). De löss- en de paleobodemlagen bevatten elk verschillende hoeveelheden van diverse magnetische ijzeroxiden, waarvan de vorming wordt gecontroleerd door de omgeving (Hus and Han, 1992). Magnetische en magnetostratigrafische eigenschappen van deze afzettingen geven niet alleen een indicatie van de intensiteit en de tijdspanne van de klimatologische perioden in het verleden, maar ook van de neerslag en maken het zelfs mogelijk om het stelsel van de regionale winden kwantitatief te beoordelen. Deze informatie kan gebruikt worden om de natuurlijke veranderingen van het klimaat te bestuderen nog voor er antropogene invloeden waren, alsook om klimaatmodellen op lange termijn op te stellen. (Jordanova *et al.*, 2007; Djerrab *et al.*, 2013).



Figuur 2.19. Verticale doorsnede van een löss/paleobodem-sequentie in Jiacun in de buurt van Baoji in de Volksrepubliek China. Lichtgele lagen van löss, afgezet tijdens koude droge klimatologische periodes (ijstijden), wisselen af met donkerbruine paleobodems gevormd tijdens warme vochtige klimatologische perioden (interglaciale tijdperken).

Tot nu toe werd er weinig aandacht geschonken aan het verband tussen veranderingen in het geomagnetisch veld en klimaatveranderingen. Eén van de mogelijke mechanismen binnen deze relatie, zou de veranderingen in de stroom van kosmische straling zijn, die gemoduleerd door zonneactiviteit en vergezeld van geomagnetische wijzigingen, de vorming van wolken in de lagere atmosfeer en de albedo beïnvloedt en dus uiteindelijk ook het klimaat (zie figuur 2.20).

Bovendien is het niet uitgesloten dat er een oorzakelijk verband zou bestaan tussen de toename van de seculaire (eeuwenoude) verandering in het geomagnetisch veld en klimaatveranderingen op een tijdschaal van honderden jaren. Als dit wordt bevestigd, zou de zonneactiviteit niet de enige externe natuurlijke factor zijn die verantwoordelijk is voor de klimaatverandering. Sommige onderzoekers vonden tijdens het laatste millennium inderdaad een schijnbaar verband tussen snelle veranderingen van de veldintensiteit, bepaald door archeomagnetische technieken, en periodes van algemene afkoeling in West-Europa, bevestigd door historisch gedocumenteerde gletsjeruitbreidingen in de Alpen. Deze vaststellingen verdienen verder diepgaand onderzoek.



Figuur 2.20. Vergelijking van de kosmische stralen waargenomen in het Geofysisch Centrum van het KMI in Dourbes vanaf 1965 (blauwe kromme, schaal links) met het aantal zonnevlekken (rode kromme en schaal rechts).

Een ander onderzoeksdomein van het GFC bevat de studie van tweede-orde-effecten die het huidige klimaat beïnvloeden. Kosmische stralen veroorzaken ionisatie in de troposfeer die waarschijnlijk een invloed op het wolkendek heeft. Het experiment CLOUD in 2011 door CERN heeft aangetoond dat ionisatie door kosmische stralen de nucleatie van aerosolen voor zwavelzuur en ammoniak in de boven- en middenlagen van de troposfeer aanzienlijk bevordert, en die condensatiekernen voor wolkenvorming kunnen worden. Het experiment verklaart echter niet de nucleatiesnelheid in de onderste lagen van de atmosfeer. Het gehalte van kosmische stralen hangt, naast de zonneactiviteit, ook af van het aardmagnetische veld dat de biosfeer tegen de impact van energierijke deeltjes beschermt. Naast de atmosferische elektriciteit en de ionosfeer, worden het geomagnetisch veld en de kosmische stralen tijdens de laatste 50 jaren continu gemeten in het GFC.

Het KMI levert aan de wetenschappelijke gemeenschap dan ook sleutelgegevens voor de analyse van tijdreeksen om mogelijke en weinig bestudeerde verbanden tussen het geomagnetische veld, kosmische stralen, zonneactiviteit en wolkenvorming en hun invloed op het huidige klimaat op te sporen. We benadrukken hier dan ook het belang om de metingen van deze geofysische parameters in de toekomst te kunnen verzekeren wegens hun belangrijke rol die ze waarschijnlijk zullen spelen (zelfs indien dit moeilijk in te schatten valt op het huidige moment) in de dynamiek van klimaatsystemen op verschillende tijdschalen.

Bibliografie

De Bock, V., De Backer, H., Van Malderen, R., Mangold, A. and Delcloo, A.: Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. Atmos. Chem. Phys., 14, 12251-12270, 2014.

Dewitte, S., Clerbaux, N., Ipe, A., Velazquez, A., Baudrez, E., Nevens, S. and Decoster, I.: Climate monitoring with Earth Radiation Budget measurements. Proceedings of the International Radiation Symposium, AIP2012, 1531, 612-615, 2012.

Dewitte, S., Janssen, E. and Mekaoui, S.: Science results from the Sova-Picard Total Solar Irradiance instrument. Proceedings of the International Radiation Symposium, AIP2012, 1531, 688-691, 2012.

Djerrab, A., Spassov, S., Defaflia, N., Hus, J., Abdessadok, S., Ruault-Djerrab, M., Bahra, N. and Ech-Chakrouni, S.: The Middle Palaeolithic site of Birzgane (Tebessa, Algeria) : Rock magnetic property characterisation and past rainfall reconstruction. Quaternary International, 320, 63-74, 2014.

Eddy, J.A.: The Maunder Minimum. Science, 192 (4245), 1189-1202, 1976.

Gorodetskaya, I.V., Van Lipzig, N., Van den Broeke, M.R., Mangold, A., Boot, W. and Reijmer, C.H.: Meteorological regimes and accumulation patterns at Utsteinen, Dronning Maud Land, East Antarctic : Analysis of two contrasting years. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 1700-1715, 2013.

Hus, J. and Han, J.: The contribution of Loess magnetism in China to the retrieval of past global changes - some problems. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 70, p. 154-168, 1992.

IPCC: Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.

Jordanova, D., Hus, J. and Geeraerts, R.: Palaeoclimatic implications of the magnetic record from loess/palaesol sequence Viatovo (NE Bulgaria). Geophysical Journal International, 171, p.1036-1047, 2007.

Van Malderen, R. and De Backer, H.: A drop in upper tropospheric humidity in autumn 2001, as derived from radiosonde measurements at Uccle, Belgium. J. Geophys. Res, 115, D20114, doi:10.1029/2009JD013587, 2010.

Van Malderen, R., De Backer, H., Delcloo, A. and Allaart, M.: Identifying the origin of anomalous High tropospheric ozone in the ozonesonde data at Uccle by Comparison with nearby De Bilt. Atmosphere-Ocean, Ozone Special Issue, doi: 10.1080/07055900.2014.886552, 2014a.

Van Malderen, R., Brenot, H., Pottiaux, E., Beirle, S., Hermans, C., De Mazière, M., Mies, K., Wagner, T., De Backer, H. and Bruyninx, C.: A multi-site intercomparison of integrated water vapour absorptions for climate change analysis. Atmos. Meas. Tech., 7, 2487-2512, 2014b.

Verhulst, T., Stankov, S. and Rasson, J.: The geomagnetic field - an actively changing global phenomenon. KBVE Review E Tijdschrift - Journal of the Royal Belgian Association of Electrical Engineers (KBVE), 130 (2), 1-6, 2014.

Wild, M.: Global dimming and brightening: A review. J. Geophys. Res., 114, Issue D10, 7 May 2009.

Wild, M.: Enlightening Global Dimming and Brightening. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 27–37. doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1, 2012.

Wolter, K. and Timlin, S.: Measuring the strenght of ENSO events – how does 1997/98 rank ? Weather, 53, 315-324, 1998.

HOOFDSTUK 3. ONDERZOEK OVER KLIMAATVOORSPELLING EN KLIMAATMODELLERING

3.1 Inleiding

Sinds enkele decennia krijgt de dynamiek van het klimaat bijzondere aandacht. Dit is enerzijds te wijten aan de complexe gedragingen afgeleid uit paleoklimatologische analyses over lange periodes (meerdere honderdduizenden jaren) en anderzijds aan de potentiële invloed van de menselijke activiteit die in belangrijke mate de chemische samenstelling van onze atmosfeer alsook andere klimaatbestanddelen verandert. Deze veranderingen hebben een belangrijke impact op de energiebalans van de aarde en worden omschreven als het broeikaseffect. Enkele gassen in de atmosfeer zoals waterdamp (H2O), koolstofdioxide (CO2), methaan (CH4), stikstofoxyde (N2O) en ozon (O3), absorberen een deel van de hitte die door het aardoppervlak wordt uitgestoten zoals besproken in hoofdstuk 2. De atmosfeer past haar temperatuurprofiel aan om de energiebalans tussen de aarde en de stralingsuitwisselingen met de ruimte te herstellen. Het "broeikaseffect" is een natuurlijk proces, in die zin dat bij afwezigheid van deze gassen de aarde een globale gemiddelde temperatuur van -18°C zou hebben. Sinds de laatste decade hebben antropogene activiteiten in belangrijke mate de concentratie van een deel van deze zogenaamde broeikasgassen (= Greenhouse gases GHG) verhoogd.

Klimaatgevoeligheid aan GHG wordt gedefinieerd als de veranderingen van de statistische eigenschappen die het klimaatsysteem ondervindt nadat het, als antwoord op een verdubbeling van de GHG-concentraties, een nieuw evenwicht heeft bereikt. De kwantificering van de klimaatgevoeligheid is een belangrijke wetenschappelijke uitdaging. Het klimaatsysteem wordt echter geconfronteerd met een voortdurende stijging van GHG-concentraties en bijgevolg is zijn dynamiek een voorbijgaand proces. Dit fenomeen wordt 'transient climate response' (TCR), of 'een voorbijgaande klimaatreactie' genoemd. Gewoonlijk wordt het gedefinieerd als de verandering in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur wanneer de concentraties van GHG elk jaar met 1% stijgen. De klimaatgevoeligheid en de TCR worden sterk beïnvloed door verschillende terugkoppelingen. Hierbij een voorbeeld van een terugkoppeling die gerelateerd is aan de aanwezigheid van waterdamp in de atmosfeer: gezien de hoeveelheid waterdamp die in de lucht kan worden vastgehouden in verhouding staat met de luchttemperatuur, zal een stijging van de temperatuur de waterdamphoeveelheid beïnvloeden en bijgevolg de bewolking; die zal op zijn beurt de energiebalans verstoren en dus ook de temperatuur. Dergelijke terugkoppelingen kunnen het broeikaseffect versterken of verzwakken. Deze klimaatgevoeligheid en de TCR kunnen geschat worden door de modellering van de verschillende processen die betrokken zijn bij de klimaatdynamica.

In principe kunnen deze processen beschreven worden door fundamentele fysische principes die in punt 3.2 zullen worden voorgesteld. Twee complementaire benaderingen worden meestal gebruikt om atmosferische (en meer algemeen klimaat) processen te bestuderen. Enerzijds is er een benadering gebaseerd op extreme vereenvoudigingen (met behoud van de essentiële ingrediënten van het onderzochte proces) die analytische en/of uitgebreide numerieke modelstudies toelaat, alsook het grondig begrijpen van de specifieke mechanismen. Anderzijds is er de voorstelling van alle processen in gedetailleerde klimaatmodellen die een meer kwantitatieve schatting van de klimaatgevoeligheid toelaten. Zo zijn klimaatmodellen belangrijke hulpmiddelen die toelaten om (i) schattingen van de verwachtte klimaatveranderingen (en de klimaatgevoeligheid) als gevolg van externe forcering te maken, en (ii) om de mechanismen die aan de oorsprong van de waargenomen fenomenen in ons klimaatsysteem liggen, te beschrijven. Deze twee denkpistes worden door het KMI gevolgd en een samenvatting van de belangrijkste resultaten vindt u respectievelijk in de punten 3.3 en 3.4.

Enkele nuttige definities:

Voorspellingsmodel: Verzameling van vergelijkingen die de evolutie van het beschouwde systeem beschrijven, gebaseerd op de wetten van het behoud van de vloeistofdynamica.

Variabele: Hoeveelheid afhankelijk van tijd en ruimte waarvan de evolutie wordt beschreven door een vergelijking in het model.

Parameter: Hoeveelheid (die afhankelijk kan zijn van tijd en ruimte) waarvan de dynamiek niet wordt beschreven door een vergelijking binnen het model.

Voorspelling van het weer of het klimaat: Toekomstige evolutie van het beschouwde systeem uitgaande van de actuele, ogenblikkelijke toestand van het systeem (initiële toestand).

Klimaatprojectie: Langetermijngedrag van de statistische eigenschappen van het klimaat onder het effect van diverse forceringen waarvan de bronnen intern of extern kunnen zijn.

Klimaatscenario: Mogelijke evolutie van de statistische eigenschappen van het klimaatsysteem onder het effect van potentiële, toekomstige forceringen.

Interne forcering (1): Forcering verbonden aan de variaties van zekere parameters intern aan het systeem, zoals bijvoorbeeld de toename van broeikasgassen.

Externe forcering (1): Forcering verbonden aan veranderingen van gecontroleerde parameters door bestanddelen buiten het systeem, zoals de forceringen van de zon of de omstandigheden aan de rand van het systeem (bijvoorbeeld als het beschouwde dynamische systeem de atmosfeer is, worden de randvoorwaarden geleverd door anderen).

(1) Deze definities die binnen het kader van deze huidige publicatie gebruikt worden, kunnen een onderwerp van discussie zijn en door andere auteurs op een andere manier gebruikt worden.



3.2 Voorspelling van het weer en het klimaat - Algemeen

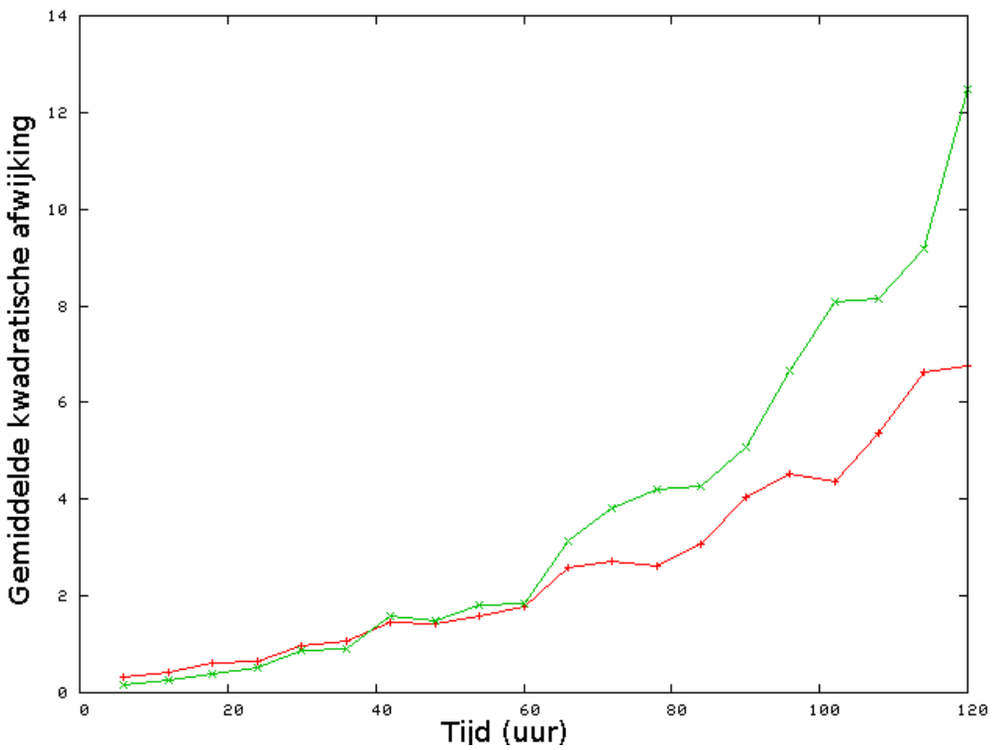
De atmosferische variabelen vertonen een sterke variabiliteit over zeer verschillende tijdsschalen, gaande van een minuut tot honderd jaar, en zelfs nog meer. In de vorige hoofdstukken kwamen voldoende voorbeelden van die variabiliteit aan bod. Bovendien verloopt de ontwikkeling van de variabelen die daarin werden beschreven, onregelmatig, maar gaan toch vaak gepaard met algemene regelmatigheden zoals de seizoensgebonden of dagelijkse variaties van de zonneschijn, alsook met abrupte of zachtere regimeveranderingen. Al deze verschijnselen vloeien voort uit de fysische en chemische wetten die de dynamica van het klimaatsysteem, bestaande uit de atmosfeer, de hydrosfeer, de cryosfeer, de biosfeer en de lithosfeer, beheersen. In die context is één van de kernvragen de mate waarin deze fenomenen kunnen beschreven worden door modellen die de verschillende componenten van het klimaat zo goed mogelijk weergeven, en binnen welke grenzen zij kunnen voorspeld worden.

Van al die componenten weten we wellicht het meest over de atmosfeer, want zij vormt het natuurlijke milieu waarin we leven. Desondanks, zelfs in dit geval, leert de dagelijkse ervaring ons dat ons voorspellingsvermogen zeer beperkt blijft, ook al beschikken we nu over krachtige computers. Er blijkt onder meer dat na een tiental dagen de weervoorspelling gemaakt op basis van de modellen, nauwelijks nog afwijkt van een zuiver toevallige voorspelling die enkel rekening houdt met de periode van het jaar in kwestie. Figuur 3.1 illustreert deze dynamiek aan de hand van het operationele globale model voor weervoorspelling van het 'Europees Centrum voor Weervoorspellingen op Middellange Termijn' (het ECMWF). De (gemiddelde kwadratische) afwijking, weergegeven op de verticale as voor de temperatuur bij een druk van 500 hectopascal en een druk van 850 hectopascal in heel België, stijgt met de termijn van de voorspelling. Dat geleidelijke verlies aan voorspelbaarheid kan toegeschreven worden aan twee oorzaken: (i) de aanwezigheid van onvolmaaktheden in de modellering die inwerken op de voorspelling en (ii) de gevoeligheid voor de beginvoorwaarden waardoor elke afwijking van de beginvoorwaarden van een systeem, geleidelijk zal groeien in de loop van de tijd. Op basis van figuur 3.1 kunnen de twee afwijkingsoorzaken niet worden onderscheiden, maar is het wel mogelijk om aan te tonen dat de belangrijkste oorzaak in dit concrete geval, de afwijking van de beginvoorwaarden is (Vannitsem and Nicolis, 2008).

De twee eigenschappen die hierboven kort beschreven werden, namelijk de uitgesproken en onregelmatige variabiliteit van de atmosferische variabelen en de gevoeligheid voor de beginvoorwaarden, zijn de twee zichtbare facetten van een dynamiek die eigen is aan atmosferische modellen, bekend onder de naam chaotische dynamica of aperiodische dynamica. Het is belangrijk om te benadrukken dat deze geen gevolg is van onze beperkte kennis en onze onvolmaakte beschrijving van de ontwikkelingswetten van de atmosfeer, maar een integraal kenmerk van het gamma mogelijke dynamieken die aan dergelijke wetten zijn onderworpen.

De atmosferische variabelen waarvoor meteorologen en klimatologen zich het meest interesseren, zijn wind, temperatuur, luchtdruk, dichtheid, de verschillende fasen van het water, de hoeveelheid aerosolen en ook de verschillende chemische componenten van de luchtmassa. De evolutie ervan wordt beschreven door de basisvergelijkingen van de vloeistofdynamica, de thermodynamica en de chemische kinetica. Daarbij komt een hele reeks relaties die de faseveranderingen van het water beschrijven en de absorptie, emissie en diffusie van straling door de bestanddelen in de lucht. Een van de essentiële bijzonderheden van deze vergelijkingen is dat ze van nature niet-lineair[13] zijn. Dit kenmerk ligt aan de grondslag van de bovenvermelde chaotische dynamica en vormt een centraal element in de theoretische en praktische werkzaamheden uitgevoerd in het kader van de dynamische systeemtheorie, een discipline op de grens van de fysica en de wiskunde. Voor het effectieve onderzoek binnen deze context door het KMI verwijzen we naar het punt 3 in dit hoofdstuk.

13 Een reactie van een systeem wordt gekwalificeerd als lineair als ze evenredig is met de amplitude van de actie en het principe van superpositie volgt, dat wil zeggen dat het effect van verschillende acties overeenstemt met de som van die acties. Een reactie is niet-lineair als ze niet in die categorie valt.



Figuur 3.1. Kwadratische afwijking, gemiddeld over twee winters en over heel België, voor de temperatuur bij een druk van 500 hectopascal (ongeveer 5 kilometer hoog), groene curve, en bij een druk van 850 hectopascal (ongeveer 1 kilometer hoog), rode curve. De resultaten zijn afkomstig van de voorspelling van het model van het Europees Centrum voor weervoorspellingen op middellange termijn (het ECMWF).

Traditioneel wordt het klimaat gedefinieerd als het geheel van de statistische kenmerken (gemiddelden, afwijkingen... van de verschillende belangrijke variabelen, zoals de temperatuur of de neerslag) van de atmosfeer. De beschrijving van zijn dynamica gaat uit van dezelfde basisvergelijkingen die ook worden gebruikt bij de weervoorspellingen, aangepast om de statistische hoeveelheden te beschrijven waarvoor men zich interesseert, en uitgebreid met terugkoppelingen naar de andere, eveneens gemodelleerde, elementen van het klimaat, evenals met langzaam variërende externe forceringen die vaak (terecht) worden genegeerd bij de weervoorspelling. Voor de oceanen volgt de basismodellering dezelfde aanpak als voor de atmosfeer, met dit verschil dat de massa nu een vloeistof op basis van water en zout is (en andere chemische of biologische elementen zoals fytoplankton). Voor de cryosfeer is een dynamisch ijsmodel nodig en voor de biosfeer een model dat de verschillende soorten vegetatie en bedekking op het aardoppervlak beschrijft. Een van de grootste problemen in deze context is de precieze modellering van de diverse stromen tussen deze verschillende elementen van het klimaatsysteem (bijvoorbeeld de stromen van warmte, de evapotranspiratie, de stromen van verschillende gassen waaronder de broeikasgassen, enz.).

Wanneer men belangstelling heeft voor de toekomstige evolutie van deze gemiddelde statistische hoeveelheden, dan heeft men het over klimaatprognoses die de gevoeligheid van deze statistische kenmerken aan andere componenten van het klimaatsysteem en de interne en externe forceringen karakteriseren. Deze aanpak is gebaseerd op modellen die specifiek gebouwd zijn voor lange tijdschalen door vereenvoudiging van de procedures die op korte tijdschalen (binnen een dag) plaatsvinden, d.w.z. typische tijdschalen die voor meteorologen van belang zijn. Binnen deze context dient opgemerkt te worden dat een complete theorie over hoe de vergelijkingen van de evolutie van het klimaatsysteem zodanig verminderd kunnen worden om tot nieuwe vergelijkingen voor alleen de statistische hoeveelheden (gemiddelden, afwijkingen...) te komen, nog niet beschikbaar is en dit voornamelijk vanwege de complexiteit van het klimaatsysteem. Dit impliceert dat relatief heuristische benaderingen worden gebruikt, wat enigszins een belangrijke onzekerheid over de kwaliteit van deze modellen en de aanwezigheid van belangrijke bronnen van modelleringsafwijkingen meebrengt.

Recente werken proberen om parallel voorspellingsmodellen te ontwikkelen die kunnen gebruikt worden voor voorspellingen op zowel de korte termijn (in de grootte van een paar dagen), de middellange termijn (in de grootte van een maand) of de lange termijn (jaarlijkse of decenniale schaal) en die toch de klimaatvoorspelling beschouwen als een probleem bij de initiële voorwaarden (de voorspelling wordt gemaakt vanuit een relatief goed gedefinieerde huidige staat van alle onderdelen van het waargenomen klimaatsysteem). Deze zeer gedetailleerde benadering van de beschrijving van het klimaatsysteem is een zeer tijdrovend berekening en heeft enkel toekomst als zeer krachtige computersystemen ingezet worden, evenals volledige waarnemingssystemen die alle onderdelen van het klimaatsysteem bevatten. De studies die in dit kader (gevoeligheidsanalyse) door het KMI worden uitgevoerd zullen beschreven worden in punt 3.4.

3.3 Fundamentele benadering van de dynamica van de atmosfeer en het klimaat

Inleiding

De theorie van dynamische systemen zoals hiervoor vernoemd, kan niet alleen oplossingen van het chaotische type in de niet-lineaire systemen verklaren, maar laat ook de beschrijving van de uitgebreide 'zoölogie' van mogelijke oplossingen van deze systemen, onder de naam van attractoren, toe. Een bepaald systeem kan verschillende attractoren hebben en de toepassing van storingen die eigen zijn aan dat soort systemen kan dan, in bepaalde omstandigheden, de overgang van een oplossing naar een andere teweegbrengen. Dat leidt tot min of meer snelle transities tussen de oplossingen zoals diegene die in hoofdstuk 1 voor de temperaturen of de neerslag empirisch beschreven werden. Deze transities kunnen een natuurlijk karakter hebben indien de forcering waardoor ze worden opgewekt, van natuurlijke oorsprong is, zoals bijvoorbeeld een toename van de zonne-energie die de Aarde bereikt, of van antropogene aard, wanneer de forcering wordt uitgelokt door de mens, zoals een buitensporige exploitatie van de lokale plantaardige hulpbronnen.

Een spectaculair voorbeeld van deze transities tussen verschillende toestanden is de evolutie van de neerslag in de Sahel (Oost-Afrika), waar periodes van droogte en vochtigere periodes elkaar afwisselen. Deze transities maakten het voorwerp uit van een vereenvoudigde modellering op basis van een niet-lineair model dat de ontwikkeling tussen deze twee toestanden bijzonder goed weergeeft (Demarée and Nicolis, 1990).

Het klimaat en de voorspelbaarheid van de gemiddelden

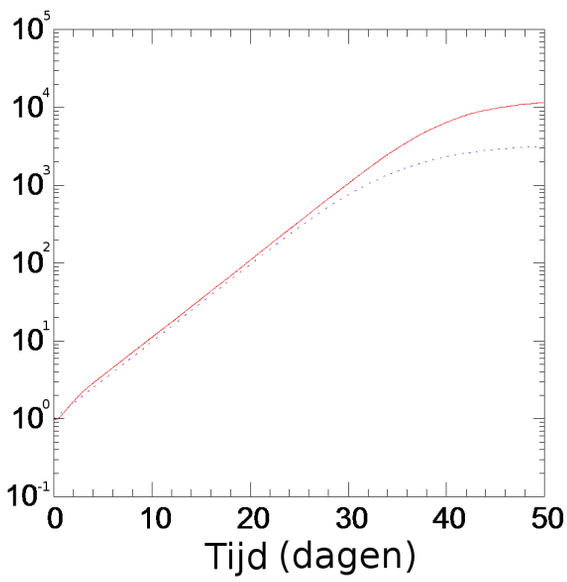
Hoewel de statische eigenschappen van de atmosfeer sterk beïnvloed worden door de andere elementen van het klimaatsysteem (bijvoorbeeld de hydrosfeer of de cryosfeer) die op langere tijdsschalen evolueren, moet toch ook rekening worden gehouden met het onregelmatige gedrag van de atmosfeer, dat eerder werd beschreven. Deze natuurlijke vaststelling leidt derhalve tot de vraag in welke mate het klimaat voorspelbaar is, gezien de beperkte horizon van de weervoorspelling.

De evolutievergelijkingen van het klimaat zijn bijzonder complex. Vaak is het beter om de beschrijving van de fenomenen aanzienlijk te beperken zodat het probleem dat ons interesseert eenvoudiger wordt, maar zonder dat de essentiële ingrediënten die het eigen karakter ervan uitmaken over het hoofd worden gezien. Zo zijn zeer eenvoudige modellen die specifieke fenomenen beschrijven, ontstaan zoals het model voor oceaancirculatie van Stommel (zie bijvoorbeeld Dijkstra, 2005). Dat model wordt beschreven door twee gewone niet-lineaire, differentiaalvergelijkingen (gekwalificeerd als een model met een lage dimensie), of ook middelgrote modellen (die zich situeren tussen de modellen met een lage dimensie en de operationele modellen voor weer- en klimaatvoorspelling). Deze systemen hebben als fundamenteel voordeel dat ze een uitgebreid onderzoek mogelijk maken en toch de essentiële ingrediënten van de basisdynamica behouden.

Gedurende de laatste jaren werden bij het KMI verschillende onderzoeken met dit soort vereenvoudigde modellen uitgevoerd. Een voorbeeld daarvan wordt gegeven in figuur 3.2; hier wordt de ontwikkeling van de afwijking (ten gevolge van de gekoppelde afwijking bij de schatting van een parameter) weergegeven in functie van de voorspellingstermijn voor een middelgroot atmosferisch model dat nog voldoende realistisch is om de dynamica van de synoptische schalen in de middelste breedtegraden (zonder tijdsafhankelijkheid) afdoende te beschrijven. De rode curve geeft de ontwikkeling van de afwijking voor de variabelen van het oorspronkelijke model weer en de blauwe curve die van de tijdsgemiddelden over 10 dagen. De afwijking is genormaliseerd door zijn initiële afwijking om de vergelijking te vergemakkelijken. Er blijkt duidelijk dat de initiële toename van de afwijking in beide gevallen vergelijkbaar is en dat de asymptotische convergentie naar een constante waarde (ondanks de verschillende waarden) zich voor dezelfde tijdsschalen voordoet.

Dit resultaat toont duidelijk aan dat de grens van de voorspelbaarheid van statistische hoeveelheden zoals de temporele gemiddelden identiek is aan die van het oorspronkelijke systeem en dat de dynamica chaotisch blijft. Bijgevolg is de verbetering van de voorspellingen via een berekening van het temporele gemiddelde van de belangrijke hoeveelheden op het eerste gezicht zinloos, aangezien de horizon van de voorspelbaarheid van dezelfde orde van grootte lijkt te zijn als die van het oorspronkelijke systeem.

Deze resultaten suggereren dat de keuze van de beginvoorwaarden van de atmosferische component relatief weinig belang speelt in de problematiek van de klimaatvoorspelling, gezien de afwijking snel gesatureerd wordt na een tiental dagen. Doch dit sluit niet uit dat bepaalde informatie kan afgeleid worden uit een langere voorspelling door de invloed van andere klimaatelementen die veel langzamer evolueren. Met een gecombineerd oceaan-atmosfeer model tonen Goswami and Shukla (1991) bijvoorbeeld aan dat de afwijking veel langzamer wordt gesatureerd dan de afwijking die volgt uit de zuiver atmosferische modellen, en dat nuttige informatie kan verzameld worden op seizoenniveau of verschillende jaren. Bedenk echter dat hoewel deze resultaten hoopgevend mogen zijn, zich ook snelle en moeilijk voorspelbare veranderingen die samenhangen met de niet-lineaire aard van de andere klimaatelementen en de koppeling daarvan met de atmosfeer, kunnen voordoen. Hierna volgt een voorbeeld.



Figuur 3.2.: Evolutie van het gemiddelde afwijking (de absolute waarde van de afwijking) in functie van de voorspellingstermijn voor de variabele (in dit geval de stroomfunctie, afgeleid van de wind gegenereerd door het model) van het bestudeerde systeem (rode curve) en dezelfde variabele gemiddeld over 10 dagen (blauwe curve). Dit resultaat is overgenomen uit Vannitsem and Nicolis (1998).

De invloed van de andere componenten van het klimaatsysteem

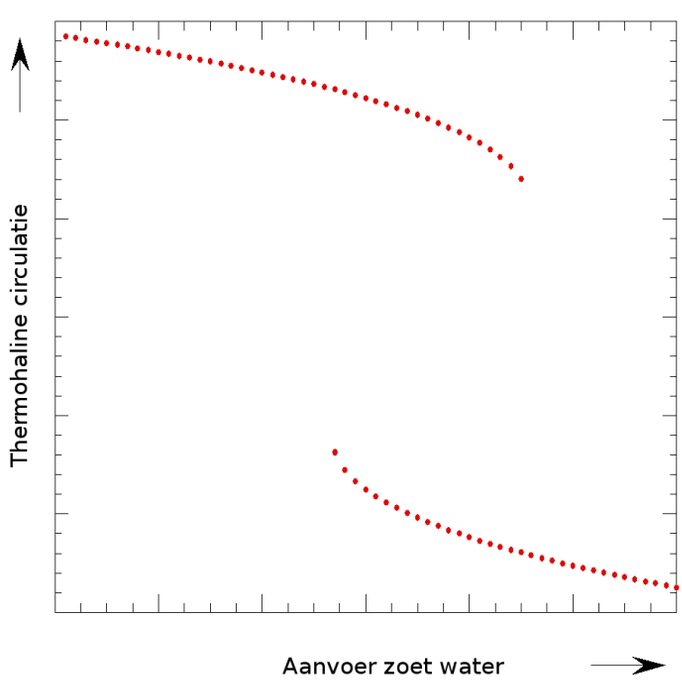
Talloze studies hebben de doorslaggevende rol die de oceanen en het ijs spelen in de dynamica van het klimaat over langere tijdsschalen dan die van de atmosfeer, aangetoond. Hun interactie met de atmosfeer kan tot 'klimaatverrassingen' leiden die grote gevolgen kunnen hebben.

Een eerste voorbeeld van deze relatief plotselinge effecten is de opeenvolging van ijstijden en tussenijstijden tijdens het quartaire tijdperk (ongeveer de laatste twee miljoen jaar), onderbroken door overgangsfases die vaak veel korter waren (enkele duizenden jaren) dan die periodes zelf. Een eerste element dat deze ontwikkeling kan verklaren, is de treffende gelijkenis tussen deze opeenvolgende veranderingen en de variaties in de excentriciteit van de baan die de Aarde maakt (Berger, 1981). Maar de afwezigheid van een perfecte coherentie tussen deze twee 'cycli' en de grote variabiliteit in duur van de ijstijden en tussenijstijden bleven nog onopgehelderd. Dit gedrag werd later volledig verklaard door de beschrijving van de complexe interactie tussen de wijzigingen van excentriciteit van de baan van de Aarde (en dus de zonne-influx) en de temperatuur van het aardoppervlak, waarvan de dynamica een niet-lineaire vergelijking volgt. Deze onderzoeken over de ijsvorming in het quartaire tijdperk liggen onder meer aan de oorsprong van de ontwikkeling van een belangrijke theorie in de fysica, met name de stochastische resonantie, die verklaart hoe een niet-lineair systeem kan reageren op storingen met een zeer kleine amplitude (Nicolis, 1982, 1991).

Een ander voorbeeld van gedrag dat samenhangt met de aanwezigheid van niet-lineaire klimaatelementen is de mogelijke onderbreking van de thermohalinecirculatie, d.i. een belangrijke stroming die alle oceanen van de aardbol doorkruist. Dit transport wordt bepaald door de verschillen in dichtheid van de massa's oceaanwater die zich verspreiden over de aardbol. Die verschillen zijn een gevolg van de verschillen in temperatuur en zoutgehalte (Dijkstra, 2005). Deze stroming speelt een essentiële rol in de overdracht van warmte en massa in de oceanen op aarde en draagt dus in hoge mate bij aan de energie-

spreiding op Aarde. Een eventuele onderbreking van deze stroming zou desastreuze gevolgen kunnen hebben voor het klimaat in verschillende regio's (Baruch, 2007). Stellen we ons eens voor dat de Golfstroom, de relatief warme oceaanstroom die deel uitmaakt van de thermohalinecirculatie vanuit de Zuid-Atlantische Oceaan en langs onze kusten, stilvalt; dat zou tot een spectaculaire lokale afkoeling van het klimaat in onze regio's leiden.

Dat soort overgang tussen deze twee verschillende regimes zou het resultaat kunnen zijn van de aanwezigheid van wat in de dynamische systeemtheorie een bifurcatie wordt genoemd. Dit kenmerkt de manier waarop een systeem van regime (dat wil zeggen van attractor) zal veranderen onder invloed van een wijziging van bepaalde parameters die zijn toestand controleert. Om terug te keren naar het bovenvermelde voorbeeld: de thermohalinecirculatie in de Noord-Atlantische Oceaan wordt, onder meer, gecontroleerd door de hoeveelheid zoet water die aan de noordpool in de oceaan komt. Als die hoeveelheid te groot wordt (bijv. door snelle smelting van het poolijs), zou dat de circulatie kunnen verstoren, zelfs tot stilstand brengen of omkeren, en dat zou snel een hele reeks lokale veranderingen met mogelijke rampzalige gevolgen, opwekken. Figuur 3.3 illustreert dat fenomeen aan de hand van een schematisch bifurcatiediagram, afgeleid van een vereenvoudigd, kwalitatief model dat de thermohalinecirculatie beschrijft in de Noord-Atlantische Oceaan. Als we in dat model de aanvoer van zoet water verhogen, zal het systeem achtereenvolgens overgaan van een stabiele unieke toestand met een sterke circulatie (rode punten bovenaan op het diagram) naar een situatie waarbij twee mogelijke toestanden stabiel zijn, een intense en een zwakke (of omgekeerde circulatie), en vervolgens naar een situatie waar de stabiele toestand overeenstemt met een circulatie van zwakke intensiteit (of omgekeerde circulatie). Als we ons bovendien op een bepaald ogenblik in de toestand van intense circulatie bevinden en de aanvoer van zoet water toeneemt, dan glijden we langs de bovenste curve en kunnen we vervolgens snel overgaan naar de toestand met zwakke circulatie (of omkering van de circulatie), weergegeven door de onderste curve.



Figuur 3.3. Bifurcatiediagram van de intensiteit van de thermohalinecirculatie in de Noord-Atlantische Oceaan in functie van de aanvoer zoet water bij de noordpool.

In het algemeen kan de aanwezigheid van niet-lineaire elementen in het klimaatsysteem onverwachte gevolgen hebben, vooral bij tijdsafhankelijke forceringen zoals de toename van de broeikasgassen of de snelle ontbossing van de aarde die de albedo wijzigt en dus de hoeveelheid zonne-energie die kan worden opgeslagen door de Aarde en de atmosfeer. De verandering van zo'n parameter kan ertoe leiden dat het klimaat overgaat van de ene toestand in een andere en dat de statistische eigenschappen van het systeem volledig veranderen.

Zoals we hierboven reeds hebben besproken, zou de initiële toestand die voor de atmosfeer wordt ingevoerd, relatief weinig invloed mogen hebben op de dynamica van het klimaat. Dat geldt niet voor de andere klimaatelementen, aangezien die over langere tijdschalen evolueren en hun voorspellingsgrens verder ligt dan die van de atmosfeer. Het is dus aannemelijk dat de beginvoorwaarden die voor de oceanen of de verdeling van ijs worden gekozen, een belangrijke rol moeten spelen, ook zonder

dat de eerder besproken forceringen veranderen. Het is ook gegrond om zich af te vragen wat het effect is van wijzigingen van deze forceringen op de dynamica van de overgang tussen de stabiele oplossingen die zich voordoen binnen het systeem, zoals deze die in figuur 3.3 worden weergegeven. Deze vraag kwam onlangs in het KMI nog aan bod bij eenvoudige modellen en het is gebleken dat de initiële toestand van het systeem aan het begin van de wijziging van de betrokken parameter en de snelheid waarmee die parameter verandert, onverwachte gevolgen hebben zoals de persistentie in een bepaalde toestand, terwijl die toestand niet meer stabiel is wanneer de forcering niet wijzigt (Nicolis and Nicolis, 2004). Al deze effecten moeten in aanmerking worden genomen bij een klimaatprojectie.

Het probleem van de modelfout

Dankzij het gebruik van klimaatmodellen met een verschillende complexiteit krijgen we een beter inzicht in de dynamica van de klimaatveranderingen. Maar wat de voorspellingen betreft, schuilt de moeilijkheid in een zeer goede weergave van de klimaatprocessen en hun interacties binnen een model. Dit alles gebeurt zowel door de analyse van zeer eenvoudige systemen die een grondige studie van de mechanismen die inwerken op het klimaat, mogelijk maken, als door de ontwikkeling van zeer gedetailleerde modellen die rekening houden met alle aanwezige processen. Deze analyse kan leiden tot een raming van de toekomstige ontwikkeling van het klimaat en een evaluatie van zijn voorspelbaarheidshorizon. Maar dat werk is op dit ogenblik allesbehalve klaar, omdat er nog veel onzekerheden bestaan over de processen die een rol spelen en de impact ervan op het klimaat (Baruch, 2007). Dit leidt derhalve tot de vraag wat enerzijds de impact van die onzekerheden op de huidige klimaatprojecties is en anderzijds hoe we rekening kunnen houden met deze onzekerheden in de toekomstige projecties.

De vraag welke impact de modelfout heeft op de voorspelling, stelt zich niet alleen bij de klimaatmodellen, maar ook bij de weervoorspellingsmodellen. Zoals bijvoorbeeld in figuur 3.1 die de impact van de twee soorten afwijkingen weergeeft, namelijk de afwijking van de initiële toestand en de modelafwijking, aangezien het voorspellingsmodel slechts een onvolmaakte weergave van de realiteit is. In het KMI komt deze vraag momenteel uitgebreid aan bod bij de ontwikkeling van een fundamentele theorie van de dynamica van de modelfout en de correctie ervan. Het blijkt dat de aanwezigheid van een modelfout belangrijke gevolgen kan hebben voor de weervoorspelling; zoals bijvoorbeeld het ontbreken van een overgang naar een ander regime van het bestudeerde systeem. Als het systeem chaotisch is, neemt de modelfout, net zoals de afwijking van de initiële toestand, toe, waardoor het systeem uiteindelijk totaal onvoorspelbaar wordt (Nicolis, 2004; Vannitsem, 2006).

Parallel aan deze vermindering van de voorspelbaarheid neigt de modelfout ertoe aanzienlijke afwijkingen te veroorzaken in de diverse statistische grootheden (gemiddelden, varianties,...) van klimaatvariabelen die ons interesseren zoals bijvoorbeeld de globale jaarlijkse gemiddelde temperatuur. Deze afwijkingen worden in het algemeen achteraf gecorrigeerd door middel van post-processingtechnieken (statistische correctietechniek op basis van gemeten gegevens uit het verleden). Maar wanneer men zich interesseert in de evolutie van het klimaat onder invloed van bijvoorbeeld externe forceringen of veranderingen in de chemische samenstelling van de atmosfeer, zijn deze correctietechnieken op basis van statistische relaties tussen de observaties en de variabelen in het model niet langer noodzakelijkerwijs geldig. Deze kwestie is van cruciaal belang wanneer men weergaves voor klimaatverandering op lange termijn wil maken en deze wil koppelen aan een potentiële onzekerheid. Dit werd bestudeerd in de context van zeer eenvoudige systemen, met inbegrip van een klimaatmodel van lage dimensie (Vannitsem, 2011). Hierbij bleek effectief dat de afwijkingen en statistische relaties die de correctie van de gevolgen van de modelfout toestonden, aanzienlijke veranderingen ondergingen wanneer de eigenschappen van energieabsorptie van de atmosfeer waren veranderd. Bovendien vertonen deze statistische relaties en de correctie van de afwijkingen een complexe afhankelijkheid in functie van de wijzigingen van de eigenschappen van de energie-absorptie die opgelegd werden aan het betrokken klimaatsysteem (bijvoorbeeld gekoppeld aan de toename van broeikasgassen) en waarbij men het type relatie dat in de toekomst zou kunnen overheersen niet kan afleiden.

Naar een probabilistische benadering van de klimaatvoorspelling

Alle onzekerheden die tot nog toe werden aangehaald, met name de onzekerheid over de beginvoorwaarden, over de aanwezigheid van modelfouten, over de toekomstige projecties van de externe forceringen van het klimaatsysteem (mogelijke scenario's met bijvoorbeeld de menselijke activiteit), of interne forceringen zoals de uitstoot van broeikasgassen, moeten in aanmerking genomen worden om een betrouwbare evaluatie van de evolutie van het klimaat mogelijk te maken. Dit kan enkel via een probabilistische voorspelling.

Deze benadering wordt sinds ruim een tiental jaar door de belangrijkste meteorologische centra die globale voorspellingen leveren voor de volgende dagen of een heel seizoen, gebruikt om het weer te voorspellen. De operationele aanpak van dit soort voorspellingen stoelt ofwel op een reeks voorspellingen vanuit een bepaald model dat uitgaat van verschillende beginvoorwaarden, ofwel op het gebruik van een set modellen met verschillende specificaties van de ontwikkelingseigenschappen van bepaalde fysische processen, ofwel ook op een combinatie van de twee technieken.

Het grootste voordeel bij dergelijke aanpak is dat men niet alleen de voorspellingsfout gaat ramen, maar ook de waarschijnlijkheid van bepaalde meteorologische gebeurtenissen, zoals extreme gebeurtenissen gaat evalueren.

Bij de klimaatvoorspelling begint men deze benadering steeds meer toe te passen zowel via het gebruik van verschillende beginvoorwaarden als via meerdere, licht verschillende modellen (Palmer, 2000). Echter, we mogen verwachten dat de onzekerheden nog groter zullen zijn bij bepaalde fysische processen (zoals de opname van koolstofdioxide in de oceanen), waarmee men in de klimatologische modellering nog maar pas rekening begint te houden (Baruch, 2007), maar ook in verband met de toekomstige projecties van de productie van broeikasgassen, van bepaalde vervuilende stoffen die een stabiliserend effect kunnen hebben op de opwarming van de planeet, bosbranden of vulkanische activiteit of zonne-activiteit. Het lijkt er dus momenteel op dat nog niet alle onzekerheden in verband met ons toekomstig klimaat in rekening worden gebracht en dat de marge van mogelijke ontwikkelingen groter is dan de marge die momenteel in de recente rapporten over de klimaatontwikkeling naar voren wordt geschoven.

Deze probabilistische benadering die reeds lang wordt aangeprezen door de centra voor meteorologische voorspellingen, zal erop vooruitgaan bij uitbreiding tot de hele problematiek van de klimaatvoorspelling, evenals tot de sociaaleconomische oplossingen die nodig zijn voor een correct beheer van goederen en mensen.

3.4 Regionale klimaatmodellering

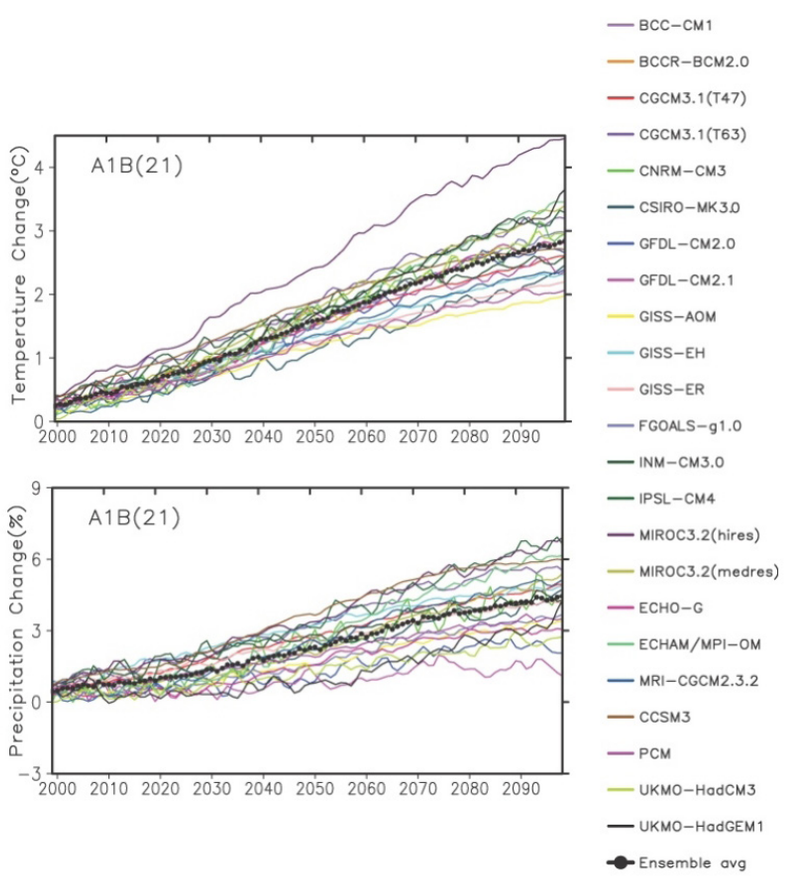
Algemeenheden

Zoals reeds eerder werd aangehaald, zijn de fysische principes en processen veel te complex om rechtstreeks te implementeren in de modellen. Een manier om dit probleem te verhelpen is door deze onopgeloste processen te vervangen door andere vereenvoudigde processen die wel expliciet door het model opgelost kunnen worden. De component van het model dat deze vereenvoudigde processen oplost, wordt de parameterisatie genoemd. Eens deze parameterisaties gedefinieerd zijn, worden de vergelijkingen in het model "gediscretiseerd", zowel in tijd als in ruimte. Dit betekent dat de modellen het aardoppervlak beschouwen als een opeenvolging van gridpunten die op een gelijke en vaste afstand van elkaar liggen, zodanig dat de vergelijkingen opgelost kunnen worden voor elk van deze gridpunten en voor elke tijdstap afzonderlijk. De afstand tussen deze gridpunten bepaalt de ruimtelijke resolutie van het model. In het geval dat een specifieke regio op Aarde bestudeerd wordt, is het beter om de afstanden tussen de gridpunten te verkleinen (i.e. hoge ruimtelijke resolutie) aangezien dit meer gedetailleerde en precieze modelinformatie voor het bestudeerde gebied zal opleveren. Een kleinere afstand tussen de gridpunten waarvoor het model de vergelijkingen moet oplossen, impliceert echter wel een langere rekentijd.

Ondanks de enorme inspanningen om de modellen te verbeteren, blijven klimaatmodellen toch een vereenvoudiging van de realiteit, wat onzekerheden impliceert. De kwaliteit van de modellen dient daarom zorgvuldig getest en gevalideerd te worden met het huidige klimaat door vergelijking met observaties. Tevens dienen de modelfouten voldoende klein te zijn t.o.v. de klimaatverandering die men wenst te bestuderen. Door voldoende verschillende klimaatmodellen met verschillende parameterisaties te gebruiken, kan men een benadering maken van de onzekerheden afkomstig van de modelfouten.

Men kan tevens de klimaatgevoeligheid en de transiënte klimaatrespons van de modellen berekenen en benaderingen van de onzekerheid gerelateerd aan modelfouten maken. Zo kan de klimaatgevoeligheid bestudeerd worden door de vergelijkingen van het model op te lossen voor een periode in de toekomst die voldoende lang is om een evenwichtstoestand met een referentiewaarde van broeikasgasconcentraties te bereiken. Vervolgens laten we hetzelfde model nog eens draaien voor dezelfde periode, maar dit keer met een initiële waarde voor de broeikasgasconcentraties die dubbel zo hoog is als de waarde in de eerste modelberekening. Deze verdubbeling in broeikasgasconcentraties vertegenwoordigt de forcering. Het verschil in temperatuur tussen deze twee modelberekeningen hetzij met, hetzij zonder forcering, is dan een maat voor de gevoeligheid van ons klimaatsysteem. Zulke gevoeligheidsstudies zijn relevant voor beleidsvorming. Voor een meer realistische benadering kunnen we de transiënte klimaatrespons die geassocieerd wordt met een transiënte toename in broeikasgasconcentraties die gebaseerd is op een te verwachten uitstoot van broeikasgassen, beschouwen. Het IPCC heeft "emissiescenario's" gedefinieerd voor toekomstige veranderingen in broeikasgasconcentraties. Deze emissiescenario's zijn afhankelijk van zowel economische evoluties als van evoluties in beleidsvorming. Een scenario is een modelberekening volgens een emissiescenario, terwijl een projectie verschillende modellen gebruikt om verscheidene scenario's te formuleren.

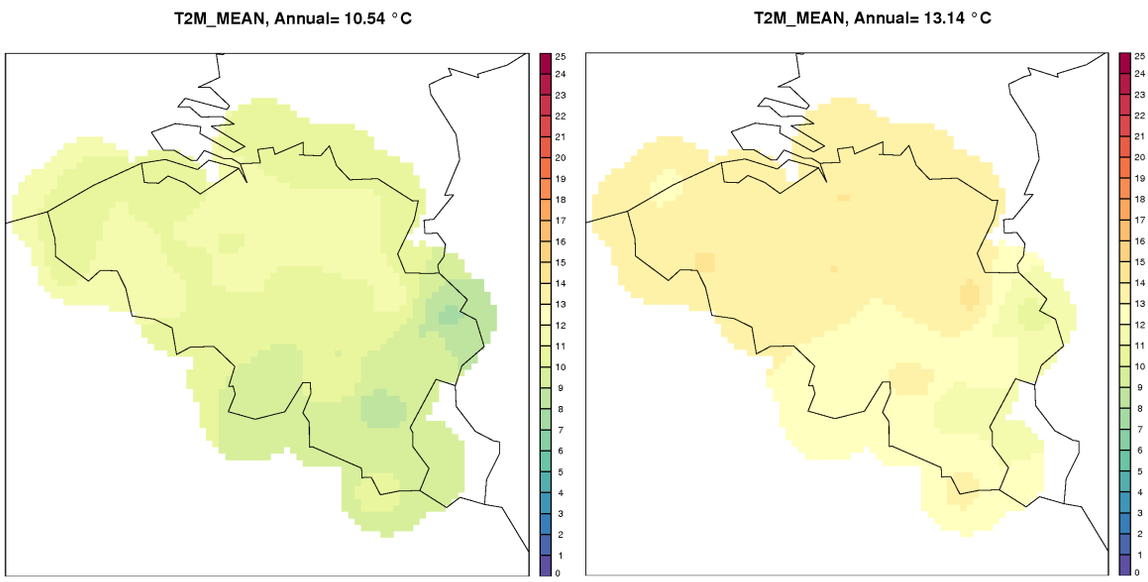
Ter illustratie toont figuur 3.4 de gemiddelde globale oppervlakte-opwarming (boven: verandering in oppervlakte-luchttemperatuur, uitgedrukt in °C) en de verandering in neerslag (onder: uitgedrukt in %) afkomstig van 21 globale klimaatmodellen voor het IPCC- emissiescenario A1B. Het A1B-scenario beschrijft een toekomstige wereld van heel snelle economische groei en een snelle implementatie van nieuwe en meer efficiënte technologieën. Dit scenario veronderstelt een «balans» tussen alle energiebronnen, zonder beroep te doen op één enkele energiebron (http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/029.htm).



Figuur 3.4. Tijdseries van de gemiddelde globale oppervlakte-opwarming (boven: oppervlakte- luchttemperatuurverandering, uitgedrukt in °C) en de verandering in neerslag (onder: uitgedrukt in %) afkomstig van 21 globale klimaatmodellen voor het emissiescenario A1B. De waarden zijn jaarlijkse gemiddelden, relatief t.o.v. het 1980-1999 gemiddelde van de overeenstemmende 20ste eeuw simulaties. Multi-model gemiddelden stemmen overeen met de zwarte puntlijn (Source: IPCC AR4).

De emissiescenario's stemmen niet noodzakelijk volledig overeen met de waarheid. Niemand weet hoe de economie, demografie, technologie, politiek, enz. zal evolueren. Daarom is het onmogelijk om alle mogelijke scenario's te berekenen. Wat we wel kunnen opmaken uit figuur 3.4, is dat de 'state of the art' klimaatmodellen een opwarming tonen. Maar hoe sterk deze opwarming zal zijn, is niet zeker, aangezien de modellen onderhevig zijn aan modelfouten en aangezien het klimaat kan evolueren volgens elk van de 21 weergegeven modelscenario's.

Bovendien gebruikt het KMI de globale modeloutput van CNRM-CM3 (aangeduid in groen op figuur 3.4, met een globale opwarming van ongeveer 3°C in 2100) om het ALARO-model op 4 km horizontale resolutie aan te drijven voor de berekening van hoge-resolutie regionale klimaatsimulaties voor België. Zo'n modelberekeningen op hoge ruimtelijke resoluties laten toe om regionale klimaatevoluties te bestuderen op het nationaal (Belgische) niveau. Ter illustratie, toont figuur 3.5 de gemodelleerde gemiddelde oppervlaktetemperatuur voor België voor het huidige klimaat (1961-1990, links) en het toekomstige klimaat gebaseerd op het IPCC-emissiescenario A1B (2071-2100, rechts). Daarnaast is het erg belangrijk om steeds de onzekerheden op deze klimaatprojecties in rekening te brengen, aangezien deze vaak zeer waardevolle informatie voor beleidsmakers bevatten.



Figuur 3.5. Gemiddelde oppervlakte temperatuur voor België voor het huidige klimaat (1961-1990) en (rechts) het toekomstige klimaat gebaseerd op het IPCC-emissiescenario A1B (2071-2100) afkomstig van het ALARO-model.

Zoals eerder aangehaald, zal het vergelijken van modelgegevens met observaties, de betrouwbaarheid van de modellen verhogen. Modelvalidatie voor het huidige klimaat is een eerste en belangrijke stap vooraleer deze modellen gebruikt kunnen worden voor betrouwbare projecties voor de toekomst. De klimaatmodelleringsonderzoeksgroep startte recent met zulke validatiestudies. Hierbij werden de twee voornaamste klimaatparameters, temperatuur en neerslag afkomstig van de modellen, op verschillende horizontale resoluties vergeleken met de observaties. Laat ons nu dieper ingaan op deze validatiestudies.

Validatie van de regionale klimaatmodellen

Inleiding

Het nieuwe voorspellingsmodel ALARO werd gebruikt om het regionale klimaat voor de zomer tussen de periode 1961-1990 in België te simuleren (temperatuur en neerslag) (de periode 1961-1990 stemt in deze publicatie overeen met het zgn. «huidige klimaat»). Aangezien convectieve processen, die gekenmerkt worden door intense en verspreide onweersbuien en hoge temperaturen, hoofdzakelijk plaatsvinden tijdens de zomer, werd het ALARO-model met de nieuwe fysische parameterisaties voor diepe convectie en wolken, in eerste instantie getest voor de zomer. De modelgegevens werden geproduceerd door een opeenvolging van dagelijkse modelintegraties die aan de randen van het modeldomein als inputdata de globale ERA-40 reanalyses (een dataset die zo optimaal mogelijk de toestand van de atmosfeer beschrijft) afkomstig van het Europees centrum voor weervoorspellingen op middellange termijn (ECMWF) gebruiken.

Het ALADIN- en ALARO-model werd gevalideerd, gebruik makend van observaties afkomstig van stations die deel uitmaken van het klimatologisch netwerk van het KMI. Voor de validatieperiode (1961-1990) werden 50 en 93 stations geselecteerd voor respectievelijk temperatuur en neerslag. Verschillende simulaties voor het huidige klimaat werden geëvalueerd :

(1) een simulatie met een ruimtelijke resolutie van 40 km gebruik makend van de ERA-40 reanalyses als inputdata aan de randen van het modeldomein,

(2) twee simulaties met een ruimtelijke resolutie van 10 km en 4 km gebruik makend van de output van de 40-km-simulatie aan de randen van het modeldomein. De 4 km simulatie werd enkel uitgevoerd met het ALARO-model, aangezien de oude parameterisaties in het ALADIN-model op zulke hoge resoluties niet gebruikt kunnen worden (zie kader *De versies van de regionale klimaatmodellen die gebruikt worden door het KMI*).

De versies van de regionale klimaatmodellen die gebruikt worden door het KMI

Het KMI heeft zijn eigen atmosferisch model dat operationeel gebruikt wordt, zowel voor de dagelijkse weervoorspellingen als voor klimaatstudies. Dit model heet ALADIN («Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational») en er bestaat een recentere versie, ALARO genaamd. Het ALARO-model gebruikt nieuwe fysische parameterisaties ((2) in Tabel 1) (voor diepe convectie en wolken) die specifiek ontwikkeld zijn om te gebruiken bij hoge ruimtelijke resoluties.

Het ALADIN- en het ALARO-model zijn het resultaat van een internationale samenwerking binnen het Europese ALADIN-consortium, waaraan het KMI deelneemt. Dit consortium bestaat uit 16 nationale meteorologische diensten en heeft enerzijds tot doel om iedere deelnemende ploeg een state-of-the-art atmosferisch model te laten exploiteren voor de nationale behoeften en anderzijds om voldoende know-how en kritieke massa te creëren voor hedendaags wetenschappelijk onderzoek naar weer en klimaat. Aan het ALADIN-consortium werken een honderdtal wetenschappers mee. Het KMI speelt momenteel een centrale rol binnen het management en de wetenschappelijke activiteiten van dit consortium.

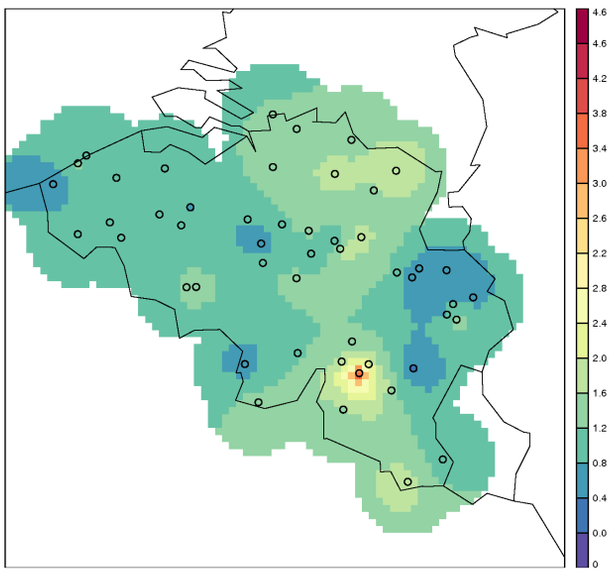
	ALADIN		ALARO		
Ruimtelijke resolutie	40 km (ALD40)	10 km (ALD10)	40 km (ALR40)	10 km (ALR10)	4 km (ALR04)
Fysische parameterisatie (voor diepe convectie en wolken)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)
Input data aan de randen van het modeldomein	ERA-40	ALD40	ERA-40	ALR40	ALR40

Tabel 3.1 Overzicht van de simulaties met het ALADIN- en ALARO-model voor de validatie van de klimatologie tussen 1961 en 1990.

Klimaatgemiddelden

Gemiddelde temperatuur

Figuur 3.6 toont de ruimtelijke verdeling van de 30-jarige (1961-1990) gemiddelde zomerbias (model min observatie) van de dagelijks gemiddelde temperatuur afkomstig van het ALARO-model op 4 km-resolutie. Gemiddeld genomen over België, geeft het model een bias van ongeveer 1°C. Er is geen duidelijke trend merkbaar in het land, met gemiddelde waarden voor de bias die variëren tussen een paar tienden van een graad tot 3 graden (in het zuiden van België).

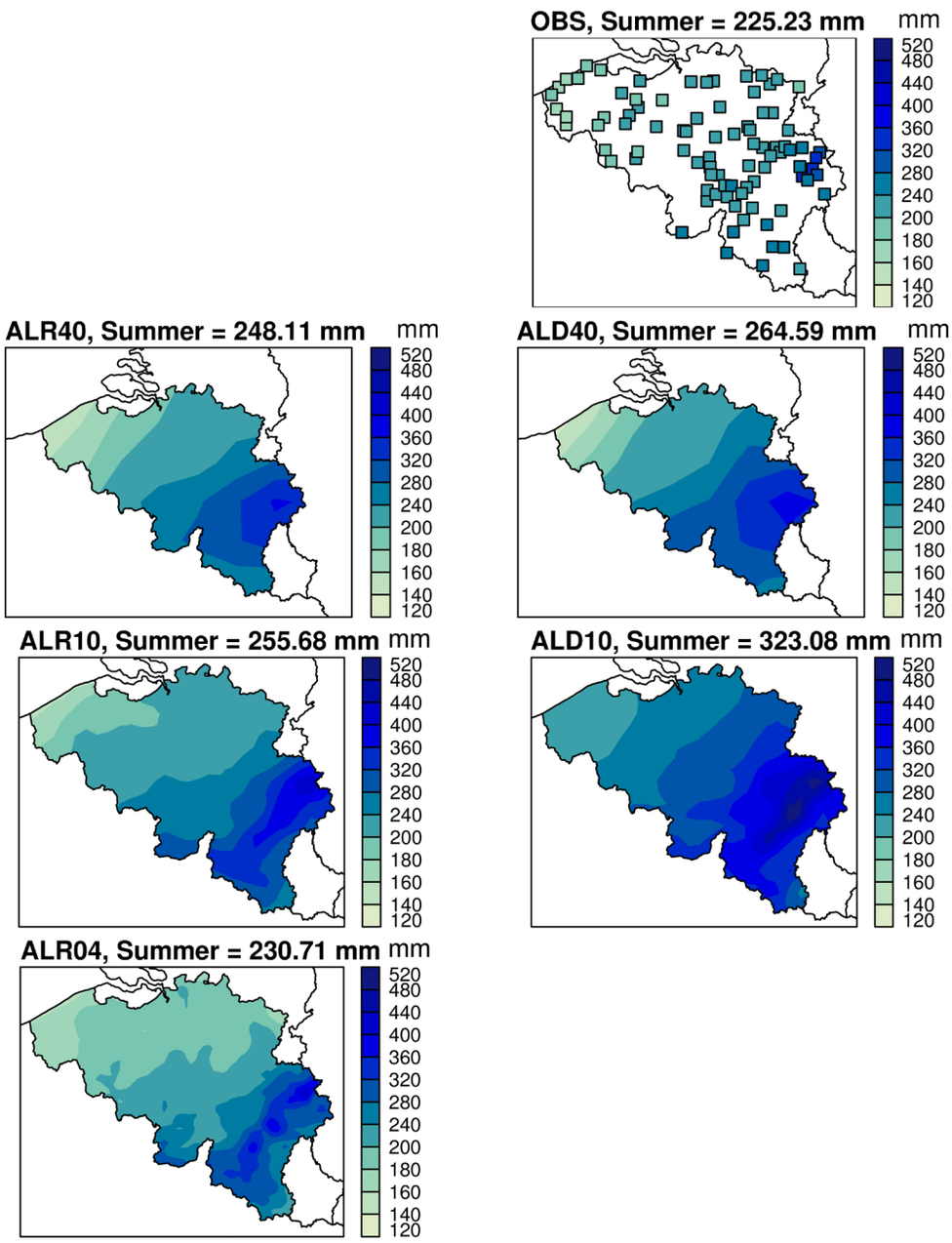


Figuur 3.6. Ruimtelijke verdeling van de 30-jarige gemiddelde zomerbias (model min observatie) van de dagelijkse gemiddelde temperatuur afkomstig van het ALARO-model op 4 km-resolutie (ALR04).

Neerslag

Naast de zomertemperatuur werden eveneens de modelresultaten voor zomerneerslag gevalideerd voor het huidige klimaat (1961-1990). Dagelijkse neerslaggegevens van het ALARO-model dat wolken en neerslag via een nieuwe parameterisatie modelleert, werden vergeleken met dagelijkse neerslagwaarden van het ALADIN-model dat een oude versie van deze parameterisatie bevat. Algemeen kan men stellen dat de bekwaamheid van een atmosferisch model om correct neerslag te voorspellen, in sterke mate bepaald wordt door twee factoren: enerzijds de horizontale resolutie waarop de modelberekeningen uitgevoerd worden en anderzijds de gebruikte parameterisatie voor neerslag en wolken.

Onderstaande figuur 3.7 toont de ruimtelijke verdeling van de 30-jarige gemiddelde zomerneerslag voor de observaties en modellen. De 30-jarige gemiddelde zomerneerslag over alle 93 stations is weergegeven bovenaan de figuren. Alle modellen geven een overvoorspelling van de geobserveerde zomerneerslag. Verder tonen zowel de observatie als de modellen een graduele toename in neerslag gaande van het noordwesten (lage hoogtes) naar het zuidoosten (hoge hoogtes) van het land. De ruimtelijke distributies van de lage resolutiemodellen (ALR40 en ALD40) zijn vrij gelijkaardig. Voor de hoge resolutiesimulaties (10 km en 4 km) daarentegen, zien we een duidelijke verbetering voor het ALARO-model (ALR10 en ALR04) in vergelijking met het ALADIN-model (ALD10). Het geobserveerde lokale maximum in het zuidoosten van het land wordt zowel door ALR10 als ALR04 zeer goed benaderd. ALD10 daarentegen simuleert niet de correcte neerslagwaarde van dit lokale maximum. Dit geeft een eerste indicatie dat niet zozeer een verhoging in de resolutie, maar eerder de gebruikte ALARO-parameterisatie verantwoordelijk is voor de betere benadering van de geobserveerde zomerneerslag.



Figuur 3.7. Ruimtelijke distributie van de zomerneerslag van de observaties (OBS) en (links) het ALARO-model met horizontale resolutie van 40 km (ALR40), 10 km (ALR10) en 4 km (ALR04), en (rechts) het ALADIN-model met een horizontale resolutie van 40 km (ALD40) en 10 km (ALD10).

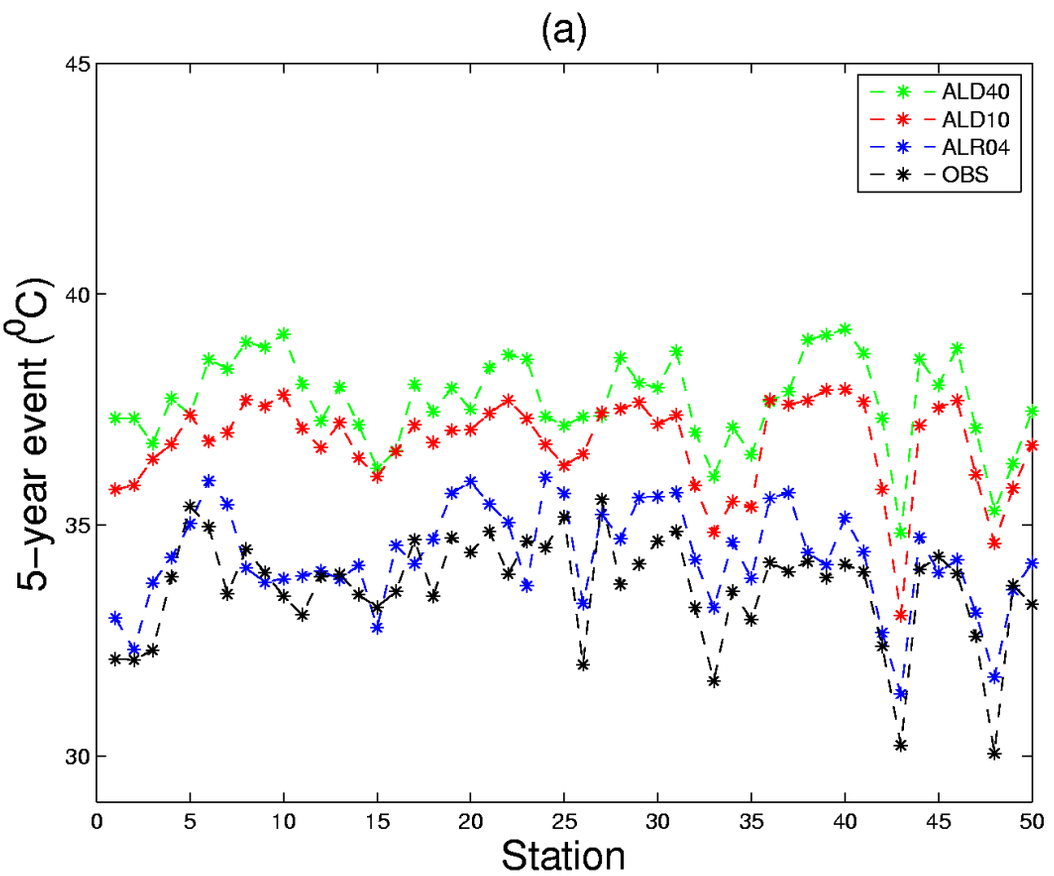
Voor het hele land geeft de 4 km-ALARO-simulatie waarden die veel dichter bij de observaties liggen dan de oude ALADIN-versie. In de recente wetenschappelijke literatuur zijn er echter heel wat studies die aantonen dat regionale klimaatmodellen die erin slagen om correct de gemiddelden en standaardafwijkingen van temperatuur en neerslag te simuleren, niet noodzakelijk in staat zijn om extreme temperatuur en neerslaggebeurtenissen te reproduceren. Daarom werden gedetailleerde studies uitgevoerd naar de bekwaamheid van het ALARO-model om extreme waarden van zomermaximumtemperatuur en zomerneerslag in België correct te simuleren. Deze studies worden in de twee hierop volgende secties besproken.

Extreme waarden

Temperatuur

Een interessante grootheid om extreme gebeurtenissen te bestuderen zijn zogenaamde terugkeerniveaus. Deze niveaus zijn in feite extreme hoeveelheden die gemiddeld om de x aantal jaar overschreden worden.

In figuur 3.8 worden de extreme waarden voor dagelijkse maximumtemperatuur met een terugkeerperiode van 5 jaar tijdens de periode 1961-1990 afkomstig van drie modelsimulaties op 40, 10 en 4 km-resolutie vergeleken met deze van de observaties voor dezelfde periode. De twee simulaties op 40 en 10 km ruimtelijke resolutie slagen er niet in om de geobserveerde maximumtemperatuur voor een terugkeerperiode van 5 jaar te reproduceren. De 4 km-simulatie gebruik makend van de nieuwe parameterisaties van het ALARO-model sluit veel beter aan bij de observaties (blauwe curve). Een gelijkaardig resultaat werd verkregen voor extreme waarden met een 20-jarige terugkeerperiode.



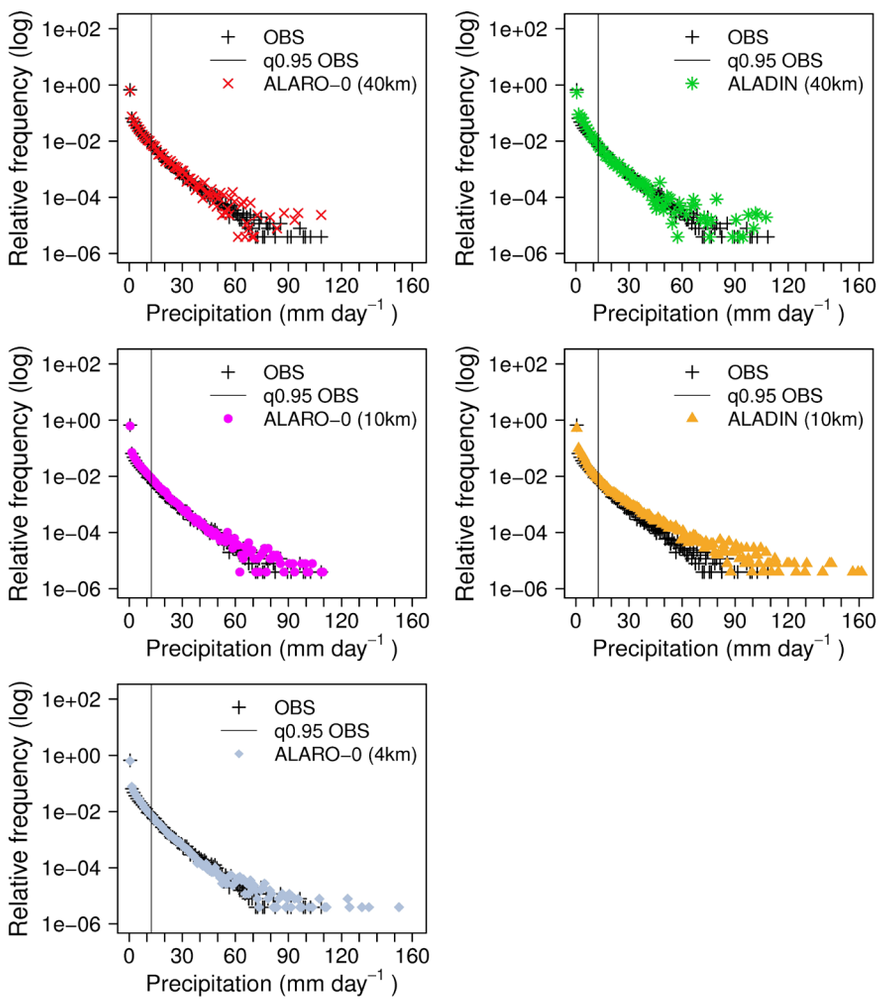
Figuur 3.8. Terugkeerniveaus van observaties en modellen voor een terugkeerperiode van 5 jaar (voor dagelijkse maximum temperatuur).

Neerslag

Extreme neerslaggebeurtenissen leiden vaak tot overstromingen of landverschuivingen. De overstromingen die ons land in december 1993, januari 1995 en november 2010 teisterden, zijn hier een sprekend voorbeeld van. Gezien de grote impact en schade van deze gebeurtenissen op samenlevingen, is het belangrijk om te onderzoeken of de modellen eveneens in staat zijn om op klimatologische tijdschalen zulke extreme neerslaggebeurtenissen te reproduceren.

Om dit na te gaan toont figuur 3.9 de relatieve frequentieverdelingen voor de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse neerslag voor de 30-jarige periode en de 93 stations. Voor een betere weergave van de extreme neerslagwaarden, worden de frequenties op logaritmische schaal weergegeven. Om een idee te geven van neerslagwaarden die als “extreem” beschouwd kunnen worden, werd tevens het 0.95e kwantiel van de observaties (q0.95 OBS) berekend (zwarte verticale lijn op de figuur 3.9). Het 0.95e kwantiel van de observaties stemt overeen met een dagelijkse neerslaghoeveelheid van ongeveer 12 mm,

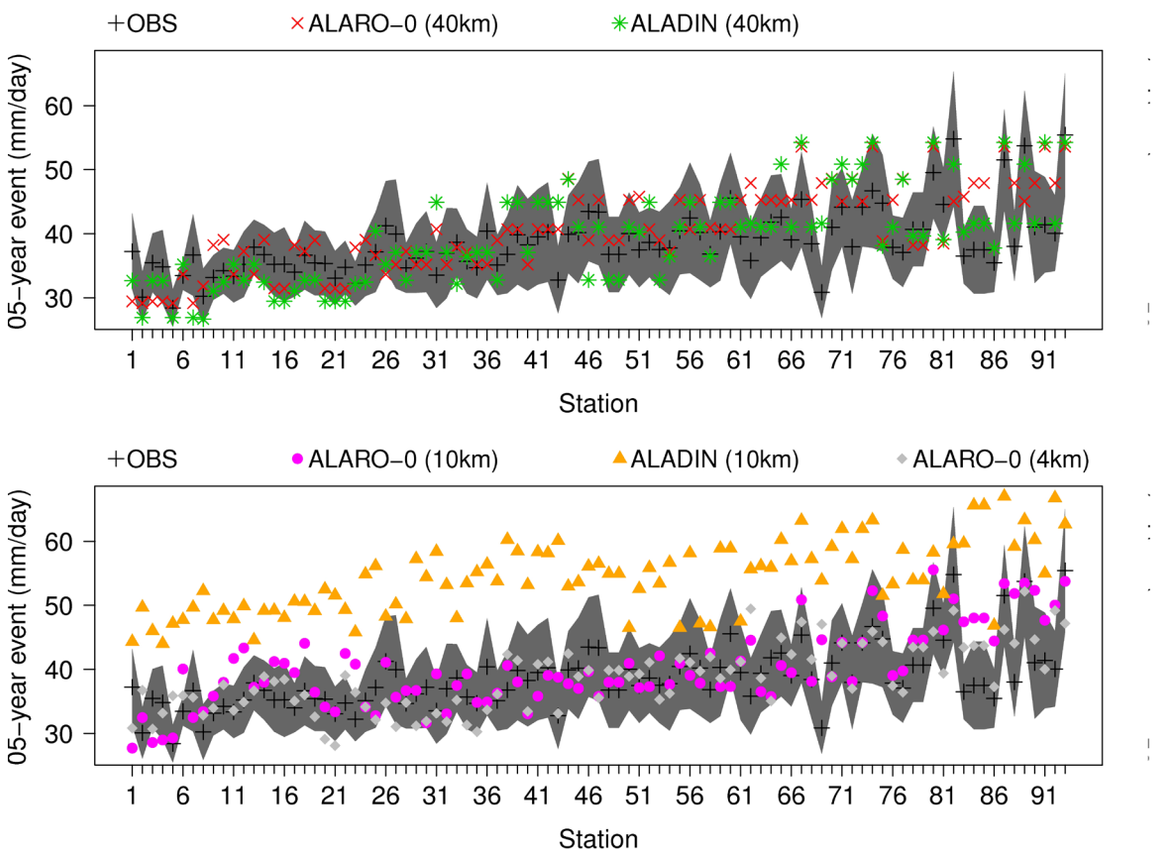
hetgeen betekent dat 95 procent (5 procent) van de geobserveerde zomerneerslag lagere (hogere) dagelijkse neerslagwaarden dan 12 mm heeft. Voor de neerslagwaarden kleiner dan q0.95 OBS slagen alle modellen er vrij goed in om de geobserveerde frequenties te reproduceren. Voor de neerslagwaarden groter dan q0.95 OBS tonen ALARO en ALADIN op 40 km horizontale resolutie opnieuw een gelijkaardig resultaat, terwijl voor de hogere 10 km-resolutie een duidelijk verschil tussen beide modellen zichtbaar is. ALD10 toont immers een duidelijke overbenadering en naarmate de neerslagwaarden toenemen, wordt de afwijking ten opzichte van de observaties alsmaar groter. De frequentieverdelingen voor beide hoge resolutiesimulaties van ALARO (ALR10 en ALR04) vallen mooi samen met de observaties, zowel voor de lage als de hoge neerslaghoeveelheden.



*Figuur 3.9. Frequentie verdeling van de observaties (OBS) en modellen. Frequenties worden weergegeven op logaritmische schaal voor een betere weergave van de dagelijkse extreme waarden. De verticale zwarte lijn stemt overeen met het 0.95e kwantiel van de observaties [+ Observaties, x ALARO (40km), ● ALARO (10km), ♦ ALARO (4km), * ALADIN (40km), ▲ ALADIN (10km)].*

Ook voor de zomerneerslag werden terugkeerniveaus voor een terugkeerperiode van 5 en 20 jaar berekend. De resultaten voor beide terugkeerperiodes leveren gelijkaardige resultaten op. Ter illustratie, toont figuur 3.10 voor elk station de terugkeerniveaus voor de dagelijkse neerslag voor een terugkeerperiode van 5 jaar. De 93 stations op de x-as zijn weergegeven volgens toenemende hoogte van links naar rechts. Algemeen tonen de stations op hogere hoogtes grotere terugkeerniveaus.

De grijze band toont de 95% betrouwbaarheidsintervallen voor de geobserveerde terugkeerniveaus. Deze betrouwbaarheidsintervallen geven het interval waarvoor we met 95% kans kunnen zeggen dat de geobserveerde terugkeerniveaus een waarde hebben die binnen dit interval vallen. De niveaus van ALARO (40 km, 10 km en 4 km) vallen voor het merendeel van de stations binnen de betrouwbaarheidsintervallen van de observaties. ALADIN op 40 km benadert eveneens relatief goed de geobserveerde terugkeerniveaus. De 10 km-simulatie van ALADIN toont echter opnieuw opmerkelijk hogere niveaus dan de geobserveerde, die tot ver buiten het betrouwbaarheidsinterval liggen.



Figuur 3.10. Terugkeerniveaus van observaties en modellen voor een terugkeerperiode van 5 jaar (voor dagelijkse neerslag).

We kunnen concluderen dat het ALARO-model erin slaagt om op drie verschillende horizontale resoluties (40 km, 10 km en 4 km) de observaties zowel voor lage als extreme neerslaghoeveelheden zeer goed te benaderen. Het 40 km-ALADIN-model reproduceert neerslagwaarden die zeer sterk aansluiten bij ALARO 40 evenals bij de observaties. De hoge resolutiesimulatie van ALADIN (ALD10) geeft echter consistent te hoge neerslaghoeveelheden, in het bijzonder voor de extremen. Deze bevindingen sluiten aan bij hetgeen de ruimtelijke verdeling voor de 30-jarige gemiddelde zomerneerslag reeds illustreerde. Kortom, niet zozeer een verhoging in de horizontale resolutie van het model, als wel de nieuwe parameterisatie voor wolken en neerslag van het ALARO-model is verantwoordelijk voor een correcte simulatie van (extreme) zomerneerslag op meerdere horizontale resoluties.

Conclusie

Systematische verificatie van het ALARO-model op 4 km-resolutie ten opzichte van geobserveerde temperatuur en neerslag heeft aangetoond dat het ALARO-model met de nieuwe parameterisatie een betere skillscore voor België heeft dan het ALADIN-model met de oude diagnostische parameterisatie.

3.5 Algemene conclusies

Vanuit praktisch oogpunt, laten de fysische en technische ontwikkelingen van het ALARO-model toe om de eigenschappen van het Belgische klimaat te bestuderen, dit ter ondersteuning van de gegevens die effectief gemeten worden in het instituut. Dit laat tevens toe om sensitiviteitsstudies voor het Belgisch klimaat voor veranderingen waarmee onze samenleving geconfronteerd wordt (natuurlijke klimaatveranderingen, toename van de uitstoot van broeikasgassen, stedelijke veranderingen, veranderingen in landgebruik...), uit te voeren. Hiervoor dient men een betrouwbaar model dat gevalideerd werd met de observaties, voorhanden te hebben. Een aantal belangrijke resultaten die hiertoe betrekking hebben, werden in dit hoofdstuk besproken. Praktische toepassingen van sensitiviteitsstudies worden eveneens besproken in hoofdstuk 4.

De theorie van dynamische systemen biedt eveneens een natuurlijk kader voor de studie van de dynamische eigenschappen van de atmosfeer en het klimaat. Ze laat toe om mogelijke gedragingen van deze systemen aan het licht te brengen evenals om nieuwe benaderingen voor te stellen om de voorspelling van deze systemen te verbeteren, en dit voornamelijk via de probabilistische voorspelling. Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België neemt deel aan de toepassing en ontwikkeling van middelen en technieken die bijdragen tot een beter begrip van deze dynamiek. Deze studies behoeden zich voor het idee om klimaatprojecties voor tientallen tot duizenden jaren uit te voeren, zonder een maat voor betrouwbaarheid te bieden. Ze tonen eveneens de noodzaak om alle onzekerheden die de voorspelling beïnvloeden in rekening te brengen door middel van een probabilistische benadering, die onder meer als voordeel heeft dat het mogelijk is een schatting te maken van de waarschijnlijkheden van het optreden van extreme gebeurtenissen.

Bibliografie

Baruch, J-O . (ed): Les trois inconnues du CLIMAT. La Recherche, dossier, 414, 31-49, 2007.

Berger, A.: Climatic variations and variability : Facts and theories. Reidel, Dordrecht, 1981.

Demarée, G.R. and Nicolis, C.: Onset of sahelian drought viewed as a fluctuation-induced transition. Q. J. R. Meteorol. Soc., 116, 221-234, 1990.

De Troch, R., Hamdi, R., Van de Vyver, H., Geleyn, J.-F. and Termonia, P.: Multiscale performance of the ALARO-0 model for simulating extreme summer precipitation climatology in Belgium. J. Climate, 26, 8895-8915, 2013.

Dijkstra, H.A.: Nonlinear Physical Oceanography. Springer, 2005.

Goswami, B. and Shukla, J.: Predictability of a coupled Ocean-Atmosphere model. J. Climate, 4, 3-22. 1991.

Hamdi, R., Van de Vyver, H. and Termonia, P.: New cloud and microphysics parameterisation for use in high-resolution dynamical downscaling : Application for summer extreme temperature over Belgium. Int. J. Climatol., 32, 2051-2065, 2012.

IPCC: Fourth assessment report: Climate change 2007 (AR4), 2007.

Nicolis, C.: Stochastic aspects of climatic transitions - Response to a periodic forcing. Tellus, 34, 1-9, 1982.

Nicolis, C.: Le climat peut-il basculer ? La recherche, 232, 584-587, 1991.

Nicolis, C.: Dynamics of model error : The role of unresolved scales revisited. J. Atmos. Sci., 61, 1740-1753, 2004.

Nicolis, C. and Nicolis, G.: Noisy limit point bifurcation with slowly varying control parameter. Europhys. Lett., 66, 185-191, 2004.

Palmer, T.N.: Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. Rep. Prog. Phys., 63, 71-116, 2000.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.): IPCC report, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007.

Vannitsem, S.: The role of scales in the dynamics of parameterization uncertainties. J. Atmos. Sci., 63, 1659-1671, 2006.

Vannitsem, S.: Bias correction and post-processing under climate change. Nonlinear Processes in Geophysics, 18, 911-924, 2011.

Vannitsem, S. and Nicolis, C.: Dynamics of fine-scale variables versus averaged observables in a T21L3 quasi-geostrophic model. Q. J. R. Meteorol. Soc., 124, 2201-2226, 1998.

Vannitsem, S. and Nicolis, C.: Dynamical properties of Model Output Statistics forecasts. Mon. Wea. Rev., 2008.

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 klimaatsysteem 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.

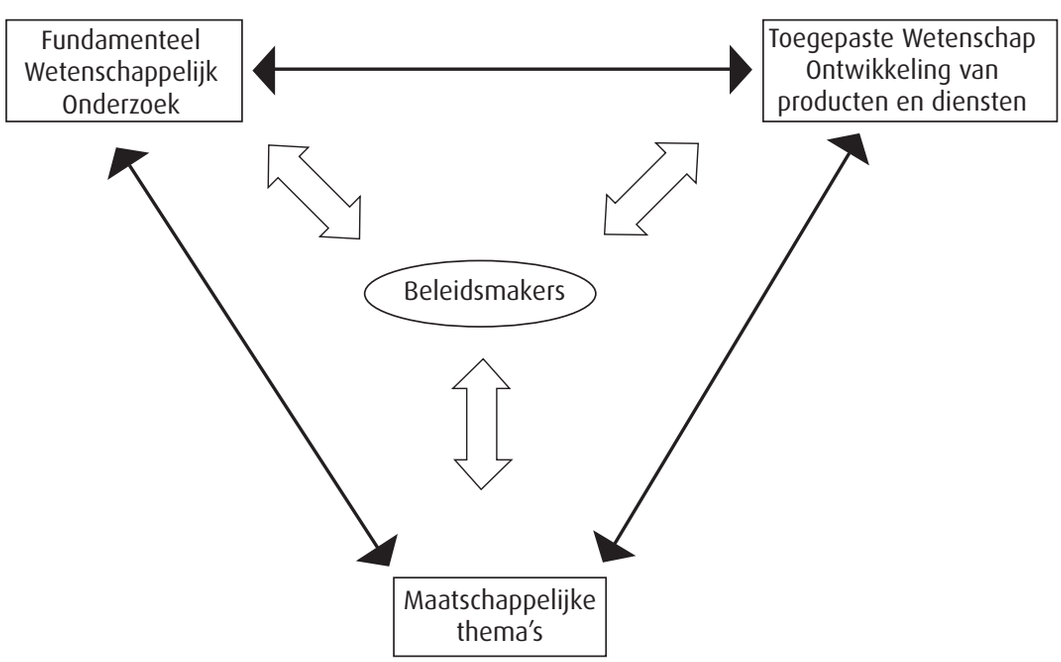
We weten dat veranderingen gesimuleerd door verschillende mondiale modellen doorheen de tijd (eeuwen), in reactie op veranderende concentraties van broeikasgassen, tot nu toe wijzen in de richting van de zeer waarschijnlijke voortzetting van de opwarming. Een vergelijking tussen modellen en waarnemingen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

Momenteel belet het onvoltooide 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 schema[14] 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 (VanHuysse *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.

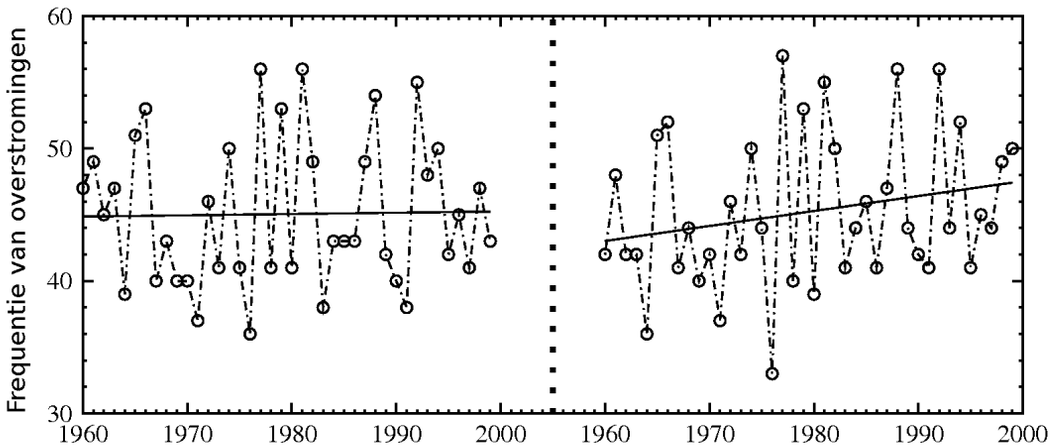
Wat betreft het effect van de klimaatveranderingen:

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 temperatuursveranderingen 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 gehergroepeerd 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 klimaatsimulaties van het huidige en het toekomstige klimaat is een maat voor de klimaatverandering. Het project PRUDENCE biedt een set van dergelijke klimaatsimulaties 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 klimaatsverandering 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

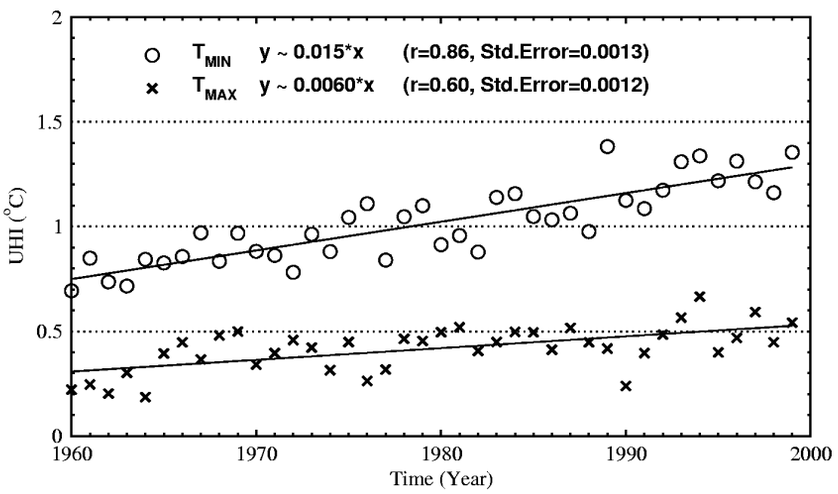
Het is bekend dat de temperaturen in de stedelijke gebieden in het algemeen hoger zijn dan in een meer landelijke omgeving. Dit heet het stedelijk hitte-eiland (of stadseffect). Het SURFEX/TEB-model is ook gebruikt om dit effect voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (BHG) in te schatten voor de afgelopen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

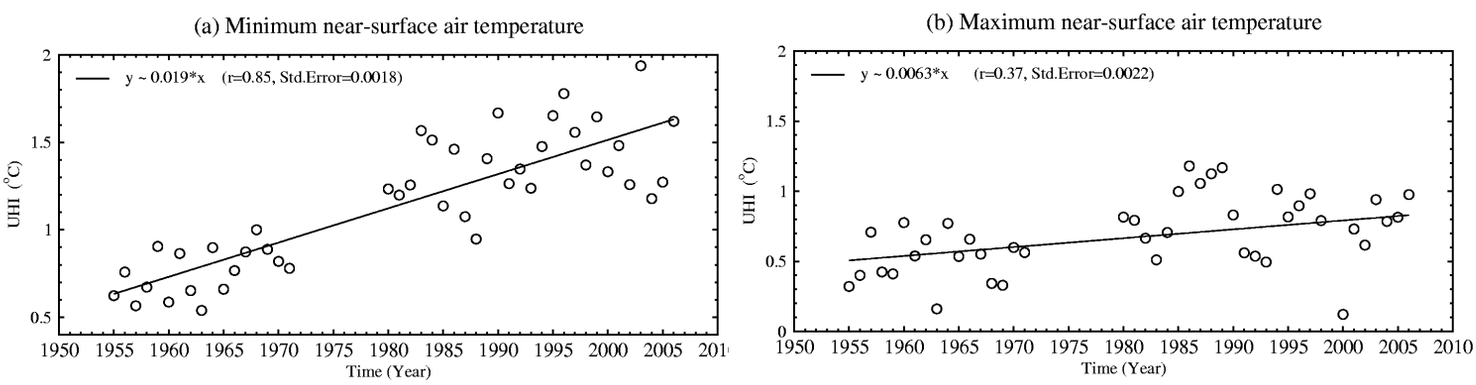
1. Met de verstedelijking van het BHG, stijgt het zomers stadseffect op de jaarlijkse minimumtemperatuur twee maal zo snel als op de maximumtemperatuur.

2. Voor het gemiddelde tussen 1960 en 1999 wordt de stijging van het zomers stadseffect geraamd op +0,4°C voor de gemiddelde temperatuur (+0,55°C voor de minimumtemperatuur en +0,25°C voor de maximumtemperatuur). De metingen van het station in Ukkel gedurende deze periode laten een zomeropwarming van ongeveer 1,6°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.

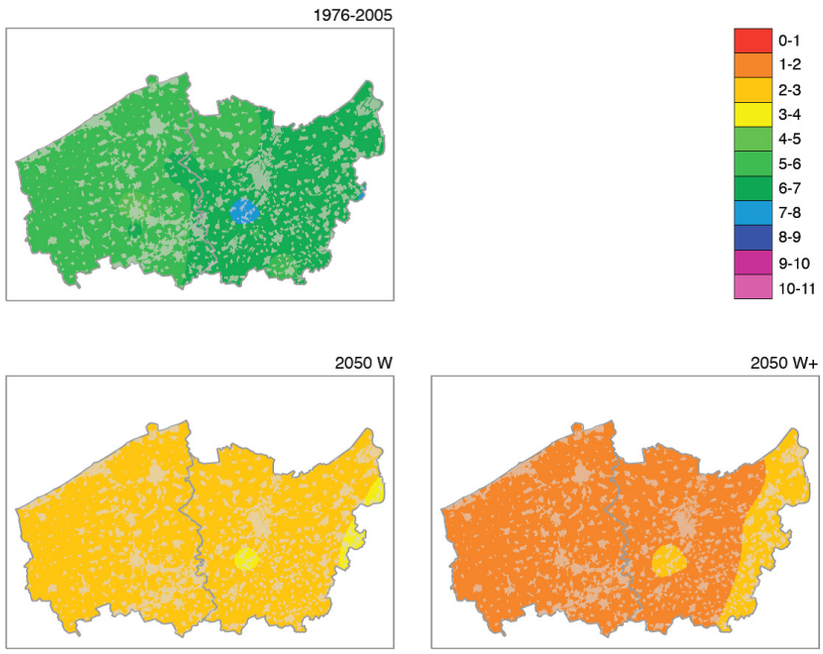
Als besluit willen we het belang voor wetenschappers, stedenbouwkundigen en beleidsmensen om nog meer samen te werken om tot een beter begrip en een betere beheersing van de interactie tussen de stedelijke gebieden en de klimaatverandering te komen, onderstrepen en zodoende passende aanpassings- en afzwakkingsstrategieën 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 (Klimaateffectschetsboek 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.



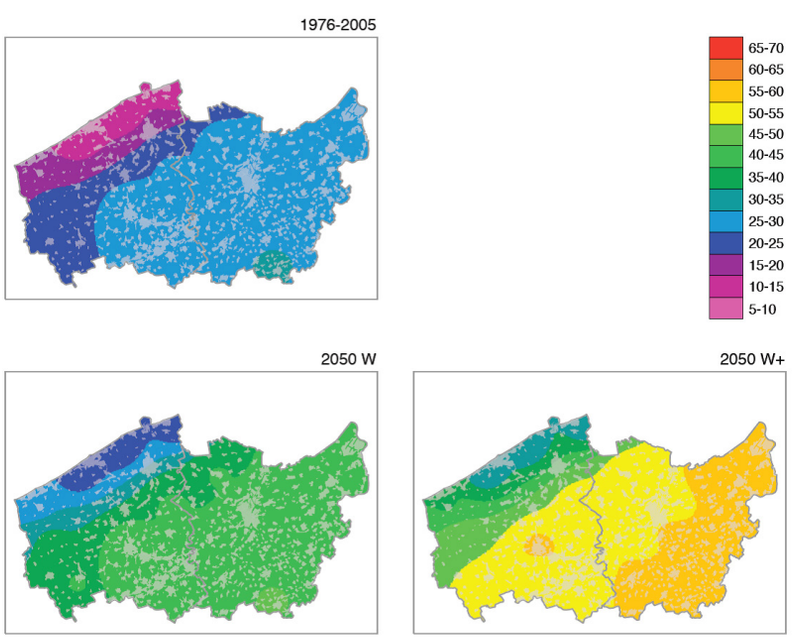
Figuur 4.4. Jaarlijks aantal winterse dagen (Tmax <0°C) voor de provincies West- en Oost-Vlaanderen voor het huidige klimaat (1976-2005), met een scenario voor 2050 zonder verandering van circulatie (W) en met verandering van circulatie (W+).

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 (Tmax ≥ 25°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.

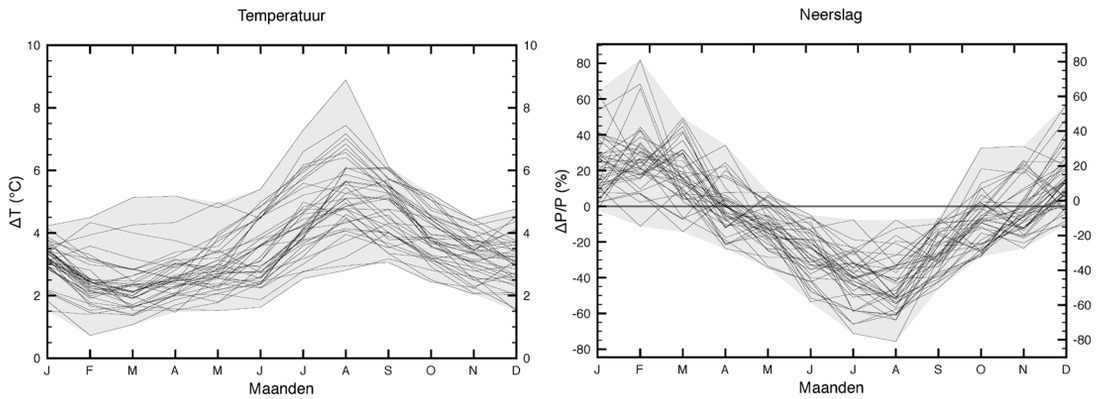
Gezien de reeds eerder aangegeven opeenstapeling van onzekerheden die samenhangen met toekomstvoorspellingen, spreekt het voor zich dat het antwoord op dit probleem niet voor onmiddellijk is. Niettemin is het mogelijk om de gevoeligheid van een hydrologisch model voor de door de klimatologen voorgestelde 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.

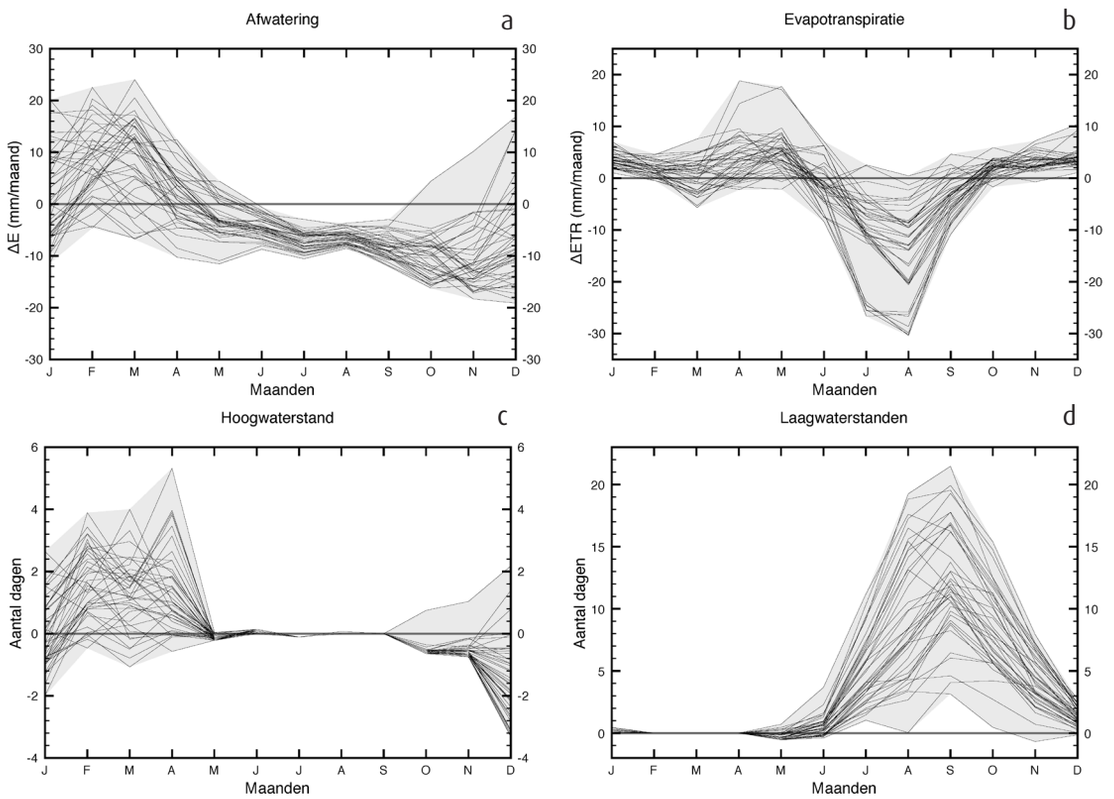
De meest recente analyse (2005-2010) werd uitgevoerd in het kader van het programma «Wetenschap voor een duurzame ontwikkeling» van het Federaal Wetenschapsbeleid, waarbij het een van hun doelstellingen is om wetenschappelijke ondersteuning te bieden aan de nationale autoriteiten. Tijdens dit project (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 rekendomeinen 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 °C, links) en relatieve veranderingen in neerslag (in ΔP/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 beheren.

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 prognoses[15]» 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

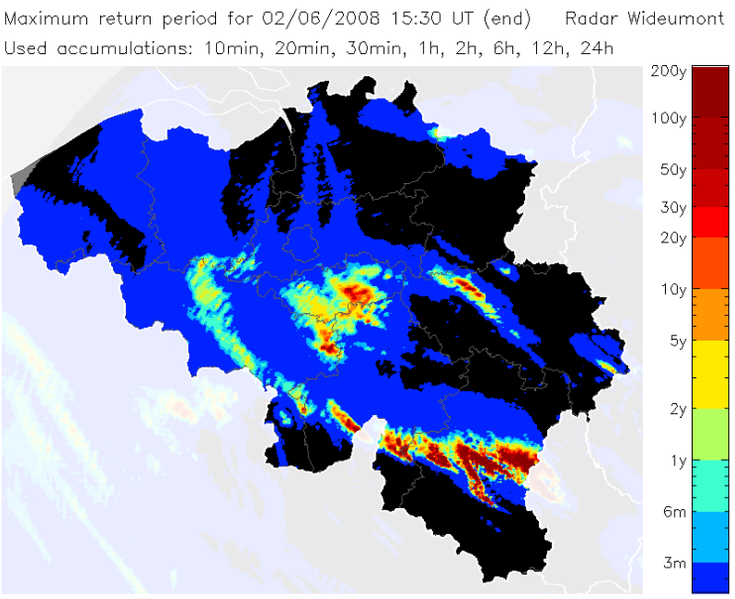
Een belangrijke rol van de regionale hydrologische diensten bestaat uit het verspreiden van pre-meldingen en waarschuwingen voor het aanzwellende waterniveau van rivieren en voor overstromingsrisico. Hiervoor is het verzamelen van neerslaggegevens in real time, in aanvulling op de neerslagvoorspellingen, 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.



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).



Figuur 4.9. Een voorbeeld van een «hitte»-waarschuwing, uitgegeven door het KMI op16/08/2012. 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 gemeten 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-beslisser 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 dichter 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.

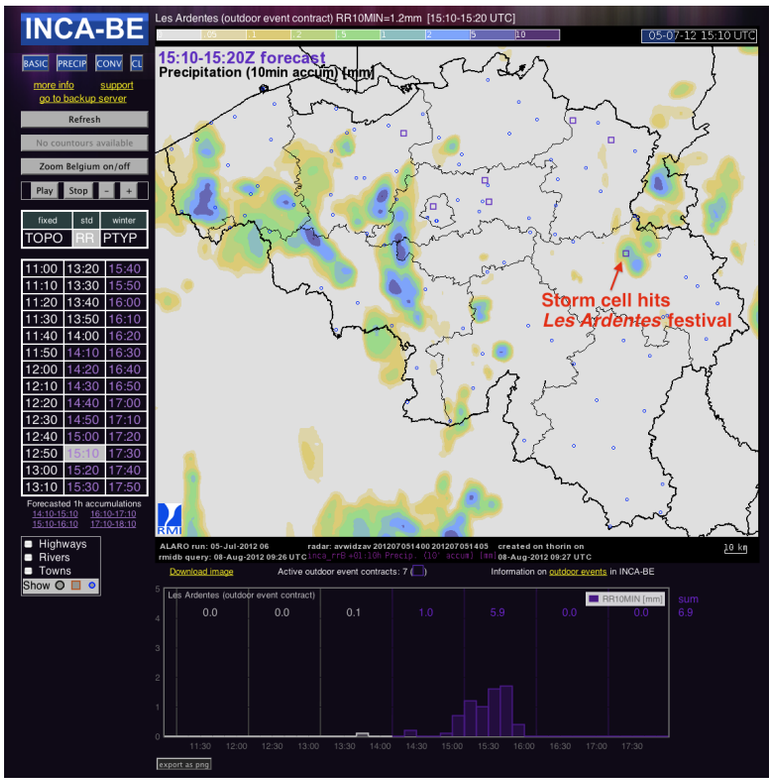
Hulp voor organisatoren van buitenactiviteiten bij zware onweders

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 voorspellingssysteem van het KMI op zeer korte termijn, (INCA-BE), voor de onweerachtige 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 voorspellingssysteem 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., Vanhuysse, 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.

Vanhuysse, 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.



Uitgegeven door het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, Ringlaan 3 - 1180 Brussel. Verantwoordelijke uitgever dr. D. Gellens

ISBN 02008/0224/049