

# MIRA

---

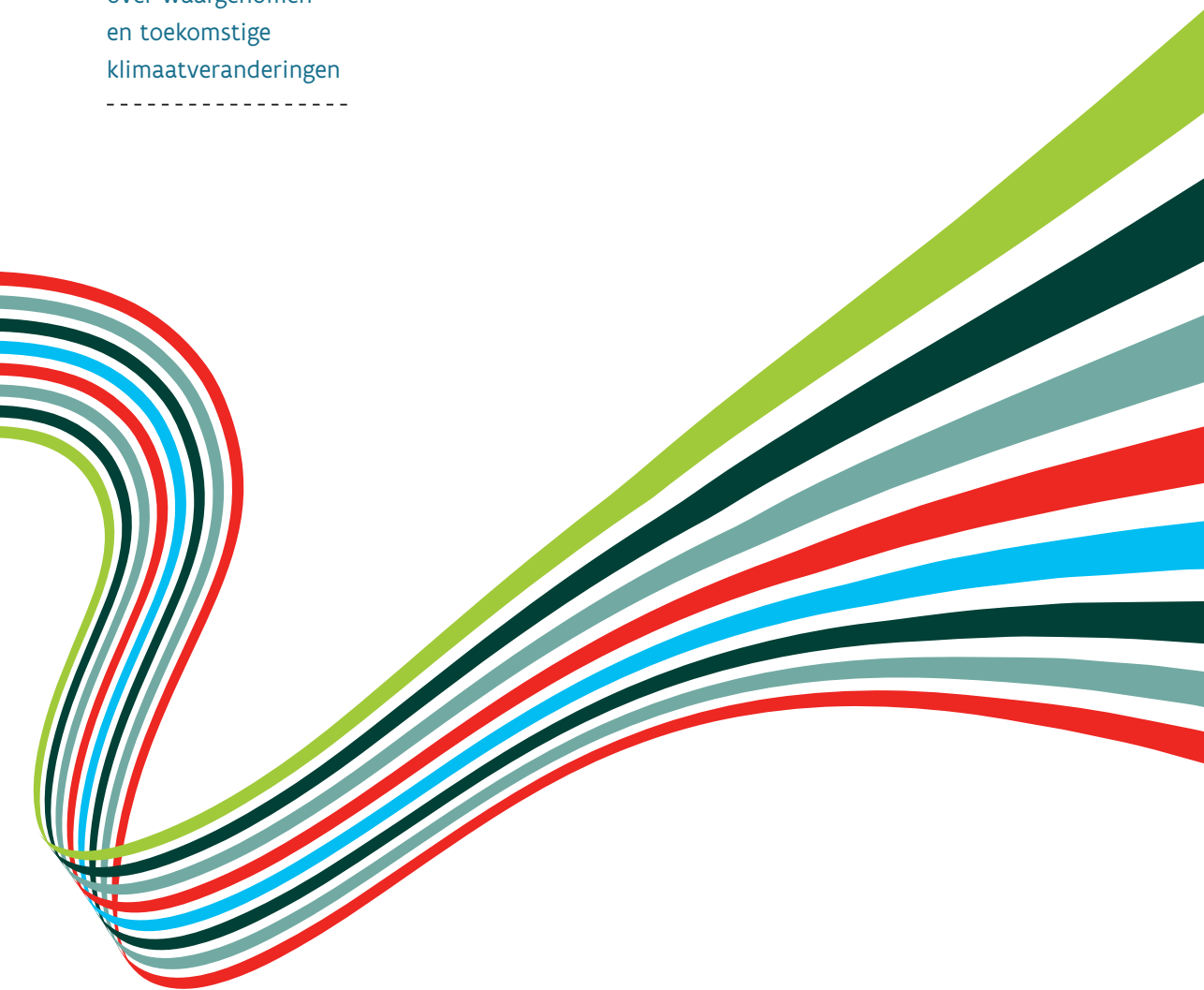
## Klimaatrapport 2015

over waargenomen  
en toekomstige  
klimaatveranderingen

---



Vlaanderen  
is milieu





# MIRA



## Klimaatrapport 2015

OVER WAARGENOMEN  
EN TOEKOMSTIGE  
KLIMAATVERANDERINGEN

JOHAN BROUWERS, BOB PEETERS, MARLEEN VAN STEERTEGEM, DIENST MIRA, VMM

NICOLE VAN LIPZIG, HENDRIK WOUTERS, JOCHEM BEULLENS, MATTHIAS DEMUZERE,  
DEPARTEMENT AARD- EN OMGEVINGSWETENSCHAPPEN, KU LEUVEN

PATRICK WILLEMS, AFDELING HYDRAULICA, KU LEUVEN

KOEN DE RIDDER, BINO MAIHEU, AFDELING RUIMTELIJKE MILIEU-ASPECTEN, VITO

ROZEMIEN DE TROCH, PIET TERMONIA, KMI

THOMAS VANSTEENKISTE, MICHEL CRANINX, WILLEM MAETENS, WILLEM DEFLOOR,  
KRIS CAUWENBERGHS, DIENST HOOGWATERBEHEER, VMM

## SAMENVATTING

---

‘In welke mate is de klimaatverandering nu al zichtbaar in Vlaanderen en België?’ en ‘Wat zijn de verwachtingen voor de toekomst?’, dat zijn de belangrijkste onderzoeksvragen waarop dit MIRA Klimaatrapport 2015 een antwoord wil geven. Het rapport start met een toelichting over het mechanisme dat aan de basis ligt van de mondiale klimaatverandering. Vervolgens wordt specifiek voor Vlaanderen en België gezocht naar signalen van klimaatverandering in de bestaande meetreeksen. Daarbij is de aandacht voor het stedelijk hitte-eilandeffect en voor droogte relatief nieuw. De toekomstscenario's zijn gebaseerd op de meest recente scenario's van het IPCC (het *Intergovernmental Panel on Climate Change* van de Verenigde Naties). Bovendien wordt voor het eerst nagegaan welke ruimtelijke verschillen zich mogelijk kunnen aftekenen binnen Vlaanderen en omgeving. Ook de mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor de volksgezondheid en het waterbeheer krijgen de nodige aandacht. Vervolgens wordt het belang van zogenaamde *tipping points* in de verf gezet. Dat zijn abrupte veranderingen van het klimaatsysteem die kunnen optreden door de wereldwijde opwarming. Het rapport sluit af met enkele beschouwingen over de manier waarop het beleid kan omgaan met de onzekerheden die inherent zijn aan de problematiek van klimaatverandering.

2

### Waargenomen klimaatverandering

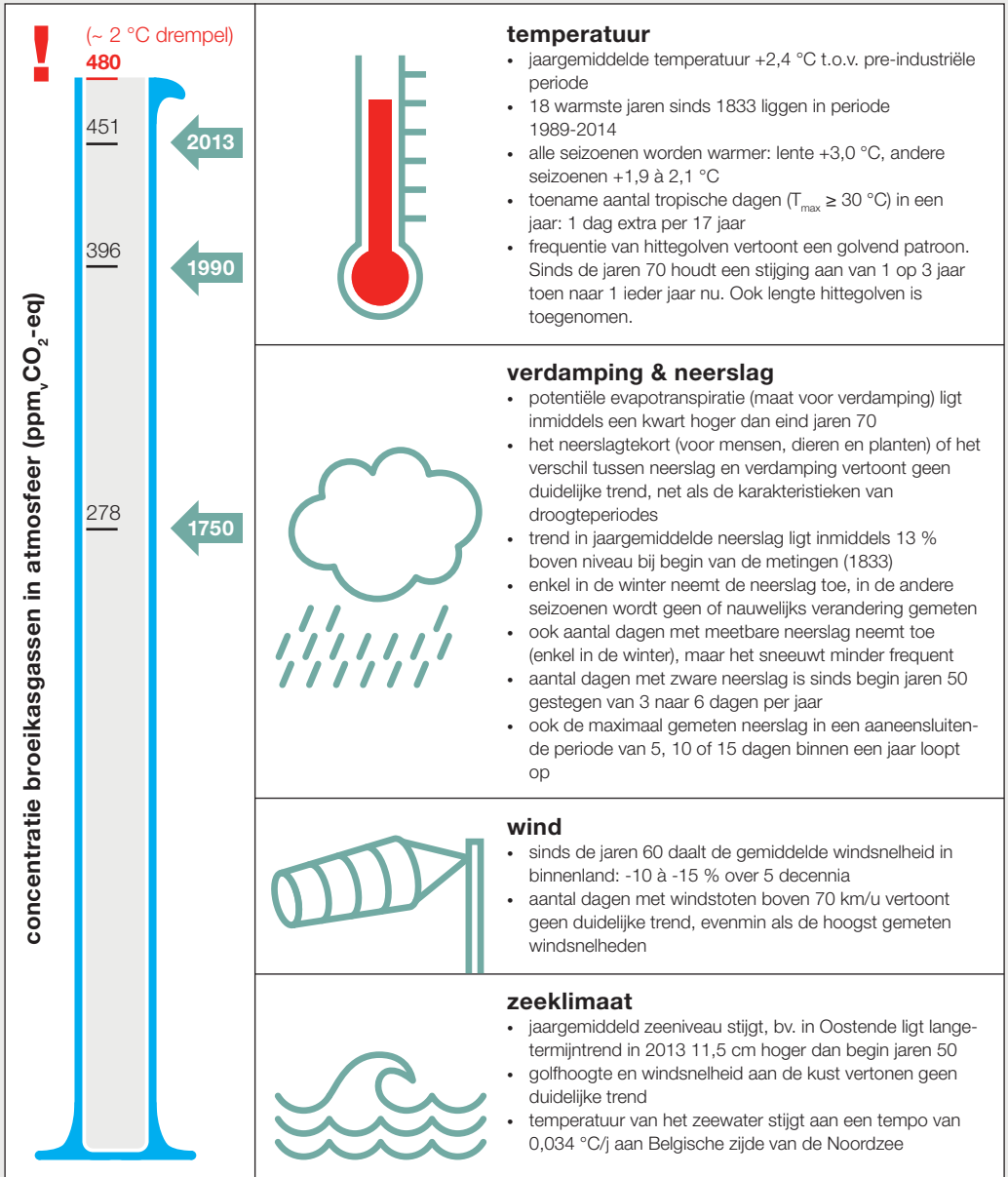
Ondanks belangrijke, natuurlijke schommelingen zijn de effecten van klimaatverandering nu al zichtbaar in een aantal indicatoren. Zo ligt de jaargemiddelde temperatuur in Ukkel inmiddels bijna 2,4 °C hoger dan in de pre-industriële periode. De gemiddelde temperatuur is in de vier seizoenen gestegen, waarbij de lente de grootste stijging vertoont. De potentiële evapotranspiratie - een maat voor de verdamping - is samen met de temperatuur toegenomen. Het beeld voor het aantal dagen met (erg) hoge en (erg) lage temperaturen is veel minder duidelijk. Het aantal tropische dagen (maximumtemperatuur  $\geq 30$  °C) is statistisch aantoonbaar gestegen sinds 1968, maar de stijging van het aantal zomerdagen (maximumtempe-

ratuur  $\geq 25$  °C) is statistisch dan weer niet significant. Ook de dalende trends voor het aantal vorst- (minimumtemperatuur  $< 0$  °C) en ijsdagen (maximumtemperatuur  $< 0$  °C) zijn statistisch niet significant. Het aantal hittegolven en de lengte ervan vertonen een golvend patroon met een eerste maximum in de jaren 40 en een trendlijn die sinds de jaren 70 duidelijk oploopt.

Van jaar tot jaar vertoont de neerslaghoeveelheid een erg grote variabiliteit. Bovendien zijn er langere periodes geweest met meer neerslag, bijvoorbeeld rond 1920, 1960 en 2000. Over een nog langere periode vertoont de jaarlijkse neerslaghoeveelheid in Ukkel een langzame, maar significant stijgende trend. De trendlijn ligt momenteel bijna 13 % hoger dan bij het

---

## Klimaatrends gedetecteerd in België tot in 2014



begin van de metingen in 1833. Wat de neerslag per seizoen betreft, kwam er enkel een significante toename aan het licht voor de winter. Het aantal dagen met zware neerslag (1951-2013) en de maximale hoeveelheid neerslag in 5, 10 en 15 dagen (1880-2013) is eveneens significant toegenomen.

De waterbeschikbaarheid voor mensen, dieren en planten hangt zowel af van de neerslag als van de verdamping. Als de verdamping groter is dan de neerslag, kan er sprake zijn van een neerslagtekort. Het verschil tussen neerslag en verdamping kan dus fungeren als een benaderende indicator voor droogtestress bij planten. Dat neerslagtekort vertoont geen significante trend. Ook de geanalyseerde kenmerken van droogteperiodes blijken niet significant gewijzigd te zijn.

Tot de jaren 60 bleef de jaargemiddelde windsnelheid relatief stabiel in ons land. Sindsdien is een daling ingezet. Het huidige jaargemiddelde ligt 10 à 15 % lager. In het voorkomen van het aantal dagen met een windstoot boven de 70 km/u valt geen duidelijke trend te bespeuren, in de hoogst gemeten windsnelheden evenmin.

De statistische analyse van de meetwaarden aan de Belgische kust laat zien dat het jaargemiddelde zeeniveau in 2013 significant hoger ligt dan bij het begin van de meetreeks. Zo ligt in 2013 de trendlijn voor Oostende 115 mm hoger dan in 1951. Ook de temperatuur van het zeewater is gestegen. De golfhoogte en de windsnelheid aan de kust vertonen dan weer geen duidelijke trends.

---

### **Stedelijk hitte-eiland**

De temperatuur ligt in steden doorgaans hoger dan in de omringende landelijke gebieden. Hierdoor worden stedelingen tijdens hittegolven meer blootgesteld aan hittestress. Vooral bij ouderen en kinderen leidt dit tot bijkomende sterfte. De oorzaken van het hitte-eilandeffect zijn o.m. minder vegetatie (en dus minder koeling door verdamping), het invangen van straling tussen gebouwen, de relatief beperkte warmte-uitwisseling tussen stad en atmosfeer, de hoge thermische inertie van stedelijke materialen, en de warmte die vrijkomt bij de verwarming en koeling van gebouwen en in het verkeer.

Het stedelijk hitte-eilandeffect kon voor Antwerpen geïllustreerd worden op basis van metingen in de periode 2012-2014 en op basis van stedelijke klimaatmodellering in de periode 2000-2012. Daarnaast werd de stedelijke hittestress voor heel Vlaanderen en omgeving in beeld gebracht op basis van satellietbeelden. In vergelijking met het platteland ligt in steden vooral de nachtelijke temperatuur hoger. Gemiddeld loopt dit verschil op tot enkele graden, met uitschieters tot 7 à 8 °C en meer. Hittegolven treden daardoor frequenter én intenser op in steden. Er blijkt vooral een sterk verband te bestaan tussen de verhardingsgraad van een stad en de sterkte van het hitte-eilandeffect. De Vlaamse steden met een relatief groot hitte-eilandeffect zijn Antwerpen, Gent, Kortrijk, Mechelen, Roeselare en Brugge. In Antwerpen wordt een beduidend hoger percentage van de bevolking blootgesteld aan hogere temperaturen dan in andere steden.

### **Toekomstige klimaatverandering**

Het IPCC heeft vier mogelijke scenario's voor de mondiale broeikasgasconcentraties tot het jaar 2100 gedefinieerd. Het meest extreme scenario wordt gekenmerkt door het uitblijven van klimaatbeleid en sterk stijgende broeikasgasemissies. Dat scenario zou in 2100 kunnen leiden tot een stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde tussen 3,2 en 5,4 °C ten opzichte van de periode 1850-1900. Het minst extreme scenario gaat uit van belangrijke

reducties in de emissie van broeikasgasen. In dat scenario zou de stijging van de mondiale temperatuur beperkt kunnen blijven tot 0,9 à 2,3 °C. Het totale bereik van deze scenario's omvat met hoge waarschijnlijkheid de werkelijke toekomstige evolutie. Het is echter onmogelijk en ook niet de bedoeling voor elk van de vier scenario's te berekenen hoe groot de kans is dat ze werkelijkheid zal worden. Het is nu al wel duidelijk dat de recente, mondiale emissies van broeikasgassen bijna

naadloos aansluiten bij het traject van het meest extreme scenario.

Voor dit Klimaatrapport 2015 zijn een 200-tal mondiale klimaatmodelsimulaties beschikbaar. Die mondiale simulaties zijn op ruimtelijke en temporele schaal nog te grof om bijvoorbeeld extreme neerslagperiodes en ruimtelijke variaties binnen Vlaanderen in beeld te brengen. Daarom worden ze zowel in de ruimte als in de tijd verder verfijnd. Om specifieke, lokale impactanalyses van klimaatverandering uit te voeren, worden mondiale, regionale en lokale klimaatmodellen gecombineerd met een statistische neerschalingstechniek. Zo zijn, vertrekkende van de mondiale simulaties voor dit rapport, drie klimaatscenario's afgeleid: hoog, midden en laag. De tabel in deze samenvatting geeft een overzicht van de voornaamste resultaten per scenario. De bandbreedte tussen het hoge en het lage klimaatscenario geeft per parameter de mogelijke klimaatverandering die Vlaanderen en België te wachten staat. Ook hier geldt dat de waarschijnlijkheid van de scenario's niet te bepalen valt. De toekomstige klimaatverandering kan zelfs, met een onbekende maar wellicht kleine kans, buiten deze scenario's vallen. Het midden klimaatscenario komt overeen met de mediaan van alle modelsimulaties maar het is niet per definitie het meest waarschijnlijke scenario.

De klimaatscenario's geven voor Vlaanderen en over 100 jaar een stijging van de jaargemiddelde temperatuur van

0,7 tot 7,2 °C. De spreiding tussen het laag en hoog klimaatscenario is in de zomermaanden groter dan in de wintermaanden. De ruimtelijke verschillen binnen België zijn klein. Het aantal extreem warme dagen neemt in het hoog scenario sterk toe, terwijl het aantal extreem koude dagen sterk daalt. In het laag scenario zijn de verschillen met het huidige klimaat voor deze temperatuurextremen heel klein. De toename van het aantal extreem warme dagen is het meest uitgesproken in het centrum van het land terwijl de afname van het aantal extreem koude dagen het grootst is in de Ardennen. De toename van de hittestress zal in stedelijke gebieden groter zijn dan in landelijke gebieden; niet alleen omdat het in steden sowieso al warmer is tijdens hittegolven maar ook door de toekomstige uitbreiding van de steden zelf. Samen met de stijging van de temperatuur wordt een toename van de potentiële evapotranspiratie verwacht.

Twee van de drie klimaatscenario's tonen een toename van de neerslag in de wintermaanden. Die toename kan oplopen tot +38 % over 100 jaar en lijkt niet zozeer toe te schrijven aan een toename van het aantal natte dagen, maar eerder aan een toename van de neerslaghoeveelheid per dag. Dichter bij de kust wordt de toename in winterneerslag ook groter. Eveneens twee van de drie klimaatscenario's geven een afname van de neerslag in de zomermaanden. Die afname kan oplopen tot -52 % over 100 jaar, neemt toe in zuidelijke richting en lijkt vooral toe te schrijven

---



**Overzicht van de mogelijke klimaatverandering voor Vlaanderen en België, volgens het laag, midden en hoog klimaatscenario over 30, 50 en 100 jaar**

verandering voor	over aantal jaar	klimaatscenario			bijkomende info
		laag	midden	hoog	
jaargemiddelde temperatuur	30	+0,2 °C	+1,1 °C	+2,2 °C	De kust heeft een temperende werking op de opwarming, maar het effect is klein ten opzichte van de verwachte klimaatverandering.
	50	+0,3 °C	+1,8 °C	+3,6 °C	
	100	+0,7 °C	+3,7 °C	+7,2 °C	
gemiddeld aantal extreem warme dagen per jaar	30	0	+5	+19	Het aantal extreem warme dagen neemt het sterkst toe in het centrum van België.
	50	0	+8	+32	
	100	0	+16	+64	
gemiddeld aantal extreem koude dagen per jaar	30	0	-2	-10	Het aantal extreem koude dagen neemt het sterkst af in de Ardennen.
	50	-1	-4	-17	
	100	-1	-7	-33	
totale winterneerslag	30	-0,4 %	+3 %	+11 %	De winterneerslag neemt sterker toe langs de kust.
	50	-0,6 %	+6 %	+19 %	
	100	-1 %	+12 %	+38 %	
totale zomerneerslag	30	-16 %	-4 %	+5 %	Extreme zomerneerslagintensiteiten kunnen sterk stijgen. Ruimtelijk tekent zich een noord-zuidpatroon af met een grotere verdroging in het zuiden van het land.
	50	-26 %	-7 %	+9 %	
	100	-52 %	-15 %	+18 %	
aantal natte dagen in winter	30	-1 %	+0,5 %	+2 %	
	50	-2 %	+0,8 %	+4 %	
	100	-5 %	+1,5 %	+8 %	
aantal natte dagen in zomer	30	-12 %	-5 %	+1 %	
	50	-21 %	-8 %	+2 %	
	100	-41 %	-15 %	+4 %	
totale potentiële evapotranspiratie in winter	30	+0,5 %	+3 %	+11 %	
	50	+1 %	+6 %	+18 %	
	100	+2 %	+12 %	+35 %	
totale potentiële evapotranspiratie in zomer	30	+0,5 %	+5 %	+14 %	
	50	+1 %	+8 %	+23 %	
	100	+2 %	+17 %	+47 %	
daggemiddelde windsnelheid in winter	30	-8 %	0 %	+3 %	
	50	-14 %	-0,5 %	+6 %	
	100	-28 %	-1 %	+11 %	

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

aan de sterke afname van het aantal natte dagen. Daarnaast blijkt dat tijdens de zomermaanden de meest uitzonderlijke regenbuien het sterkst in neerslagintensiteit kunnen toenemen.

Voor de gemiddelde windsnelheden, zowel in de winter als in de zomer, en de gemiddelde windrichting worden in België deze eeuw geen significante veranderingen verwacht. Wel zal in de winter de windsnelheid tijdens de sterkste stormen waarschijnlijk met 0 à 30 % toenemen.

8 Voor de Belgische kust wordt in het Vlaams Klimaatbeleidsplan 2013-2020 rekening gehouden met een gemiddelde verhoging van het zeeniveau van 60 tot 200 cm. Die 200 cm wordt vooral aangewend om 'robuuste' maatregelen aan te tonen, hoewel er wetenschappelijk gezien weinig reden is om een dergelijke stijging op een termijn van 100 jaar aan te nemen.

### **Mogelijke gevolgen van klimaatverandering, nu en in de toekomst**

Klimaatverandering kan een brede waaier aan gevolgen hebben. In dit rapport ligt de nadruk op de gevolgen voor het waterbeheer en voor de volksgezondheid, meer bepaald via hittegolfslachtoffers en via de invloed op de luchtkwaliteit. De specifieke invloed van de nieuwe klimaatscenario's voor Vlaanderen werd nog maar ten dele gekwantificeerd. Dat betekent dat de concrete gevolgen van de nieuwste

klimaatprojecties op specifieke sectoren soms nog niet gekend zijn. Maar de afgelopen jaren zijn - zoals gerapporteerd in de Milieuverkenning 2030 van MIRA en voor de opmaak van de overstromingsrisicobeheerplannen - wel heel wat impactmodelleringen uitgevoerd met de klimaatscenario's. Op basis van de (vrij beperkte) verschillen tussen de vroegere en de nieuwe klimaatscenario's, kunnen dan wel indicaties gegeven worden over de mogelijke gevolgen.

Het aantal problematische overstromingen is sinds 1970 opmerkelijk gestegen, zowel wereldwijd als in België. Klimaatverandering is daarin slechts een van de mogelijke factoren. De toename van de bevolking en de welvaart bepalen immers in grote mate de schade door overstromingen. Mogelijk speelt ook een verbeterde dataverzameling een rol. De totale oppervlakte van de recent overstroomde gebieden bedraagt ongeveer 5 % van Vlaanderen. Modelmatig is bepaald dat - met het huidige klimaat en bodemgebruik - 7,5 % van Vlaanderen met een kleine kans kan overstromen. Voor iets meer dan 2 % is die kans groot. De jaarlijkse, gemiddelde schade door overstromingen wordt voor heel Vlaanderen momenteel geschat op ruim 50 miljoen euro.

De verwachte zeespiegelstijging en de verhoogde stormopzet zullen de kansen op overstromingen aan de kust doen toenemen. Dat geldt ook langs de oevers van rivieren die verbonden zijn met de

---

Noordzee (bijv. de Schelde). Vooral bij sterke noordwestenwind kan een extreme stormopzet voorkomen in combinatie met hevige neerslag in het binnenland, wat tot nog sterkere toenames van de waterhoogtes en de overstromende debieten kan leiden. Hogere waterstanden kunnen niet alleen leiden tot overstromingen vanuit rivieren, maar kunnen ook de uitwateringsmogelijkheden van polders en wateringen beperken. Bij de analyses van de overstromingen van onbevaarbare waterlopen is gebleken dat bij een gematigd ('midden') klimaatscenario de klimaatverandering als voornaamste gevolg heeft dat de kansen op overstroming met de tijd toenemen, terwijl de sociaal-economische groei de gevolgen van een overstroming nog ernstiger maakt. Verschillende beleidsstrategieën kunnen de toenames van de risico's echter gedeeltelijk of geheel tenietdoen en zelfs leiden tot aanzienlijk lagere risico's dan die in 2010. Dit alles toont het grote belang van de opmaak en de uitvoering van het Masterplan Kustveiligheid, het Sigma-plan en de overstromingsrisico-beheerplannen.

De overstromingskansen en -risico's werden voor Vlaanderen nog maar recent bepaald waardoor er over evoluties in het verleden niet kan worden gerapporteerd. Uit de analyse van hoogwaterafvoeren blijken wel indicaties dat op regionaal niveau zeer uitzonderlijke hoogwaterafvoeren, en dus ook het ermee samenhangende overstromingsgevaar, de laatste twee decennia wat minder uitzonderlijk zijn geworden. In

welke mate de klimaatverandering of andere factoren (bijv. veranderingen landgebruik, verharding) hiervoor verantwoordelijk zijn, is nog niet duidelijk. Bovendien zijn de beschikbare meetreeksen nog te kort om het onderscheid te maken tussen meerjarige klimaatschommelingen en echte klimaatrends op veel langere termijn. Op lokaal niveau blijken de trends erg te verschillen wat aangeeft dat lokale factoren soms een nog grotere rol spelen en/of dat toevallige fluctuaties de trends maskeren.

Eerdere doorrekeningen van klimaatscenario's wijzen voor alle bestudeerde stroomgebieden in Vlaanderen op een toekomstige daling van de laagwaterafvoeren. Een van de belangrijke conclusies uit de Milieuverkenning 2030 was dan ook dat de kansen op ernstig watertekort in de toekomst gaan stijgen. De nieuwe klimaatscenario's verwachten echter een hogere evapotranspiratie tijdens de zomermaanden, wat zou kunnen leiden tot nog lagere laagwaterdebieten. Uit de analyse van zeven meetstations op grotere, onbevaarbare waterlopen kon echter niet besloten worden dat er momenteel in Vlaanderen al een algemene toename is van de laagwaterproblematiek.

De klimaatscenario's voor de zomerperiode wijzen op een sterke toename van de extreme, kortstondige regenbuien, vooral in het geval van het hoog klimaatscenario. Daardoor zullen rioleringsystemen en andere afwateringssystemen bijkomend

---

belast worden in de toekomst. Naast het ruimer dimensioneren van riolen, bufferbekkens en andere waterreservoirs is het belangrijk de instroom van regenwater in riolen te beperken door bijvoorbeeld waterdoorlatende verharding en infiltratievoorzieningen. Ook een betere afstemming tussen stedelijk waterbeheer, stadsontwerp, land- en groenbeheer en ruimtelijke planning dringt zich op.

De zomer van 2003 was waarschijnlijk de heetste zomer in Europa sinds het jaar 1500 met bijna 72 000 extra overlijdens tot gevolg. In België werd een oversterfte van ongeveer 2 000 genoteerd. Ook in 1994, 2006 en 2010 werden bijna 1 000 slachtoffers of meer door extreme temperaturen genoteerd in ons land. Dat sensibilisatie en opvolgingssystemen het aantal slachtoffers sterk kunnen terugdringen, bleek in 2013 toen ondanks een lang aanhoudende hitteperiode geen significante stijging van het aantal overlijdens werd vastgesteld.

Naast de emissie van pollutanten hebben ook veranderingen in het klimaat een impact op de luchtkwaliteit. Zo wordt de vorming van ozon beïnvloed door de temperatuur en tijdens hittegolven zijn de ozonconcentraties in het algemeen hoog. De concentratie van fijn stof is afhankelijk van het mengen van de verschillende luchtlagen in de atmosfeer en zal daarom toenemen bij windstille omstandigheden en gedurende periodes waarbij de verticale menging in de atmosfeer klein is. De concentratie van fijn stof in omgevings-

lucht wordt ook beïnvloed door de neerslagfrequentie en -intensiteit. Het transport van andere pollutanten wordt beïnvloed door de heersende windcondities. Door de vergelijking te maken tussen 2007 (bepaling voor huidig klimaat) en 2003 (bepaling voor toekomstig klimaat) is voor Vlaanderen al aangetoond dat bij aanhoudende klimaatverandering grotere emissiereducties nodig zullen zijn om de doelstellingen voor ozonpiekconcentraties en fijn stof te respecteren. Recent werd ook aangetoond dat de verwachte klimaatverandering onder een gematigd mondiaal broeikasgasscenario de daggemiddelde ozonconcentraties tegen 2030 al tot 10 % kan doen stijgen in ons land. De grootste toenames worden verwacht dicht bij de belangrijkste wegen en in het centrum van de steden.

### **Tipping points**

Klimaatscenario's gaan uit van langzame evoluties van onder andere temperatuur en neerslag, die met een zekere vertraging de stijgende broeikasgasconcentraties volgen. Naast die langzame evoluties kan klimaatverandering echter ook leiden tot meer abrupte veranderingen. Verschillende elementen van het klimaatstelsel reageren buiten verhouding sterk op verstoringen. Vaak worden mechanismen in gang gezet zodra bepaalde drempelwaarden (*tipping points*) overschreden worden en zijn er zelfversterkende mechanismen in het spel waarbij een transitie gemaakt

---

wordt van de ene, min of meer stabiele, toestand naar een andere toestand. Eens een sneeuw- of ijsmassa, bijvoorbeeld, begint te smelten, wordt er minder zonlicht weerkaatst en warmen de donkere oppervlakten meer op, wat resulteert in een nog grotere opwarming en nog meer afsmelten. Dergelijke klimaattransities worden op dit moment slechts in zeer beperkte mate meegenomen in de klimaatscenario's. Dit impliceert dat de risico's van klimaatverandering wellicht nog onderschat worden.

Van de klimaatelementen die relevant zijn voor Europa, zijn het arctisch zee-ijs en de alpiene gletsjers het meest kwetsbaar. De zee-ijsbedekking in het Noordpoolgebied is al gehalveerd sinds 1950 en een verdere afname ligt in de lijn der verwachtingen met o.a. belangrijke ecologische en geopolitieke gevolgen. Het ijsvolume van de alpiene gletsjers bedraagt nu nog minder dan de helft van het volume in 1850. Zelfs een scenario waarin de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur onder de 2 °C blijft, zal leiden tot een bijna volledig verlies van de gletsjers in de Alpen met o.a. belangrijke gevolgen voor de waterbeschikbaarheid in de zomer.

Het afsmelten van de Groenlandse en West-Antarctische ijskappen kan leiden tot een aanzienlijke stijging van het zeeniveau. Maar, voor een volledig afsmelten van de Groenlandse ijskap zou de temperatuur gedurende een millennium enkele graden hoger moeten zijn dan de drempelwaarde

(een stijging met 1 à 4 °C ten opzichte van het pre-industriële tijdperk). Omdat het klimaatsysteem een wereldwijd gekoppeld systeem is en omdat de globalisering steeds toeneemt, kunnen ook klimaatveranderingen ver buiten Europa effecten in Vlaanderen hebben.

### Omgaan met onzekerheden

De klimaatscenario's omspannen een bereik dat de toekomstige werkelijkheid met grote waarschijnlijkheid omvat. Toch blijft de onzekerheid groot. De exacte kans op het voorkomen van een bepaald klimaatscenario is immers niet gekend. Bovendien zijn er gekende processen en mechanismen waarmee nog niet expliciet rekening kan gehouden worden (bijv. overschrijden *tipping points*). Ook zijn er onzekerheden waarvan het bestaan zelfs nog niet gekend is. De gevolgen van klimaatscenario's laten zich echter wel berekenen. Als de gevolgen van een bepaald scenario groot zijn, is het belangrijk er rekening mee te houden in de beleidsvoering en het beheer. Daarbij moet de mogelijkheid voorzien worden om - met een zo beperkt mogelijke kost - aanpassingen aan te brengen naarmate de klimaatkennis vergroot. Ook moeten beslissingen effectief en kostenefficiënt zijn, onafhankelijk van de precieze evolutie van het klimaat.

INHOUDSTAFEL

---

	<b>Samenvatting</b>	<b>2</b>
	Waargenomen klimaatverandering	2
	Toekomstige klimaatverandering	5
	Mogelijke gevolgen van klimaatverandering, nu en in de toekomst	8
	Tipping points	10
	Omgaan met onzekerheden	11
	<b>Inhoudstafel</b>	<b>12</b>
	<b>Lijst figuren</b>	<b>15</b>
	<b>Lijst tabellen</b>	<b>18</b>
12	<b>Inleiding</b>	<b>19</b>
	<b>1 Versterking van het natuurlijk broeikaseffect</b>	<b>22</b>
	1.1 Mechanismen	22
	1.2 Concentraties aan broeikasgassen in de atmosfeer lopen op	26
	1.2.1 Invloed van de mens	26
	1.2.2 Afspraak om temperatuurstijging beneden de 2 °C te houden	26
	1.2.3 Concentratie meeste broeikasgassen blijft toenemen	27
	1.2.4 Verstoring warmtebalans blijft verder oplopen	29
	<b>2 Reeds waargenomen klimaatverandering</b>	<b>32</b>
	2.1 Temperatuur	32
	2.1.1 Jaargemiddelde temperatuur	32
	2.1.2 Seizoenen	37
	2.1.3 Hittegolven en andere temperatuurextremen	39
	2.1.4 Stedelijk hitte-eiland	42
	2.2 Potentiële evapotranspiratie	50
	2.3 Neerslag	50
	2.3.1 Jaarlijkse neerslag	50
	2.3.2 Seizoenen	54
	2.3.3 Neerslagextremen	57
	2.4 Wind	62
	2.5 Zeeklimaat	63
	2.5.1 Gemiddeld zeeniveau	63
	2.5.2 Zeewatertemperatuur, saliniteit, golfhoogte en windsnelheid aan zee	66
	2.6 Klimaatschommelingen	67

<b>3 Hoe kan het klimaat in Vlaanderen evolueren tot 2100?</b>	<b>70</b>
3.1 Over scenario's en klimaatmodellen	70
3.1.1 Nieuwe broeikasgasscenario's	70
3.1.2 Nieuwe mondiale klimaatmodelsimulaties	72
3.1.3 Nieuwe Europese klimaatmodellen	72
3.1.4 Nieuwe Belgische fijnmazige klimaatmodellen	72
3.1.5 Opmaak van klimaatscenario's voor Vlaanderen	73
3.2 Temperatuur	74
3.2.1 Gemiddelde temperatuur	74
3.2.2 Extreme temperaturen	78
3.2.3 Ruimtelijke patronen	78
3.2.4 Mogelijke evolutie van het stedelijk hitte-eilandeffect	80
3.3 Neerslag en potentiële evapotranspiratie	85
3.3.1 Gemiddelde neerslag	85
3.3.2 Extreme neerslag	88
3.3.3 Ruimtelijke patronen	90
3.3.4 Gemiddelde potentiële evapotranspiratie	91
3.4 Wind	93
3.4.1 Windsnelheid	93
3.4.2 Windrichting	96
3.5 Zeeklimaat	96
3.5.1 Gemiddeld zeeniveau en stormopzet	96
3.5.2 Stromingen en golven	97
<b>4 Mogelijke gevolgen en adaptatie aan klimaatverandering</b>	<b>100</b>
4.1 Slachtoffers van hittegolven	101
4.2 Invloed op de luchtkwaliteit	104
4.3 Overstromingen	107
4.3.1 Huidig voorkomen van overstromingen	107
4.3.2 Overstromingen bij aanhoudende zeespiegelstijging in de komende decennia	113
4.3.3 Overstromingen bij wijzigende neerslag in de toekomst	115
4.3.4 Gevolgen van klimaatverandering versus wijzigend landgebruik	116
4.4 Afvoer en beschikbaarheid van water	117
4.4.1 Geobserveerde trends in afgevoerde debieten	117
4.4.2 Hoog- en laagwaterdebieten langs rivieren bij aanhoudende klimaatverandering	119
4.4.3 Gevolgen van klimaatverandering voor grondwater	121
4.4.4 Gevolgen voor landbouw en gerelateerde veranderingen in stroomgebiedshydrologie	121

<b>5 Over omslagpunten (in de klimaatverandering) en omgaan met onzekerheden</b>	<b>124</b>
5.1 Omslagpunten of tipping points	124
5.1.1 De Groenlandse en West-Antarctische ijskappen	126
5.1.2 Arctisch zee-ijs	127
5.1.3 Alpiene gletsjers	128
5.1.4 Arctisch stratosferisch ozon	128
5.1.5 Atlantische Oceaancirculatie	129
5.1.6 Indirecte effecten	129
5.1.7 Gevoelige elementen en gevaarlijke klimaatverandering	130
5.2 Omgaan met onzekerheden en beleidsrespons	130
<b>6 Meer informatie en bronnen</b>	<b>136</b>
<b>Begrippenlijst</b>	<b>140</b>
<b>Afkortingen</b>	<b>142</b>
<b>Voorvoegsels eenheden</b>	<b>143</b>
<b>Index</b>	<b>144</b>



## LIJST FIGUREN

-----	
Klimaatrends gedetecteerd in België tot in 2014	3
Figuur 1: De rol van broeikasgassen in de stralings- en warmtebalans van de aarde	23
Figuur 2: Mondiaal gemiddelde stralingsforcering in 2011 vergeleken met 1750	25
Figuur 3: Variatie in de atmosferische CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> - en N <sub>2</sub> O-concentratie tussen 800 000 V.C. en 2013	28
Figuur 4: Toename van het opwarmend vermogen of de stralingsforcering van broeikasgassen in de mondiale atmosfeer sinds 1750 (1750-2013)	29
Figuur 5: Afwijking van de jaargemiddelde temperatuur in België, Europa en mondiaal (1850-2013)	33
Figuur 6: Jaargemiddelde temperatuur uitgedrukt als afwijking t.o.v. gemiddelde in de periode 1850-1899 (Ukkel, 1833-2014)	35
Figuur 7: Ruimtelijk patroon in jaargemiddelde temperatuur onder het huidig klimaat (België)	36
Figuur 8: Gemiddelde temperatuur in de lente (linksboven), de zomer (rechtsboven), de herfst (linksonder) en de winter (rechtsonder) (Ukkel, 1833/1834-2014)	38
Figuur 9: Aantal dagen met (erg) hoge of lage temperaturen (Ukkel, 1968-2014)	40
Figuur 10: Aantal hittegolven per jaar (Ukkel, 1901-2013)	41
Figuur 11: Lengte van hittegolven (Ukkel, 1901-2013)	42
Figuur 12: Dagverloop van het gemiddeld temperatuurverschil tussen stad en platteland (Antwerpen, april tot september 2013)	43
Figuur 13: Hittegolfgraaddagen (Antwerpen, 2012-2014)	44
Figuur 14: Hittegolfgraaddagen aan de hand van stedelijke klimaatmodellering (Antwerpen, 2000-2012)	46
Figuur 15: Jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur (°C) op basis van satellietgegevens (België, 2013)	47
Figuur 16: Hot Island Population Index (HIP-index) per stad en voor het geheel van Vlaanderen (Vlaanderen, 2002-2013)	49
Figuur 17: Evolutie van de jaarlijkse potentiële evapotranspiratie (Ukkel, 1901-2014)	51
Figuur 18: Neerslag per jaar en per decennium (Ukkel, 1833-2014)	52
Figuur 19: Analyse evolutie jaarlijkse neerslag (Ukkel, 1833-2014)	53
Figuur 20: Ruimtelijk patroon in jaargemiddelde neerslag onder het huidig klimaat (België)	54
Figuur 21: Neerslaghoeveelheid per half kalenderjaar (Ukkel, 1833-2014)	55
Figuur 22: Neerslaghoeveelheid per seizoen (Ukkel, 1833-2014)	55

	Figuur 23: Aantal dagen met meetbare neerslag per seizoen en per jaar (Ukkel, 1833-2013/2014)	56
	Figuur 24: Aantal dagen met zware neerslag ( $\geq 20,0$ mm per dag) (Ukkel, 1951-2013)	58
	Figuur 25: Maximale hoeveelheid neerslag gevallen op 1 dag of in een aaneensluitende periode van 5, 10 of 15 dagen (Ukkel, 1880-2013)	59
	Figuur 26: Evolutie van de maximale toename van het cumulatief neerslagtekort over 30 dagen (Ukkel, 1901-2014)	60
	Figuur 27: Langste droogteperiode in een jaar (Ukkel, 1880-2013)	61
	Figuur 28: Evolutie van de maandelijkse Standardized Precipitation Index of SPI-1 (Ukkel, 1835-2014)	62
	Figuur 29: Historische evolutie van het jaargemiddeld zeeniveau doorheen de achtereenvolgende geologische tijdperken (België, 150 000 jaar terug in de tijd)	64
—	Figuur 30: Evolutie zeeniveau aan de Belgische kust (Oostende, 1951-2013)	66
16	Figuur 31: Tijdsevolutie van enerzijds de stralingsforcering volgens de nieuwe RCP-scenario's en de oude SRES-scenario's (links), en anderzijds de mondiale CO <sub>2</sub> -uitstoot door gebruik van fossiele energiebronnen en cement volgens de nieuwe RCP-scenario's, samen met de waargenomen uitstoot tot 2014 (rechts)	71
	Figuur 32: Schematisch overzicht van de beschikbaarheid van klimaatmodellen bij verschillende tijdschalen en hoe deze met statistische neerschalingmethoden gecombineerd worden om klimaatscenario's af te leiden voor lokale impactanalyses	74
	Figuur 33: Geprojecteerde verandering in de gemiddelde temperatuur per jaar (links) en in de zomer (rechts) in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor het RCP8.5-scenario	75
	Figuur 34: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur (Ukkel, over 100 jaar)	76
	Figuur 35: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur (Ukkel, over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts))	77
	Figuur 36: Regionaal patroon van de temperatuurverandering aan het einde van de eeuw ten opzichte van Ukkel	79
	Figuur 37: Regionaal patroon van de verandering in het aantal dagen per jaar boven de 25 °C (links) en onder de 0 °C (rechts) aan het einde van de eeuw	80
	Figuur 38: Evolutie jaarlijks aantal hittegolfgraaddagen voor stedelijke gebieden, rand- of licht-stedelijke gebieden, en landelijke gebieden volgens verschillende klimaatscenario's (Vlaanderen, 2000-2010 versus 2060-2070)	83
	Figuur 39: Mogelijke evolutie van de ruimtelijke hittestress-indicator (België, 2000-2010 versus 2060-2070)	84

Figuur 40: Geprojecteerde verandering in de jaarlijkse (links) en zomer (rechts) neerslag in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor het RCP8.5-scenario	85	
Figuur 41: Klimaatscenario's voor de verandering in maandgemiddelde neerslag (Ukkel, over 100 jaar)	86	
Figuur 42: Klimaatscenario's voor de verandering in aantal natte dagen (links) en aantal droge dagen (rechts) (Ukkel, over 100 jaar)	87	
Figuur 43: Procentuele verandering in neerslagintensiteiten in functie van de terugkeerperiode in zowel de winter (links) als de zomer (rechts) bij wijzigend klimaat (Ukkel, over 100 jaar)	89	
Figuur 44: Neerslagverandering tegen het einde van de 21 <sup>ste</sup> eeuw (België)	91	
Figuur 45: Klimaatscenario's voor de verandering in potentiële evapotranspiratie (Ukkel, over 100 jaar)	92	
Figuur 46: Veranderingen in windsnelheid tegen het einde van de 21 <sup>ste</sup> eeuw (België en omstreken)	93	
Figuur 47: Verandering van extreme wind tegen het einde van de 21 <sup>ste</sup> eeuw	94	17
Figuur 48: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid (Ukkel, over 100 jaar)	95	
Figuur 49: De gemiddelde windrichting in het heden, de periode rond 2030 en de periode rond 2064 (België)	96	
Figuur 50: Evolutie van het sterftecijfer en van de temperatuur in de zomer van 2006 (België)	102	
Figuur 51: Veranderingen in daggemiddelde ozonconcentraties tegen 2030 voor het RCP4.5 scenario per seizoen (lente, zomer, herfst, winter)	106	
Figuur 52: Evolutie van het aantal geregistreerde overstromingen (1970-2014)	108	
Figuur 53: Recent overstromde gebieden (Vlaanderen, 1988-2013)	109	
Figuur 54: Overstromingsgevaarkaart huidig klimaat (Vlaanderen, 2012)	111	
Figuur 55: Economisch risico door overstroming bij huidig klimaat (Vlaanderen, 2012)	112	
Figuur 56: Evolutie van terugkeerperiodes voor hoogwaterafvoer in drie hydrologisch homogene zones (Vlaanderen, 2014 versus 1996)	119	
Figuur 57: De verschillende tipping elements of gevoelige elementen in het klimaatsysteem met een impact wereldwijd (links) en met een impact in Vlaanderen (rechts)	125	
Figuur 58: Inschatting van de kans dat de gevoelige elementen, relevant voor Europa (x-as), een transitie ondergaan als functie van de gemiddelde mondiale opwarming van de aarde ten opzichte van huidige condities (y-as)	126	
Figuur 59: Gradaties van onzekerheid	133	

LIJST TABELLEN

---

Overzicht van de mogelijke klimaatverandering voor Vlaanderen en België, volgens het laag, midden en hoog klimaatscenario over 30, 50 en 100 jaar	7
Tabel 1: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in jaargemiddelde temperatuur (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	76
Tabel 2: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in seizoensgemiddelde temperatuur in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	77
Tabel 3: Klimaatscenario's voor de absolute verandering in het aantal dagen per jaar met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C (extreem warme dagen) of onder de 0 °C (extreem koude dagen) (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	78
Tabel 4: Klimaatscenario's voor de verandering in seizoensneerslag in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	86
Tabel 5: Klimaatscenario's voor de verandering in aantal natte en droge dagen in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	88
Tabel 6: Klimaatscenario's voor de procentuele verandering in winterse neerslag-intensiteiten met terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	89
Tabel 7: Klimaatscenario's voor de verandering in neerslagintensiteiten met terugkeerperiodes tussen 1 en 30 jaar in de zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	90
Tabel 8: Klimaatscenario's voor de verandering in potentiële evapotranspiratie in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	92
Tabel 9: Klimaatscenario's voor de verandering in windsnelheid in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)	95

## INLEIDING

---

‘De aarde warmt op, en die opwarming houdt verband met de uitstoot van broeikasgasen van menselijke oorsprong.’ Deze ondubbelzinnige conclusie staat centraal in het vijfde evaluatierapport van het *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Deze opwarming blijkt overduidelijk uit observaties van de toename van de gemiddelde mondiale temperaturen van atmosfeer en oceanen, het wijdverspreide smelten van sneeuw en ijs en de stijging van het gemiddelde mondiale zeeniveau.

Het IPCC werd in 1988 opgericht door de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) en het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP). Het is een onafhankelijk orgaan met als opdracht periodiek de wetenschappelijke kennis te evalueren met betrekking tot klimaatverandering. Zo vormde de eerste evaluatie van het IPCC in 1990 de basis voor het Klimaatverdrag van de wereldmilieutop in Rio de Janeiro (Brazilië, 1992). Het tweede wetenschappelijke eindverslag (*Second Assessment Report of SAR*, 1995) verstrekte voldoende argumenten om een Protocol aan het Klimaatverdrag toe te voegen. Dat Protocol werd op de Klimaatconferentie in december 1997 in Kyoto (Japan) goedgekeurd en legde voor het eerst bindende verplichtingen op voor de reductie van de broeikasgasuitstoot. In 2001 volgde het derde (*Third Assessment Report of TAR*) en in 2007 het vierde evaluatierapport (*Fourth Assessment Report of AR4*). Van rapport tot rapport nam de bewijsgraad voor de invloed van de mens op de opwarming van de aarde toe.

Na het AR4 startte het IPCC met de ontwikkeling van een nieuwe set scenario's voor de mogelijke toename van de concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer. In tegenstelling tot eerdere scenario's waarin geen klimaatbeleid werd verondersteld, ligt bij de nieuwe *Representative Concentration Pathways* of RCP-scenario's de focus op de effecten van verschillende ambitieniveaus van het beleid. De bandbreedte die door deze scenario's wordt beschouwd, gaat van scenario's met weinig maatregelen en weinig technologische doorbraken tot scenario's met een zeer ambitieus klimaatbeleid. De RCP-scenario's liggen aan de basis van het nieuwste, vijfde IPCC-rapport dat verspreid over verschillende delen verscheen in 2013 en 2014 (*Fifth Assessment Report of kortweg AR5*).

In 2009 werd in de Milieuverkenning 2030 van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) de bestaande wetenschappelijke kennis verzameld rond klimaatverandering in Vlaanderen en de mogelijke gevolgen daarvan tot 2100 (Brouwers *et al.*, 2009). De hierin afgeleide klimaatscenario's waren nog gebaseerd op de oude SRES-scenario's (*Special Report on Emissions Scenarios*, 2000) van het IPCC. Nu de RCP-scenario's al enkele jaren beschikbaar zijn voor doorrekening met diverse klimaatmodellen, bundelde de Dienst Milieurapportering (MIRA) van de VMM samen met collega's van de Dienst Hoogwaterbeheer van de VMM en wetenschappers van de KU Leuven, VITO en het KMI met dit MIRA Klimaatrapport 2015 de nieuwste wetenschappelijke inzichten rond klimaatverandering in Vlaanderen. Naast de nieuwe RCP-scenario's, wordt in dit rapport ook gebruik gemaakt van de mogelijkheden om voor Vlaanderen (en België) klimaatscenario's door te rekenen met hoge temporele en ruimtelijke resolutie. Dit laat toe om de set klimaatscenario's voor Vlaanderen en België te actualiseren en verder te verfijnen en een antwoord te formuleren op vragen over ruimtelijke verschillen en over veranderingen in het voorkomen van extreme weersomstandigheden. Daarmee verdiept de VMM ook de

kennis rond een van de zes megatrends die voor het milieu in Vlaanderen geïdentificeerd werden in de 'MIRA Toekomstverkenning 2014 – Megatrends: ingrijpend, maar ook ongrijpbaar?' (VMM, 2014a). Megatrends werden hierbij opgevat als autonome ontwikkelingen die zich op wereldschaal afspelen en waarmee het toekomstige (milieu)beleid in Vlaanderen rekening moet houden als het adequaat, veerkrachtig en succesvol wil zijn. Het betreft nu al zichtbare, langdurige veranderingsprocessen met een zeer brede reikwijdte en met ingrijpende, verstrekkende en kritieke implicaties.

Het MIRA Klimaatrapport 2015 bundelt en interpreteert bestaande kennis met als doel tot een zo breed mogelijke doorstroming van de klimaatkennis in Vlaanderen te komen. Naast de jaarlijks geactualiseerde klimaatindicatoren op de MIRA-website ([www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)) is dit rapport vooral gebaseerd op twee onderzoeksrapporten die in opdracht van MIRA werden uitgevoerd tussen het najaar van 2013 en begin 2015:

- van Lipzig N.P.M. & Willems P. (2015), *Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen*, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/01, KU Leuven i.s.m. KMI. Raadpleegbaar op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).
- De Ridder K., Maiheu B., Wouters H. & van Lipzig N. (2015), *Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen*, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/05, VITO en KU Leuven. Raadpleegbaar op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

We verwijzen dan ook naar de uitgebreide referentielijsten in beide rapporten voor meer informatie.

In hoofdstuk 1 wordt het mechanisme van een versterkt broeikaseffect in beeld gebracht. Het tweede hoofdstuk zoomt in op de klimaatverandering zoals die al in Vlaanderen en België wordt vastgesteld. Hoofdstuk 3 brengt de set geactualiseerde en verfijnde klimaatscenario's aan. Deze scenario's geven voor de verschillende klimaatparameters (temperatuur, neerslag, wind en zeeklimaat) inzicht in de mogelijke evolutie van zowel gemiddelden als extremen (o.a. hitte- en koudegolven, droogteperiodes, hevige neerslag, stormopzet) doorheen de komende decennia. De tijdshorizon hiervoor ligt zowel op de middellange (2030/2050) als lange (2100) termijn. Dit hoofdstuk besteedt ook aandacht aan mogelijke verschillen in de klimatologische veranderingen binnen Vlaanderen en België. Wijzigingen in het klimaat hebben een belangrijke impact op de maatschappij. Dit komt aan bod in het vierde hoofdstuk. Wanneer door klimaatverandering ook bepaalde omslagpunten of *tipping points* worden overschreden, kunnen zelfversterkende mechanismen in gang worden gezet die een nog veel grotere impact kunnen hebben. Deze en andere moeilijk te kwantificeren klimaataspecten komen aan bod in hoofdstuk 5, samen met enkele aanbevelingen voor het omgaan met onzekerheden door het beleid. Hoofdstuk 6, tot slot, bundelt de informatiebronnen van het MIRA Klimaatrapport 2015.

---

1

VERSTERKING VAN HET NATUURLIJK BROEIKASEFFECT



## 1 VERSTERKING VAN HET NATUURLIJK BROEIKASEFFECT<sup>1</sup>

---

### 1.1 Mechanismen

---

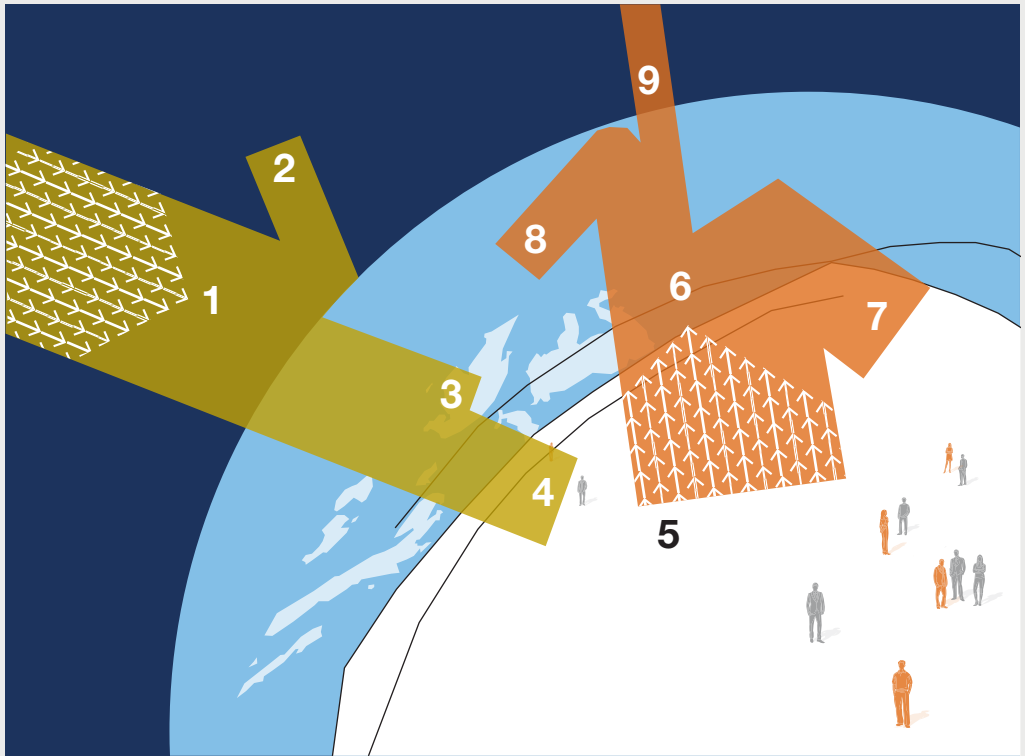
In de atmosfeer zijn gassen aanwezig die de invallende zonnestraling doorlaten, maar die door het opgewarmde aardoppervlak uitgezonden thermische infraroodstraling absorberen. Dit natuurlijk fenomeen heet het broeikaseffect naar analogie met de werking van glas in een serre. Het leven op aarde dankt zijn bestaan aan dit broeikaseffect: de gemiddelde temperatuur op aarde zou anders -18 °C bedragen, in plaats van de huidige +15 °C. De voornaamste natuurlijke broeikasgassen zijn waterdamp (H<sub>2</sub>O), koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O). De concentratie van deze gassen in de atmosfeer is het resultaat van talrijke dynamische processen en cycli die op elkaar inwerken.

Figuur 1 geeft schematisch de warmtebalans van de aarde weer. Invallende zonnestraling bestaat in belangrijke mate uit zichtbaar licht (golflengte 400 tot 700 nm) en ultraviolet licht (golflengte 10 tot 400 nm). Iets minder dan de helft van zonnestraling zit in het nabij-infrarood deel van het spectrum (golflengte 700 tot 2 500 nm). De gemiddelde hoeveelheid energie die zo invalt op het aardoppervlak bedraagt ca. 340 W/m<sup>2</sup>. Hiervan wordt 51 % door het aardoppervlak geabsorbeerd (zowel door land als door oceanen). De rest wordt al eerder gereflecteerd door de atmosfeer, de wolken en het aardoppervlak (samen 30 %) of geabsorbeerd door de atmosfeer en de wolken (samen 19 %). Door de absorptie van invallend zonlicht warmt het aardoppervlak op, waardoor het zelf energie uitwisselt met de atmosfeer. Dit gebeurt door middel van radiatie (straling), transport van warmte door turbulente menging, en evaporatie (verdamping van water). Door haar karakteristieke temperatuur zendt het aardoppervlak infrarode straling (golflengte 2 500 tot 1 000 000 nm) uit die een langere golflengte heeft dan de invallende zonnestraling. Broeikasgassen laten de invallende kortgolvlige straling vrijwel volledig door, maar absorberen de door de aarde uitgestraalde infrarode straling nagenoeg volledig. Vervolgens zenden deze moleculen zelf infrarode straling uit in alle richtingen, dus zowel naar het aardoppervlak als naar de ruimte. De broeikasgassen bemoeilijken dus enkel de vrijgave van warmte maar ze stoppen dit niet, aangezien de helft van hun eigen straling gericht is naar de ruimte. Door het broeikaseffect verhoogt de oppervlaktetemperatuur van de aarde (dus van -18 °C naar +15 °C) tot op het moment dat de warmtestraling bovenaan de absorberende luchtlagen naar de ruimte in evenwicht is met de invallende zonnestraling op dat niveau. Hoe meer broeikasgassen in de atmosfeer, hoe hoger de temperatuur aan het aardoppervlak waarbij dit evenwicht zich instelt.

<sup>1</sup> Dit hoofdstuk is in hoofdzaak gebaseerd op de MIRA Themabeschrijving Klimaatverandering en enkele milieu-indicatoren, zoals raadpleegbaar op <http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/klimaatverandering/>. Hierin staan ook de verschillende (wetenschappelijke) bronnen aangegeven waarop dit materiaal gebaseerd is. Andere bronnen staan in de tekst zelf vermeld.



Figuur 1: De rol van broeikasgassen in de stralings- en warmtebalans van de aarde



- 1 = invallende zonnestrallen;  
 2 = weerkaatsing van een deel van de stralen door de atmosfeer en de wolken;  
 3 = absorptie van zonnestrallen, wat de atmosfeer gedeeltelijk opwarmt;  
 4 = stralen die het aardoppervlak bereiken;  
 5 = de aarde absorbeert de stralen, warmt zelf op en geeft op haar beurt infrarode straling af;  
 6 = die infraroodstralen worden opgenomen door de broeikasgassen;  
 7 = een deel van die stralen wordt door de broeikasgassen weerkaatst en door hogere lagen van de atmosfeer geabsorbeerd (8);  
 9 = de rest verdwijnt in de ruimte.

Bron: [www.klimaat.be](http://www.klimaat.be)

Het klimaat op aarde wordt beïnvloed door elke factor die een weerslag heeft op:

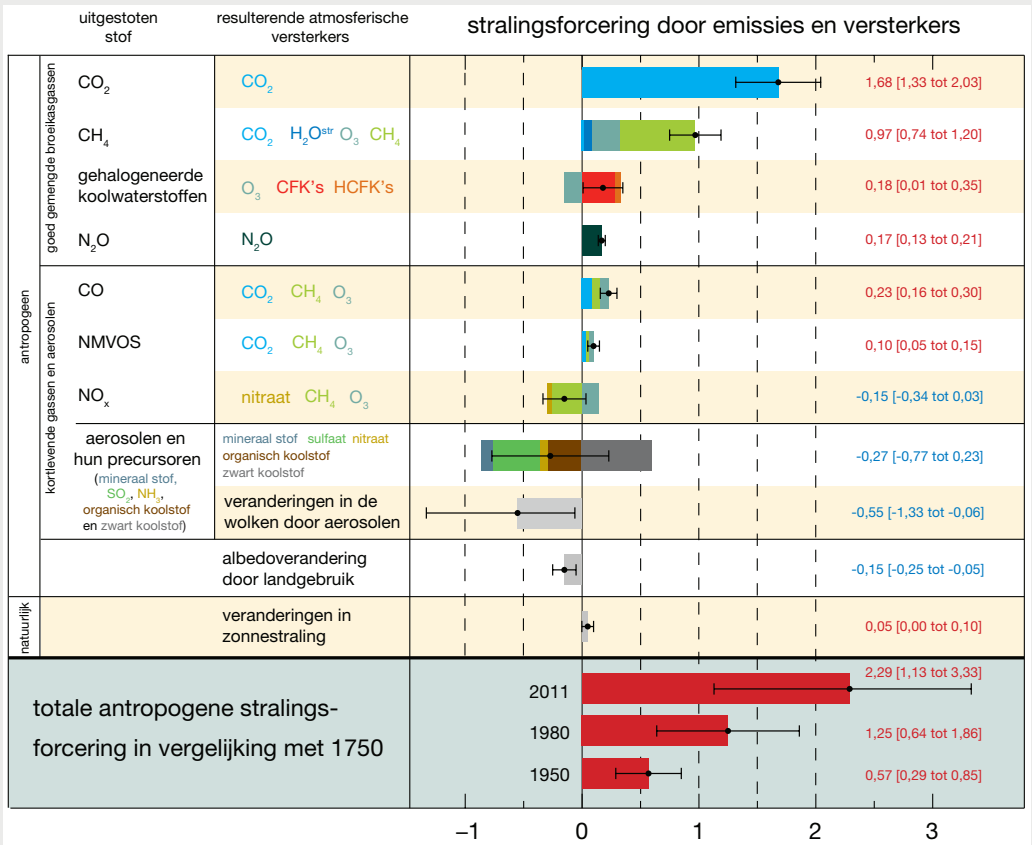
- de hoeveelheid opgevangen zonnestraling: bijv. de elfjarige zonnecyclus, variaties in de baan van de aarde rond de zon;
- de hoeveelheid door de aarde geabsorbeerde en uitgestuurde warmte: bijv. een stijging van de concentraties van broeikasgassen of de verandering van de concentratie met de hoogte (bijv. voor waterdamp), de aanwezigheid van aerosolen (vulkaanuitbarstingen, industriële emissie van zwaveloxide);
- de fysische verspreidingspatronen over het aardoppervlak: bijv. een verandering van de huidige temperatuurverdeling in de atmosfeer en de oceanen kan weerpatronen en oceaanstroomingen wijzigen.

Door het samenspel van deze vele factoren wordt het klimaat gekenmerkt door een grote natuurlijke variabiliteit. Toch blijkt uit het AR5 van het IPCC dat de stijging van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer sinds de industriële revolutie (na 1750) veruit de belangrijkste oorzaak is van de opwarming van het klimaat. De verandering in zonne- en vulkaanactiviteit draagt slechts in beperkte mate bij tot een opwarming van het klimaat in het industrietijdperk. De verstoring van de warmtebalans van de aarde door de mens of de totale stralingsforcering van antropogene oorsprong sinds 1750 (zie § 1.2.4) is positief (2,29 W/m<sup>2</sup>), en heeft tot een netto-ophoping van energie in het klimaatsysteem geleid (figuur 2). De stralingsforcering die samenhangt met een stijging van de concentratie broeikasgassen (voornamelijk CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O), sinds 1750, ligt in de orde van 3 W/m<sup>2</sup>. Zij wordt gedeeltelijk gecompenseerd door het stralingseffect van aerosolen (in de orde van -0,8 W/m<sup>2</sup>). De stratosferische aerosolen (geassocieerd met de activiteit van vulkanen) en de variaties in zonneactiviteit dragen slechts in mindere mate bij tot het belangrijke stralingseffect sinds het begin van de industriële revolutie (met uitzondering van enkele korte periodes na grote vulkaanuitbarstingen).

24 Door de antropogene uitstoot is de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer verhoogd. Deze verhoogde concentratie versterkt het natuurlijke broeikaseffect en leidt zo tot een verhoging van de gemiddelde temperatuur op aarde en een globale klimaatverandering. En doordat de meeste broeikasgassen enkele decennia of (veel) langer aanwezig blijven in de atmosfeer en het ook lang duurt voor er een nieuw energetisch evenwicht wordt ingesteld, zal de temperatuur nog een tijd blijven stijgen na stabilisatie van de concentratie van broeikasgassen. Maar hoe lager het niveau waarop de concentraties worden gestabiliseerd, hoe lager de uiteindelijke temperatuurstijging.

Zo'n temperatuurstijging kan leiden tot een verschuiving van de klimaatzones op aarde en kan een zeer belangrijke invloed hebben op de frequentie en de ernst van extreme fenomenen in bepaalde regio's, zoals hittegolven en langdurige droogtes. De uitzetting van het opwarmende zeewater en het (gedeeltelijk) smelten van de ijskappen op land zullen een stijging van de zeespiegel veroorzaken met groter overstromingsgevaar in lager gelegen gebieden. Door de hogere temperaturen zullen ziekten zoals malaria en gele koorts zich over een groter deel van de wereld verspreiden. Deze grootschalige veranderingen op lange termijn interageren met natuurlijke variaties op tijdschalen van enkele dagen tot enkele decennia.

Figuur 2: Mondiaal gemiddelde stralingsforcering in 2011 vergeleken met 1750



Bron: IPCC (2013) AR5-WG1-Summary for policy makers (zie [http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5\\_SPM\\_brochure\\_en.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf))

Kenmerkend voor het verstoringproces van klimaatverandering zijn het mondiale karakter, de onzekerheden verbonden met de complexiteit van het proces en de terugkoppelingsmechanismen die de processen kunnen versterken (bijv. hogere temperaturen leiden tot meer waterdamp in de atmosfeer, waardoor het broeikas-effect wordt versterkt, wat op zijn beurt leidt tot nog hogere temperaturen) of afremmen. Ook een potentieel voor belangrijke onomkeerbare schade, een lange verblijftijd van de gassen in de atmosfeer, een groot tijdsverschil tussen emissies en effecten (o.m. door de bufferwerking van de oceanen) en grote regionale variaties in oorzaken en vooral gevolgen, zijn kenmerkend voor het verstoringproces.

## 1.2 Concentraties aan broeikasgassen in de atmosfeer lopen op

---

### 1.2.1 Invloed van de mens

Vooraf sinds de industriële revolutie (na 1750) heeft de mens gaandeweg steeds grotere hoeveelheden broeikasgassen in de atmosfeer gebracht door verbranding van fossiele brandstoffen ( $\text{CO}_2$  en  $\text{N}_2\text{O}$ ), veeteelt ( $\text{CH}_4$  en  $\text{N}_2\text{O}$ ), afvalverwerking ( $\text{CH}_4$ ) en chemische processen in de industrie ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Door de wereldwijde ontbossing en de ermee gepaard gaande verbranding worden ook grote koolstofreservoirs in het hout en de bodem omgezet naar broeikasgassen (vnl.  $\text{CO}_2$ ) die vrijkomen in de atmosfeer. Daarnaast dragen ook nieuwe stoffen zoals de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's), hun vervangproducten zoals zachte gehydrogeneerde chloorfluorkoolwaterstoffen (HCFK's) en fluorkoolwaterstoffen (HFK's en PFK's), o.a. gebruikt als koelmiddel en drijfgas, en zwavelhexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) bij tot het broeikas effect.  $\text{SF}_6$  zit in sommige elektrische schakelinstallaties en in geluids-isolerende dubbele beglazing.

De oplopende atmosferische concentratie van broeikasgassen in de 20<sup>ste</sup> en in het begin van de 21<sup>ste</sup> eeuw wijst het IPCC met meer dan 95 % zekerheid in hoofdzaak toe aan menselijke activiteiten. En ook al worden de meeste broeikasgassen uitgestoten in geïndustrialiseerde landen (o.a. Europa, Verenigde Staten, Canada) en groei landen op het noordelijk halfrond (China, India), toch is de concentratie van broeikasgassen overal in de wereld nagenoeg gelijk. Dit komt doordat hun verblijftijd in de atmosfeer voldoende lang is om tot een homogene vermenging te komen. Er is geen ruimtelijke relatie tussen emissies en effecten.

Ondanks het mondiaal mechanisme zijn de verwachte klimatologische effecten geografisch sterk verschillend (zie ook hoofdstuk 2 en volgende) en hun impact is afhankelijk van de lokale kwetsbaarheid. Bovendien zijn de landen die momenteel weinig broeikasgassen uitstoten vaak het meest kwetsbaar voor de gevolgen van klimaatverandering.

### 1.2.2 Afspraak om temperatuurstijging beneden de 2 °C te houden

Zowel op mondiaal vlak (Kopenhagen Akkoord van december 2009 in het kader van het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties of UNFCCC, bevestigd tijdens de klimaatconferentie in Cancun eind 2010) als binnen de EU (o.a. besluit Milieuraad van oktober 2008) zijn beleidsmakers het er over eens dat de wereldwijde gemiddelde temperatuurstijging op langere termijn moet worden beperkt tot 2 °C boven het pre-industriële niveau (referentiejaar 1750). Ook Vlaanderen heeft in haar Vlaams Klimaatbeleidsplan 2013-2020 de doelstelling onderschreven om de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur niet boven de 2 °C te laten uitstijgen in 2050 ten opzichte van pre-industriële tijden (VKP, 2013). Daartoe is tegen 2020 een daling nodig van de emissie van broeikasgassen door de ontwikkelde landen van 25 tot 40 %, en van 80 tot 90 % tegen 2050 ten opzichte van 1990. Eind 2015 wordt in Parijs op de 21<sup>ste</sup> klimaatconferentie van de Verenigde Naties (COP-21) onderhandeld over een nieuw, globaal klimaatakkoord. In de aanloop hier naartoe bereikte de Europese Raad in oktober 2014 een akkoord over een bindende Europese reductiedoelstelling voor de emissie van broeikasgassen van minstens 40 % tegen 2030 ten opzichte van 1990. Deze reductiedoelstelling is een aanscherping ten opzichte van de doelstelling tegen 2020 (-20 % t.o.v. 1990), vooral omdat alle reducties na 2020 binnen de EU zelf moeten gebeuren.

Om de kans op een mondiale temperatuurstijging boven die 2 °C op 50 % of minder te houden, moet de CO<sub>2</sub>-concentratie stabiliseren beneden 400 ppm<sub>v</sub>, en de concentratie van alle Kyoto-gassen samen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFK's, PFK's en SF<sub>6</sub>) onder de 480 ppm<sub>v</sub> blijven. Voor alle broeikasgassen samen (met naast de Kyoto-gassen ook CFK's, HCFK's, ozon en aerosolen), wordt een plafond van 450 ppm<sub>v</sub> naar voor geschoven. Dit ligt lager dan de 480 ppm<sub>v</sub> voor Kyoto-gassen omdat de meeste aerosolen geen opwarmend, maar een afkoelend effect hebben. Om deze plafonds te respecteren, moet de mondiale emissie van broeikasgassen al binnen de twee decennia van een stijgende naar een dalende trend worden omgebogen.

### 1.2.3 Concentratie meeste broeikasgassen blijft toenemen

Van alle koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) die door menselijke activiteiten wordt uitgestoten, wordt ongeveer een kwart opgenomen door de oceanen en een ander kwart door de biosfeer (o.a. planten). De andere helft van de CO<sub>2</sub>-emissies blijft achter in de atmosfeer.

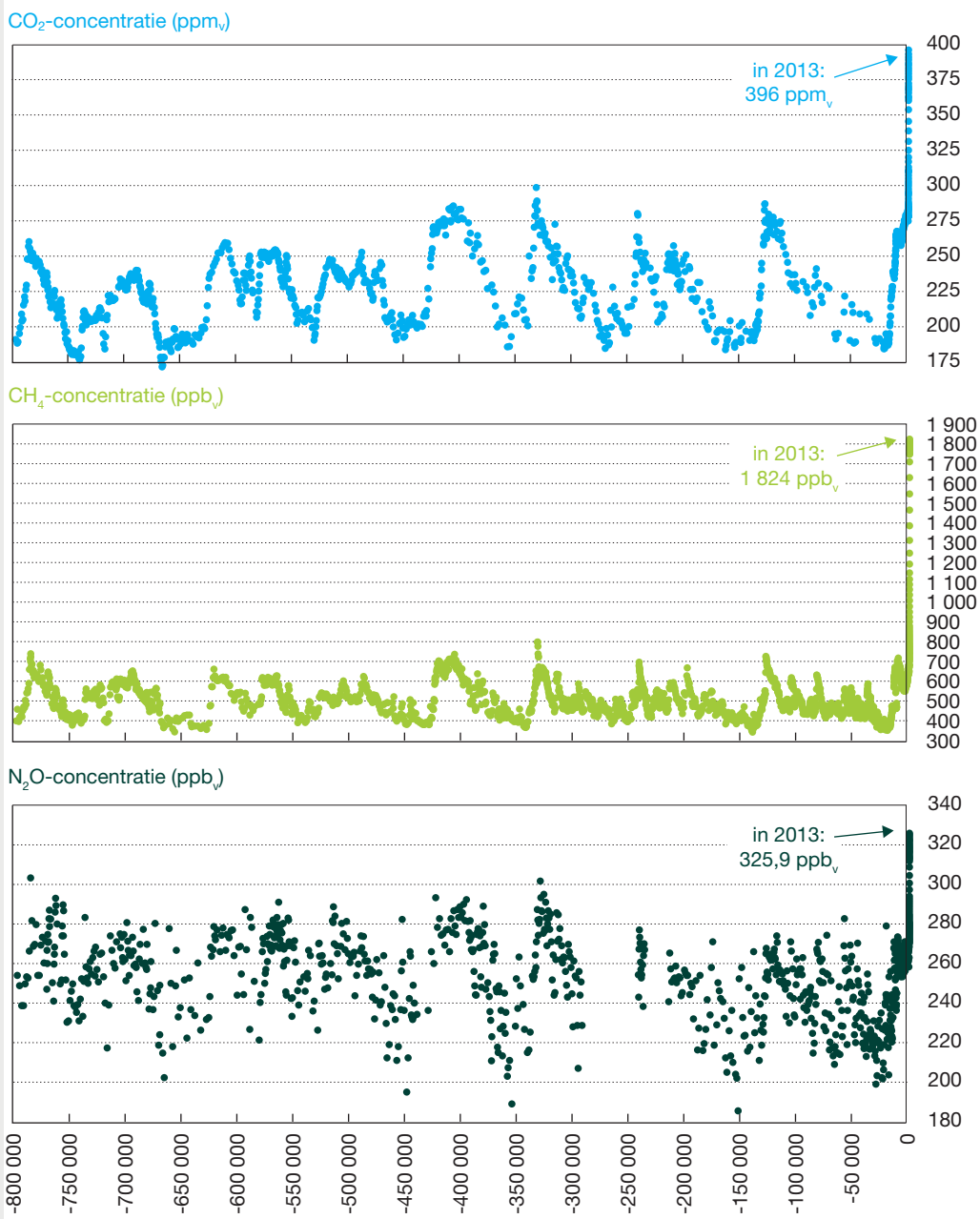
In 2013 bedroeg de gemiddelde atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie 396 ppm<sub>v</sub>, een stijging met 42 % ten opzichte van de pre-industriële concentratie van 278 ppm<sub>v</sub>. Dat jaar nam de concentratie nog toe met 2,9 ppm<sub>v</sub>, een groeiritme dat beduidend hoger ligt dan in de jaren 90 (gemiddeld 1,5 ppm<sub>v</sub>/jaar) en tijdens het afgelopen decennium (gemiddeld 2,0 ppm<sub>v</sub>/jaar). De huidige CO<sub>2</sub>-concentratie is de hoogste van de afgelopen 800 000 jaar (figuur 3, boven). Ook het huidige tempo van toename is het hoogste van de afgelopen 30 jaar. Aan dit tempo zal de jaargemiddelde CO<sub>2</sub>-concentratie de drempel van 400 ppm<sub>v</sub> al in 2015 of 2016 overschrijden. Oorzaak is de aangroeiende emissie op mondiaal niveau. Bovendien zijn er indicaties dat ook de biosfeer op aarde steeds minder CO<sub>2</sub> opneemt.

Voor methaan (CH<sub>4</sub>) bedroeg de atmosferische concentratie in 2013 al 1 824 ppb<sub>v</sub> of meer dan het dubbele (+153 %) van de waarde van de pre-industriële periode (722 ppb<sub>v</sub>) (figuur 3, midden). Tussen begin jaren 80 en 2006 nam de jaarlijkse toename af van 16 ppb<sub>v</sub> naar 0 ppb<sub>v</sub> of zelfs een lichte daling begin jaren 2000.

Ondertussen nemen de concentraties opnieuw toe met circa 5 ppb<sub>v</sub> per jaar. Oorzaken voor de hernieuwde stijging zijn de verhoogde emissies uit waterrijk natuurland (o.a. moerassen) door de toegenomen neerslag in de tropen en antropogene emissiebronnen te midden het noordelijk halfrond. Ook de huidige CH<sub>4</sub>-concentratie is de hoogste in 800 000 jaar. Zo'n 60 % van de methaanemissies is van antropogene oorsprong, onder meer het gebruik van fossiele brandstoffen, veeteelt, rijstteelt en stortplaatsen.

In 2013 bedroeg de atmosferische concentratie van lachgas (N<sub>2</sub>O) 326 ppb<sub>v</sub>, dit is 21 % meer dan de concentratie gedurende de pre-industriële periode (270 ppb<sub>v</sub>) en het hoogste niveau in minstens duizend jaar (figuur 3, onder). Slechts 40 % van de globale lachgasemissies is van antropogene oorsprong: vooral door gebruik van meststoffen en daarnaast ook bij industriële processen en bij de verbranding van biomassa. De toename in het laatste jaar (0,8 ppb<sub>v</sub>) lag in de lijn van het gemiddelde van de laatste 10 jaar (+0,82 ppb<sub>v</sub>/jaar).

Figuur 3: Variatie in de atmosferische CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- en N<sub>2</sub>O-concentratie tussen 800 000 V.C. en 2013



Bron: MIRA op basis van Lüthi *et al.* (2008), Loulergue *et al.* (2008), Schilt *et al.* (2010), EEA (2004) en WMO (2014a)

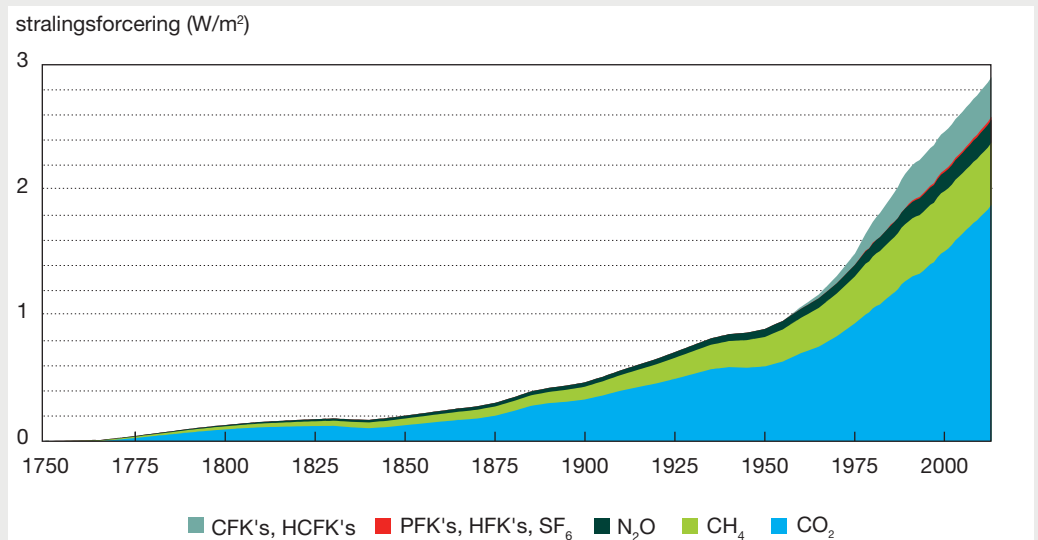
### 1.2.4 Verstoring warmtebalans blijft verder oplopen

Veranderingen in concentraties van broeikasgassen en aerosolen leiden tot een verstoring van de stralingsbalans van de aarde. Deze verstoring noemen we *radiative forcing*, verwijzend naar de antropogene oorsprong (*forcing*: forceren, afdwingen; *forcing house*: broeikas of serre) en naar het stralingseffect (*radiative*: stralings-). Als Nederlandstalig equivalent voor deze term gebruiken we ‘stralingsforcering’ of anders nog ‘opwarmend vermogen’. Een stralingsforcering kan zowel positief zijn (waarbij de onderste atmosfeerlaag opwarmt) als negatief (zorgt voor afkoeling).

Figuur 4 geeft een overzicht van de toename van de atmosferische concentratie van de belangrijkste langlevende broeikasgassen sinds 1750, herrekend naar de overeenkomstige stralingsforcering in  $W/m^2$ . Hieruit blijkt een duidelijke versnelling sinds het begin van de jaren 50 wanneer het energiegebruik sterk toenam en men stilaan CFK's en aanverwante gassen (o.a. als koelmiddel en drijfgas) begon te gebruiken. De figuur maakt duidelijk dat de belangrijkste bijdrage aan de opwarming van de aarde komt van koolstofdioxide, maar dat ook de bijdrage van de andere gassen niet verwaarloosbaar is. De drie belangrijkste broeikasgassen staan samen in voor 88 % van de toename inzake stralingsforcering sinds het begin van de industrialisatie (1750): 65 % voor  $CO_2$ , 17 % voor  $CH_4$  en 6 % voor  $N_2O$ . Zelfs na 1990, het referentiejaar voor het Kyoto-protocol van 1997, nam het gezamenlijk opwarmende effect van de voornaamste broeikasgassen in onze atmosfeer nog toe met 34 %. Hiervan is 80 % voor rekening van koolstofdioxide.

29

**Figuur 4: Toename van het opwarmend vermogen of de stralingsforcering van broeikasgassen in de mondiale atmosfeer sinds 1750 (1750-2013)**



Bron: MIRA op basis van NOAA (2014), IPCC (2014) en EEA (2015)

Naast de gassen waarvan de emissies gereguleerd worden door het Kyoto-protocol ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ , PFK's en HFK's) spelen ook CFK's en HCFK's een niet te verwaarlozen rol in de warmtehuishouding van de atmosfeer. De uitstoot van die CFK's en HCFK's werd al aan banden gelegd in het Montreal-protocol van 1987 aangezien ze ook bijdragen aan de afbraak van de stratosferische ozonlaag. Het effect van emissiebeperkende maatregelen resulteert inmiddels in een afremming van de concentratietoename en voor enkele gassen zelfs al in een concentratiedaling. CFK-11 en CFK-12 zijn de twee belangrijkste gassen uit deze groep, en hun concentraties lopen terug sinds respectievelijk begin jaren 90 van vorige eeuw en 2005. De concentraties van HCFK's en HFK's nemen daarentegen snel toe, ook al blijft hun bijdrage in de totale stralingsforcering nog beperkt.

Omrekening van de stralingsforcering in figuur 4 naar  $\text{CO}_2$ -equivalent ( $\text{CO}_2$ -eq) leert dat de concentratie van de Kyoto-gassen tussen 1990 en 2013 is geëvolueerd van 396 ppm<sub>v</sub>  $\text{CO}_2$ -eq naar 451 ppm<sub>v</sub>  $\text{CO}_2$ -eq. Daarmee is in 23 jaar al twee derde van de marge tot het plafond van 480 ppm<sub>v</sub>  $\text{CO}_2$ -eq ingenomen.

Naast bovenvermelde langlevende broeikasgassen spelen ook nog andere stoffen een rol in de warmtehuishouding van onze atmosfeer:

30

- troposferische ozon en aerosolen: ozon versterkt het broeikaseffect, terwijl de meeste aerosolen een afkoelend effect hebben. Door het luchtkwaliteitsbeleid los van het klimaatbeleid valt te verwachten dat de concentratie van aerosolen in de omgevingslucht zal afnemen, waardoor hun afkoelend effect zal dalen. In vergelijking met de stoffen die onder het Kyoto- en het Montreal-protocol vallen, hebben ozon en aerosolen een erg korte verblijftijd in de atmosfeer (vaak slechts enkele dagen of weken). Hun concentraties vertonen mondiaal grote verschillen en hun gemiddelde concentratie en effect op de stralingsbalans van de aarde kunnen maar met grote onzekerheid worden bepaald. Daarom zijn ze niet meegenomen in figuur 4;
- waterdamp: levert eigenlijk de belangrijkste bijdrage aan het natuurlijk broeikaseffect, maar in tegenstelling tot de andere broeikasgassen is de directe invloed van de mens op de concentratie ervan minimaal en is de verblijftijd van watermoleculen in de atmosfeer veel korter dan die van de andere ('langlevende') broeikasgassen. Daarom wordt water(damp) buiten beschouwing gelaten bij de opvolging van de stralingsforcering.



---

2

REEDS WAARGENOMEN KLIMAATVERANDERING



## 2 REEDS WAARGENOMEN KLIMAATVERANDERING<sup>2</sup>

---

Een verhoogde concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer zorgt voor een toename van de gemiddelde temperatuur op aarde met verschuiving van de klimaatzones en wijzigingen in extreme weersfenomenen tot gevolg. We gaan na in hoeverre verschillende klimaatindicatoren voor Vlaanderen en België reeds wijzigingen vertonen, en toetsen het verloop van deze indicatoren ook af aan de evoluties binnen Europa en mondiaal.

In dit hoofdstuk werd voor heel wat indicatoren door MIRA een statistische analyse uitgevoerd op de beschikbare datasets. Als er sprake is van statistisch significante trends of verschillen, hebben die uitspraken een betrouwbaarheid van minstens 95 %. Waar mogelijk wordt de trendlijn bepaald met een methode die geen voorafnames doet wat betreft de vorm van de trendlijn. Het resultaat kan dus zowel een niet-lineaire als een lineaire trendlijn zijn. Bovendien wordt het 95 %-betrouwbaarheidsinterval voor de ligging van de trendlijn weergegeven. De gehanteerde analysemethode levert ook informatie aan over de snelheid van de verandering en de verschillen tussen de laatste meting en de voorgaande metingen. Als deze methode niet toepasbaar blijkt, wordt een methode toegepast die gebaseerd is op lineaire regressie.

### 2.1 Temperatuur

---

#### 2.1.1 Jaargemiddelde temperatuur

---

*Gemiddelde temperatuurstijging mag maximaal 2 °C bedragen*

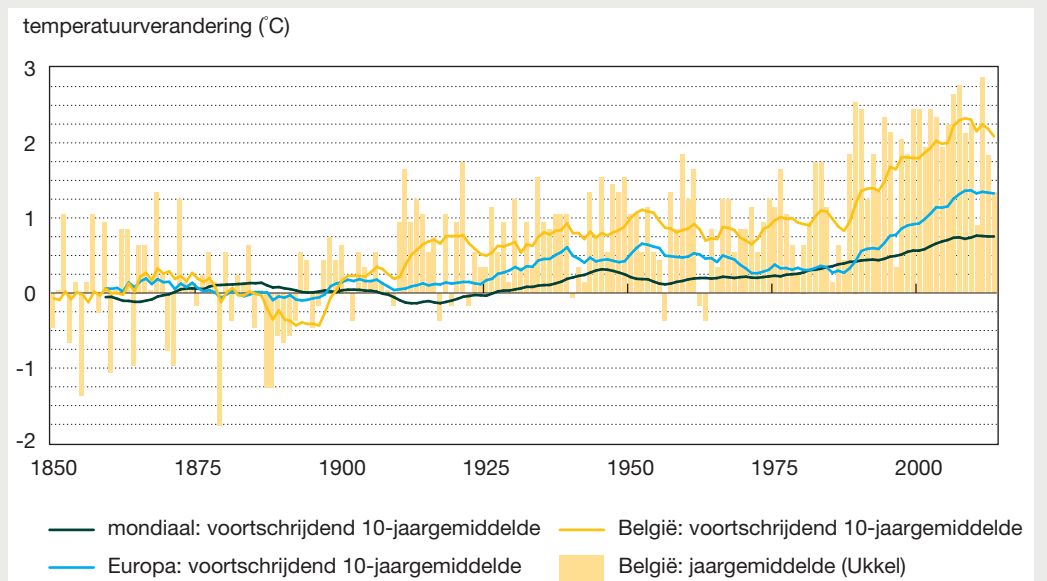
Het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties uit 1992 bepaalt dat de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer moet worden gestabiliseerd op een niveau waarop geen gevaarlijke menselijke verstoring van het klimaatstelsel optreedt. Dit moet gebeuren binnen een termijn die ecosystemen toelaat zich op natuurlijke wijze aan te passen aan de klimaatverandering, die de voedselvoorziening verzekert en die de economische ontwikkeling op een duurzame manier laat voortgaan. In de EU is in 2008 afgesproken dat daartoe de mondiale jaargemiddelde temperatuur maximum 2 °C mag stijgen ten opzichte van de periode voor het industriële tijdperk. Sinds eind 2010 hebben ook de landen onder het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties (UNFCCC) de stabilisatiedoelstelling van 2 °C overgenomen. Omdat (zeker binnen Europa) de jaargemiddelde temperaturen in de pre-industriële periode 1750-1799 erg gelijkaardig zijn aan deze in de periode 1850-1899 en in deze laatste periode metingen voor veel meer locaties beschikbaar zijn, wordt voor de toetsing aan de 2 °C-doelstelling doorgaans gewerkt met 1850-1899 als referentieperiode.

2 Dit hoofdstuk is in hoofdzaak gebaseerd op de MIRA-indicatoren van het milieuthema klimaatverandering, zoals raadpleegbaar op <http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/klimaatverandering/>. § 2.1.4 steunt volledig op De Ridder *et al.* (2015). Andere bronnen staan in de tekst zelf vermeld.

### Mens jaagt mondiale temperatuur omhoog

Mondiaal nam de gemiddelde oppervlaktetemperatuur op aarde toe met bijna 0,8 °C tussen 1850 en 2013 (figuur 5). Daarmee werd al ruim een derde van de marge tot de stabilisatiedoelstelling van 2 °C ingenomen. Ondanks enkele korte periodes van afkoeling (eind 19<sup>de</sup> eeuw, de jaren 20 en de jaren 50) kende de jaargemiddelde temperatuur op aarde de laatste 140 jaar een belangrijke stijging. Die stijging is zowel in omvang als in snelheid ongewoon, en overtreft ruimschoots de natuurlijke klimaatfluctuaties van de laatste duizend jaar. De laatste drie decennia waren warmer dan alle vorige decennia sinds 1850. Het noordelijk halfrond blijkt bovendien sneller op te warmen dan het zuidelijk halfrond. Een voorlopige analyse van de meest recente meetgegevens geeft bovendien aan dat de mondiale temperatuur in 2014 nog verder opliep, en dat 2014 met een jaargemiddelde temperatuur van 14,57 °C het warmste jaar was sinds de start van de metingen (WMO, 2015).

**Figuur 5: Afwijking van de jaargemiddelde temperatuur in België, Europa en mondiaal (1850-2013)**



Als referentieperiode voor toetsing aan de 2 °C-doelstelling worden de metingen in de periode 1850-1899 gebruikt. De temperatuurverandering wordt uitgedrukt als 1) de afwijking van de jaargemiddelde temperatuur ten opzichte van de gemiddelde temperatuur tijdens de referentieperiode 1850-1899, en 2) het tienjarige voortschrijdende gemiddelde van de afwijking t.o.v. dezelfde referentie.

Bron: MIRA op basis van KMI, EEA en UK Met Office Hadley Centre and Climate Research Unit

Voorals sinds de jaren 70 van de vorige eeuw nam de temperatuur steeds sneller toe tot het niveau van 0,24 °C per decennium. De laatste 10 à 15 jaar warmt het aardoppervlak echter minder snel op. Die rem op de recente temperatuuroename wordt quasi evenredig toegeschreven aan natuurlijke oorzaken (meer vulkaanuitbarstingen en een periode van verminderde zonneactiviteit) en aan een verkoelende bijdrage door de interne variabiliteit in het aardse klimaatsysteem (herverdeling warmte in diepere oceanen). Niettemin blijft de jaargemiddelde temperatuur op aarde verder stijgen, zodat de 29 warmste jaren sinds 1850 allemaal in de periode vanaf 1980 liggen.

Het IPCC wijst de toename van de mondiale temperatuur in de laatste decennia vooral toe aan antropogene activiteiten, waarbij de uitstoot van broeikasgassen heeft geleid tot een stijging van de concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer. Ook natuurlijke factoren zoals de verandering in zonne- en vulkaanactiviteit beïnvloeden de jaargemiddelde temperatuur op aarde, maar deze factoren kunnen de substantiële opwarming van de laatste 50 jaar niet verklaren.

#### *Opwarming in Europa is nog groter*

34

Boven het Europese landoppervlak is de temperatuur nog sterker gestegen dan het mondiale gemiddelde: een toename met 1,3 °C ten opzichte van de pre-industriële referentie (figuur 5).

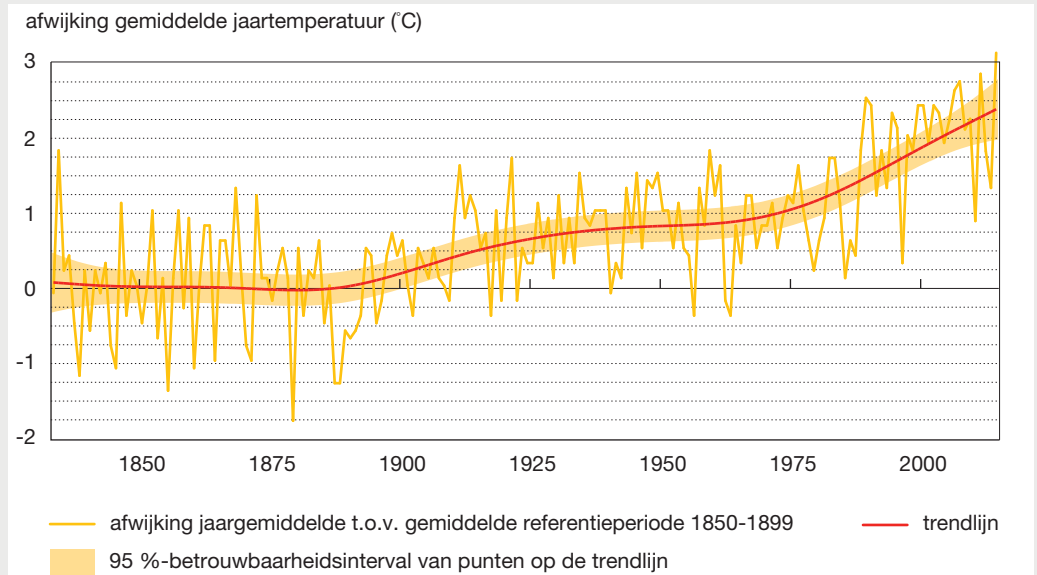
Tot nog toe stonden 2007 en 2008 gekend als respectievelijk het warmste en het tweede warmste jaar sinds 1850. Maar de eerste analyses voor het Europese landoppervlak geven voor 2014 een absoluut temperatuurrecord aan met een jaargemiddelde van circa 11,22 °C (Photiadou *et al.*, 2015). 2012 en 2013 vallen net buiten de top tien van warmste jaren op het Europese vasteland. En de 18 warmste jaren sinds 1850 lagen allemaal in de periode 1989-2013.

#### *België (Ukkel) is nu bijna 2,4 °C warmer dan in pre-industriële periode*

Ook in België vertonen de metingen een duidelijk stijgende trend (figuur 5). De statistische analyse van de jaargemiddelde temperatuur in Ukkel (figuur 6) geeft aan dat die temperatuur significant stijgt sinds eind 19<sup>de</sup> eeuw. Halverwege de 20<sup>ste</sup> eeuw viel de stijging bijna stil, maar sinds de jaren 60 van de vorige eeuw ging de temperatuur steeds sneller stijgen, tot wel +0,4 °C per decennium. Sinds begin jaren 90 neemt de snelheid van de stijging niet langer toe: de trendlijn van de jaargemiddelde temperatuur blijft verder stijgen aan eenzelfde tempo van bijna +0,4 °C per decennium. De trendlijn van de jaargemiddelde temperatuur geeft aan dat het in Ukkel ondertussen gemiddeld bijna 2,4 °C warmer is dan in de pre-industriële periode (figuur 6).

De 18 warmste jaren sinds het begin van de metingen in Ukkel (1833) liggen allemaal in de periode 1989-2014. Het absolute recordjaar was bovendien 2014 met een jaargemiddelde van 11,9 °C. In België (Ukkel) wordt de top drie van warmste jaren vervolledigd door 2011 (11,6 °C) en 2007 (11,5 °C).

**Figuur 6:** Jaargemiddelde temperatuur uitgedrukt als afwijking t.o.v. gemiddelde in de periode 1850-1899 (Ukkel, 1833-2014)



Bron: MIRA op basis van KMI

### *Invloed verstedelijking*

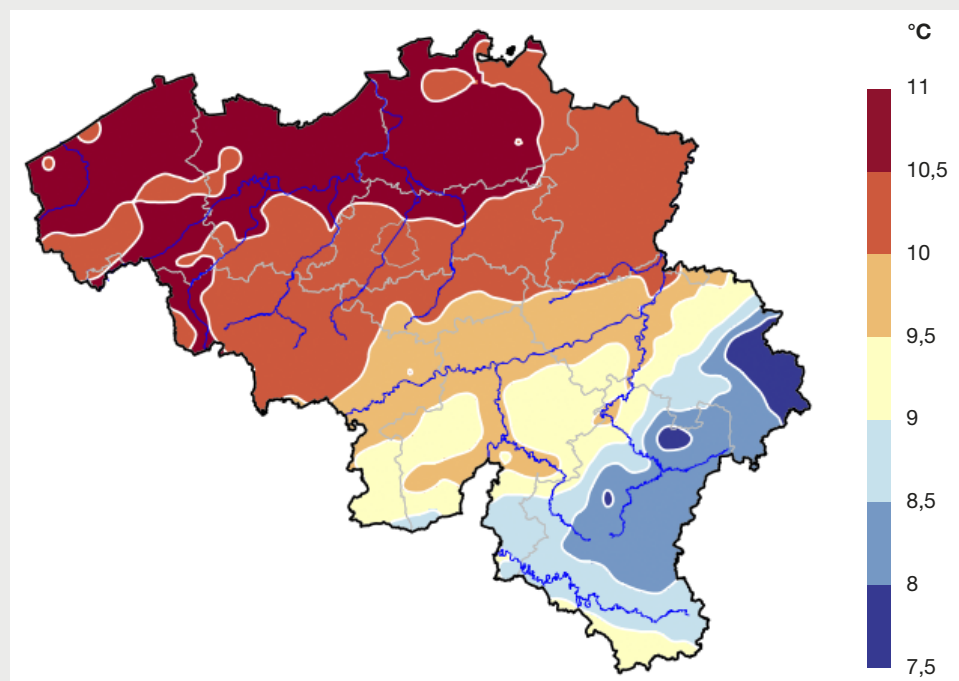
Uit analyses van het KMI, de KU Leuven en VITO blijkt dat de temperatuurstijging in Ukkel voor een deel ook veroorzaakt kan zijn door het zogenaamde hitte-eilandeffect (zie § 2.1.4). Zo wordt een kwart van de temperatuurstijging in de zomer, opgetekend te Ukkel tussen 1960 en 1999, toegewezen aan een intensivering van het stedelijke effect in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (KMI, 2015a). Onder invloed van een verstedelijking van het landschap, wijzigt immers het lokale windklimaat en komen meer materialen als beton en asfalt voor die beter de warmte capteren. Dit leidt vooral 's nachts tot de vorming van hitte-eilanden, waarbij de stad minder afkoelt dan het omliggende platteland.

### *Ruimtelijke patronen*

In 2015 lanceerde het KMI een Belgische klimaatatlas die de ruimtelijke spreiding van verschillende meteorologische parameters in kaart brengt voor het huidige klimaat. De dertigjarige referentieperiode die daarbij wordt gehanteerd betreft 1981-2010. Uit figuur 7 blijkt dat de jaargemiddelde temperatuur oploopt van het zuidoosten naar het noordwesten van ons land, en van 7,5 °C op de Hoge Venen en sommige Ardense toppen tot ruim 11 °C in de Kempen. Het jaargemiddelde voor het Belgische grondgebied in zijn geheel bedroeg 9,8 °C in de periode 1981-2010. Warmste en koudste maanden waren respectievelijk de maanden juli (17,8 °C) en januari (2,5 °C). De opgetekende dagelijkse maximum- en minimumtemperaturen vertonen steeds variaties van circa 4 °C binnen het Belgisch grondgebied, onafhankelijk van de maand of het seizoen. Hun verdeling wordt

hoofdzakelijk bepaald door twee factoren: de afstand tot de zee en de hoogteligging. De temperatuur van het zeewater verandert uiterst langzaam, wat de seizoensvariatie van de temperatuur aan de Kust afzwakt en vertraagt: de winter is er zachter en de zomer frisser dan in het binnenland. Buiten de kuststreek daalt de temperatuur gemiddeld met 0,6 °C voor elke 100 meter hoogteverschil.

*Figuur 7: Ruimtelijk patroon in jaargemiddelde temperatuur onder het huidig klimaat (België)*



Huidig klimaat is hier bepaald voor de referentieperiode 1981-2010.

Bron: KMI (2015b)

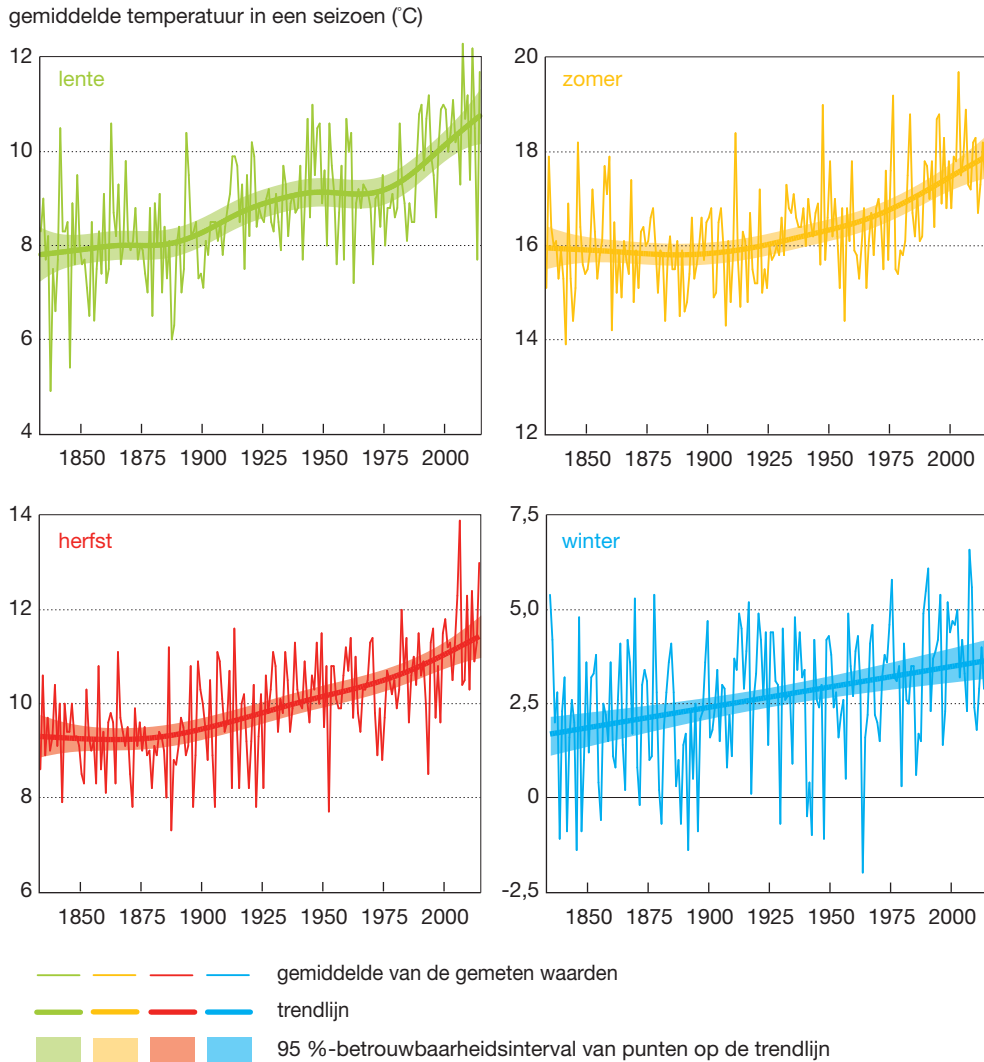
Met uitzondering van de kustzone vertoont de ruimtelijke verdeling van het aantal dagen met erg hoge temperaturen (zomerse en tropische dagen; zie § 2.1.3) grote gelijkenissen met het patroon in figuur 7. De hoogste waarden worden opgetekend in de Kempen en de laagste op de Hoge Venen en sommige Ardense toppen, met daarnaast een positieve gradiënt van de Kust naar het binnenland in Laag- en Midden-België. Het voorkomen van dagen met erg lage temperaturen (vorst- en ijsdagen; zie eveneens § 2.1.3) lijkt weinig te zijn beïnvloed door de nabijheid van de zee en vertoont een relatief gelijkmatige verspreiding in Laag- en Midden-België. Daartegenover zijn de variaties belangrijk in Hoog-België, met de hoogste waarden op de Hoge Venen (KMI, 2015b).

### 2.1.2 Seizoenen

De meetreeksen geven aan dat in ons land alle seizoenen warmer worden. Figuur 8 geeft voor de vier seizoenen een significante stijging aan. Toch zijn er ook verschillen:

- de temperatuurstijging is het sterkst in de lente, en het patroon van de stijging is erg gelijkend op dat van de jaargemiddelde temperatuur. De trendlijn geeft aan dat in 2014 de lentetemperatuur al 3,0 °C hoger ligt dan in 1833. Over de laatste tien jaar bedroeg de stijging nog 0,4 °C;
- in de zomermaanden stijgt de temperatuur meer geleidelijk. De zomertemperatuur ligt 1,9 °C hoger dan bij het begin van de metingen. De stijging blijft ook in de laatste jaren significant, en het stijgingsritme bedraagt ondertussen 0,3 °C per decennium;
- de herfsttemperatuur komt inmiddels 2,1 °C uit boven het niveau van 1833, en stijgt momenteel aan bijna 0,3 °C per decennium. Ook deze stijging blijft de laatste jaren significant aanhouden;
- van de vier seizoenen vertoont de winter de grootste variatie in gemiddelde temperatuur. Toch vertoont over de jaren heen ook de wintertemperatuur een significante stijging: 2,0 °C hoger in 2014 dan in 1834. Het significante stijgingstempo bedraagt ondertussen 0,1 °C per decennium.

**Figuur 8:** Gemiddelde temperatuur in de lente (linksboven), de zomer (rechtsboven), de herfst (linksonder) en de winter (rechtsonder) (Ukkel, 1833/1834-2014)



De winter van een jaar X bestaat uit de maanden januari en februari van jaar X, samen met de maand december van jaar X-1.

Bron: MIRA op basis van KMI



### 2.1.3 Hittegolven en andere temperatuurextremen

De kwetsbaarheid van mens en natuur voor klimaatverandering wordt niet alleen bepaald door wijzigende jaar- en seizoensgemiddelden, maar ook, en zelfs nog meer, door wijzigende extremen. Bovendien verhogen extreme temperaturen ook de blootstelling aan diverse schadelijke stoffen, zoals troposferische ozon en fijn stof. Daarom brengen we de temperatuurextremen in beeld door het aantal (erg) warme en koude dagen in een jaar op te volgen:

- vorstdagen: dagen waarop de minimumtemperatuur onder 0 °C ligt;
- ijsdagen: dagen waarop de maximumtemperatuur onder de 0 °C ligt;
- zomerse dagen: dagen waarop de maximumtemperatuur 25 °C of meer bedraagt;
- tropische dagen: dagen waarop de maximumtemperatuur 30 °C of meer bedraagt.

Ook het voorkomen en de karakteristieken van hittegolven worden geanalyseerd.

#### *Significant meer tropische dagen*

Wanneer we kijken naar het voorkomen van het aantal dagen met (erg) hoge of lage temperaturen, dan blijkt er enkel een significante, lineair stijgende trend te zijn voor het aantal tropische dagen (figuur 9 linksboven): voor het meetpunt in Ukkel tellen we per 17 jaar 1 extra tropische dag in een jaar. De eveneens stijgende trend voor het aantal zomerse dagen in een jaar is evenwel niet significant<sup>3</sup> (figuur 9 rechtsboven).

Voor het aantal vorstdagen en ijsdagen geven respectievelijk de figuren linksonder en rechtsonder een dalende trend aan, maar ook die trend blijkt niet significant.

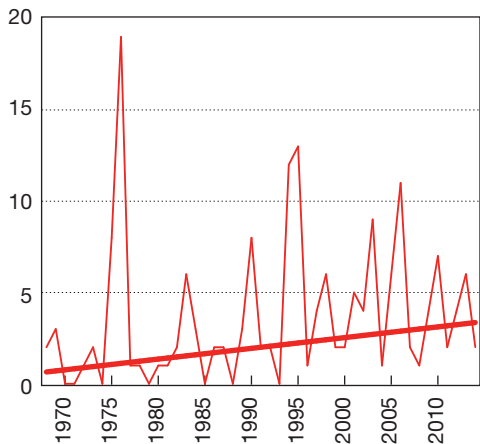
#### *Hittegolven duren nu dubbel zo lang in West-Europa*

De schadelijkste klimaateffecten in Europa worden verwacht van de toegenomen frequentie en intensiteit van extreme gebeurtenissen zoals hittegolven. Vooral de laatste twee decennia blijkt de zomertemperatuur op land binnen Europa sterk toegenomen, evenals het aantal hittedagen (maximumtemperatuur >35 °C), tropische nachten (minimumtemperatuur >20 °C) en hittegolven. Zo is de gemiddelde lengte van zomerse hittegolven in West-Europa verdubbeld sinds 1880, en de frequentie van hittedagen zelfs verdrievoudigd. Dagen en langere periodes van erg lage temperaturen zijn dan weer minder frequent geworden.

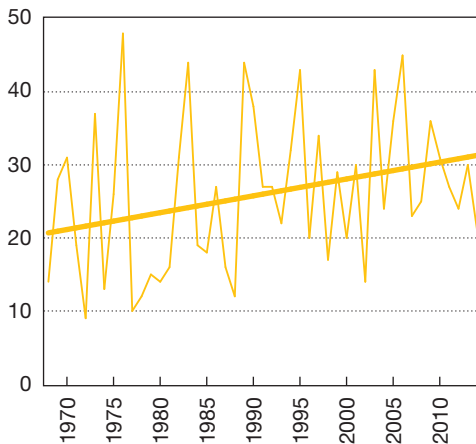
3 MIRA heeft deze analyse uitgevoerd op de metingen in het referentiemeetpunt onder gesloten thermometerhut. Voor deze meetreeks zijn pas gegevens beschikbaar vanaf 1968. Een analyse van het KMI op een langere meetreeks met waarden vanaf 1901 in een halfopen thermometerhut geeft ook voor het aantal zomerse dagen in een jaar een significante stijging aan. Die meetreeks geeft ook een significante daling van het aantal vorstdagen aan (KMI, 2015a).

Figuur 9: Aantal dagen met (erg) hoge of lage temperaturen (Ukkel, 1968-2014)

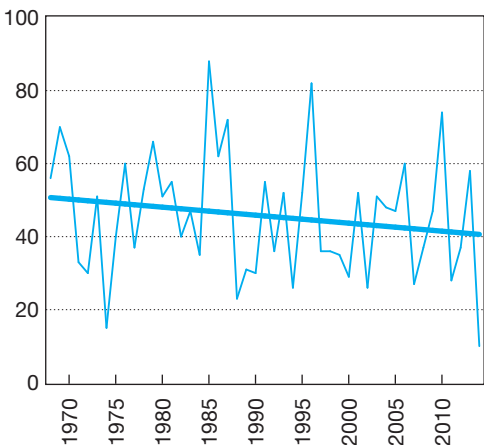
aantal tropische dagen



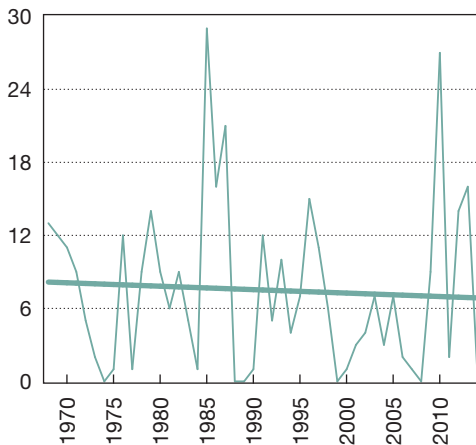
aantal zomerse dagen



aantal vorstdagen



aantal ijsdagen



— aantal waargenomen dagen per jaar

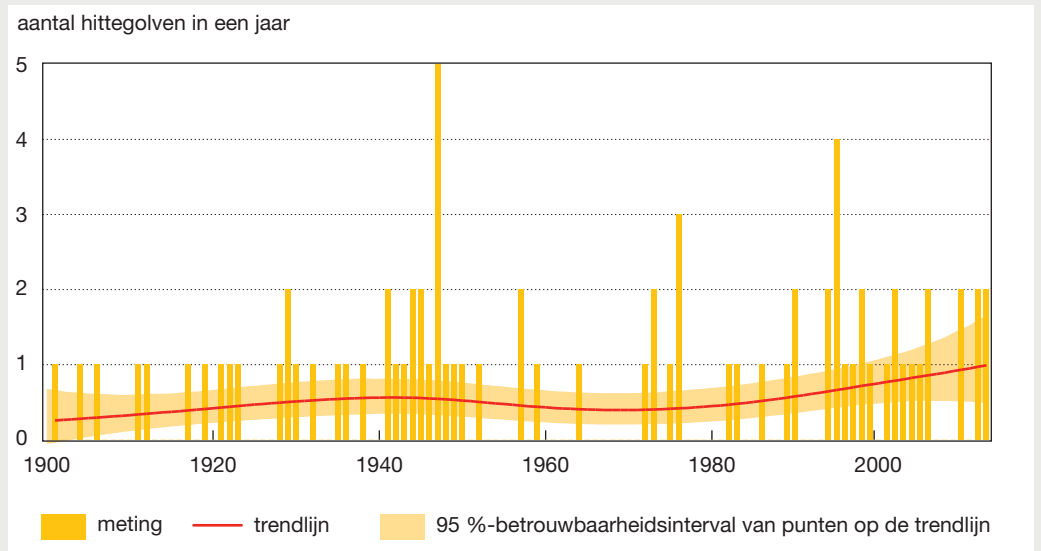
— lineaire trendlijn

### Het golvend patroon van hittegolven

Van jaar tot jaar bekeken, vertoont het aantal hittegolven een grote variabiliteit (figuur 10). Een trendanalyse levert een golvend patroon op met een stijging die nu aanhoudt sinds de jaren 70. Anno 2013 ligt het aantal hittegolven significant hoger dan in het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw. De frequentie aan hittegolven is toegenomen van gemiddeld eens om de drie jaar naar een hittegolf per jaar. Ook 2014 kende een hittegolf.

Naast het aantal hittegolven is het ook belangrijk te kijken naar de lengte (aantal dagen tijdens hittegolven in een jaar), het gewicht (de mate waarin de temperatuur boven de 25 °C uit stijgt) en de intensiteit (verhouding tussen het gewicht en de lengte) van de hittegolven. Analyse voor de periode 1901-2013 laat voor deze drie parameters eveneens een golvend patroon zien met een trendlijn die oploopt sinds de jaren 70, maar enkel voor de lengte van hittegolven blijkt de waarde in 2013 significant hoger te liggen dan bij het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw (figuur 11): in de laatste 10 jaren van de meetreeks (2004-2013) werd een jaargemiddelde van bijna 12 hittegolfdagen opgetekend, daar waar dat in de eerste 10 jaren (1901-1910) nog geen 3 dagen betrof.

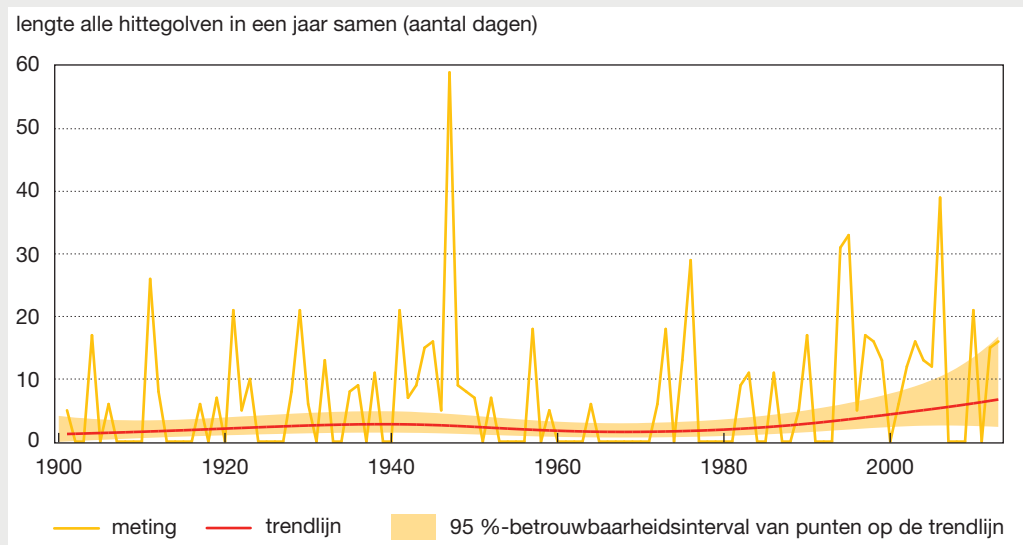
**Figuur 10: Aantal hittegolven per jaar (Ukkel, 1901-2013)**



Een 'hittegolf' is gedefinieerd als een periode van minimum vijf opeenvolgende dagen met een maximumtemperatuur van minstens 25 °C, waarbij de maximumtemperatuur minstens drie dagen groter of gelijk is aan 30 °C. Deze indicator is opgebouwd op basis van de metingen in open hut. De gesloten hut (momenteel de KMI-referentie) wordt in Ukkel slechts gebruikt vanaf 1968.

Bron: MIRA op basis van KMI

Figuur 11: Lengte van hittegolven (Ukkel, 1901-2013)



Een 'hittegolf' is gedefinieerd als een periode van minimum 5 opeenvolgende dagen met een maximumtemperatuur van minstens 25 °C, waarbij de maximumtemperatuur minstens drie dagen groter of gelijk is aan 30 °C. Deze indicator is opgebouwd op basis van de metingen in open hut. De gesloten hut (momenteel de KMI-referentie) wordt in Ukkel slechts gebruikt vanaf 1968.

Bron: MIRA op basis van KMI

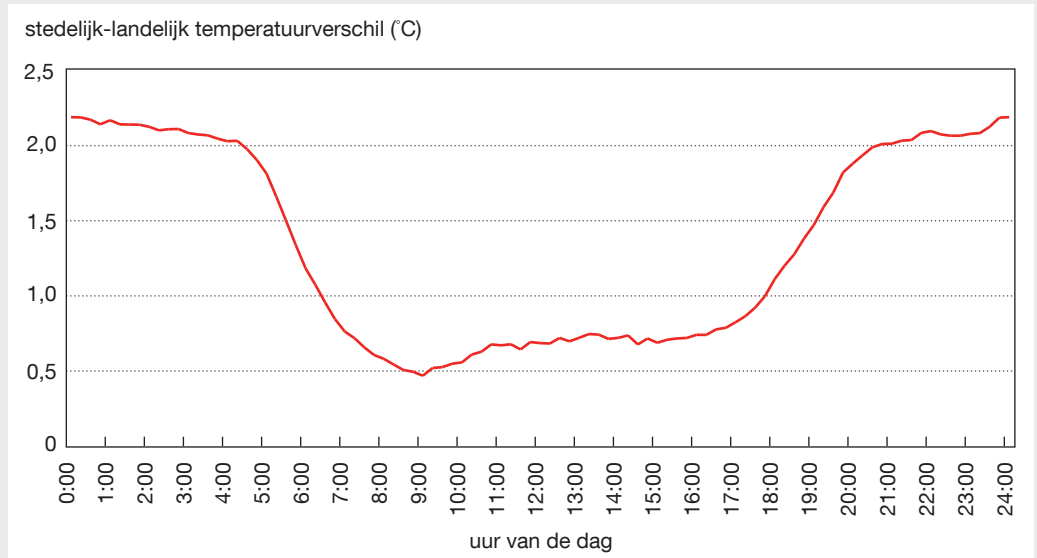
### 2.1.4 Stedelijk hitte-eiland

De temperatuur in steden ligt doorgaans hoger dan in de omringende landelijke gebieden, waardoor stedelingen tijdens hittegolven meer blootgesteld worden aan hittestress. Dit zogenaamde hitte-eilandeffect of UHI-effect (*urban heat island*) neemt bovendien toe tijdens hittegolven onder invloed van atmosferische condities zoals een wolkeloze hemel en lage windsnelheden die zich vaak samen met hittegolven voordoen. Vooral bij ouderen en kinderen leidt dit tot bijkomende oversterfte (zie ook § 4.1). Verder beïnvloedt het fenomeen van het stedelijk hitte-eiland onder andere het energiegebruik (toename o.a. door gebruik van airconditioning), en stimuleert het de algengroei in oppervlaktewater. In de winter daarentegen, ligt de mortaliteit in steden wel lager door de verminderde blootstelling aan koude temperaturen.

#### "Hot in the city"

In vergelijking met het platteland ligt in steden vooral de nachtelijke temperatuur hoger. Gemiddeld loopt dit verschil op tot enkele °C (figuur 12), maar er worden ook dagen genoteerd met uitschieters tot 7 à 8 °C en meer. Hittegolven treden daardoor frequenter én intenser op in steden.

**Figuur 12:** Dagverloop van het gemiddeld temperatuurverschil tussen stad en platteland (Antwerpen, april tot september 2013)



Bron: VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

De oorzaken van het stedelijk hitte-eiland zijn onder meer een verminderde koeling door evapotranspiratie (door de afwezigheid van vegetatie), het invangen van kort- en langgol- vige straling tussen gebouwen, de relatief beperkte warmte-uitwisseling tussen het stedelijk weefsel en de atmosfeer, de hoge thermische inertie van stedelijke materialen, en het vrijkomen van antropogene warmte (door o.a. gebouwenverwarming, het gebruik van airco-installaties en verkeer).

Hoewel het fenomeen van een stedelijk hitte-eiland al meer dan 180 jaar gekend is, heeft het pas recent aan belang gewonnen. De verhoogde aandacht kwam er enerzijds door de groei van stedelijke gebieden en hun inwonersaantallen, en anderzijds door de verwachte toename van de hittestress door de globale klimaatverandering.

Er bestaan bovendien aanwijzingen dat het vooral de hoge nachtelijke minimumtempera- turen zijn die aanleiding geven tot gezondheidsproblemen. Na blootstelling overdag aan hittestress, kunnen mensen dan 's nachts onvoldoende rusten en dus onvoldoende recu- pereren. Daarom moeten niet enkel de dagelijkse temperatuurmaxima opgevolgd worden, maar ook de dagelijkse minima die in steden meestal een stuk hoger liggen dan in lande- lijk gebied. Een analyse van de metingen in Ukkel gaf aan dat het aantal dagen – eigenlijk nachten – waarop de minimumtemperatuur niet onder de 15 °C daalt, vooral de laatste drie decennia significant hoger ligt dan in het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw (KMI, 2015a).

Stedelijke hitte-indicator: hittegolfgraaddagen

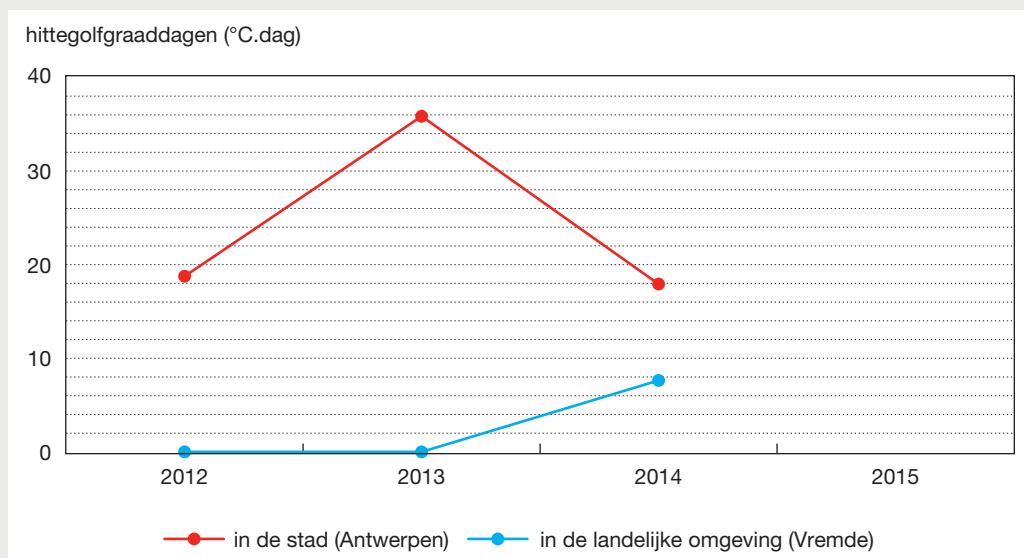
Het stedelijk hitte-eilandeffect kan in cijfers omgezet worden door de indicator 'hitegolfgraaddagen' te hanteren, die voor een gegeven jaar berekend wordt door:

- eerst te bepalen op welke dagen in de periode van 1 april tot 30 september van dat jaar zich een hittegolf voordoet, uitgaande van de definitie van de Federale Overheidsdienst Volksgezondheid: "een periode van minstens drie opeenvolgende dagen met een gemiddelde minimumtemperatuur (gemiddelde over de drie dagen en niet per dag) hoger dan 18,2 °C én een gemiddelde maximumtemperatuur hoger dan 29,6 °C";
- en vervolgens voor die dagen de som te nemen van de overschrijdingen van de dagelijkse maximumtemperatuur boven de drempel van 29,6 °C, samengeteld met de som van de overschrijdingen van de dagelijkse minimumtemperatuur boven de drempel van 18,2 °C.

Zo geeft deze indicator een samengesteld beeld van de totale duur en het gewicht van hittegolven in een jaar. De indicator wordt telkens getoond voor een stedelijke en een nabijgelegen landelijke locatie op eenzelfde grafiek, zodat het stedelijk effect duidelijk is (figuur 13).

44

**Figuur 13: Hitegolfgraaddagen (Antwerpen, 2012-2014)**



Figuur opgemaakt op basis van meetwaarden in Antwerpen (stedelijk) en Vremde (landelijk).

Bron: VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

De indicator kan enkel nog maar voor Antwerpen ingevuld worden. Er zijn immers nog geen permanente meetreeksen beschikbaar voor andere centraal-stedelijke en omliggende landelijke locaties. De meetreeks voor Antwerpen start bovendien pas in 2012. Het is daarom nog wat snel om al besluiten te formuleren over de evolutie in de tijd van het stedelijk hitte-eiland. De volgende elementen blijken wel al uit de beschikbare data:

- in de stad werden in 2013 twee hittegolven kort na elkaar opgetekend, in 2012 en 2014 telkens slechts een. Dat verklaart de hogere waarde voor de stad in 2013;
- als men de hittegolven in de stad afzonderlijk bekijkt (twee in 2013, een telkens in 2012 en 2014), dan is iedere hittegolf ongeveer even intens met een indicatorwaarde van ongeveer 18 hittegolfgraaddagen;
- eigenaardig lijkt op het eerst zicht het feit dat 2014, met de laagste indicatorwaarde voor de stad, tegelijk ook de hoogste waarde voor de landelijke locatie heeft. Uit analyse van de meetwaarden blijkt echter dat de landelijke site in 2014 maar heel nipt voldoet aan de criteria voor een hittegolf. Iets lagere temperaturen zouden ook voor 2014 tot een waarde van 0 graaddagen op de landelijke site geleid hebben.

#### *Simulatie (ontbrekende) meetreeksen met een regionaal klimaatmodel*

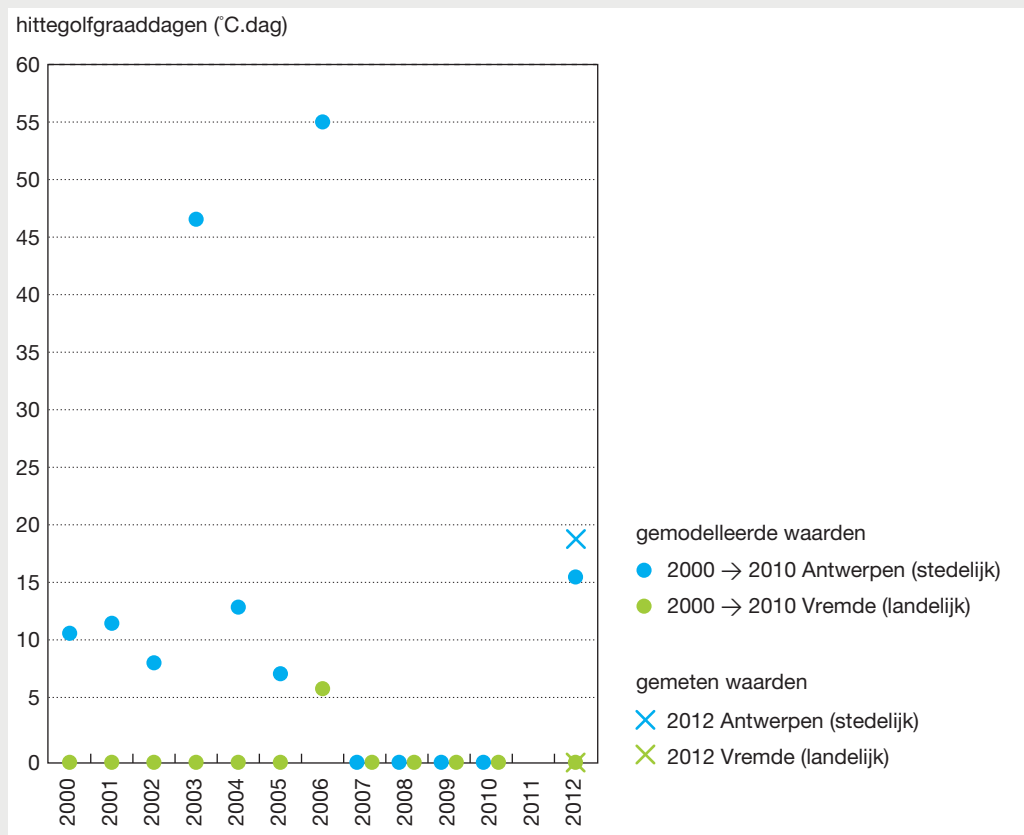
De hierboven uitgewerkte indicator is de meest nauwkeurige, omdat hij gebaseerd is op een directe meting van de luchttemperatuur. Deze indicator kan (momenteel) echter slechts voor één stad (Antwerpen) berekend worden, en dat voor een beperkte periode (vanaf 2012). Aan de hand van een regionaal klimaatmodel (met een resolutie van 2,8 km) met een specifieke stedelijke module werd de indicator echter vrij accuraat retroactief gereconstrueerd voor langere periodes (en meerdere steden in Vlaanderen). Zo kon figuur 13 aangevuld worden tot het resultaat uitgewerkt in figuur 14.

Naast de temporele variabiliteit kan met behulp van klimaatmodellering ook de ruimtelijke variabiliteit van het stedelijk hitte-eilandeffect in beeld worden gebracht. Zo blijkt duidelijk dat zowel voor de historische jaren (2010-2014) als voor de komende decennia (zie § 3.2.4) beduidend meer hittegolfgraaddagen worden opgetekend in de stadscentra dan in de omgevende natuurlijke gebieden. In de landelijke gebieden is het aantal hittegolfgraaddagen trouwens in de meeste jaren van de periode 2000-2012 gelijk aan nul. Enkel in de erg warme zomer van 2006 kwam in Vremde de minimumtemperatuur drie opeenvolgende dagen nipt boven 18,2 °C uit. Er blijkt ook een grote variabiliteit in de tijd te bestaan voor het aantal hittegolfgraaddagen in de stedelijke gebieden, met uitschieters voor de jaren 2003 en 2006. Verder blijkt uit doorrekening van historische jaren met een regionaal klimaatmodel voor Vlaanderen dat het aantal hittegolfgraaddagen sterk beïnvloed wordt door de grootte van de stad.

#### *Satellieten brengen stedelijke hittestress in Vlaanderen in beeld*

Naast meting van de temperatuur in omgevingslucht, kan het stedelijk hitte-eiland ook bestudeerd worden aan de hand van thermisch infrarood satellietbeelden. Deze bieden het voordeel dat ze gebiedsdekkend zijn en beschikbaar voor langere periodes. Nadeel is echter dat deze satellietbeelden wel de temperatuur aan de grond of de oppervlakte-temperatuur tonen, maar niet de omgevingstemperatuur (onderste luchtlaag).

Figuur 14: Hittegolfgaaddagen aan de hand van stedelijke klimaatmodellering (Antwerpen, 2000-2012)



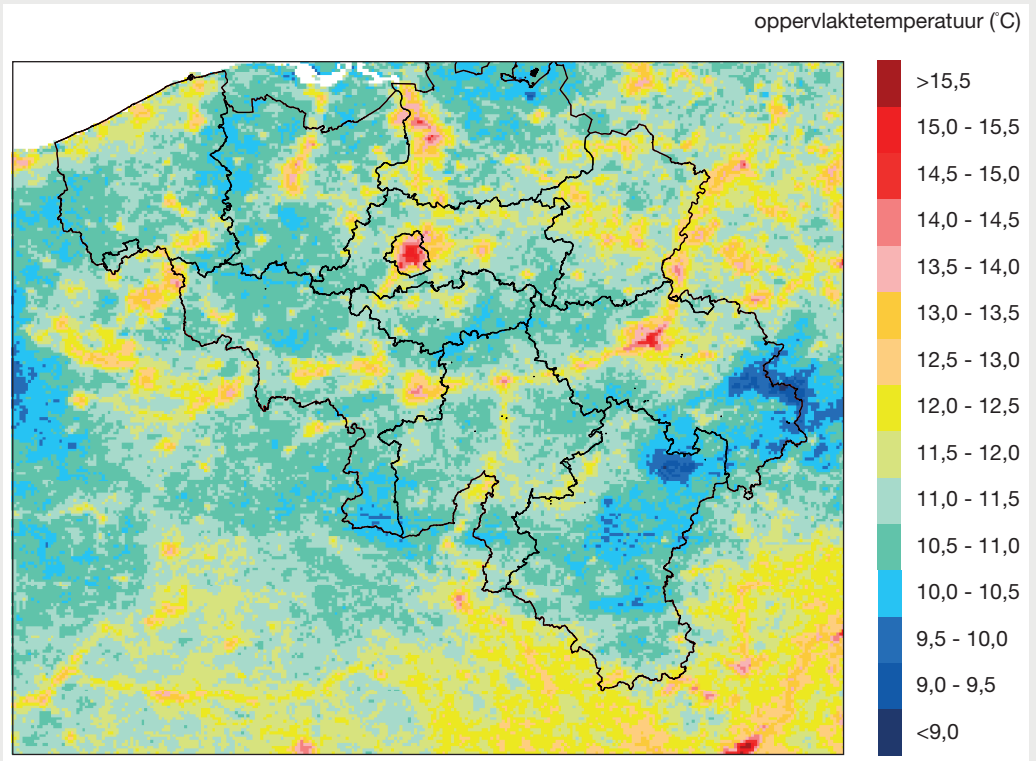
Bron: KU Leuven en VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

De hittestress wordt vooral bepaald door de omgevingstemperatuur, maar er is een duidelijk verband tussen de omgevingstemperatuur en de oppervlaktetemperatuur: hogere oppervlaktetemperaturen dragen bij tot de opwarming van de onderste atmosfeerlaag. Zo hebben groenzones in de stad een lagere oppervlaktetemperatuur dan de bebouwing en de infrastructuur errond, en dragen ze bij tot een lagere luchttemperatuur in de nabije omgeving. Door turbulente menging en grootschalige atmosferische effecten is de relatie tussen oppervlaktetemperatuur en luchttemperatuur echter niet eenvoudig te bepalen. Uit enkele buitenlandse studies blijkt niettemin dat gebieden gekenmerkt door de hoogste nachtelijke oppervlaktetemperaturen ook de hoogste oversterfte kennen tijdens warme periodes.

Op basis van satellietmetingen is een beeld gemaakt van de temperatuur aan de grond (figuur 15). Dit laat toe de hotspots voor hittestress in Vlaanderen te identificeren.



Figuur 15: Jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur (°C) op basis van satellietgegevens (België, 2013)



Jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur afgeleid van de MODIS-satellietsensoren. De verhoogde temperatuur in de steden is duidelijk te zien.

Bron: VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

Er blijkt een duidelijk verband tussen de bevolkingsdichtheid en het hitte-eilandeffect aan de grond. Voor de steden in Vlaanderen kan gemiddeld zo'n 50 à 55 % van de ruimtelijke variabiliteit van de sterkte van het hitte-eiland verklaard worden aan de hand van de bevolkingsdichtheid van een stad of gemeente. Er blijkt nog een sterker verband te bestaan tussen de verhardingsgraad van een stad en de sterkte van het hitte-eiland-effect aan de grond: gemiddeld kan 66 % van de variabiliteit 's nachts tussen de steden in Vlaanderen hierdoor verklaard worden. De steden in Vlaanderen zijn te rangschikken volgens de sterkte van het hitte-eilandeffect zoals bepaald aan de hand van satellietbeelden voor de zomerperiode (april tot september), waaruit we drie groepen kunnen onderscheiden:

- steden met een relatief hoog hitte-eilandeffect: Antwerpen, Gent, Kortrijk, Mechelen, Roeselare, Brugge;
- steden met een gemiddeld hitte-eilandeffect: Sint-Niklaas, Aalst, Leuven, Turnhout, Ieper, Tienen, Geel, Hasselt en Genk;
- steden met een relatief laag hitte-eilandeffect: Aarschot, Sint-Truiden, Lier, Diest.

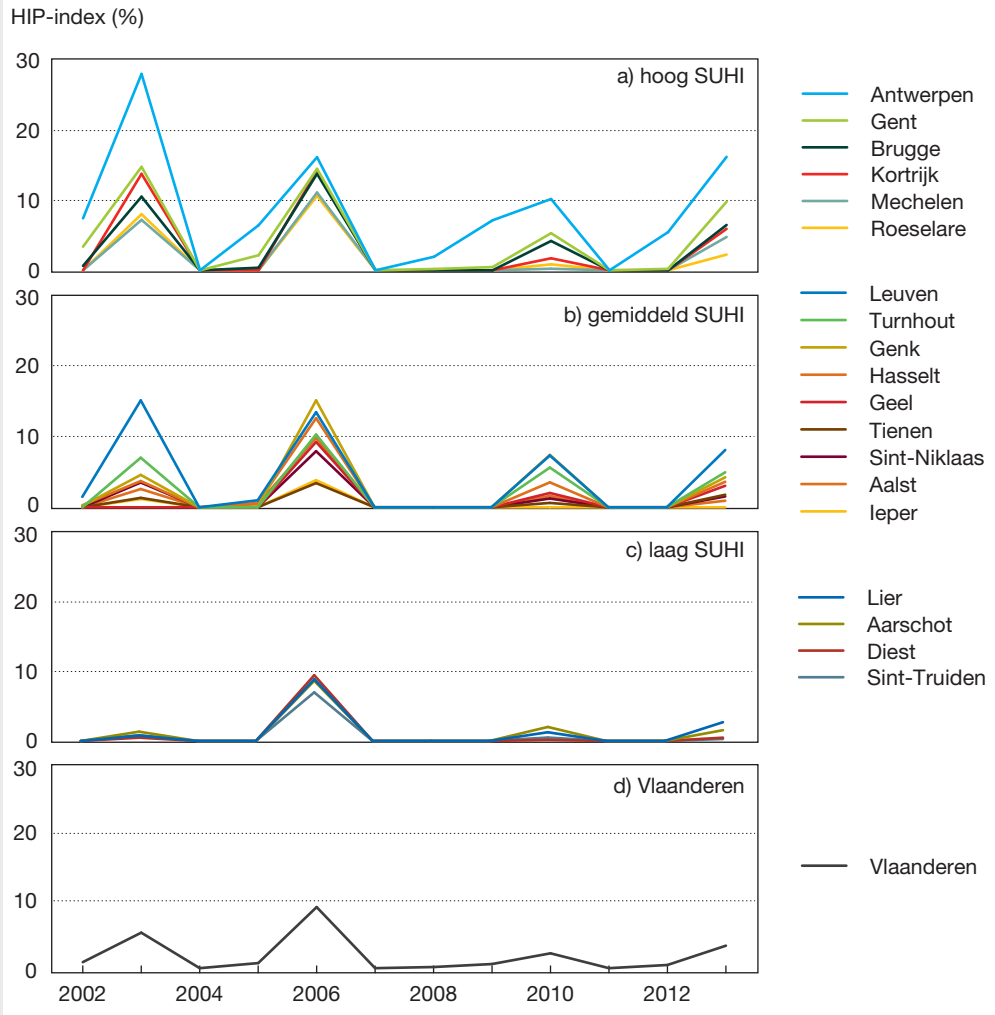
Op basis van satellietbeelden kunnen ook afgeleide indicatoren berekend worden. Zo meet de *Hot Island Population Index* of HIP-index het percentage van de bevolking van een stad of een regio dat woont in gebieden met oppervlaktetemperaturen boven bepaalde drempelwaarden. Zo krijgen we een beeld van het aantal mensen blootgesteld aan verhoogde temperaturen en verhoogde hittestress. De HIP-index voor een stad of regio in een bepaald jaar wordt bepaald door het aandeel te berekenen van de populatie die woont in een gebied met een oppervlaktetemperatuur die overdag hoger is dan 31,5 °C en 's nachts hoger dan 15,7 °C (tijdens de maanden april tot september). Deze drempelwaarden betreffen het 95<sup>ste</sup> percentiel van de oppervlaktetemperatuur respectievelijk overdag en 's nachts in de stedelijke gebieden binnen Vlaanderen in de periode 2002-2013. Figuur 16 toont dat de HIP-index duidelijk verschilt tussen de kernsteden in Vlaanderen, waarbij in Antwerpen een beduidend grotere fractie van de bevolking wordt blootgesteld aan hogere temperaturen. Ook zien we in jaren met erg warme zomers (2003, 2006) een duidelijk hogere blootstelling.

#### *Hoe kunnen we het stedelijk hitte-eiland verhelpen?*

— 48 Het is belangrijk dat de hitteplannen van de overheid afgestemd worden op de stedelijke situatie. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat hittegolven zich vaker en feller doen voelen in steden. Ook de specifieke sociale situatie van stedelingen (bijvoorbeeld meer alleenwonende ouderlingen) is daarbij een belangrijk aandachtspunt.

Het is ook van belang bij de ruimtelijke planning in steden rekening te houden met de invloed van de bebouwing op het lokale klimaat, onder andere door vegetatie en wateroppervlakken in te zetten om de extreme temperaturen lokaal te milderen. Uit onderzoek blijkt dat vooral minder verharding en meer groen in de stad het hitte-eilandeffect kunnen verminderen. Het verkoelende effect van wateroppervlakken blijkt lager te liggen: water kan veel warmte opnemen, waardoor het vooral later in de zomer 's nachts juist warmer kan zijn dan de omgevingslucht. Op zo'n moment draagt water in de stad dus eerder bij tot de hitte in de stad. Toch kunnen grotere waterpartijen ook naar het einde van de zomer toe nog verkoeling brengen wanneer hun oriëntatie in het verlengde ligt van de heersende windrichting: ze laten dan toe dat verkoelende wind dieper doordringt in de stad (Rovers *et al.*, 2014).

Figuur 16: Hot Island Population Index (HIP-index) per stad en voor het geheel van Vlaanderen (Vlaanderen, 2002-2013)



SUHI = oppervlakte hitte-eilanden, of 'surface urban heat island'

De index geeft per stad de gemiddelde fractie van de bevolking aan die gedurende de zomerperiode blootgesteld is aan een gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag hoger dan 31,5 °C en 's nachts hoger dan 15,7 °C. De steden zijn opgedeeld volgens de 3 categorieën met respectievelijk een hoog, gemiddeld en relatief laag hitte-eilandeffect. Onderaan wordt de indicator voor gans Vlaanderen afgebeeld.

Bron: VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

## 2.2 Potentiële evapotranspiratie

---

Naast de neerslag (zie § 2.3) wordt de waterbeschikbaarheid voor mensen, dieren en planten ook bepaald door de evapotranspiratie. Die evapotranspiratie is een verzamelterm voor de waterafgifte door de bodem en de vegetatie aan de atmosfeer. Dit omvat alle neerslag die rechtstreeks in de atmosfeer komt door verdamping of onrechtstreeks via ecosystemen. De 'potentiële evapotranspiratie' (PET, uitgedrukt in mm neerslag per jaar) is de maximaal mogelijke evapotranspiratie die optreedt indien er steeds voldoende water beschikbaar zou zijn aan de oppervlakte of in de bodem. Indien dit laatste niet het geval is, zoals tijdens droge zomerperiodes, is de werkelijk optredende evapotranspiratie lager dan de potentiële. Er wordt gebruik gemaakt van de potentiële evapotranspiratie. De werkelijke evapotranspiratie is namelijk moeilijk te kwantificeren aangezien deze sterk gebiedsafhankelijk is en in functie is van de waterbeschikbaarheid aan de oppervlakte en in de bodem. Een bosgebied of een sterk verstedelijkt gebied hebben daardoor een sterk verschillende evapotranspiratie.

Klimaatrends worden best gedetecteerd op zo lang mogelijke datareeksen. De langst beschikbare tijdreeks voor PET in België is deze van Ukkel. Er zijn dagelijkse gegevens voor PET sinds 1901. De trendanalyse werd uitgevoerd op de volledige tijdreeks, na het berekenen van de jaartotalen of de totalen per groeiseizoen (april tot en met september).

Tussen het begin van de metingen in 1901 en eind jaren 70 vertoont de meetreeks van de jaartotalen geen duidelijke trend. Maar sinds begin jaren 80 loopt de trendlijn voor de jaarlijkse PET duidelijk op (figuur 17). Die stijging is ook significant. Anno 2014 ligt de trendlijn 130 mm hoger dan in 1901, wat overeenkomt met een stijging van ongeveer een kwart. Niet toevallig lijkt de trendlijn sterk op die van de jaargemiddelde temperatuur (figuur 6). Temperatuur is immers een bepalende factor voor verdamping.

De evolutie van de PET in het groeiseizoen verloopt analoog. Ook die stijging is significant. Anno 2014 ligt de trendlijn ervan 92 mm hoger dan in 1901.

## 2.3 Neerslag

---

Verhoogde temperaturen op aarde leiden tot een verstoring van het huidige klimaat. De indicatoren in deze paragraaf gaan na of de aan de gang zijnde klimaatverandering ook in ons land al leidt tot wijzigende neerslagpatronen.

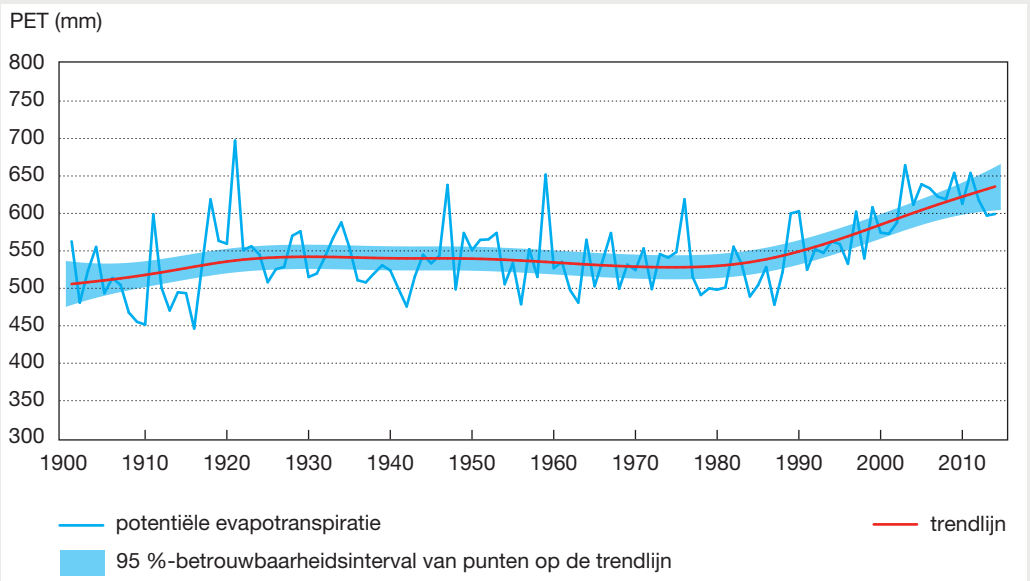
### 2.3.1 Jaarlijkse neerslag

---

#### *Wijzigend neerslagpatroon onder invloed van menselijke activiteiten*

Wetenschappers hebben aangetoond dat menselijke activiteiten de hoofdoorzaak vormen van de neerslagveranderingen op aarde waargenomen tussen 1925 en 1999. Tussen 40° en 70° noorderbreedte – waarbinnen ook het gros van Europa valt, met uitzondering van Cyprus, Malta, Griekenland, de zuidelijke helft van Spanje/Portugal en het zuiden van Italië – nam de neerslag gemiddeld met 6,2 mm per decennium toe. De bijdrage van menselijke activiteiten hierin wordt begroot op 50 tot 85 %.

Figuur 17: Evolutie van de jaarlijkse potentiële evapotranspiratie (Ukkel, 1901-2014)



Bron: MIRA op basis van KMI

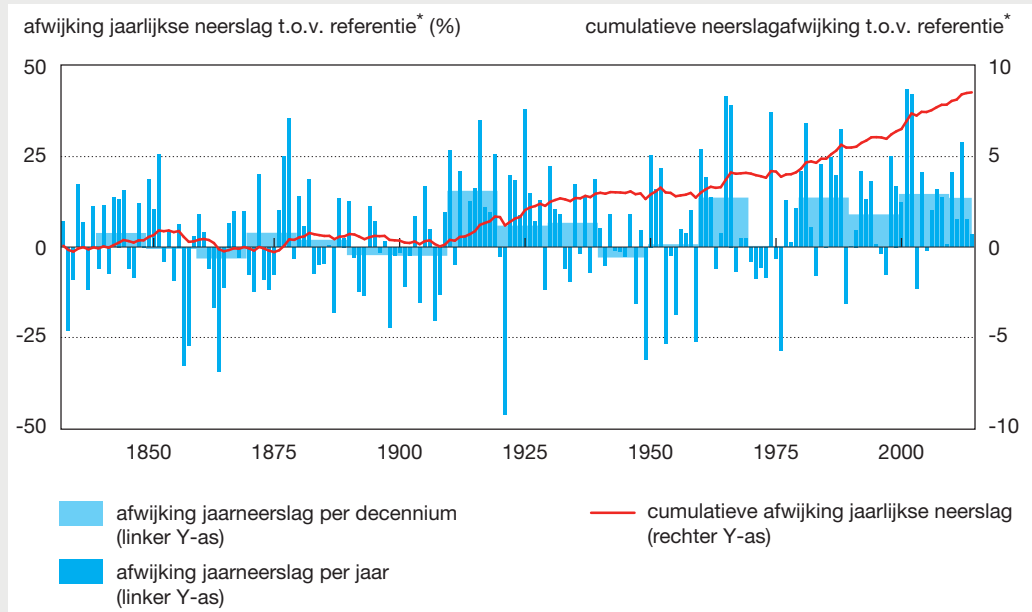
Inmiddels blijkt dat in het gros van de noordelijke helft van Europa, waaronder ook Vlaanderen en Noord-Frankrijk, de jaargemiddelde neerslag tussen 1960 en 2013 verder toeneemt. Die toename wordt vooral door veranderingen in de winterneerslag veroorzaakt. Grote delen in het zuiden van Europa zien de neerslag echter afnemen, vooral door minder neerslag in de zomermaanden.

#### *Toenemende neerslag in België*

Sinds het begin van de waarnemingen in Ukkel zijn 2001 en 2002 de absolute recordjaren met neerslaghoeveelheden van respectievelijk 1 088,5 mm en 1 077,8 mm.

In ons land komen steeds nadrukkelijker meer natte dan droge jaren voor. Figuur 18 brengt de afwijking in beeld van de jaarlijkse neerslaghoeveelheid vergeleken met het gemiddelde van 758 mm/jaar in de referentieperiode 1850-1899 (zie ook § 2.1.1). De trend naar nattere jaren wordt vooral duidelijk bij de lijn die de gecumuleerde afwijking weergeeft. In de 19<sup>de</sup> eeuw bleef deze lijn rond het nulpunt schommelen. Maar sinds het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw zien we een duidelijke toename, die nog versterkt vanaf de jaren 70. Voor het eerst sinds de start van de metingen zien we ook zes opeenvolgende decennia met een jaarlijkse neerslag boven deze van de referentieperiode.

**Figuur 18: Neerslag per jaar en per decennium (Ukkel, 1833-2014)**



\* jaargemiddelde neerslag in de periode 1850-1899, nl. 758 mm

Bron: MIRA op basis van KMI

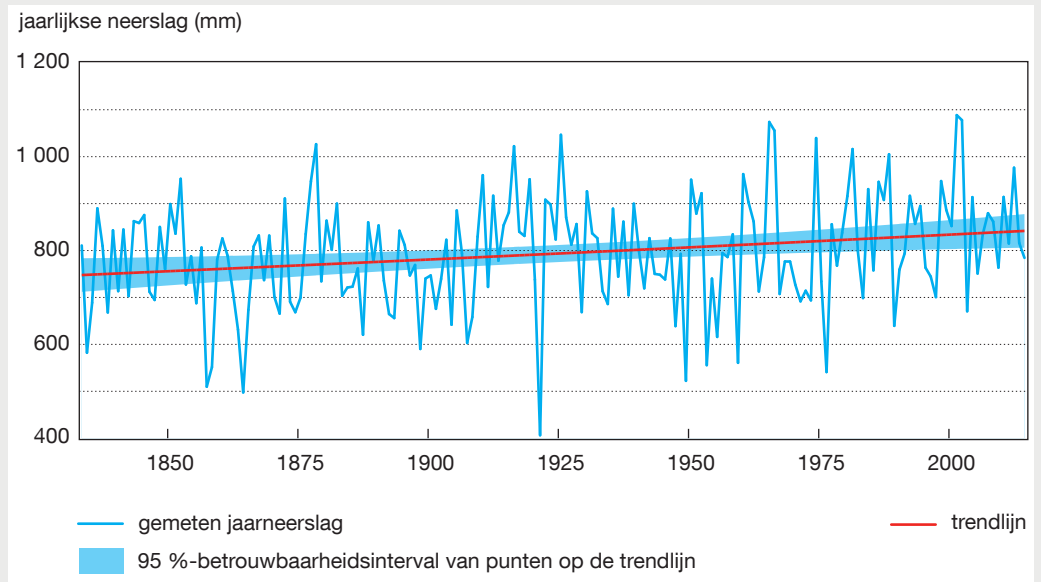
Van jaar tot jaar vertoont de neerslaghoeveelheid een erg grote variabiliteit. Bovendien zijn er langere periodes geweest met meer neerslag, bijvoorbeeld rond 1920, 1960 en 2000. Maar statistische analyse van de hele datareeks kan helpen om een langetermijntrend bloot te leggen. Uit die analyse blijkt dat ons land (meetpunt Ukkel) een langzame, maar significante stijging van de jaarlijkse neerslag kent (figuur 19). Die stijging blijft aanhouden met 0,55 mm/jaar of ruim een halve cm per decennium. Uit de trendlijn blijkt dat de jaarlijkse neerslag momenteel ongeveer 94 mm hoger ligt dan bij het begin van de metingen.

Net als in 2013 komt het jaartotaal van 2014 iets beneden de langetermijntrend uit, met een totaal van 784 mm. 2012 bleek daarentegen een erg nat jaar te zijn (977 mm in Ukkel) dat net buiten de top tien viel van natste jaren sinds de start van de metingen in 1833.

*Ruimtelijke patronen*

Figuur 20 legt de patronen in jaargemiddelde neerslag binnen België bloot voor de referentieperiode van het huidig klimaat (1981-2010). Daaruit blijkt dat er binnen Vlaanderen nauwelijks verschillen worden opgetekend. Meer naar het zuiden van ons land kunnen de verschillen wel sterk oplopen.

Figuur 19: Analyse evolutie jaarlijkse neerslag (Ukkel, 1833-2014)



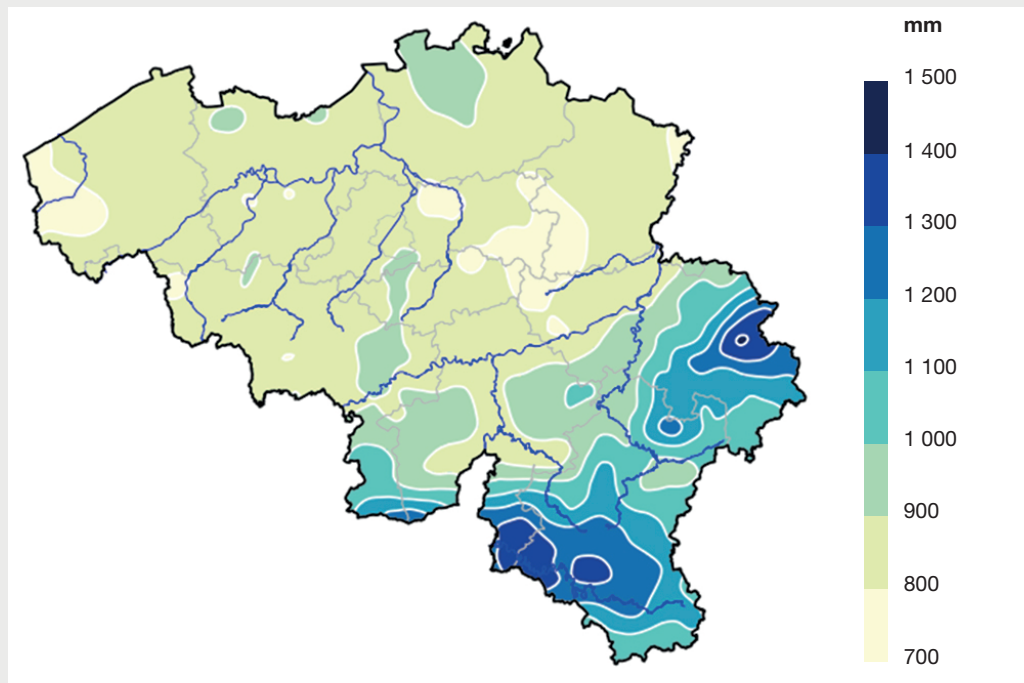
Bron: MIRA op basis van KMI

De waarden evolueren van 740 mm/jaar in het noorden van Haspengouw (de streek van Sint-Truiden) tot meer dan 1 400 mm/jaar op de Hoge Venen, of een verdubbeling tussen de droogste en natste plaatsen. Het gemiddelde voor België bedraagt 925 mm/jaar. Algemeen gezien wordt de jaargemiddelde neerslag beïnvloed door het reliëf. Langs de ene kant kennen de hoogstgelegen sites gemiddeld gezien grotere neerslaghoeveelheden dan de lager gelegen gebieden, maar langs de andere kant speelt de oriëntatie van de hellingen tegenover de overheersende regenbrengende winden (ZW) ook een rol.

De maandelijkse neerslaghoeveelheden in de kuststreek zijn algemeen gezien bij de laagste van het land. Enkel in de herfst ligt de neerslag hoger aan de kust dan in Laag- en Midden-België door de hogere temperatuur van het zeewater. Ook in het noorden van Haspengouw valt er, uitgezonderd voor de periode van april tot augustus, weinig neerslag. Voor de periode van september tot en met december valt er zelfs de minste neerslag van heel het land.

Ook het voorkomen van dagen met gewone ( $\geq 1$  mm) tot zware ( $\geq 10$  mm) neerslag vertoont een patroon erg gelijkaardig als dat in figuur 20 (KMI, 2015b).

**Figuur 20:** Ruimtelijk patroon in jaargemiddelde neerslag onder het huidig klimaat (België)



Huidig klimaat is hier bepaald voor de referentieperiode 1981-2010.

Bron: KMI (2015b)

### 2.3.2 Seizoenen

Deze indicator gaat na in hoeverre er in België wijzigingen optreden in de hoeveelheid neerslag per seizoen of in het aantal dagen met meetbare neerslag ( $\geq 0,1$  mm/dag).

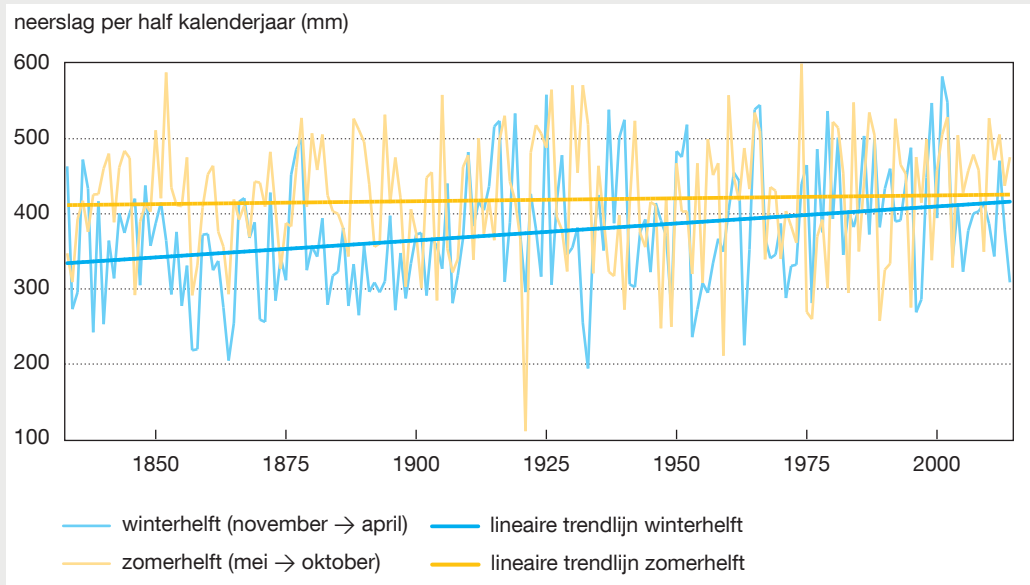
#### *Nattere winters*

De veranderingen in neerslag kunnen zich niet enkel tonen door veranderende jaartotalen. Belangrijker nog met het oog op de mogelijke impact, zijn de verschuivingen per seizoen. In Noord- en West-Europa doen de veranderingen in neerslag zich het sterkst voor tijdens de wintermaanden (+20 à +40 %).

Wanneer we kijken naar de volledige datareeks 1833-2014, tekent zich in België (Ukkel) enkel tijdens de winter en winterjaarhalfst een significante toename van de neerslaghoeveelheid af (figuur 21, 22). De neerslaghoeveelheid in de andere seizoenen verandert niet of nauwelijks (figuur 22).

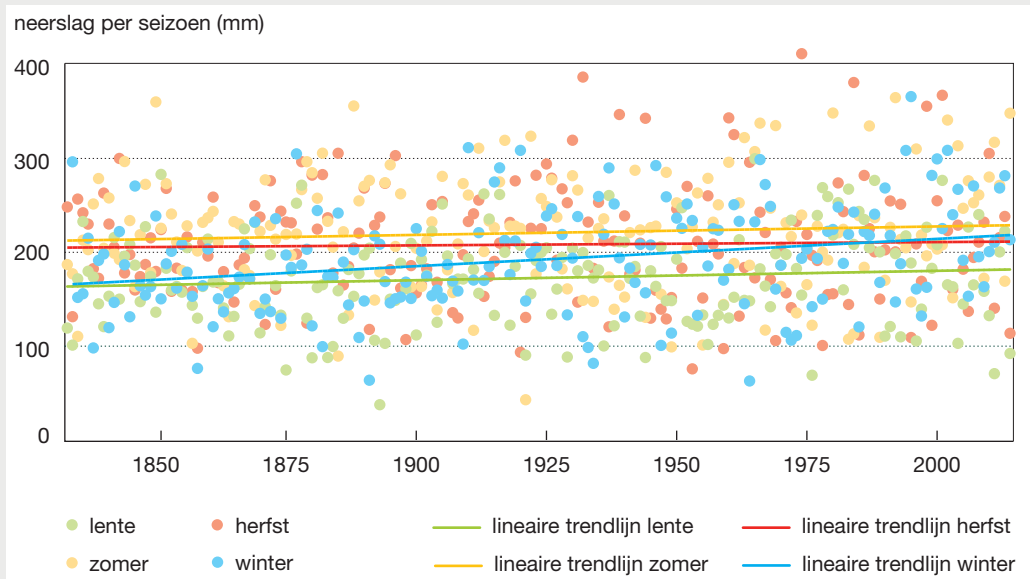


Figuur 21: Neerslaghoeveelheid per half kalenderjaar (Ukkel, 1833-2014)



Bron: MIRA op basis van KMI

Figuur 22: Neerslaghoeveelheid per seizoen (Ukkel, 1833-2014)



De winter van een jaar X bestaat uit de maanden januari en februari van jaar X, samen met de maand december van jaar X-1.

Bron: MIRA op basis van KMI

*Ook meer neerslagdagen in de winter*

België (Ukkel) telt jaarlijks gemiddeld 201 dagen met meetbare neerslag (minstens 0,1 mm/dag). Uitersten waren 1974 en 1977 met respectievelijk 266 en 265 neerslagdagen (figuur 23).

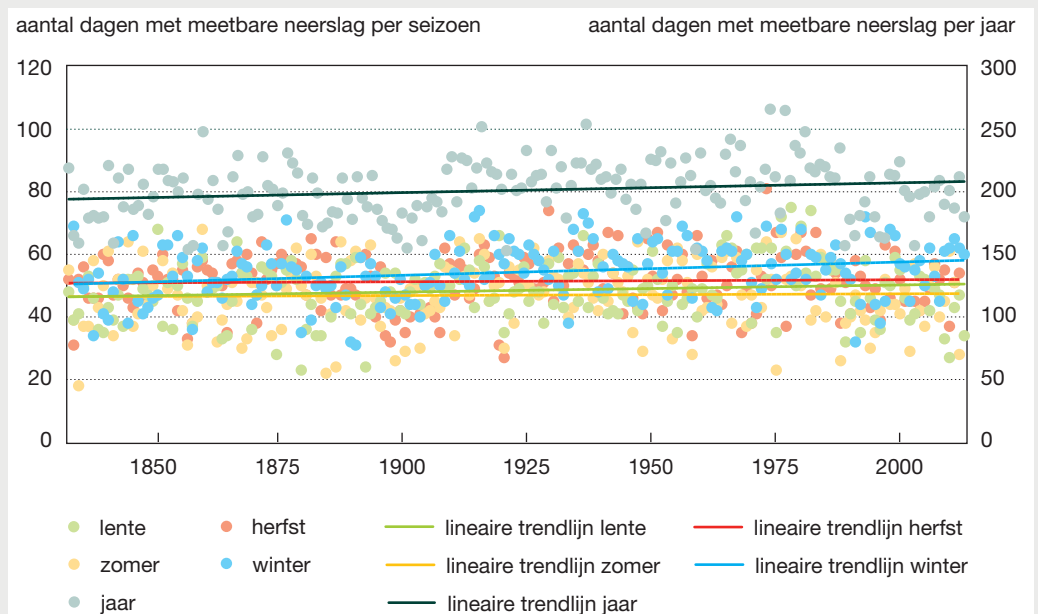
Analyse van de neerslaggegevens over de volledige periode 1833-2013 toont aan dat het aantal dagen met meetbare neerslag in een jaar significant toenam. Deze toename manifesteert zich enkel in de winter.

*Maar het sneeuwt minder*

Uit een analyse van het KMI blijkt ten slotte dat neerslag onder de vorm van sneeuw duidelijk minder frequent is geworden in België (KMI, 2015a). Dit is nauw verbonden met de stijging van de temperaturen.

**Figuur 23: Aantal dagen met meetbare neerslag per seizoen en per jaar (Ukkel, 1833-2013/2014)**

56



De winter van een jaar X bestaat uit de maanden januari en februari van jaar X, samen met de maand december van jaar X-1.

Bron: MIRA op basis van KMI

### 2.3.3 Neerslagextremen

Naast de verschuiving of verandering in jaar- en seizoensgemiddelden, is het ook belangrijk zicht te krijgen op veranderingen in het voorkomen en de aard van extreme neerslagperiodes. Periodes met extreem veel neerslag kunnen immers leiden tot overstromingen, terwijl lange droge periodes leiden tot verdroging van ecosystemen en aantasting van de waterreserves (zie ook hoofdstukken 3 en 4).

#### *Mens beïnvloedt extreme neerslag*

In 2011 konden wetenschappers voor het eerst aantonen dat menselijke activiteiten een bijdrage leveren aan de waargenomen intensifiëring van extreme neerslagperiodes in het noordelijk halfrond. De frequentie van periodes met hevige regenval is op de meeste plaatsen op aarde toegenomen. Dit komt overeen met de opwarming en de toename – minstens al sinds de jaren 80 – van de waterdampconcentratie in de atmosfeer zowel boven land als boven de oceanen.

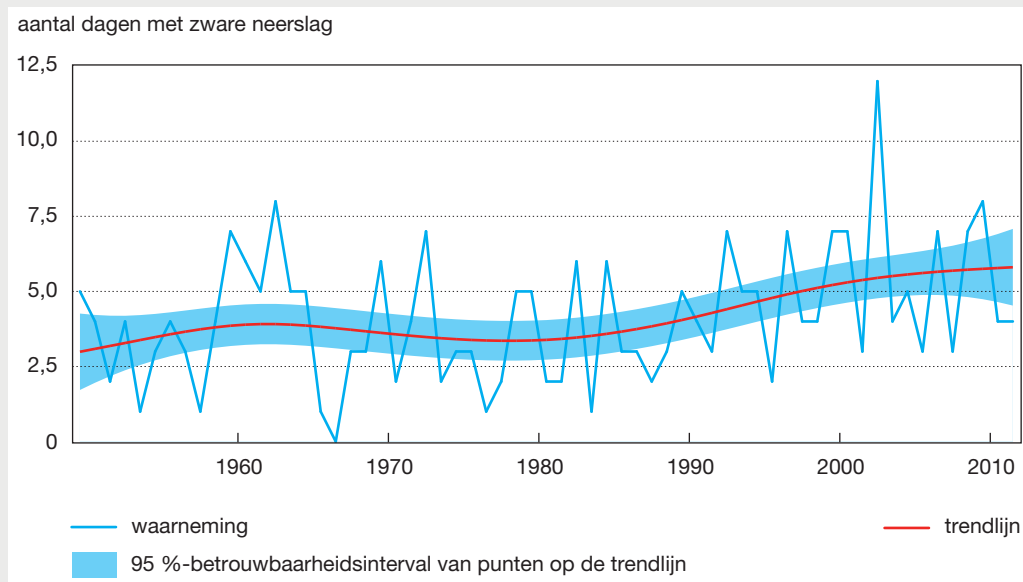
#### *Verdubbeling aantal dagen met zware neerslag*

Voor België (Ukkel) vertoont de meetreeks van het aantal dagen met zware neerslag (minstens 20 mm/dag) een duidelijke trend: vooral tussen jaren 80 en eind jaren 90 steeg het aantal dagen met zware neerslag significant. Ondertussen telt een jaar gemiddeld al dubbel zoveel dagen met zware neerslag als begin jaren 50: over zes decennia is het gemiddeld aantal geëvolueerd van drie naar zes. Het recordjaar was 2004 met twaalf dagen van zware neerslag (figuur 24). Intense neerslag komt meestal voor in de zomer omwille van intense onweersbuien die vallen in een tijdsspanne van enkele uren.

Ook door per jaar de maximaal gemeten neerslag op een dag<sup>4</sup> of in een aaneensluitende periode van 5, 10 of 15 dagen te meten, kunnen wijzigingen in extreme neerslag opgespoord worden (figuur 25). De analyse voor de meetreeks 1880-2013 geeft aan dat de trendlijnen langzaam oplopen. Door de grotere variantie in een kleine periode, is die stijging voor een periode van een dag niet significant, maar voor aaneensluitende periodes van 5, 10 en 15 dagen blijkt de maximale hoeveelheid neerslag die daarbinnen valt wel significant hoger te liggen in 2013 vergeleken met 1880: respectievelijk +11 mm, +19 mm en +24 mm. Het KMI stelde eerder al vast dat de natste periodes langer dan een week meestal in de winter voor komen, en dat de hoeveelheid neerslag in de winter die minstens valt in enkele dagen de neiging heeft toe te nemen.

4 Analyse op de maximale neerslag per jaar gemeten binnen een nog kleiner tijdsvenster van 1 uur, laat ook enkel natuurlijke variaties zien. Het gevoel dat onweersbuien die een of meerdere uren kunnen duren recentelijk intenser en overvloediger geworden zijn, wordt dus niet bevestigd voor Ukkel. Maar de evolutie van de gegevens in de komende jaren zal er misschien toe leiden deze conclusies te herzien. Meetpunten meer in de nabijheid van de kust laten – ook onder invloed van de opwarming van het zeewater – wel al een significante stijging van de maximale dagneerslag in een jaar optekenen sinds de jaren 80 (KMI, 2015a).

**Figuur 24:** Aantal dagen met zware neerslag ( $\geq 20,0$  mm per dag) (Ukkel, 1951-2013)



Bron: MIRA op basis van KMI

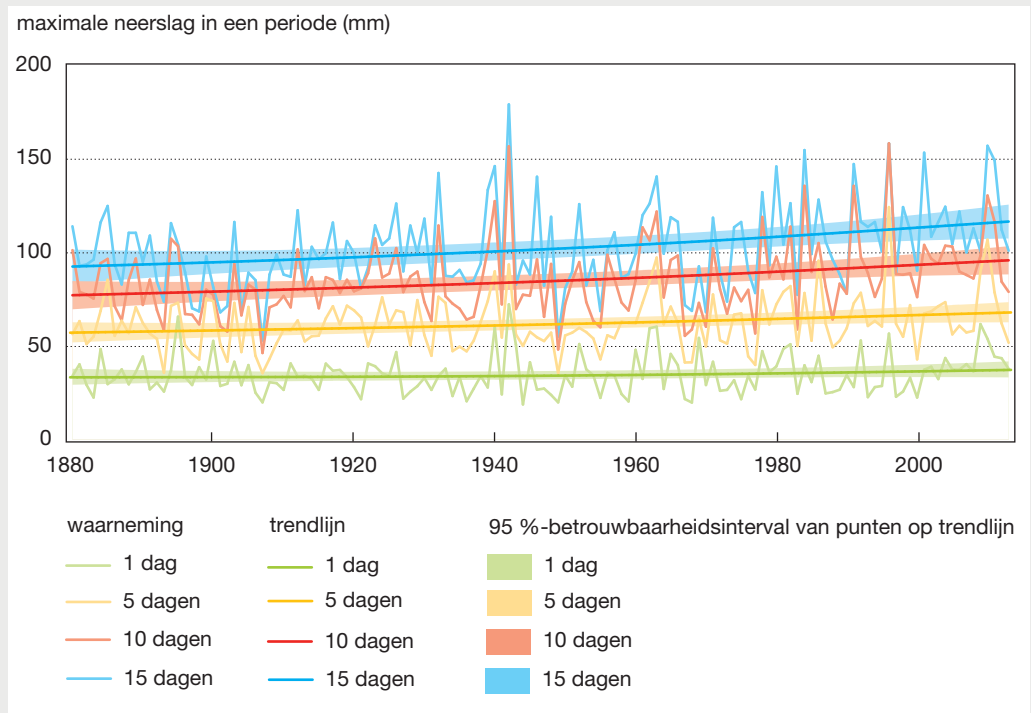
### *Cumulatief neerslagtekort vertoont geen duidelijke trend*

Het neerslagtekort is het verschil tussen de neerslag en de potentiële evapotranspiratie (zie § 2.2). Dit tekort wordt per dag bepaald en maakt een vergelijking tussen de hoeveelheid beschikbaar water (de neerslag) en de dagelijkse potentiële watervraag o.a. door planten (de potentiële evapotranspiratie). Hierdoor kan de indicator ook gebruikt worden als een benadering van de droogtestress bij planten.

Hoewel het neerslagtekort per dag bepaald wordt, is het maar zinvol deze indicator over langere periodes te bekijken. Stress bij planten door te lage waterbeschikbaarheid treedt immers pas op over langere periodes. Daarom wordt het neerslagtekort cumulatief uitgerekend als de som van het dagelijkse neerslagtekort berekend over het volledig groeiseizoen (april tot en met september) in een jaar. Wanneer die som kleiner of gelijk aan nul wordt gedurende de berekeningsperiode, blijft het cumulatief neerslagtekort nul.

Bij gebruik van het cumulatief neerslagtekort als waterstressindicator moet er wel rekening mee worden gehouden dat de indicator een (sterke) vereenvoudiging van het eigenlijke systeem is: niet alle regenval zal immers beschikbaar zijn voor de plant (een deel zal afstromen, doorsijpelen naar de diepere bodemlagen of rechtstreeks verdampen) en de plant zal niet altijd de volledige potentiële evapotranspiratie kunnen realiseren (bijv. jonge planten of afrijpende maïs vertonen een geringe evapotranspiratie).

**Figuur 25:** Maximale hoeveelheid neerslag gevallen op 1 dag of in een aaneensluitende periode van 5, 10 of 15 dagen (Ukkel, 1880-2013)



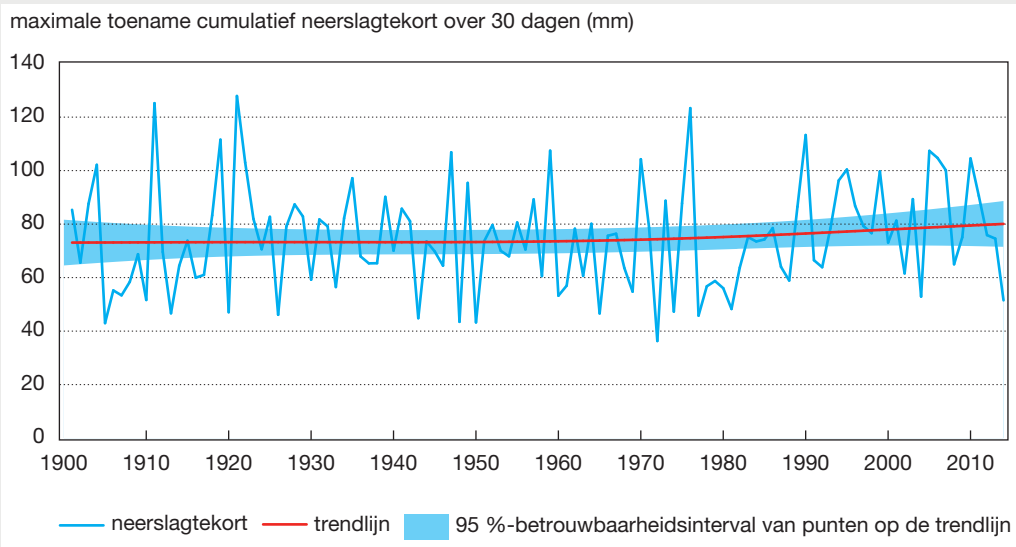
Bron: MIRA op basis van KMI

Een trendanalyse is uitgevoerd voor volgende varianten:

- de maximale toename van het cumulatief neerslagtekort over 30 dagen en over 90 dagen (telkens binnen het groeiseizoen);
- het jaarlijks cumulatief neerslagtekort bij het einde van het groeiseizoen (op 30 september);
- de maximale waarde die het cumulatief neerslagtekort tijdens het groeiseizoen in een jaar bereikt.

De trendlijn voor de maximale toename van het cumulatief neerslagtekort over 30 dagen stijgt langzaam, zeker na 1980, maar op dit moment is die stijging niet significant (figuur 26). De resultaten voor de analyse van het maximale cumulatief neerslagtekort over 90 dagen, het jaarlijks cumulatief neerslagtekort op het einde van het groeiseizoen en het jaarlijks maximum van het cumulatief neerslagtekort zijn vergelijkbaar: de trendlijnen lopen lichtjes op maar die stijgingen zijn statistisch niet significant. Dat valt te verklaren doordat de aanzienlijke toename van de potentiële evapotranspiratie (zie § 2.2) deels wordt gecounterd door een lichte (niet-significante) toename van de neerslag in het groeiseizoen. Daarnaast bemoeilijkt de grote variatie op de indicatoren voor neerslagtekort ook de detectie van trends.

**Figuur 26:** Evolutie van de maximale toename van het cumulatief neerslagtekort over 30 dagen (Ukkel, 1901-2014)



Bron: MIRA en VMM op basis van KMI

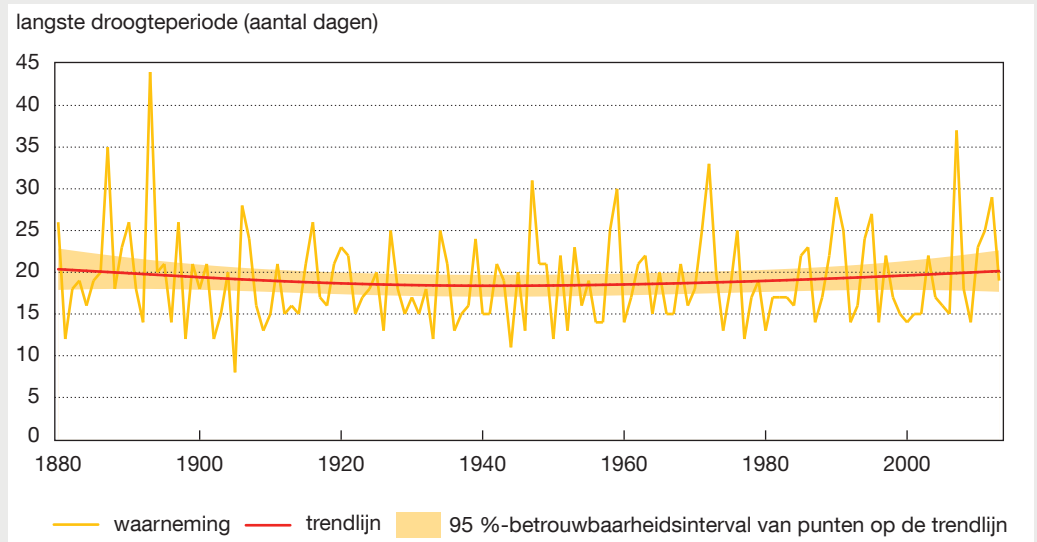
### Intensiteit droogteperiodes niet gewijzigd

Ook droogteperiodes vallen onder de noemer 'extreme neerslag'. Het KMI definieert een droge dag als een dag met maximum 0,5 mm neerslag. Uit een analyse van het maximum aantal opeenvolgende droge dagen in een jaar, blijkt geen significante trend voor het meetpunt in Ukkel over de periode 1880-2013 (figuur 27). Dit geeft aan dat de droogteperiodes niet intenser zijn geworden sinds het einde van de 19<sup>de</sup> eeuw. De recordjaren zijn 1893 en 2007, met droogteperiodes die respectievelijk 44 en 37 dagen aanhielden.

Naast een analyse van droge periodes op basis van een absoluut criterium – maximaal 0,5 mm neerslag per dag – is het ook relevant om droogte op een relatieve manier te bekijken. Daarbij wordt de waargenomen neerslag in een of een aantal maanden vergeleken met de neerslag van dezelfde maand(en) in de referentieperiode 1850-1899 aan de hand van de 'Standardized Precipitation Index' of SPI (McKee *et al.*, 1993). Een negatieve SPI komt overeen met een droger dan normale periode, een positieve met een natter dan normale periode. Aan die negatieve SPI-waarden wordt volgende interpretatie gegeven:

- extreem droog:  $SPI \leq -2$
- zeer droog:  $-2 < SPI \leq -1,5$
- matig droog:  $-1,5 < SPI \leq -1$

Figuur 27: Langste droogteperiode in een jaar (Ukkel, 1880-2013)



Langste droogteperiode wordt uitgedrukt als het maximaal aantal opeenvolgende dagen met elk 0,5 mm of minder neerslag in een jaar.

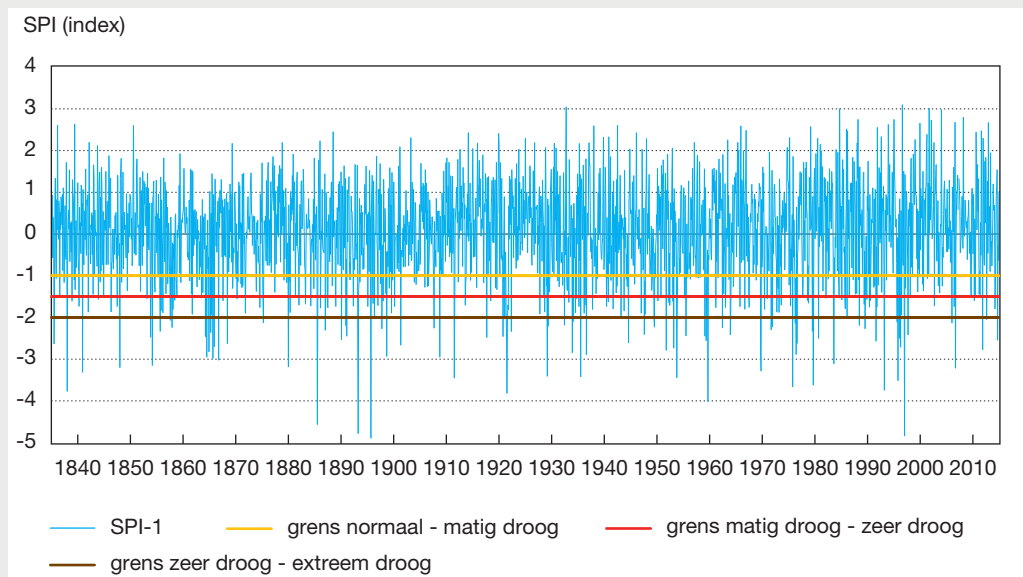
Bron: MIRA op basis van KMI

Figuur 28 geeft het verloop van SPI-1 (per maand). Ook de grenzen voor het maken van de interpretatie, staan in de figuur weergegeven. Om de omvang van de problematiek beter in beeld te brengen, worden de droogteperiodes uit figuur 28 verder geanalyseerd aan de hand van drie afgeleide indicatoren. Daarbij wordt een droogteperiode gedefinieerd als een periode die zich uitstrekt vanaf het moment dat de SPI-waarde kleiner wordt dan -1 en duurt tot de SPI-waarde weer groter wordt dan 0. Concreet worden drie afgeleide indicatoren beschouwd, waarvan de resultaten eerst geaggregeerd worden per decennium omdat droogteperiodes zich niet zo vaak voordoen:

1. droogtemagnitude: combineert de lengte van de droogteperiode met de grootte van de SPI-waarde. Hiervan wordt vervolgens de totale som per decennium gemaakt. Dit is een goede indicator om de ernst van een droge periode te kwantificeren;
2. lengte van de droogteperiode: het aantal maanden waarover de droogteperiode zich uitstrekt. Van deze waarde wordt het gemiddelde per decennium gemaakt;
3. lengte van de droogtevrije periode: lengte van de periode die begint de eerste maand volgend op het einde van een droogte-periode en eindigt waar een nieuwe droogte-periode start. Ook van deze waarde wordt het gemiddelde per decennium gemaakt.

Uit statistische analyse blijkt voor geen van de drie afgeleide indicatoren een significante trend binnen de periode 1835-2014. We kunnen dus niet stellen dat de droogtemagnitude, de lengte van de droogteperiodes of de lengte van de droogtevrije periodes toe- of afgenomen zijn sinds het begin van de metingen.

**Figuur 28:** Evolutie van de maandelijkse Standardized Precipitation Index of SPI-1 (Ukkel, 1835-2014)



Bron: MIRA en VMM op basis van KMI

## 2.4 Wind

Windmetingen worden sterk beïnvloed door de eigenschappen van de omgeving rond het meetpunt, zoals de aanwezigheid van gebouwen of bomen en het reliëf van de omgeving. Iedere wijziging in de omgeving kan de trendanalyse van deze meetreeksen dus bemoeilijken. In Ukkel bleef de gemiddelde windsnelheid relatief stabiel tot ongeveer 1960 waarna een aanhoudende daling werd ingezet. Inmiddels ligt de jaargemiddelde windsnelheid circa 15 % lager (KMI, 2015a). De invloed van wijzigende vegetatie rondom Ukkel hierbij is niet gekend, maar ook in de meetpunten van Zaventem en Saint-Hubert – waar geen betekenisvolle wijzigingen in de omgeving plaatsvonden sinds de jaren 60 – blijkt de gemiddelde windsnelheid inmiddels 10 % gedaald te zijn. Deze daling van de windsnelheid wordt opgetekend in alle seizoenen met uitzondering van de winter, het seizoen waarin doorgaans de hoogste windsnelheden voorkomen (KMI, 2015a).

In het voorkomen van aantal stormdagen – met een maximale windstoot van boven de 70 km/u – valt geen duidelijke trend te bespeuren, en evenmin in de hoogst gemeten windsnelheden. De intensiteit van stormen is in België dus niet toegenomen tijdens de laatste decennia (KMI, 2015a).



## 2.5 Zeeklimaat

---

### 2.5.1 Gemiddeld zeeniveau

Het zeeniveau wordt op wereldschaal beïnvloed door tal van factoren, waaronder:

- volumeverandering van een watermassa bij veranderende temperaturen;
- uitwisseling van watermassa met ijskappen en gletsjers op het land;
- veranderende opslag van water op het land (zowel oppervlaktewater als grondwater).

Een temperatuurstijging (bijv. onder invloed van broeikasgasemissies van menselijke oorsprong) kan leiden tot een uitzetting van het zeewater en de afsmelting van de ijskappen, met een stijging van de zeespiegel en groter overstromingsgevaar in lager gelegen gebieden tot gevolg. Ook uitputting van grondwatervoorraden (onder invloed van oplopende temperaturen) draagt bij tot de zeespiegelstijging doordat opgepompt en gebruikt grondwater uiteindelijk grotendeels afvloeit naar de zee.

#### *Historisch perspectief*

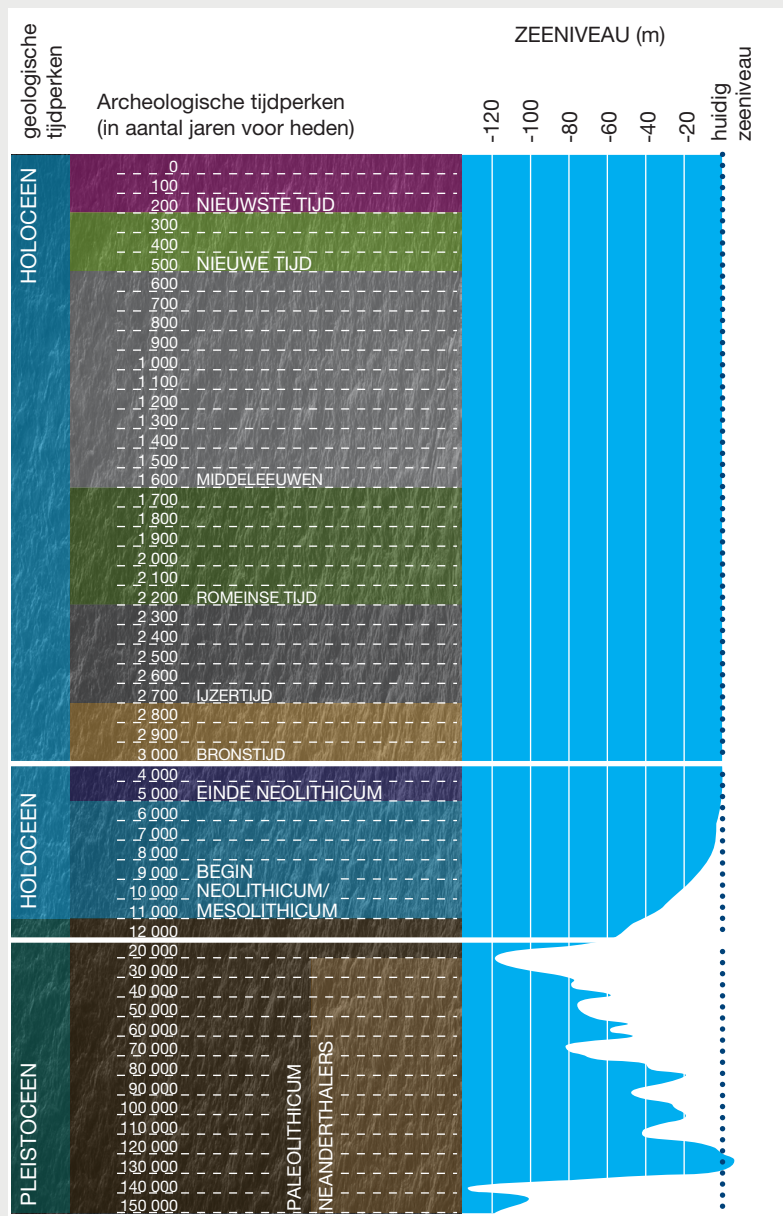
In totaal is het globale gemiddelde zeeniveau met zo'n 120 meter gestegen sinds het einde van de laatste ijstijd, nu 20 000 jaar geleden. Zo ook aan onze kust. Daar kon het Vlaams Instituut voor de Zee of VLIZ door combinatie van archeologische en paleontologische vondsten met wetenschappelijke literatuur achterhalen hoe het zeeniveau doorheen de tijd veranderde (VLIZ, 2014). Het resultaat hiervan is de tijdlijn in figuur 29, die de variatie van het zeeniveau aan onze kust in beeld brengt tot 150 000 jaar terug in de tijd. Daaruit blijkt dat tijdens de ijstijden het zeeniveau 100 à 120 meter lager lag dan nu. Het laatste glaciële maximum, waarbij de ijskappen op land het verst reiken, werd circa 20 000 jaar geleden bereikt. Gletsjers bedekten toen grote delen van Noord-Europa. Door de opslag van grote hoeveelheden (zee)water in de ijskappen, lag de zeespiegel spectaculair lager. Het Noordzeegebied kwam zelfs droog te liggen. De huidige kustlijn daarentegen ligt al grotendeels vast sinds het einde van de 18<sup>de</sup> eeuw.

#### *Stijging zeeniveau overtreft nu al duurzaamheidsdoelstelling*

Het Klimaatverdrag van 1992 bepaalt dat de concentratie van broeikasgassen moet worden gestabiliseerd op een niveau waarop geen gevaarlijke menselijke verstoring van het klimaatstelsel optreedt. Dit moet gebeuren binnen een termijn die o.a. ecosystemen toelaat zich op een natuurlijke wijze aan te passen. Wetenschappelijk wordt deze duurzaamheidsdoelstelling voor het zeeniveau vertaald naar een maximale stijging met 2 cm per decennium.

In de 20<sup>ste</sup> eeuw nam het gemiddelde zeeniveau op aarde jaarlijks met 1,7 mm toe. En sinds de jaren 50 blijkt een significante versnelling van de wereldwijde zeespiegelstijging ingezet. Inmiddels zit die jaarlijkse zeespiegelstijging al aan 3,4 mm per jaar (mondiaal gemiddelde), en overtreft het daarmee de aangehaalde duurzaamheidsdoelstelling.

Figuur 29: Historische evolutie van het jaargemiddeld zeeniveau doorheen de achtereenvolgende geologische tijdperken (België, 150 000 jaar terug in de tijd)



Merk op dat de tijdslijn eerst met sprongen van 100 jaar, vervolgens per 1 000 jaar en ten slotte per 10 000 jaar teruggaat in de tijd. Deze periodes worden gescheiden door een verticale witte lijn.

Bron: VLIZ (2014; <http://www.sea-arch.be/nl/tijdslijn>)

*Belgische kust volgt mondiale trend*

Statistische analyse van de meetwaarden aan de Belgische kust laat zien dat het jaargemiddelde zeeniveau in 2013 significant hoger ligt dan bij het begin van de meetreeks:

- in Oostende steeg de trendlijn van het zeeniveau met 115 mm tussen 1951 en 2013;
- in Nieuwpoort steeg de trendlijn van het zeeniveau met 81 mm tussen 1967 en 2013;
- in Zeebrugge steeg de trendlijn van het zeeniveau met 42 mm tussen 1979 en 2013.

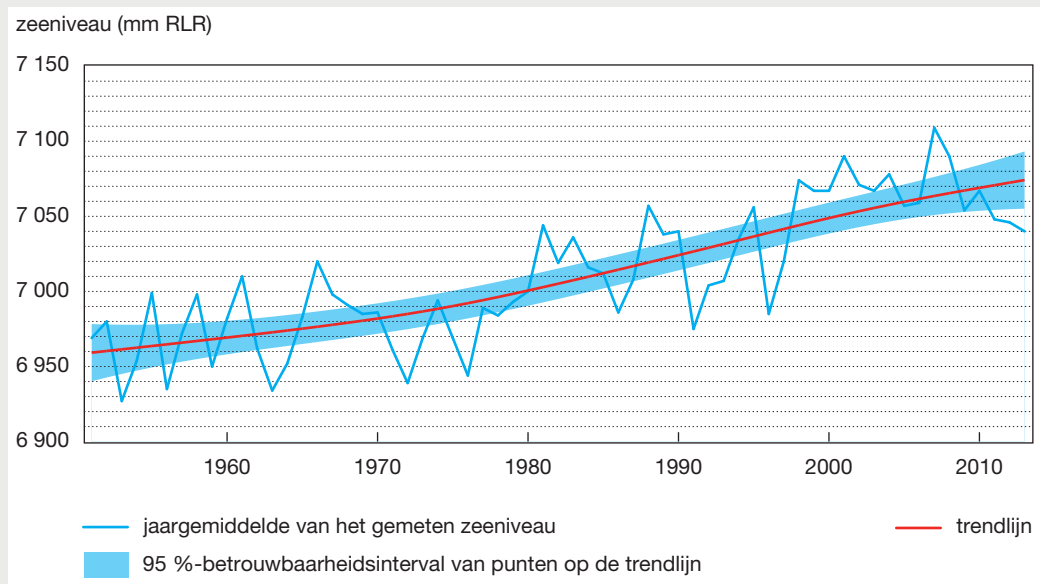
Oostende is het meetpunt aan onze kust met de langste ononderbroken meetreeks. Daarom is deze reeks het meest geschikt om langetermijntrends te detecteren en te kwantificeren. Aanvankelijk steeg het zeeniveau hier vrij langzaam (met 1 mm/jaar). Maar sinds het midden van de jaren 60 nam de stijging gestaag toe tot 2,5 mm/jaar midden jaren 90. Ook de laatste jaren blijft de stijging nog significant aanhouden, maar het stijgingstempo is wel wat terug gevallen tot 1,7 mm/jaar (figuur 30). De snelheid waarmee de zeespiegel stijgt, blijkt dus onderhevig aan meerjarige schommelingen, maar dat de zeespiegel gestegen is, staat buiten kijf. Ook Zeebrugge en Nieuwpoort lieten voorgaande decennia significante stijgingen optekenen, maar hier lijkt de stijging zich de laatste jaren niet door te zetten. Naast de invloed van de klimaatverandering is het zeeniveau (zowel het gemiddeld zeeniveau als de hoogwaterstanden) echter ook onderhevig aan een natuurlijke schommeling met een interval van 18,61 jaar, het zogenaamde nodale getij. Door een variatie van de hoek tussen de aarde, de zon en de maan stijgt de zeespiegel daarom veel sterker in sommige periodes dan in andere.

Een recente studie onderzocht de extreme hoogwaters te Oostende en de bijdrage van afzonderlijke astronomische en stormopzetcomponenten, trends en langjarige schommelingen daarin. Hieruit bleek de stormopzet – naast de stijging van de jaargemiddelde zeespiegel – geen afzonderlijke of bijkomende stijgende trend te vertonen (Willems, 2014).

*Kwetsbaar voor overstromingen*

In Europa blijkt België na Nederland het meest kwetsbaar te zijn voor overstromingen ten gevolge van een stijgend zeeniveau: in Vlaanderen ligt 15 % van het oppervlak minder dan vijf meter boven het gemiddelde zeeniveau. Bovendien blijkt de Belgische kustlijn de meest bebouwde van Europa: in 2000 was ruim 30 % van de kuststrook tot 10 km bebouwd, en zelfs bijna 50 % van de strook tot 1 km van de kustlijn. In West-Vlaanderen woont 33 % van de bevolking in laaggelegen poldergebieden gevoelig voor overstromingen door toedoen van de zee.

Figuur 30: Evolutie zeeniveau aan de Belgische kust (Oostende, 1951-2013)



Het zeeniveau wordt uitgedrukt in mm RLR (*Revised Local Reference*). Daarbij zijn de data van een lokale referentie (voor de Belgische Kust is die de TAW of Tweede Algemene Waterpassing) omgezet t.a.v. het internationaal referentieniveau.

Bron: MIRA op basis van PSMSL en Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust

### 2.5.2 Zeewatertemperatuur, saliniteit, golfhoogte en windsnelheid aan zee

Samen met de afvoer van afsmeltend landijs naar zee, is de thermische uitzetting van het zeewater de belangrijkste oorzaak van de reeds waargenomen zeespiegelstijging. De temperatuur beïnvloedt de dichtheid van het water en daardoor de stromingen en het zeespiegelniveau. Daarnaast beïnvloedt de temperatuur ook de oplosbaarheid van koolstofdioxide in het zeewater, en heeft zo een link met de samenstelling van de atmosfeer. In alle deelgebieden van de Noordzee (niet enkel het Belgische deel ervan) stijgt de zeewatertemperatuur. Er lijkt bovendien een natuurlijke variabiliteit op te treden met een periode van 7 à 8 jaar. De stijging van de zeewatertemperatuur ligt tussen 0,023 °C/jaar (in de noordelijke Noordzee) en 0,053 °C/jaar in de centrale Noordzee en de zuidelijke Noordzee. In het gebied het dichtst bij de Belgische kust bedraagt de toename ongeveer 0,034 °C per jaar of 3,4 °C per eeuw.

Voor wat betreft de golfhoogte, geeft de historische datareeks in en nabij het Belgische deel van de Noordzee enkel een natuurlijke variabiliteit aan met een periode van ongeveer zeven jaar. Er is ook een seizoencyclus: er zijn gemiddeld hogere golven in de winter en lagere golven in de zomermaanden. Een duidelijke klimaatrend kon in de historische meetreeksen van golfhoogten en windsnelheden niet worden aangetoond.

## 2.6 Klimaatschommelingen

---

Naast het achterhalen van de klimaattrends is het belangrijk te beseffen dat het klimaat onderhevig is aan belangrijke, natuurlijke klimaatschommelingen op verschillende tijdschalen. Daardoor kunnen kortetermijntrends sterk afwijken van de langetermijntrends, of kunnen kortetermijnevoluties tegengesteld zijn aan de langetermijntrend als gevolg van de klimaatopwarming.

Zo werd recent het bestaan van schommelingen van meerdere decennia in het voorkomen van extreme neerslag vastgesteld voor ons land. Dit resulteerde in periodes met meer en hogere extreme neerslag rond de jaren 1910-1920, 1950-1960 en 1990-2000, en periodes met minder extreme neerslag daartussen (Willems 2013a; Willems 2013b). Dit kan een invloed hebben op statistische analyses van resultaten van klimaatmodellen (zie hoofdstuk 3), die gebaseerd zijn op beperkte tijdreeksen (typisch 30 jaar of minder). Zo werd vastgesteld dat de onzekerheid bij het gebruik van een 30-jarige periode, 11 % is voor de gemiddelde neerslag en 37 % voor de 10-jarige terugkeerperiodes (Brisson *et al.*, 2014). Wanneer men dus twee klimaatprojecties van 30 jaar met elkaar vergelijkt, dan is 11 % van de verandering potentieel het gevolg van klimaatschommelingen voor de 30-jaar gemiddelden en 37 % voor de 10-jarige terugkeerperiodes. Deze bevinding geldt voor puntmetingen. Wanneer er veranderingen optreden over een grotere regio wordt het effect van de klimaatschommelingen kleiner.



---

3

HOE KAN HET KLIMAAT IN VLAANDEREN EVOLUEREN TOT 2100?



## 3 HOE KAN HET KLIMAAT IN VLAANDEREN EVOLUEREN TOT 2100?<sup>5</sup>

---

### 3.1 Over scenario's en klimaatmodellen

---

#### 3.1.1 Nieuwe broeikasgasscenario's

De nieuwe RCP-scenario's (*Representative Concentration Pathways*) uit het *Fifth Assessment Report* (AR5) van het IPCC bestrijken vier mogelijke trajecten voor de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer tot het jaar 2100, en omvatten een waaier aan mogelijke, toekomstige stralingsforcering (zie § 1.2.4) (van Vuuren *et al.* 2011; figuur 31):

- RCP8.5: Dit is het *business-as-usual* scenario en wordt gekenmerkt door stijgende broeikasgasemissies in de tijd waarbij de stralingsforcering toeneemt tot 8,5 W/m<sup>2</sup> tegen 2100. Het scenario is representatief voor scenario's die leiden tot hoge broeikasgasconcentraties door uitblijven van klimaatbeleid. RCP8.5 is een hoog energie-intensief scenario met een hoge groei van de bevolking tot ongeveer twaalf miljard in 2100 en een lage technologische ontwikkeling.
- RCP6.0: Dit is een scenario waarbij de stralingsforcering geleidelijk aan stijgt en stabiliseert op 6 W/m<sup>2</sup> na 2100. Het wordt gekenmerkt door een reeks van technologieën en strategieën om het energiegebruik en de emissie van broeikasgassen te beperken. Er is echter nauwelijks een vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. In dit scenario wordt een middenprojectie voor bevolkingsgroei tot ongeveer negen miljard in 2100 aangenomen.
- RCP4.5: Dit is een scenario waar de stralingsforcering geleidelijk aan stabiliseert tot het in 2100 4,5 W/m<sup>2</sup> bereikt. Dit scenario wordt gekenmerkt door een groter scala aan technologieën en strategieën om broeikasgasemissies te beperken dan in RCP6.0. In het scenario wordt eveneens een middenprojectie voor bevolkingsgroei tot ongeveer negen miljard in 2100 aangenomen. Het verschilt vooral van RCP6 door dat dit scenario wel uitgaat van een sterke vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. Kenmerkend voor RCP4.5 is het gebruik van bio-energie en koolstofopvang en -opslag.
- RCP2.6: Dit scenario is een zogenaamd 'piek-en-afname' scenario, waar de stralingsforcering eerst waarden tot circa 3 W/m<sup>2</sup> bereikt rond het midden van deze eeuw, en daarna afneemt tot 2,6 W/m<sup>2</sup> in 2100. Om deze niveaus te bereiken zijn belangrijke reducties in de emissie van broeikasgassen noodzakelijk. Ook dit scenario hanteert een middenprojectie voor bevolkingsgroei tot ongeveer negen miljard in 2100. Kenmerkend voor RCP2.6 is de lage emissie van broeikasgassen: onder andere een gecombineerd gebruik van bio-energie en koolstofopvang en -opslag zullen uiteindelijk zelfs leiden tot netto negatieve emissies.

De bovenvermelde aannamen bij de vier RCP-scenario's zijn indicatief. Het is net zo goed mogelijk dat een andere combinatie van aannamen dezelfde stralingsforcering met

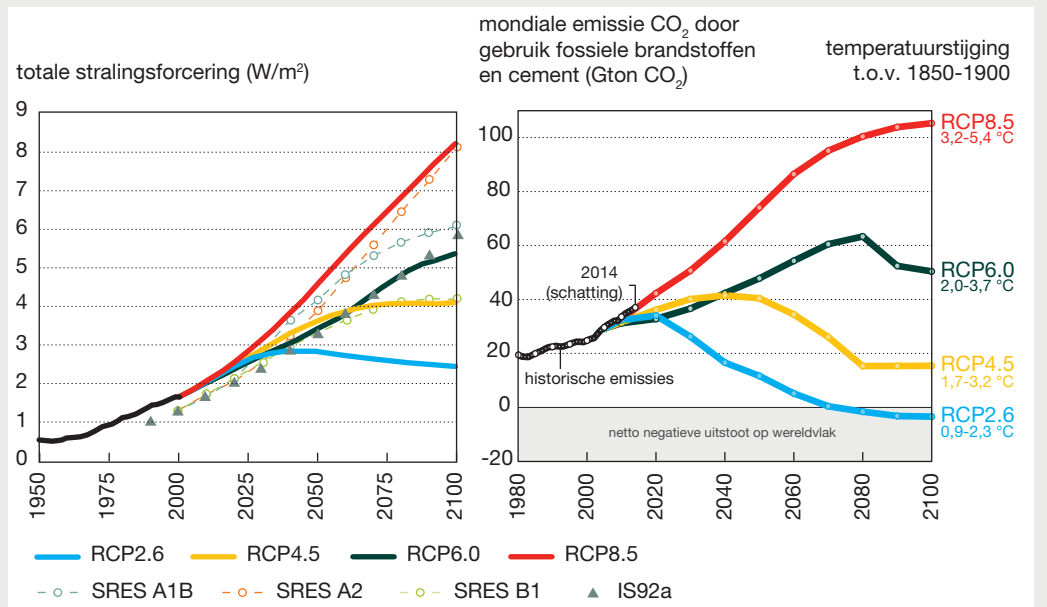
5 Dit hoofdstuk is in hoofdzaak gebaseerd op van Lipzig & Willems (2015), en op De Ridder *et al.* (2015). Andere bronnen staan in de tekst zelf vermeld.



zich meebrengt. Dit heeft echter ook als voordeel dat de RCP-scenario's representatief zijn voor verschillende emissiescenario's met een soortgelijke stralingsforcering, wat maakt dat niet alle verschillende emissiescenario's met de klimaatmodellen doorgerekend hoeven te worden. Figuur 31 toont ook hoe de nieuwe scenario's gerelateerd kunnen worden aan de voorheen internationaal gehanteerde SRES-scenario's.

Er kan geen waarschijnlijkheid of kans toegekend worden aan elk van de RCP-scenario's. Het zijn immers vier scenario's die mogelijke toekomstscenario's voorstellen. Wel wordt ervan uitgegaan dat – op basis van de huidige wetenschappelijke kennis – het totale bereik van de scenario's met hoge waarschijnlijkheid de werkelijke toekomstige evolutie omvat. Van de volledige set van scenario's is RCP8.5 het meest extreme scenario, maar helemaal niet zo onrealistisch, zoals blijkt uit het rechterdeel van figuur 31. Wanneer de recente historische gegevens van de mondiale uitstoot van broeikasgassen worden vergeleken met RCP-scenario's die enkele jaren geleden werden opgesteld, volgen deze bijna naadloos het RCP8.5-scenario. Dit toont dat er nog geen sprake is van een reductie van de mondiale uitstoot door emissiebeperkende maatregelen.

**Figuur 31:** Tijdsevolutie van enerzijds de stralingsforcering volgens de nieuwe RCP-scenario's en de oude SRES-scenario's (links), en anderzijds de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot door gebruik van fossiele energiebronnen en cement volgens de nieuwe RCP-scenario's, samen met de waargenomen uitstoot tot 2014 (rechts)



Bron: IPCC (2013) en Global Carbon Budget (2014)

### 3.1.2 Nieuwe mondiale klimaatmodelsimulaties

Het nieuwste, vijfde IPCC rapport van 2013 (*Fifth Assessment Report* of kortweg AR5) is gebaseerd op een groot aantal nieuwe klimaatmodelsimulaties, gebruik makend van de RCP-broeikasgasscenario's, maar ook van de nieuwste generatie klimaatmodellen. Deze simulaties werden uitgevoerd binnen het internationaal gecoördineerd kader van het zogenaamde *Coupled Model Intercomparison Project* nr. 5 of CMIP5 waarbinnen klimaatprojecties voor de toekomst op basis van mondiale klimaatmodellen (*General Circulation Models* of *Global Climate Models* of GCM's) worden geëvalueerd en vergeleken.

Voor dit Klimaatrapport 2015 zijn vanuit het CMIP5-project een 200-tal mondiale klimaatmodelsimulaties beschikbaar voor de vier RCP-scenario's (2.6, 4.5 6.0 en 8.5). De GCM's hebben echter een vrij grove ruimtelijke resolutie van gemiddeld 150 km, waardoor vaak slechts één roostercel grotendeels binnen onze landsgrenzen ligt. Daarom werden voor Vlaanderen en België enkel de resultaten beschouwd voor de roostercel waarbinnen ook het hoofdmeteorologisch station van het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) in Ukkel gelegen is. De tijdsresolutie van GCM's betreft een dag, wat betekent dat in de scenarioresultaten bijvoorbeeld informatie terug te vinden is over de grootste hoeveelheid neerslag die op een dag in een jaar kan vallen, maar niet over de neerslagintensiteiten in erg kortstondige periodes (bijv. een onweersbui of 'wolkbreuk').

### 3.1.3 Nieuwe Europese klimaatmodellen

Omdat een gemiddelde ruimtelijke resolutie van 150 km erg laag is voor regionale toepassingen, worden ook klimaatmodellen met hogere resolutie gebruikt. Dit zijn de zogenaamde regionale klimaatmodellen (*Regional Climate Models* of RCM's). Om de reken tijden aanvaardbaar te houden, worden ze tot een kleiner gebied beperkt. Aan de rand van dat gebied worden de resultaten van een mondiaal klimaatmodel opgelegd.

Voor de Europese regio gebeuren de evaluatie en de vergelijking van modelresultaten met RCM's binnen het EURO-CORDEX project, waarbij CORDEX staat voor *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments*. De regionale klimaatmodellen hebben een ruimtelijke resolutie tussen 12 en 50 km, en hun modeluitvoer is beschikbaar op een tijdsresolutie van één dag.

### 3.1.4 Nieuwe Belgische fijnmazige klimaatmodellen

Omdat de ruimtelijke resolutie van de Europese regionale klimaatmodellen nog steeds grof is voor heel wat toepassingen, ontwikkelen enkele Belgische onderzoeksgroepen fijnmazige klimaatmodellen voor het Belgische grondgebied. Zo is het bekend dat convectieve zomeronweders, die verantwoordelijk zijn voor bijvoorbeeld rioleringsoverstromingen, enkel expliciet en nauwkeurig kunnen beschreven worden door klimaatmodellen bij een resolutie van 3 à 4 km of fijner. Ook de nauwkeurigheid van de uurlijkse neerslagverschillen binnen een dag, de inschatting van extreme neerslagperiodes en de neerslagpatronen blijken bij modellen met een ruimtelijke resolutie van 3 km veel nauwkeuriger dan de hogervermelde GCM's en RCM's.

Voor België werden recent eerste klimaatmodelsimulaties uitgevoerd bij een ruimtelijke resolutie van 3 à 4 km. Dit gebeurde door:

- de KU Leuven (Brisson *et al.*, 2015) met het COSMO-CLM model (CCLM) met een resolutie van 3 km in het kader van de projecten CLIMAQS (*Climate and Air Quality Modelling for Policy Support*) en MACCBET (*Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory*), en
- het KMI (De Troch *et al.*, 2013) met het ALARO model met een resolutie van 4 km.

### 3.1.5 Opmaak van klimaatscenario's voor Vlaanderen

De twee fijnmazige Belgische klimaatmodellen – CCLM van de KU Leuven en ALARO van het KMI – leveren vooral meer nauwkeurige en specifieke resultaten op voor dagelijkse en uurlijkse neerslag, extreme neerslagerperiodes en de ruimtelijke variaties in neerslag binnen Vlaanderen en België. Berekeningen met de fijnmazige modellen zijn bijgevolg erg relevant omdat extreme neerslag een hoge impact kan hebben op de maatschappij.

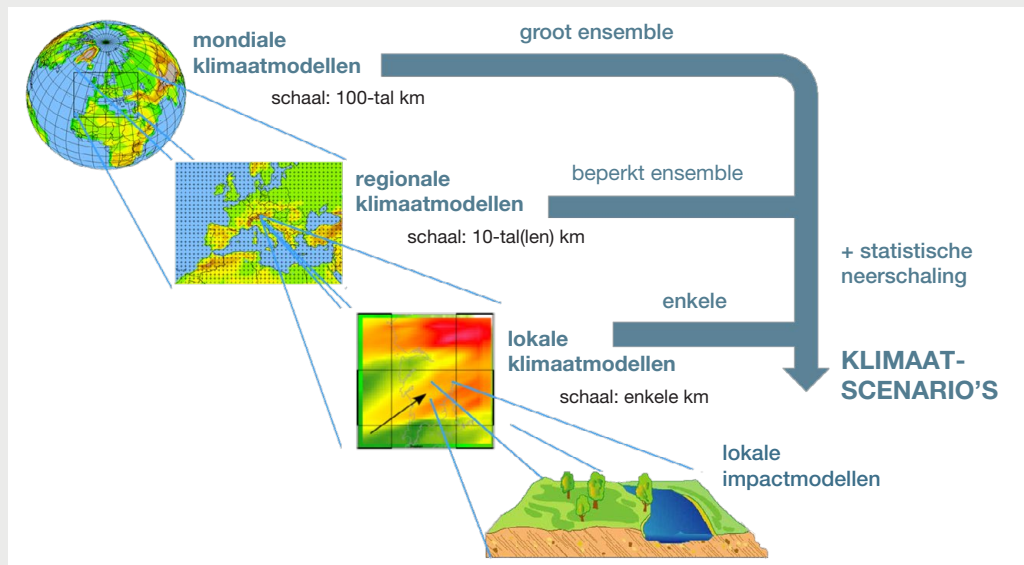
Ook het aantal beschikbare regionale klimaatmodelsimulaties voor Europa (EURO-CORDEX; op een resolutie van 12 tot 50 km) is nog beperkt. Door grote onzekerheid in de output van individuele klimaatmodellen steunen klimaatscenario's best op een ruime set aan klimaatmodelresultaten. Omdat enkel van de grofschalige, mondiale modellen een ruime set beschikbaar is en omdat er geen systematische verschillen werden vastgesteld tussen het klimaatveranderingssignaal tussen deze grofschalige modellen en de fijnschaligere (regionale Europese en hoge-resolutie Belgische) modellen, worden in dit Klimaatrapport 2015 in hoofdzaak de CMIP5-modelresultaten gebruikt om de klimaatscenario's voor Vlaanderen en België af te leiden. Die CMIP5-klimaatmodelruns geven een algemeen beeld van het klimaatveranderingssignaal voor onze regio, en worden aangevuld met de inzichten in ruimtelijke en temporele variatie die beschikbaar zijn uit de Europese en Belgische modellen. Zo blijkt uit het geheel van veertien klimaatprojecties beschikbaar met hogeresolutiemodellen voor België dat vooral voor de extreme zomerneerslag het aantal mm neerslag nauwkeuriger gesimuleerd wordt bij hogere modelresoluties in zowel ruimte als tijd.

Net als in de Milieuverkenning 2030 (Brouwers *et al.*, 2009) zijn drie klimaatscenario's afgeleid: hoog, midden en laag. De nieuwe hoge en lage klimaatscenario's zijn ook gebaseerd op de boven- en ondergrens van het 95 %-betrouwbaarheidsinterval berekend op basis van het volledige bereik aan nieuw beschikbare klimaatmodelprojecties voor België. De hoge en lage klimaatscenario's beogen dus per (klimaat)parameter de bandbreedte weer te geven van mogelijke klimaatverandering die Vlaanderen en België de komende decennia en naar het einde van deze eeuw te wachten staat. Het midden klimaatscenario komt overeen met de mediaan van alle klimaatmodelprojecties. Bemerkt dat de toekomstige klimaatverandering met een bepaalde - waarschijnlijk kleine, maar onbekende kans - extremer kan zijn dan wat omspannen wordt door de drie klimaatscenario's (zie ook hoofdstuk 5). De drie klimaatscenario's omsluiten het klimaatveranderingssignaal voor 100 jaar, en kunnen dus worden beschouwd als representatief voor de klimaatverandering van het jaar 2000 tot het jaar 2099, maar evengoed van het jaar 2014 tot 2113, enz.

Om specifieke, lokale impactanalyses van klimaatverandering uit te voeren, zullen vaak mondiale, regionale en lokale klimaatmodellen moeten worden gecombineerd met een statistische neerschalingstechniek (figuur 32). Hierbij wordt op basis van historische waarnemingen het verschil geanalyseerd tussen de kansverdeling van een bepaalde klimaatvariabele op de grove schaal (dus deze van de klimaatmodellen) versus deze op

de fijne schaal (nodig voor de impactanalyse). Dit verschil wordt daarna toegepast op de klimaatmodelresultaten voor de toekomst, om zo ook klimaatmodelprojecties op fijne schaal te bekomen. Klimaatmodelprojecties verkregen door statistische neerschaling worden vooral ingezet voor hydrologische en hydraulische impactanalysen.

**Figuur 32:** Schematisch overzicht van de beschikbaarheid van klimaatmodellen bij verschillende tijdschalen en hoe deze met statistische neerschalingmethoden gecombineerd worden om klimaatscenario's af te leiden voor lokale impactanalysen



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.2 Temperatuur

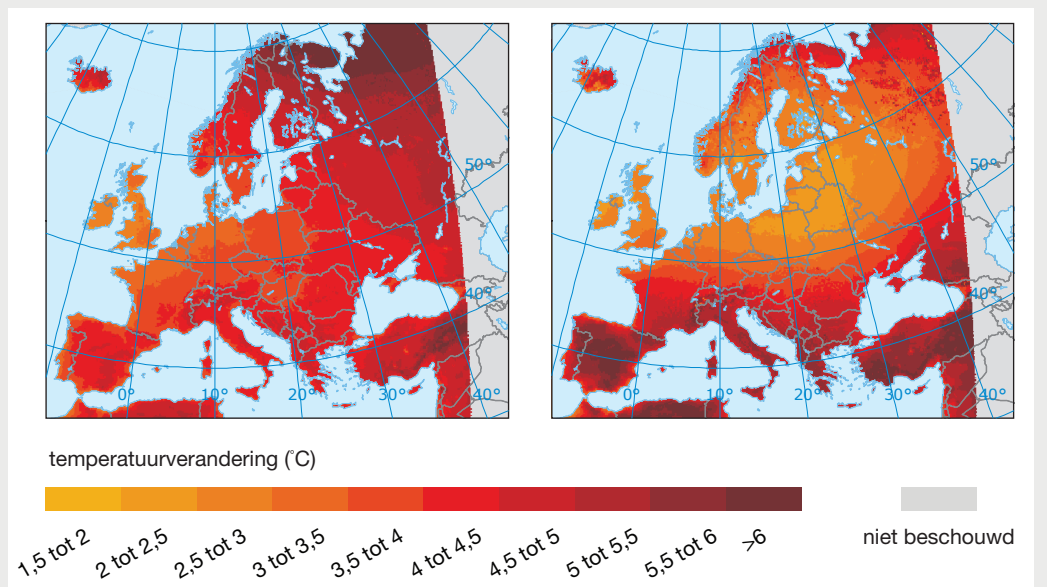
#### 3.2.1 Gemiddelde temperatuur

De mate waarin de wereldgemiddelde temperatuur zal stijgen is sterk afhankelijk van de toekomstige emissie van broeikasgassen. De temperatuuroename voor het einde van deze eeuw (2081-2100 in vergelijking tot 1986-2005) zal volgens het AR5 van het IPCC waarschijnlijk liggen tussen de 0,3-1,7 °C (RCP2.6), 1,1-2,6 °C (RCP4.5), 1,4-3,1 °C (RCP6.0) en 2,6-4,8 °C (RCP8.5) (IPCC, 2013). De poolgebieden en landoppervlakten zullen sneller opwarmen dan het wereldgemiddelde.

Voor Europa worden veranderingen in temperatuur verwacht, die groter zijn dan de veranderingen in het wereldgemiddelde (figuur 33). Uit het EURO-CORDEX multi-model ensemble wordt een toename van ongeveer 2,4 °C voor RCP4.5 en 4,1 °C voor RCP8.5 geprojecteerd voor een periode van 100 jaar (einde 20<sup>ste</sup> eeuw vergeleken met einde 21<sup>ste</sup> eeuw). De toename is het grootst in de winter voor Noordoost-Europa en Scandinavië en in de zomer voor Zuid-Europa.

Voor Vlaanderen werden drie klimaatscenario's afgeleid (laag, midden, hoog). In tegenstelling tot de IPCC-scenario's (RCP's) zijn de Vlaamse scenario's niet bedoeld om het effect van wereldwijde emissies te begroten, maar wordt er eerder beoogd de onzekerheid in klimaatprojecties voor de toekomst te omvatten. In het laag klimaatscenario komen de temperatuurveranderingen dicht bij nul uit. Zeker voor de jaargemiddelde temperatuur benadert het laag scenario het huidige klimaat. Onder het hoge klimaatscenario, daarentegen, kan de jaargemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar oplopen met 7,2 °C (tabel 1).

**Figuur 33:** Geprojecteerde verandering in de gemiddelde temperatuur per jaar (links) en in de zomer (rechts) in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor het RCP8.5-scenario



Bron: EEA (2014)

**Tabel 1:** Klimaatscenario's voor de absolute verandering in jaargemiddelde temperatuur (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

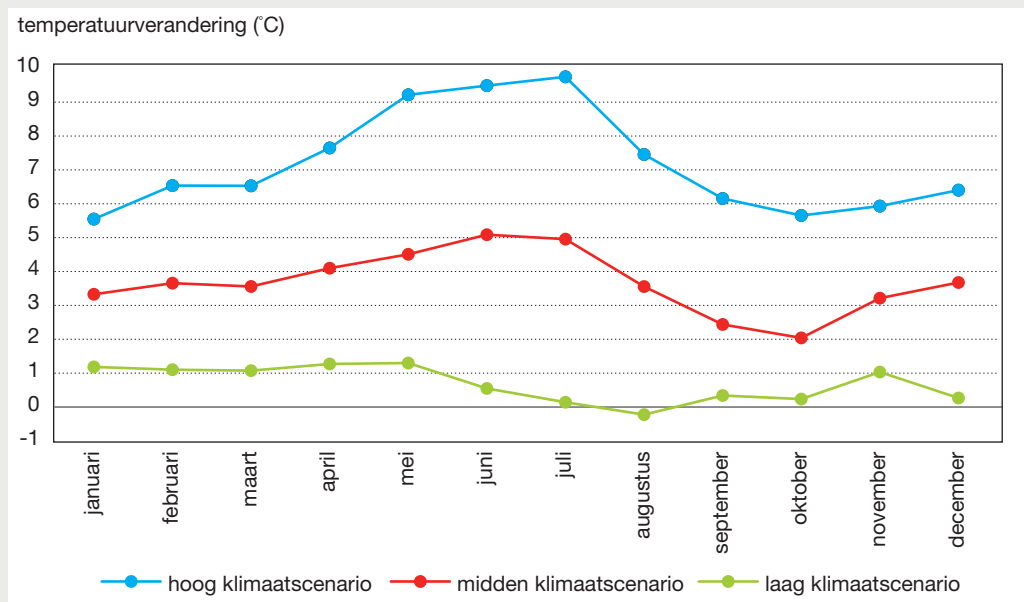
	100 jaar	50 jaar	30 jaar
hoog	+7,2 °C	+3,6 °C	+2,2 °C
midden	+3,7 °C	+1,8 °C	+1,1 °C
laag	+0,7 °C	+0,3 °C	+0,2 °C

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Wanneer de jaargemiddelde temperatuurstijging wordt opgedeeld over de twaalf maanden van het jaar, worden over 100 jaar stijgingen gevonden die gemiddeld over de wintermaanden december-januari-februari variëren tussen 0,9 °C en 6,2 °C, en over de zomermaanden juni-juli-augustus tussen 0,2 °C en 8,9 °C (figuur 34). De toenames in seizoens- en maandgemiddelden kunnen dus heel wat sterker zijn dan de jaargemiddelde stijgingen.

76

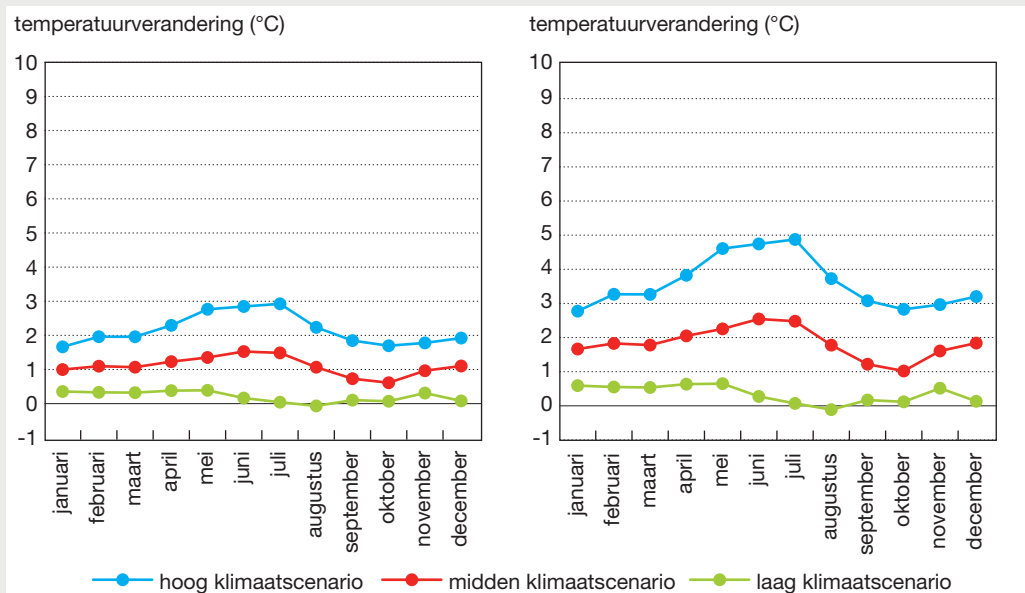
**Figuur 34:** Klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur (Ukkel, over 100 jaar)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Over 50 en 30 jaar zijn deze stijgingen min of meer proportioneel lager (figuur 35, tabellen 1 en 2). Over 30 jaar, bijvoorbeeld, varieert de toename van de jaargemiddelde temperatuur te Ukkel tussen 0,2 °C en 2,2 °C. De toename van de seizoensgemiddelde temperatuur tussen 0,3 °C en 1,8 °C voor de winter en tussen 0,05 °C en 2,7 °C voor de zomer.

**Figuur 35:** Klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur (Ukkel, over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts))



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

**Tabel 2:** Klimaatscenario's voor de absolute verandering in seizoensgemiddelde temperatuur in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug
hoog	+6,2 °C	+8,9 °C	+3,1 °C	+4,5 °C	+1,8 °C	+2,7 °C
midden	+3,6 °C	+4,5 °C	+1,8 °C	+2,3 °C	+1,1 °C	+1,4 °C
laag	+0,9 °C	+0,2 °C	+0,4 °C	+0,1 °C	+0,3 °C	+0,05 °C

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.2.2 Extreme temperaturen

De jaar-, maand- en seizoensgemiddelde temperaturen geven een beeld van de gemiddelde stijging over langere tijdsperiodes, maar voor veel sectoren zijn de risico's vooral toe te schrijven aan het voorkomen van extreem warme of extreem koude dagen. Daarom geeft tabel 3 de verandering in het aantal extreem warme dagen (met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C), en het aantal extreem koude dagen (met een daggemiddelde temperatuur onder de 0 °C).

Over 100 jaar kan het aantal extreem warme dagen stijgen met 0 (laag scenario) tot 64 dagen (hoog scenario) gemiddeld per jaar. Over 30 jaar, kan dat nog tot 19 dagen zijn. Het aantal extreem koude dagen kan over 100 jaar afnemen met 1 (laag scenario) tot 33 dagen (hoog scenario) gemiddeld per jaar. Over 30 jaar gaat deze afname tot 10 dagen.

**Tabel 3:** *Klimaatscenario's voor de absolute verandering in het aantal dagen per jaar met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C (extreem warme dagen) of onder de 0 °C (extreem koude dagen) (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)*

	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	>25 °C	<0 °C	>25 °C	<0 °C	>25 °C	<0 °C
hoog	+64 (10)	-33 (33)	+32 (10)	-17 (33)	+19 (10)	-10 (33)
midden	+16 (4)	-7 (10)	+8 (4)	-4 (10)	+5 (4)	-2 (10)
laag	0 (0)	-1 (3)	0 (0)	-1 (3)	0 (0)	0 (3)

De waarden tussen haakjes geven het gemiddeld aantal dagen per jaar met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C of onder de 0 °C te Ukkel in het historisch klimaat (1961-1990) zoals berekend in de controleruns met de klimaatmodellen. De verschillen tussen de drie klimaatscenario's geven een aanduiding van de onzekerheid in de resultaten van deze modellen, ook voor de controleruns.

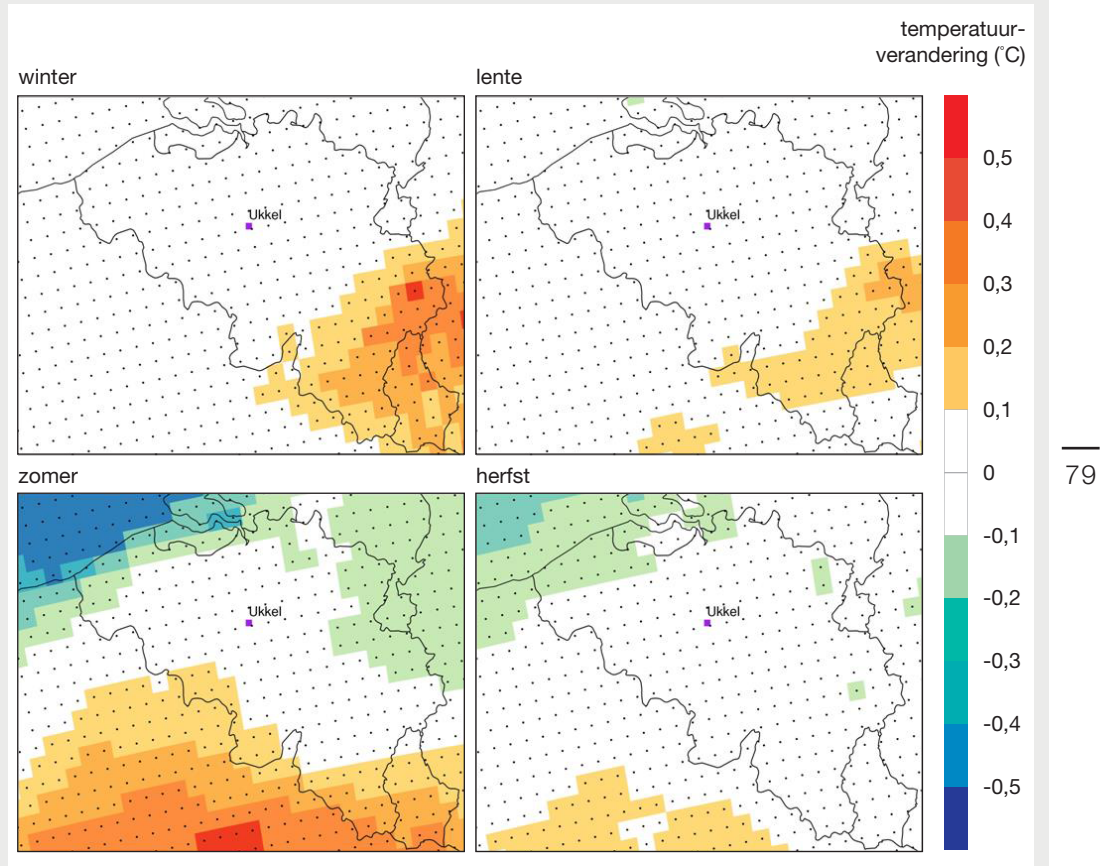
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.2.3 Ruimtelijke patronen

De projectie van de jaargemiddelde opwarming voor het einde van de eeuw neemt toe van noord naar zuid (figuur 36). Dit regionaal patroon is echter zwak ten opzichte van de te verwachten verandering. In de zomer zijn de regionale verschillen het grootst en zijn de projecties voor de kustgebieden tot ongeveer 0,3 °C lager dan in Ukkel en in Luxemburg tot ongeveer 0,3 °C hoger. Deze verschillen worden vooral bepaald door de nabijheid van de kust, die een temperende werking heeft op de opwarming.



**Figuur 36: Regionaal patroon van de temperatuurverandering aan het einde van de eeuw ten opzichte van Ukkel**



De stippen geven de significante gebieden aan, waar twee derde van de modellen een verandering weergeven met hetzelfde teken.

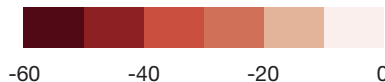
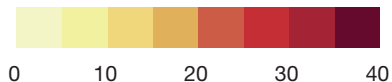
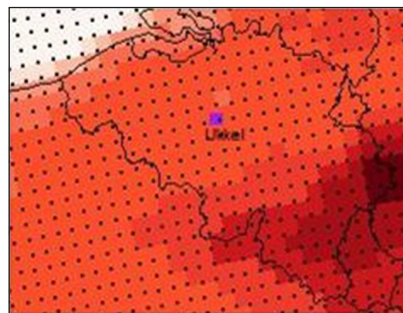
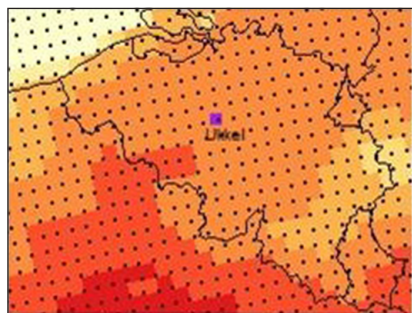
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

De regionale patronen worden iets duidelijker als we kijken naar de verandering in de frequentie van extremen aan het einde van de eeuw. Zo blijkt dat in 85 % van de modelresultaten beschikbaar voor België de sterkste toename van het aantal dagen waarbij de maximumtemperatuur boven de 25 °C uit komt, te vinden is in het centrum, met zwakere signalen nabij de kust en in de Ardennen (figuur 37). De afname van het aantal extreem koude dagen met een minimumtemperatuur beneden de 0 °C situeert zich dan weer vooral in de Ardennen, waarschijnlijk omdat het aantal koude dagen in het huidige klimaat hier hoger is.

**Figuur 37:** Regionaal patroon van de verandering in het aantal dagen per jaar boven de 25 °C (links) en onder de 0 °C (rechts) aan het einde van de eeuw

verandering in het aantal dagen met maximumtemperatuur boven de 25 °C

verandering in het aantal dagen met minimumtemperatuur onder de 0 °C



De stippen geven de significante gebieden aan, waar twee derde van de modellen een verandering weergeven met hetzelfde teken.

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.2.4 Mogelijke evolutie van het stedelijk hitte-eilandeffect

Voor een analyse van de mogelijke evolutie van het hitte-eilandeffect in en rond onze steden, is het belangrijk om fijnmazige klimaatmodellering te combineren met scenario's voor stedelijke uitbreiding. Omdat stedelijke hittestress in de zomer sterk varieert van jaar tot jaar, wordt bij deze analyse ook gewerkt met klimaatobservaties over een langere periode (10 jaar). De berekening van de stedelijke hitte-indicator is analoog als voor de temperatuurmetingen besproken in § 2.1.4, waarbij zowel de duur als het gewicht van een hittegolf in rekening worden gebracht.

De temperatuur en hittestress hangt sterk af van de omgeving. Daarom hanteren we voor de verdere analyse van het hitte-eilandeffect drie verschillende omgevingscategorieën op basis van de versteningsgraad in de omliggende 100 km<sup>2</sup>:

- stedelijk: 50 % of meer van de oppervlakte is versteend (zoals in het centrum van Brussel en Antwerpen),
- licht-stedelijk en rand-stedelijk: 25 tot 50 % van de oppervlakte is versteend (centrum van Gent, Brugge en Kortrijk, en rondom de stadscentra Antwerpen en Brussel),
- landelijk: minder dan 25 % van de oppervlakte is versteend (overig Vlaams grondgebied).

Het gecombineerd effect van klimaatverandering en stedelijke uitbreiding op het gemiddeld aantal hittegolfgraaddagen in een jaar is aanzienlijk voor het midden en het hoog klimaatscenario. Hierbij is de toename het meest uitgesproken voor de stedelijke gebieden met respectievelijke stijgingen van 14 naar 70 graaddagen (midden klimaatscenario) en van 14 naar 236 graaddagen (hoog scenario), en in mindere mate voor de licht-stedelijke gebieden van 8 naar 42 graaddagen (midden klimaatscenario), en van 8 naar 161 graaddagen (hoog klimaatscenario). Voor de landelijke gebieden is de toename telkens kleiner: van 2 naar 20 graaddagen voor het midden klimaatscenario, en van 2 naar 92 voor het hoog klimaatscenario. Bemerk wel dat het gemiddeld aantal hittegolfgraaddagen voor het toekomstige midden klimaatscenario in respectievelijk de stedelijke, licht-stedelijke en landelijke gebieden telkens hoger ligt dan het aantal hittegolfgraaddagen voor de warmste zomers uit het recente verleden (2003 en 2006).

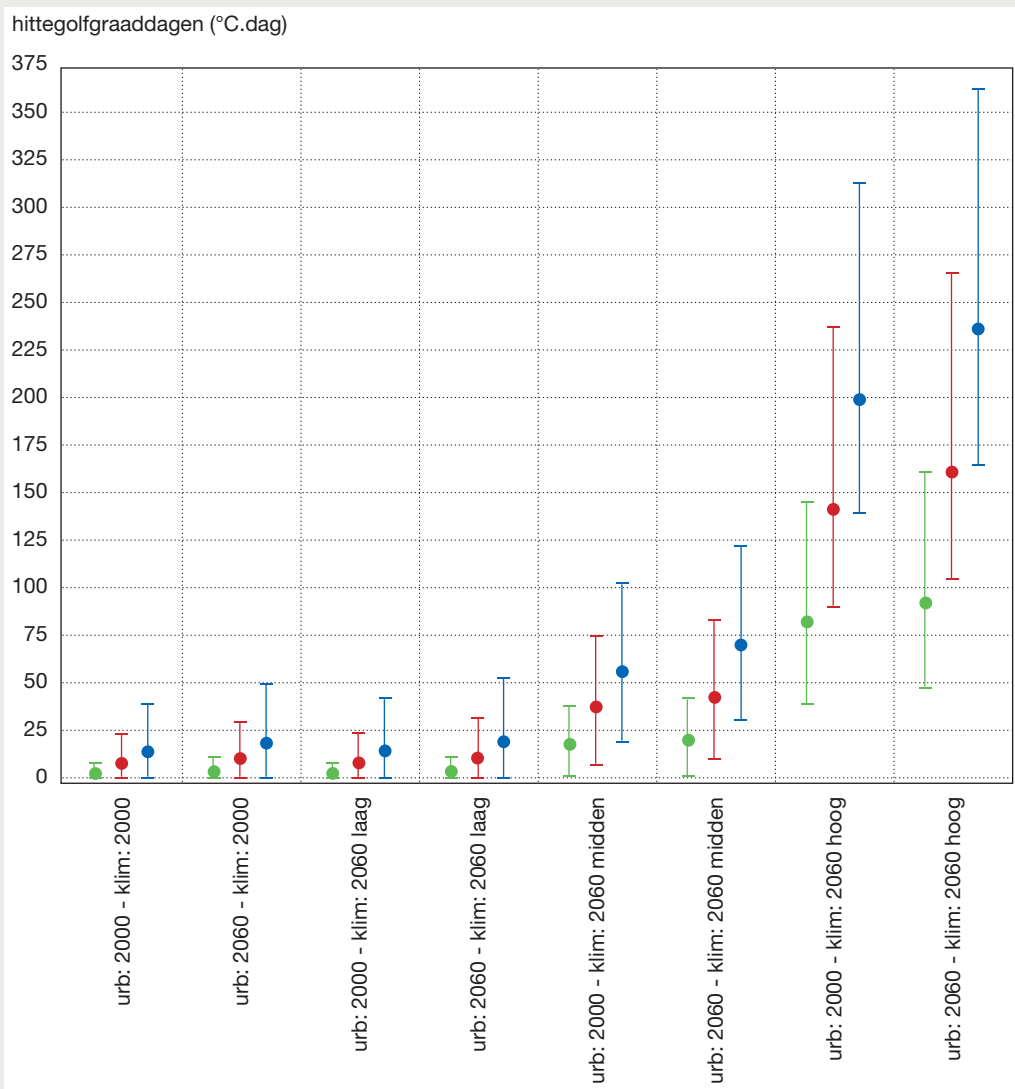
Hete zomers zoals die van 2003 worden dus helemaal geen uitzondering meer. Steden kunnen nu al fungeren als hotspots van de mondiale klimaatopwarming, en stedelijke expansie zal die hotspots nog versterken. De toename van stedelijke hittestress door stadsuitbreiding zal vooral merkbaar zijn in de stadscentra zelf, ook al manifesteert de toename in versterking zich vooral daarbuiten in randstedelijke gebieden en de aangrenzende landelijke gebieden. Dit wordt toegeschreven aan de toenemende ruimtelijke omvang van de hitte-eilanden rond de stadscentra. Hierbij wordt de lucht die 's nachts in de richting van de stadscentra wordt aangevoerd meer voorverwarmd (of juist minder afgekoeld) vanwege de toenemende warmteopslag in de stadsrand. Dat leidt uiteindelijk tot een grotere intensiteit van de hitte-eilanden ter hoogte van de stadscentra. Dat is trouwens ook een van de belangrijkste redenen waarom de stedelijke hittestress in grotere steden beduidend groter is dan in de kleinere steden, zoals ook reeds bleek in § 2.1.4. Daarnaast zijn steden landinwaarts des te gevoeliger voor de toename in hittestress dan steden dicht bij de kust, bijvoorbeeld Brugge versus Hasselt door het afkoelende effect van de zee.

Uitgedrukt in hittegolfgaardagen wordt verwacht dat de hittestress in de Vlaamse steden de komende decennia zal stijgen met een factor 5, gaande van een factor 1,4 voor het *best case* klimaatscenario tot een factor 17,2 voor het *worst case* klimaatscenario (figuren 38 en 39). Twee fenomenen spelen daarin een hoofdrol:

- opwarming van de aarde: de uitstoot van broeikasgassen zorgt voor klimaatverandering met stijgende temperaturen. Gezien steden reeds warmer zijn tijdens hittegolven, zijn zij hiervoor het meest kwetsbaar. De felle toename aan hittestress in steden vergeleken met landelijke gebieden is heel duidelijk te zien in figuur 39 (vergelijk de kaart linksboven met de kaarten eronder);
- stedelijke expansie: steden in Vlaanderen worden alsmaar groter. Hierdoor nemen de stedelijke hitte-eilanden in de toekomst toe, zowel wat betreft hun omvang als intensiteit (vergelijk de kaarten links in figuur 39 met de kaarten rechts). Het is vooral in combinatie met de klimaatopwarming dat de expansie van steden zorgt voor een belangrijke stijging in stedelijke hittestress.

De gesimuleerde toename van stedelijke hittestress kan drastisch lijken; ze wordt echter bevestigd door recente studies op basis van projecties van globale klimaatmodellen uit het in § 3.1.2 vermelde *Coupled Model Intercomparison Project nr. 5* of CMIP5 (De Ridder *et al.*, 2015). Zo bleek uit een analyse voor een groep van acht steden (Almada, Antwerpen, Berlijn, Bilbao, Londen, Rio de Janeiro, New York, Skopje) onder het RCP8.5-klimaatscenario dat het 95<sup>ste</sup> percentiel van de nachtelijke minimumtemperatuur in de zomer met gemiddeld 4,5 °C toeneemt tegen het einde van de eeuw (2081-2100). Het gevolg is dat de nachtelijke minimumtemperatuur veel vaker over de nachtelijke hittegolfdrempel van 18,2 °C zal worden getild dan nu het geval is (Lauwaet *et al.*, 2015). In een andere analyse werd voor dezelfde groep steden gevonden dat het verwachte aantal hittegolfdagen tegen het einde van de eeuw zal vertienvoudigen; deze stijging bleek zich heel consistent voor te doen over de ganse groep van acht steden, ondanks hun grote geografische en morfologische verscheidenheid (Hooyberghs *et al.*, 2015).

**Figuur 38: Evolutie jaarlijks aantal hittegolfgraaddagen voor stedelijke gebieden, rand- of licht-stedelijke gebieden, en landelijke gebieden volgens verschillende klimaatscenario's (Vlaanderen, 2000-2010 versus 2060-2070)**



Stedelijke gebieden: blauwe symbolen; rand- of licht-stedelijke gebieden: rode symbolen; landelijke gebieden: groene symbolen.

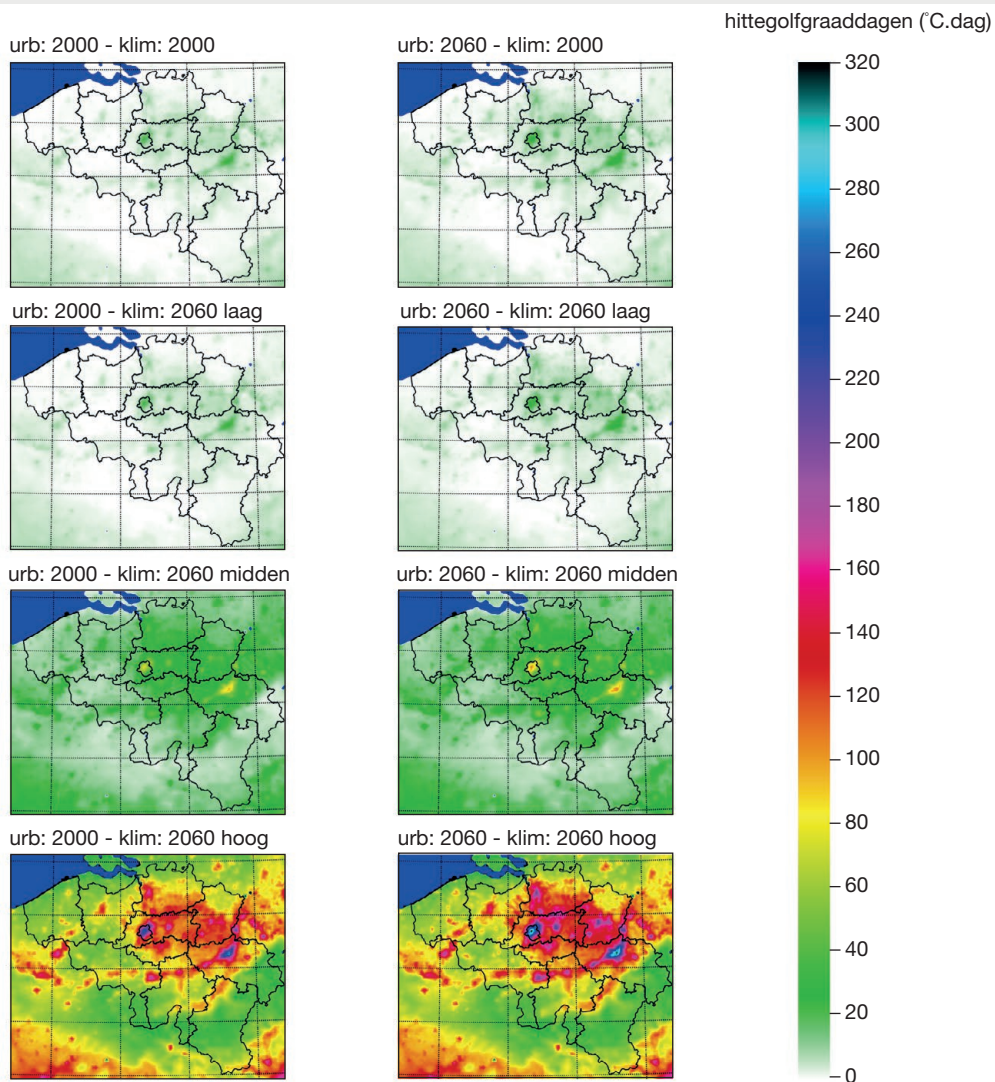
De bolletjes geven de gemiddelde waarden over de tien jaar heen weer, terwijl de horizontale lijntjes overeenkomen met de 16<sup>de</sup> en 84<sup>ste</sup> percentielen.

Klim: 2000 duidt op het recente verleden van 2000 tot 2010, en klim: 2060 op het klimaat in de periode 2060-2070 volgens respectievelijk het laag, midden en hoog klimaatscenario.

De hittestress wordt zowel getoond voor het stedelijke landgebruik van 2000 (urb: 2000) als voor het verwachte landgebruik in 2060 (urb: 2060).

Bron: KU Leuven en VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

Figuur 39: Mogelijke evolutie van de ruimtelijke hittestress-indicator (België, 2000-2010 versus 2060-2070)



Op basis van stedelijke klimaatmodellering voor het Belgisch grondgebied zijn de hittegolfgraaddagen berekend, als gemiddelde over 10 jaar voor:

1. het recente verleden van 2000 tot 2010 (klim: 2000, bovenste kaarten), en
2. deze voor respectievelijk het laag, midden en hoog klimaatscenario in 2060-2070 (klim: 2060 – laag/midden/hoog).

De hittestress wordt zowel getoond voor het stedelijke landgebruik van 2000 (urb: 2000, kaarten links) als voor het verwachte landgebruik in 2060 (urb: 2060, kaarten rechts).

Bron: KU Leuven en VITO in MIRA Onderzoeksrapport 'Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen' (2015)

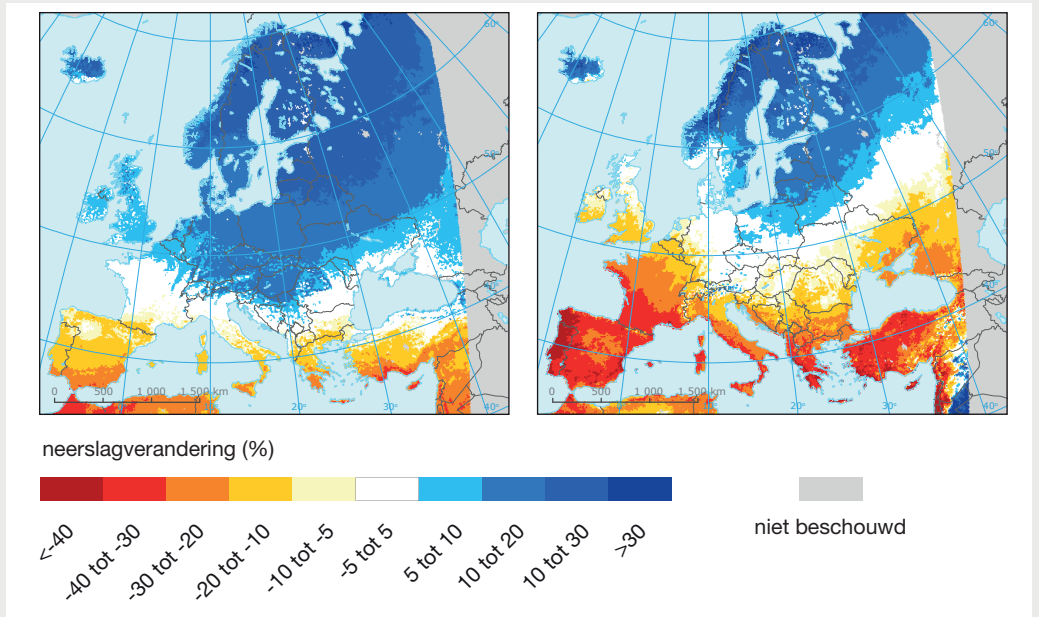
### 3.3 Neerslag en potentiële evapotranspiratie

#### 3.3.1 Gemiddelde neerslag

De mondiale watercyclus zal reageren op de opwarming van de aarde en de veranderingen in neerslag zullen niet uniform zijn over de aarde. In het algemeen zal het contrast tussen droge en natte regio's en tussen de seizoenen verder versterken (IPCC, 2013). Ook de regionale modelresultaten voor Europa tonen dit patroon: tegen het einde van deze eeuw wordt een neerslagtoename tot 30 % verwacht in Centraal- en Noord-Europa, en een afname tot 40 % in Zuid-Europa (figuur 40) in het RCP8.5-scenario. Gedurende de zomer verschuift de regio waar een verdroging optreedt verder naar het Noorden. In het RCP4.5-scenario wordt een gelijkaardig ruimtelijk patroon verwacht, maar minder uitgesproken.

Deze veranderingen zijn consistent met wat er zich gedurende de laatste 50 jaar heeft afgespeeld in Europa: in Scandinavië en de Baltische staten is de jaarlijkse neerslag sinds 1960 met meer dan 17 mm per decennium toegenomen, terwijl op het Iberische schiereiland, vooral in Portugal, de neerslag met 90 mm per decennium afnam (Haylock *et al.*, 2008).

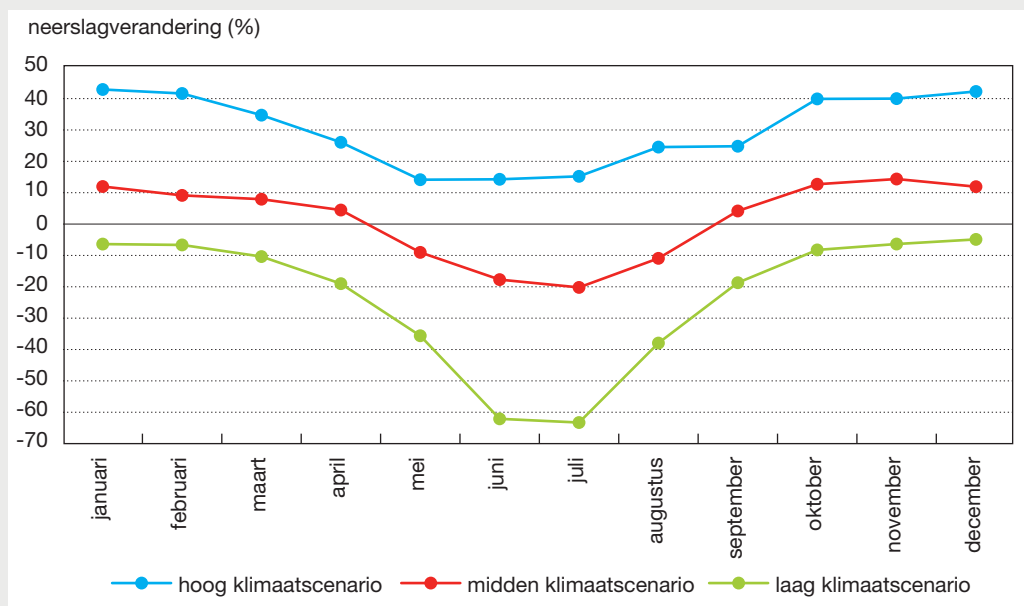
**Figuur 40:** Geprojecteerde verandering in de jaarlijkse (links) en zomer (rechts) neerslag in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor het RCP8.5-scenario



Bron: EEA (2014)

België bevindt zich in een transitiezone met een vernatting in de winter en verdroging in de zomer en een lichte toename in jaargemiddelde neerslag (figuur 40). De afgeleide klimaatscenario's voor ons land tonen relatieve neerslagveranderingen tussen een status quo en +38 % in winterneerslagvolume over 100 jaar, en tussen +18 % en -52 % in zomerneerslagvolume (figuur 41, tabel 4). Over 30 jaar bedraagt de stijging in de winter tussen ongeveer 0 % en +11 % en de verandering in de zomer tussen +5 % en -16 %.

**Figuur 41:** Klimaatscenario's voor de verandering in maandgemiddelde neerslag (Ukkel, over 100 jaar)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

**Tabel 4:** Klimaatscenario's voor de verandering in seizoensneerslag in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug
hoog	+38 %	+18 %	+19 %	+9 %	+11 %	+5 %
midden	+12 %	-15 %	+6 %	-7 %	+3 %	-4 %
laag	-1 %	-52 %	-0,6 %	-26 %	-0,4 %	-16 %

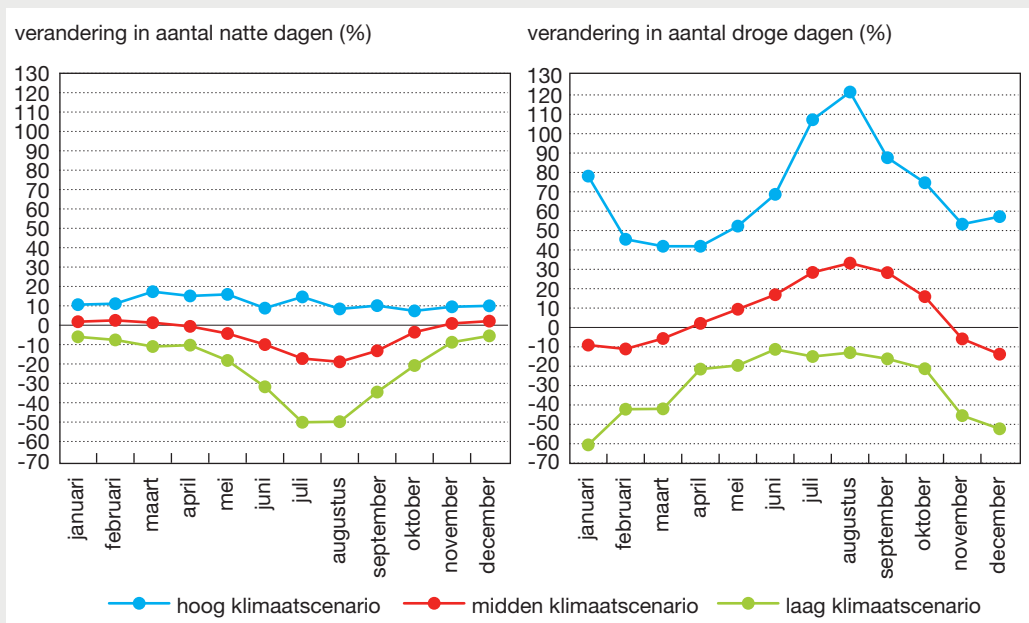
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)



Figuur 42 geeft de veranderingen weer in het aantal natte en droge dagen: wanneer de dagneerslag gelijk of lager is dan 0,1 mm wordt een dag als droog beschouwd, en nat als deze hoger is dan 0,1 mm. De procentuele toename in aantal natte dagen en afname in het aantal droge dagen zijn niet identiek omdat het aantal natte of droge dagen in het huidige klimaat verschilt (andere noemer in de berekening van het relatieve verschil of de procentuele verandering).

Uit figuur 42 en bijhorende tabel 5 blijkt dat de veranderingen in winterneerslag (gemiddelde toename) voor een deel het gevolg zijn van veranderingen in het aantal natte of droge dagen. De verandering in het aantal natte dagen (figuur 42 links) is voor de drie klimaatscenario's meer gecentreerd rond de nulwaarde dan de verandering in totale maand- of seizoensneerslag (figuur 41; tabel 4). Dit betekent dat de gemiddelde toename in winterneerslag niet zozeer het gevolg is van een wijziging in het aantal natte dagen, maar vooral van wijzigende dagneerslagintensiteiten.

**Figuur 42: Klimaatscenario's voor de verandering in aantal natte dagen (links) en aantal droge dagen (rechts) (Ukkel, over 100 jaar)**



De hoog, midden en laag scenario's werden afzonderlijk berekend voor het aantal natte dagen, en voor het aantal droge dagen. Het aantal natte dagen en het aantal droge dagen zijn bij eenzelfde scenario dus niet noodzakelijk afkomstig van hetzelfde klimaatmodel, en dus niet noodzakelijk consistent.

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Voor de zomer is dat anders. Tijdens de zomermaanden neemt het aantal natte dagen eerder af en het aantal droge dagen eerder toe. Deze af- en toenamen zijn bovendien voor de drie klimaatscenario's sterk niet-gecentreerd rond de nulwaarde. Het minst extreem klimaatscenario geeft bijvoorbeeld slechts een lichte daling in het aantal droge dagen of een lichte stijging van het aantal natte dagen, terwijl het meest extreem scenario een zeer sterke stijging geeft van het aantal droge dagen (90 % over 100 jaar) of een sterke daling van het aantal natte dagen (41 % over 100 jaar).

**Tabel 5:** *Klimaatscenario's voor de verandering in aantal natte en droge dagen in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)*

		100 jaar		50 jaar		30 jaar	
		dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug
natte dagen	hoog	+8 %	+4 %	+4 %	+2 %	+2 %	+1 %
	midden	+1,5 %	-15 %	+0,8 %	-8 %	+0,5 %	-5 %
	laag	-5 %	-41 %	-2 %	-21 %	-1 %	-12 %
droge dagen	hoog	+42 %	+90 %	+21 %	+45 %	+13 %	+27 %
	midden	-11 %	+28 %	-5 %	+14 %	-3 %	+9 %
	laag	-44 %	-6 %	-22 %	-3 %	-13 %	-2 %

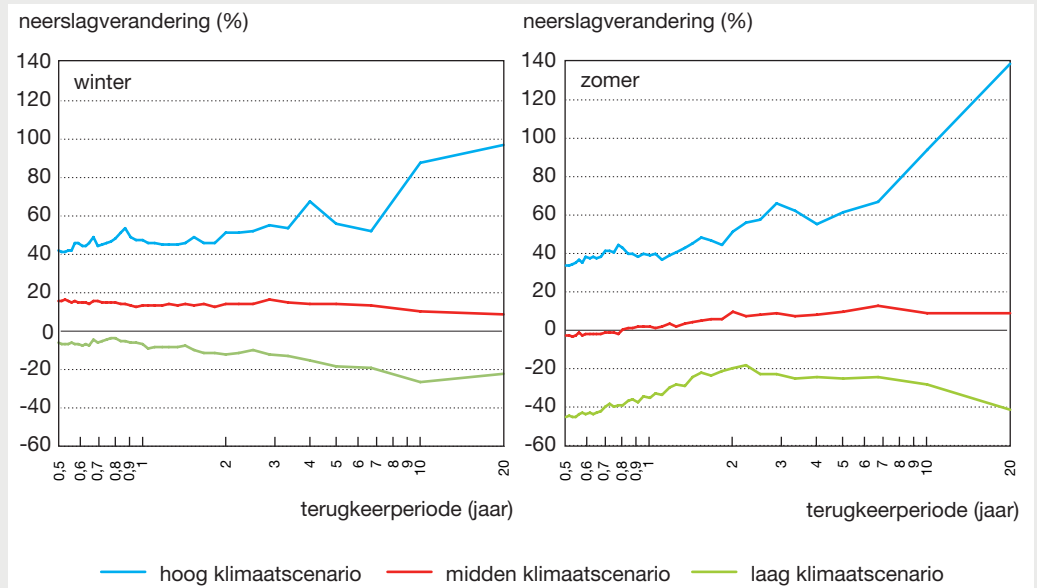
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.3.2 Extreme neerslag

Voor de neerslagextremen (dagneerslagintensiteiten) is de neerslagverandering geanalyseerd in functie van de terugkeerperiode (figuur 43). Indien rekening wordt gehouden met de hogere onzekerheid in de neerslagverandering voor de grotere terugkeerperiodes (dus groter verschil tussen hoog en laag scenario), blijkt voor de winter de procentuele neerslagverandering niet systematisch voor alle scenario's toe te nemen met de terugkeerperiode: enkel voor het hoog klimaatscenario wordt een toename van de procentuele verandering in neerslagintensiteit vastgesteld voor hogere terugkeerperiodes. Voor de zomer geeft het midden en vooral het hoog klimaatscenario een systematische toename van de procentuele neerslagverandering in functie van de terugkeerperiode.

Voor de wintermaanden is in tabel 6 de procentuele neerslagverandering berekend, uitgemiddeld voor alle neerslagintensiteiten met een terugkeerperiode groter dan 0,1 jaar. Deze verandering gaat van -10 % voor het laag scenario tot +53 % voor het hoog scenario over 100 jaar.

**Figuur 43:** Procentuele verandering in neerslagintensiteiten in functie van de terugkeerperiode in zowel de winter (links) als de zomer (rechts) bij wijzigend klimaat (Ukkel, over 100 jaar)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

**Tabel 6:** Klimaatscenario's voor de procentuele verandering in winterse neerslagintensiteiten met terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

	100 jaar	50 jaar	30 jaar
hoog	+53 %	+27 %	+16 %
midden	+15 %	+8 %	+5 %
laag	-10 %	-5 %	-3 %

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Voor de zomermaanden heeft een uitmiddeling weinig zin, omdat de procentuele verandering stijgt met toenemende terugkeerperiode (figuur 43, rechts; tabel 7). Voor een terugkeerperiode van 2 jaar bijvoorbeeld, loopt die verandering op tot +43 % over 100 jaar. Hoe uitzonderlijker de neerslag, hoe groter de verandering: tot +62 % over 100 jaar voor een terugkeerperiode van 5 jaar, tot +109 % voor 20 jaar, enz. Dit betekent dus dat tijdens de zomermaanden de meest uitzonderlijke regenbuien het sterkst in neerslagintensiteit kunnen toenemen.

**Tabel 7:** *Klimaatscenario's voor de verandering in neerslagintensiteiten met terugkeerperiodes tussen 1 en 30 jaar in de zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)*

over 100 jaar						
	1 jaar	2 jaar	5 jaar	10 jaar	20 jaar	30 jaar
hoog	+38 %	+43 %	+62 %	+66 %	+109 %	+138 %
midden	-2 %	+4 %	+8 %	+13 %	+9 %	+9 %
laag	-42 %	-29 %	-25 %	-25 %	-33 %	-41 %
over 50 jaar						
	1 jaar	2 jaar	5 jaar	10 jaar	20 jaar	30 jaar
hoog	+19 %	+22 %	+31 %	+33 %	+55 %	+69 %
midden	-1 %	+2 %	+4 %	+7 %	+5 %	+5 %
laag	-21 %	-15 %	-13 %	-13 %	-17 %	-21 %
over 30 jaar						
	1 jaar	2 jaar	5 jaar	10 jaar	20 jaar	30 jaar
hoog	+11 %	+13 %	+19 %	+20 %	+33 %	+41 %
midden	-1 %	+1 %	+2 %	+4 %	+3 %	+3 %
laag	-13 %	-9 %	-8 %	-8 %	-10 %	-12 %

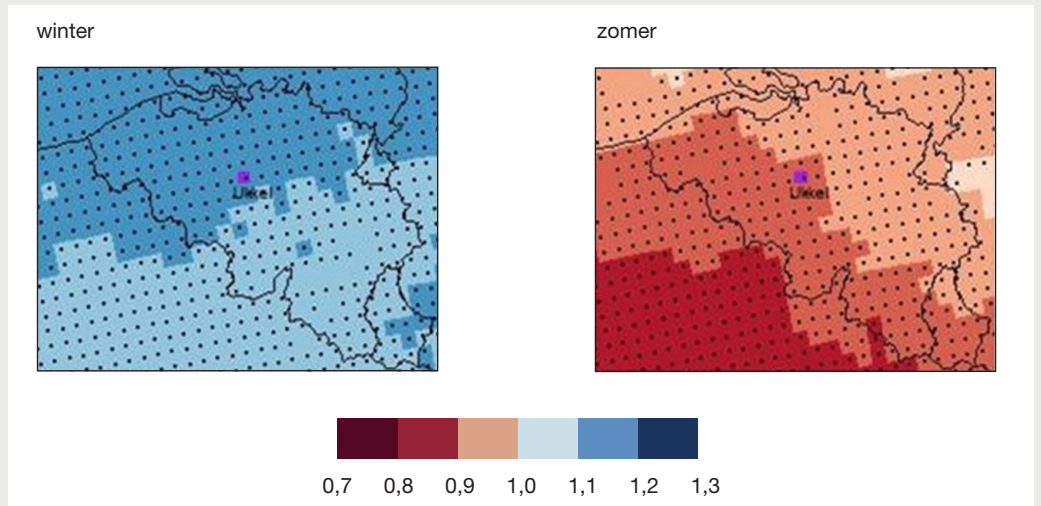
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.3.3 Ruimtelijke patronen

Binnen België zijn verschillende patronen van neerslagveranderingen te detecteren. Dichter bij de kust wordt de toename in winterneerslag groter (figuur 44, links). Dat kusteffect hangt sterk af van de wisselwerking tussen veranderingen in luchtstromingen, het temperatuurcontrast tussen land en zee en de stijging van de temperatuur. Opvallend is dat de klimaatmodellen die de sterkste toename in de neerslag nabij de kust verwachten, ook die zijn met de grootste temperatuurgradiënt tussen de Noordzee en Ukkel.

Voor de zomer wordt een ander ruimtelijk patroon gevonden (figuur 44, rechts): de verdroging wordt sterker naar het zuiden toe, wat overeenkomt met de grootschalige Europese patronen (zie ook § 3.3.1).

Figuur 44: Neerslagverandering tegen het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw (België)



De verandering is weergegeven door middel van relatieve neerslagveranderingen of perturbatiefactoren. De stippen geven de significante gebieden aan waar twee derde van de modellen een verandering weergeven met hetzelfde teken.

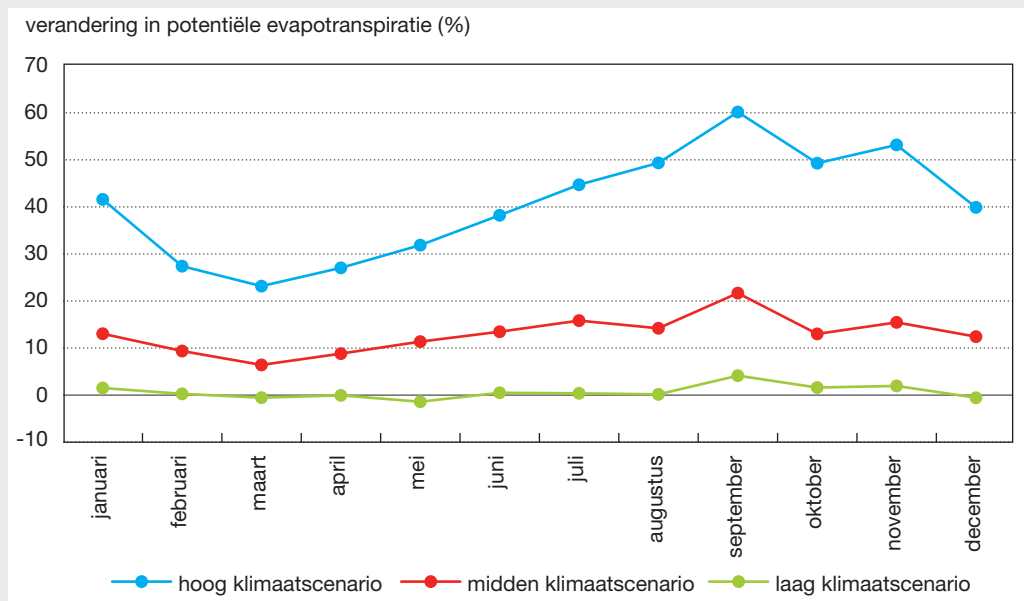
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Het aantal dagen met een dagelijkse neerslag boven de 10 mm werd ook geanalyseerd. In 75 % van de modellen namen de dagen met deze extreme neerslag met 0 tot 15 dagen toe in het noorden van België. Voor het zuiden van België blijkt een dergelijke toename van extremen niet uit de modellen, en was het verschil tussen de modellen groter dan het klimaatveranderingssignaal.

### 3.3.4 Gemiddelde potentiële evapotranspiratie

Voor de potentiële evapotranspiratie (zie ook § 2.2) worden – conform de temperatuurstijging – ook toenames verwacht (figuur 45, tabel 8). Deze bedraagt gemiddeld over de winterperiode tussen +2 % (dus ongeveer status quo ten opzichte van huidig klimaat) en +35 %, en gemiddeld over de zomerperiode tussen +2 % en +47 % over 100 jaar.

**Figuur 45:** Klimaatscenario's voor de verandering in potentiële evapotranspiratie (Ukkel, over 100 jaar)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

**Tabel 8:** Klimaatscenario's voor de verandering in potentiële evapotranspiratie in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug
hoog	+35 %	+47 %	+18 %	+23 %	+11 %	+14 %
midden	+12 %	+17 %	+6 %	+8 %	+3 %	+5 %
laag	+2 %	+2 %	+1 %	+1 %	+0,5 %	+0,5 %

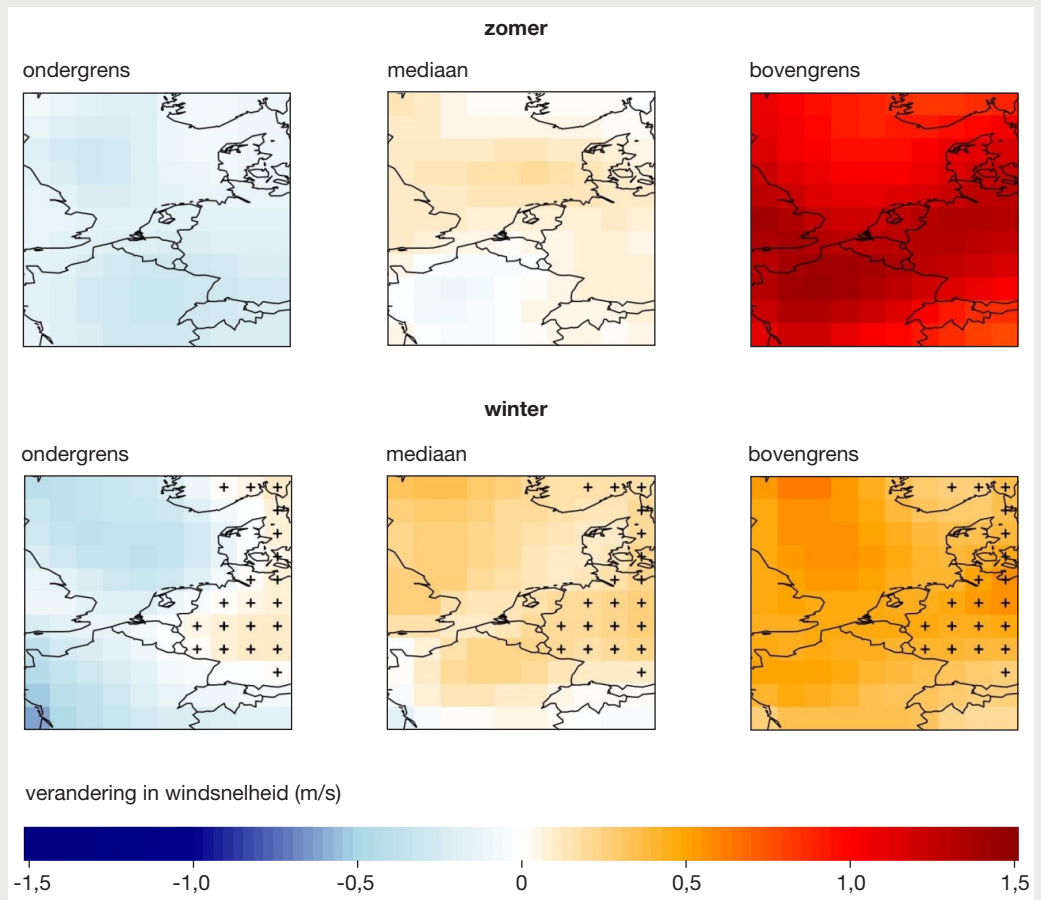
Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.4 Wind

#### 3.4.1 Windsnelheid

Veranderingen in windsnelheid zijn voor België in het algemeen niet significant (figuur 46) en er is grote onzekerheid over het teken van de verandering (toenemend versus afnemend).

**Figuur 46:** Veranderingen in windsnelheid tegen het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw (België en omstreken)

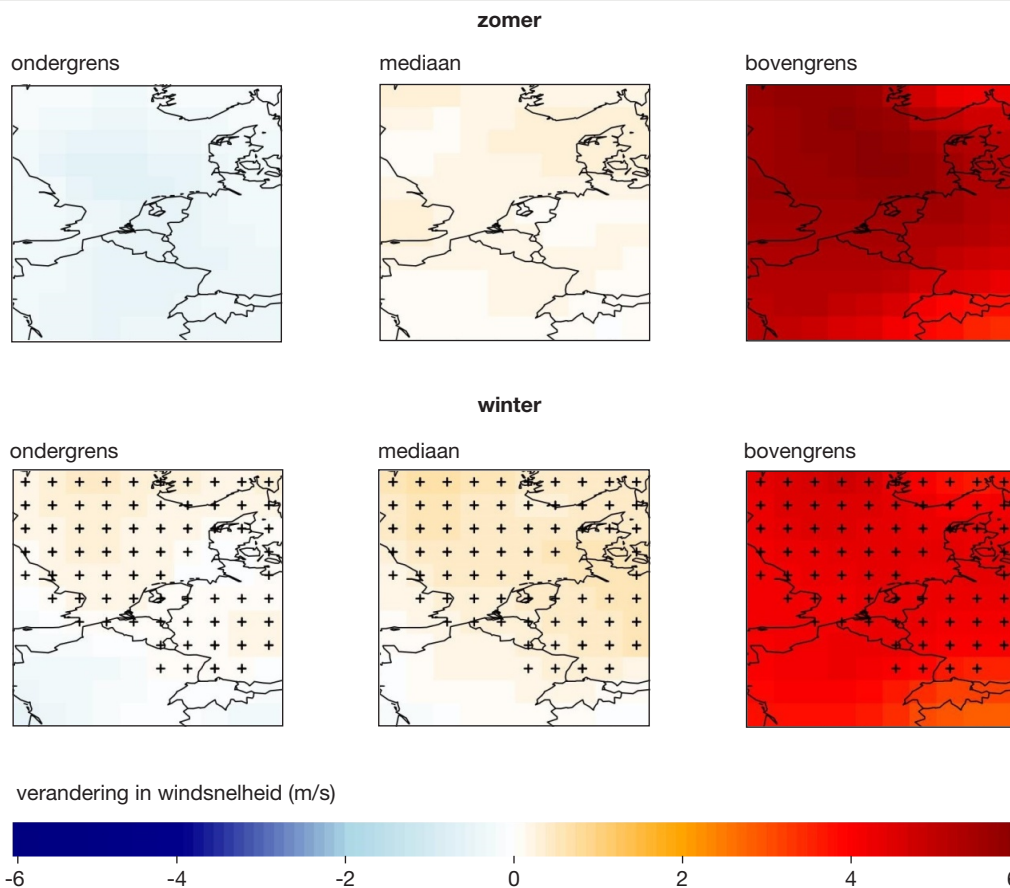


Bovenstaande resultaten zijn een afspiegeling van de output beschikbaar uit mondiale klimaatmodellen. De figuren links geven telkens de ondergrens weer van beschikbare resultaten, in het midden de mediaan en rechts de bovengrens. Waarschijnlijk (kans >66 %) blijft de verandering tussen de hier afgebeelde ondergrens en bovengrens. De kruisjes geven aan in welke gebieden het teken van de verandering voor zowel boven- als ondergrens gelijk is. Dit betekent dat het teken van de verandering met een kans >85 % kan worden vastgelegd.

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

Voor de extremen werd wel een significant signaal voor België gevonden (extreme windsnelheid is hierbij gedefinieerd als het 90<sup>ste</sup> percentiel van de windsnelheid: 9 m/s voor de zomer en 14 m/s voor de winter): in de winter zal over een periode van 100 jaar de windsnelheid tijdens de sterkste stormen waarschijnlijk (kans >66 %) met 0 à 30 % toenemen (figuur 47).

**Figuur 47: Verandering van extreme wind tegen het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw**



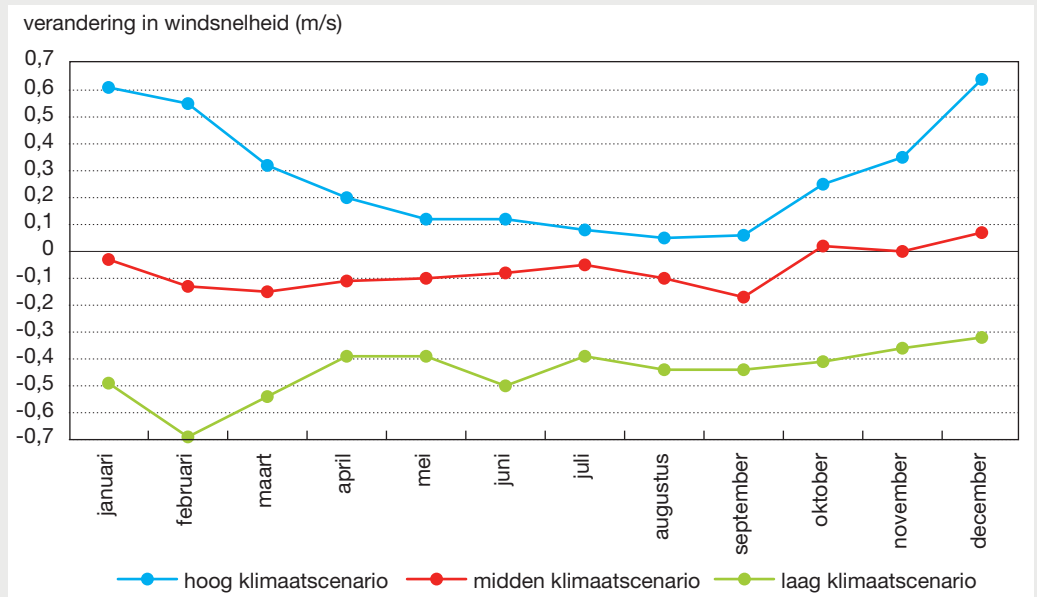
De extreme windsnelheid is hier gedefinieerd als het 90<sup>ste</sup> percentiel van de windsnelheid: 9 m/s voor de zomer en 14 m/s voor de winter.

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)



Dat de windsnelheid voor onze regio weinig verandert blijkt ook uit de resultaten van mondiale klimaatmodellen in figuur 48 en tabel 9: de klimaatscenario's zijn min of meer gecentraliseerd rond de nulwaarde, met maximale veranderingen in de wintermaanden. Gemiddeld over de winter neemt de gemiddelde windsnelheid per dag in het hoog klimaatscenario toe tot 11 % en in het laag klimaatscenario af tot 28 % over 100 jaar. In de zomermaanden zijn deze veranderingen in windsnelheid maar half zo groot.

**Figuur 48:** Klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid (Ukkel, over 100 jaar)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

**Tabel 9:** Klimaatscenario's voor de verandering in windsnelheid in winter en zomer (Ukkel, over 100, 50 en 30 jaar)

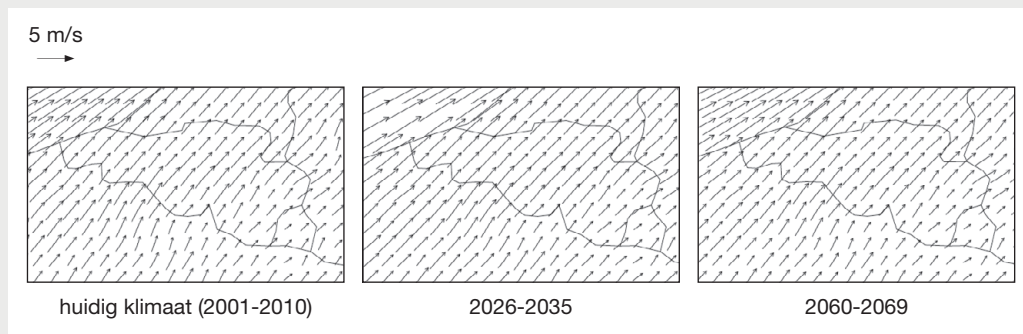
	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug	dec-jan-feb	jun-jul-aug
hoog	+11 %	+6 %	+6 %	+3 %	+3 %	+2 %
midden	-1 %	-3 %	-0,5 %	-1,5 %	0 %	-1 %
laag	-28 %	-16 %	-14 %	-8 %	-8 %	-5 %

Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

### 3.4.2 Windrichting

Ook de veranderingen in de verwachte windrichting zijn klein: er dienen zich geen duidelijke veranderingen in de gemiddelde windrichting aan (figuur 49). Gemiddeld gezien blijft de wind uit het zuidwesten komen.

**Figuur 49:** De gemiddelde windrichting in het heden, de periode rond 2030 en de periode rond 2064 (België)



Bron: KU Leuven in MIRA Onderzoeksrapport 'Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen' (2015)

## 3.5 Zeeklimaat

### 3.5.1 Gemiddeld zeeniveau en stormopzet

In het AR5 van 2013 geeft het IPCC aan een toename van het gemiddelde zeeniveau met 26 tot 82 cm (2081-2100 t.o.v. 1986-2005) te verwachten onder invloed van de globale opwarming. De belangrijkste bijdragen hiervoor zullen komen van de thermische uitzetting van het zeewater en van het afsmelten van gletsjers en kleine ijskappen, maar ook de gestage veranderingen van de grote ijskappen op Groenland en Antarctica zullen daarin een bijdrage leveren. Voor Nederland verwacht het KNMI in haar nieuwe scenario's een zeeniveaustijging aan Nederlandse kust van 50 tot 100 cm tegen 2100 (KNMI, 2014).

Voor de Belgische kust werden in het kader van het Vlaams Klimaatbeleidsplan 2013-2020 (VKP, 2013) volgende klimaatscenario's naar voor geschoven, afgeleid door middel van extrapolatie van de historische trend (zie § 2.3.1):

- een gematigd scenario met een gemiddelde verhoging van de zeespiegel van 6 mm/jaar (of 60 cm tot 2100);
- een warm scenario met een versnelde gemiddelde zeespiegelstijging van 9 mm/jaar (of 90 cm tot 2100);

- een *worst case* scenario met een toename van het jaargemiddeld zeeniveau met 200 cm tegen 2100. Dit scenario wordt vooral aangewend om 'robuuste' maatregelen aan te tonen, hoewel er wetenschappelijk gezien weinig reden is om een dergelijke stijging op een termijn van 100 jaar aan te nemen. Toch zijn dit maatregelen die een meerwaarde hebben, onafhankelijk van het scenario.

Naast het gemiddelde zeeniveau, is ook de evolutie van de stormvloedniveaus belangrijk (bij stormen tijdens de hoogste getijniveaus). Daarom vermelden we ook twee scenario's die naar voor werden geschoven door het Waterbouwkundig Laboratorium (2015). Men streeft een beveiliging van onze kust tegen minstens een 'superstorm' met een terugkeerperiode van 1 000 jaar na, dus een storm die zich statistisch gezien 1 keer in duizend jaar voordoet aan onze kust. Deze klimaatscenario's vormen een leidraad voor de afweging van duurzame maatregelen ter versterking van de zeewering tot 2100:

- een gemiddeld scenario: het jaargemiddelde zeeniveau neemt toe met 24 cm tegen 2050 en met 64 cm tegen 2100, vergeleken met 2000. De stormvloedniveaus nemen nog sterker toe door de toename van de getijslag: +30 cm tegen 2050 en +80 cm tegen 2100;
- een *worst case* scenario: het jaargemiddelde zeeniveau neemt toe met 36 cm tegen 2050 en met 192 cm tegen 2100, vergeleken met 2000. De stormvloedniveaus nemen tegelijkertijd toe met respectievelijk 45 cm en 240 cm.

### 3.5.2 Stromingen en golven

Hydrodynamische modellen, golfmodellen en sedimenttransportmodellen tonen aan dat de stromingen tot 10 % kunnen verhogen voor Nieuwpoort en dat de golven nabij het strand significant kunnen verhogen.

De golfhoogte blijkt ook een periodieke natuurlijke variabiliteit te vertonen. Voor wat deze golfhoogte betreft, geeft de historische datareeks in en nabij het Belgische deel van de Noordzee enkel een natuurlijke variabiliteit aan met een periode van ongeveer zeven jaar. Er is ook een seizoencyclus: er zijn gemiddeld hogere golven in de winter en lagere golven in de zomermaanden (VKP, 2013).



---

4

MOGELIJKE GEVOLGEN EN ADAPTATIE AAN  
KLIMAATVERANDERING



#### 4 MOGELIJKE GEVOLGEN EN ADAPTATIE AAN KLIMAATVERANDERING<sup>6</sup>

-----

De klimaatverandering zal heel wat effecten hebben op de maatschappij. Een sector die sterk beïnvloed wordt door het klimaat is het waterbeheer. In de volgende decennia zullen extreem hoge rivierdebieten frequenter voorkomen in continentaal Europa, maar afnemen in delen van Zuid-Europa. Ook zijn er verschillende studies in Vlaanderen die in bepaalde stroomgebieden een stijging van extreme debieten modelleren. Dit is bijvoorbeeld het geval in het stroomgebied van de Maas. Deze stijging in extreme debieten zal zich voornamelijk voordoen gedurende de winter in Noord-Europa, ten gevolge van de stijging in winterneerslag. In het zuiden van Europa zullen er meer en intensere droogtes zijn. In alle andere regio's is er geen significant patroon vast te stellen.

Rivieren zullen in de toekomst vaker buiten hun oevers treden. Doordat meer mensen zich vestigen in overstromingsgevoelige gebieden, zullen er meer mensen en bezittingen blootgesteld worden aan de gevolgen van overstromingen. De delen van Europa die het meest gevoelig zijn voor rivieroverstromingen zijn het Verenigd Koninkrijk, en Centraal- en Noord-Europa, waaronder ook België.

De stijging van de zeespiegel kan in de toekomst tot kustoverstromingen leiden. Dit kan gevolgen hebben voor kuststeden, havenfaciliteiten en andere infrastructuur. De landen die binnen Europa de grootste schade zullen ondervinden bij het uitblijven van gepaste adaptatiemaatregelen, zijn Nederland, Duitsland, Frankrijk, België, Denemarken, Spanje en Italië. Een aanpassing van de kustverdedigingen (bijv. dijken) kan de impact en de schadeprijs wel sterk reduceren. Kustverdedigingen moeten ook steeds meer bezittingen en mensen beschermen, waardoor het verlies als gevolg van overstromingen in de toekomst ook groter kan zijn.

Uit diverse onderzoeksprojecten in Europa blijkt voorts dat nog enkele andere gevolgen voor de waterhuishouding verwacht worden bij aanhoudende klimaatverandering:

- de aanvulling van het grondwater en het niveau van de watertafel zullen in vele stroomgebieden in Europa, vooral Zuid-Europa, maar ook in bepaalde streken van Centraal-Europa waaronder België, sterk dalen tegen het einde van de eeuw;
- hogere temperaturen in de zomer leiden in veel rivieren, zoals de Maas, tot gunstige condities voor algenbloei en droogte zorgt ervoor dat de vervuiling minder verdund wordt.

Voorts heeft de klimaatverandering ook gevolgen voor de volksgezondheid, de natuur en de ecosystemen en voor verschillende economische sectoren. Enkele voorbeelden:

- oververhitting van gebouwen (huizen, scholen, ziekenhuizen) in de zomermaanden, met een verhoogde vraag naar koelingsenergie tot gevolg;
- meer ziekte- en sterftegevallen als het gevolg van de warmte, zeker bij oudere mensen. Het aantal sterftegevallen als gevolg van de koude zal dan weer dalen;

6 Dit hoofdstuk is in hoofdzaak gebaseerd op van Lipzig & Willems (2015) en de MIRA-indicatoren van de milieuthema's Klimaatverandering en Waterkwantiteit op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be). Andere bronnen staan in de tekst zelf vermeld.

- na 2050 zal de windenergie in Centraal- en Noord-Europa stijgen gedurende de winter en dalen gedurende de zomer. Voor Zuid-Europa wordt er een daling verwacht in beide seizoenen, waardoor de stroomopbrengst van windturbines zal dalen;
- door langere droogteperiodes zullen meer bomen afsterven en zal het bosareaal afnemen, ook in België.

De specifieke invloed voor Vlaanderen van de nieuwe klimaatscenario's beschreven in hoofdstuk 3 werd nog niet gekwantificeerd. Dat betekent dat de concrete gevolgen van de nieuwste klimaatprojecties op specifieke sectoren nog niet zijn gekend. Maar afgelopen jaren zijn wel heel wat impactmodelleringen uitgevoerd met de klimaatscenario's zoals gerapporteerd in de Milieuverkenning 2030 (Brouwers *et al.*, 2009) en voor de opmaak van de overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP's). Op basis van de (vrij beperkte) verschillen<sup>7</sup> tussen de vroegere en de nieuwe klimaatscenario's, kunnen wel indicaties gegeven worden van deze gevolgen.

Hierna volgt een beschrijving van enkele gekende gevolgen van de reeds opgetreden klimaatverandering. Op basis van de meest recente impactberekeningen worden bovendien de toekomstige gevolgen geschetst voor enkele specifieke sectoren.

#### 4.1 Slachtoffers van hittegolven

De relatie tussen temperatuur en sterfte is U-vormig: de mortaliteit neemt toe bij temperaturen die ver boven of onder de optimale temperatuur liggen. Dat optimum is trouwens locatiespecifiek: de bevolking van Zuid-Europese landen is beter bestand tegen hoge temperaturen dan inwoners van onze regio.

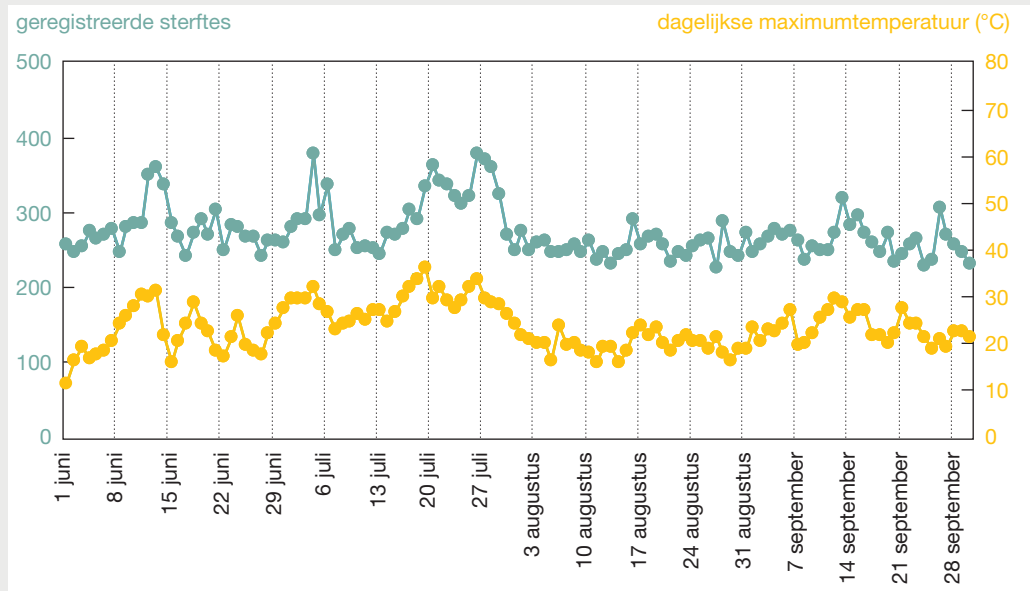
Hogere temperaturen verhogen vooral sterfte bij bejaarden, bij mensen met hart- en vaatziekten en ademhalingsproblemen, en bij kinderen jonger dan vier jaar. Die verhoogde sterfte wordt vooral opgetekend tijdens periodes waarin de dagelijkse maximumtemperatuur boven de 25 °C stijgt (figuur 50). Zulke warme periodes vallen regelmatig samen met periodes waarin ook de gezondheidsdrempels voor ozon (O<sub>3</sub>) en fijn stof (PM<sub>10</sub>) overschreden worden, die op hun beurt bijdragen tot de verhoogde sterfte tijdens hitteperiodes (zie ook § 4.2).

7 Bij vergelijking tussen de nieuwe klimaatscenario's voor Vlaanderen tegen 2100 zoals beschreven in hoofdstuk 3 en de vorige klimaatscenario's uit de Milieuverkenning 2030 van MIRA (Brouwers *et al.*, 2009), blijkt dat:

- de maandgemiddelde temperatuurveranderingen in grootteorde vergelijkbaar blijven. De bandbreedte is wel toegenomen. De modelresultaten gebruikt voor de nieuwe scenario's geven voor bepaalde maanden en scenario's immers wat grotere toenames, vooral voor de eerste zes maanden van het jaar (januari tot juni) en voor het hoog klimaatscenario. Voor deze maanden liggen de nieuwe resultaten gemiddeld 3,3 °C hoger voor het hoog scenario en 1,5 °C voor het midden scenario. Voor het laag scenario is het verschil met de vorige scenario's miniem (gemiddeld slechts 0,1 °C lager);
- de winter- en zomerneerslag respectievelijk in dezelfde mate toe- en afneemt;
- de veranderingen in neerslagextremen nagenoeg dezelfde zijn;
- de potentiële evapotranspiratie vooral bij het hoog klimaatscenario een beduidend sterkere toename krijgt toegewezen.

Voor meer duiding omtrent de gelijkenissen en verschillen tussen de 'oude' en 'nieuwe' klimaatscenario's voor Vlaanderen, verwijzen we naar van Lipzig N.P.M. & Willems P. (2015).

Figuur 50: Evolutie van het sterftecijfer en van de temperatuur in de zomer van 2006 (België)



Bron: Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid (2007)

In Europa was de zomer van 2003 waarschijnlijk de heetste sinds het jaar 1500. Niettegenstaande extreme weerfenomenen ook ‘toevallig’ kunnen gebeuren, speelt de menselijke invloed een grote rol. Onderzoek geeft aan dat menselijke activiteit het risico op een dergelijke hittegolf verdubbelt met een zekerheid van minstens 90 %. Onderzoek naar het aantal hittedoden in die zomer van 2003 geeft aan dat in de maanden juni tot september van dat jaar in twaalf Europese landen een verhoogde sterfte werd opgetekend. In totaal lag de sterfte in die vier zomermaanden gemiddeld 6,99 % hoger dan in zomermaanden in de referentie jaren (1998-2002). In Frankrijk liep de extra sterfte in de tweede week van augustus zelfs op tot 96,5 %. In totaal bedroeg het aantal extra doden in die vier zomermaanden in Europa 71 445. De extreme temperaturen verergerden ook de blootstelling aan andere schadelijke stoffen, zoals troposferische ozon en fijn stof.

Vooraf in steden staan mensen bloot aan hittestress als gevolg van klimaatverandering. Door de blokkering van wind en het vasthouden van warmte in beton, asfalt en stenen kan het in steden nog veel warmer worden dan in de omliggende gebieden. Zo kunnen steden uitgroeien tot heuse hitte-eilanden. Vooral tijdens de nacht kan het temperatuurverschil met de omgeving er oplopen (zie § 2.1.4). Ook socio-economische factoren spelen mee in de verhoogde gevoeligheid van stedelingen voor hitteperiodes: bijvoorbeeld sociale isolatie, dakloosheid, verminderde mobiliteit, lagere inkomens.

We gaan na tot welke oversterfte, hittegolven leiden in België. Daarbij baseren we ons op analyses uitgevoerd door het Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid (WIV). Een hittegolf is hier gedefinieerd als een periode van minstens vijf dagen waarin de maximale dagtemperatuur te Ukkel telkens 25 °C of meer bedraagt (zomerdagen), en waarin bovendien drie dagen lang de temperatuur er boven de 30 °C stijgt (tropische dagen).



Sinds 1990 kende België vijf zomers met een langdurige hittegolf:

- in de zomer van 1994 kostte een hittegolf in combinatie met hoge ozonconcentraties op zes weken tijd het leven aan heel wat mensen: er werd een oversterfte van 1 226 personen opgetekend;
- in 2003 kende ons land een belangrijke hittegolf die veertien dagen aanhield, en een andere warme periode die dertien dagen aanhield. Voor deze periodes betrof de oversterfte 1 230 personen. Over de ganse zomer (maanden juni tot september) van 2003 bekeken, komt men zelfs uit op een oversterfte van 2 052 personen. Ook de ozonconcentraties waren zeer hoog;
- 2006 kende twee hittegolven, respectievelijk 5 en 21 dagen lang, en een andere warme periode van negen dagen. Samen zorgden deze drie periodes voor een oversterfte van 1 263 personen. Bijna de helft van de slachtoffers was 85 jaar of ouder;
- eind juni en in de eerste helft van juli 2010 volgden twee hittegolven vlak na elkaar. De eerste hittegolf hield twaalf dagen aan, en leidde tot een oversterfte van 593 personen. De tweede hittegolf hield acht dagen aan, en zorgde voor 374 slachtoffers. In beide periodes lag de mortaliteit significant hoger dan het referentieniveau: respectievelijk +20 % en +19 %. Ruim 40 % van de slachtoffers was 85 jaar of ouder;
- in de zomer van 2013 was vooral de maand juli uitzonderlijk warm. Tussen 6 juli en 4 augustus werden 20 dagen opgetekend met een maximumtemperatuur boven de 25 °C, vijf dagen met een maximumtemperatuur boven de 30 °C en zes dagen waar de minimumtemperatuur boven de 18 °C bleef. Toch bleef de oversterfte in deze warme periode beperkt. Enkel in de leeftijdscategorie van 85 jaar en meer werd een lichte, maar significant verhoogde sterfte genoteerd (6,1 % hoger dan de verwachte sterfte voor deze periode van het jaar).

2007, 2008 en 2009 kenden geen langdurige hitteperiodes, en er werd die jaren dan ook geen significante oversterfte in de zomermaanden geregistreerd. Ook in de zomer van 2011 waren de temperaturen veelal gematigd. Enkel eind juni werd een oversterfte van 238 slachtoffers geregistreerd tijdens enkele opeenvolgende dagen met maximumtemperaturen boven de 25 °C. De slachtoffers vielen vooral in de leeftijdscategorie boven 65 jaar. In de zomer van 2012 viel een korte piek van oversterfte samen met een periode van vijf opeenvolgende warme dagen (met maxima boven de 25 °C) eind juli en werd ook een oversterfte genoteerd tijdens een hittegolf in augustus.

De buitengewone sterfteratio tijdens hittegolven is het hoogst bij bejaarden en bij mensen die vooraf reeds ziek waren. In veel landen vindt vergrijzing van de bevolking plaats, waardoor het aantal mensen die gevoelig zijn voor hittestress toeneemt en klimaatverandering op die manier tot bijkomende impact leidt. Baby's en jonge kinderen vormen mogelijk ook een risicogroep omdat hun temperatuurregulatie nog in ontwikkeling is en er ook sneller uitdroging kan optreden. Alhoewel kan worden verwacht dat een deel van de sterftes tijdens een hittegolf voorkomt bij gevoelige personen die anders in de daaropvolgende weken of maanden gestorven zouden zijn, gaf wetenschappelijk onderzoek daaromtrent geen aanwijzingen: ook na de zomermaanden van 2003 bleef de sterfteratio zelfs nog boven die van de referentieperiode.

Publieke bewustwording van de hitteproblematiek en de installatie van een opvolgings-systeem kunnen het aantal hittedoden sterk terugdringen. Dit blijkt duidelijk uit een vergelijking van de situatie in Frankrijk tijdens de zomer 2003 en de daaropvolgende zomers. Ook bij ons blijkt uit een analyse voor de zomer 2013 dat sensibilisatie helpt. Zo werd in de maanden juli en augustus, die nochtans een lang aanhoudende hitteperiode kenden met daarin twee hittegolven, geen significante stijging van het aantal overlijdens genoteerd. Specifiek in steden kunnen ook groene ruimten met voldoende vegetatie en wateroppervlakten de impact van hitteperiodes reduceren.

De impact van hitteperiodes is vaak minder zichtbaar dan de schade door bijvoorbeeld overstromingen of orkanen. Nochtans blijkt de blootstelling aan hitte toch beduidend meer slachtoffers te maken: vergelijk bijvoorbeeld de 1 500 slachtoffers van orkaan Katrina van 2005 in de Verenigde Staten met de ruim 70 000 slachtoffers van de Europese hittegolf in de zomer van 2003. Hittestress is bovendien geen geïsoleerd probleem. Bij periodes van extreem warm weer kunnen cascades van allerlei klimaatgerelateerde storingen ontstaan. We illustreren dit aan de hand van een scenario dat zich zou kunnen voordoen in een stad die wordt getroffen door een langdurige en sterke hittegolf:

—  
104

- door de droogte zakt het peil van de waterlopen, waardoor de drinkwatervoorziening in het gedrang komt. Ook de binnenvaart ondervindt problemen;
- als de drinkwatervoorziening het laat afweten, hapert de waterbedeling bij kwetsbare groepen (bijv. alleenstaande ouderlingen), met bijhorende gezondheidseffecten;
- door de droogte verliezen stedelijke parken en ander stedelijk groen ook hun koelende werking (huidmondjes van de planten sluiten, evapotranspiratie stopt);
- door de extreme hitte dreigen treinsporen te vervormen, met ontregeld trein- en tramverkeer tot gevolg waardoor pendelaars en goederen niet op hun bestemming geraken;
- door de droogte en de laagwaterstand, en het resulterende tekort aan koelwater, komt ook de elektriciteitsproductie in het gedrang;
- de resulterende elektriciteitspannes veroorzaken problemen met koelingssystemen, onder andere in de ziekenhuizen, die ondertussen overvol geraken met hittedoden;
- er ontstaat algemene chaos door het uitvallen van informaticasystemen.

## 4.2 Invloed op de luchtkwaliteit

---

Uit rapporten van het Europees Milieuagentschap blijkt dat Vlaanderen een van de regio's in Europa is met de hoogste luchtverontreiniging. Naast de emissie van pollutanten hebben ook veranderingen in het klimaat een impact op de luchtkwaliteit:

- ozonvorming wordt beïnvloed door de temperatuur en tijdens hittegolven worden in het algemeen hoge ozonconcentraties waargenomen;
- fijn stof is dan weer gevoelig voor de hoeveelheid menging in de atmosfeer en zal daarom toenemen bij windstille omstandigheden en gedurende periodes waarbij verticale menging in de atmosfeer klein is. Ook wordt de concentratie van fijn stof in omgevingslucht beïnvloed door de neerslagfrequentie en -intensiteit;
- ook het transport van andere pollutanten wordt beïnvloed door de heersende windcondities, bijvoorbeeld bij aanvoer van lucht vanuit de geïndustrialiseerde gebieden.

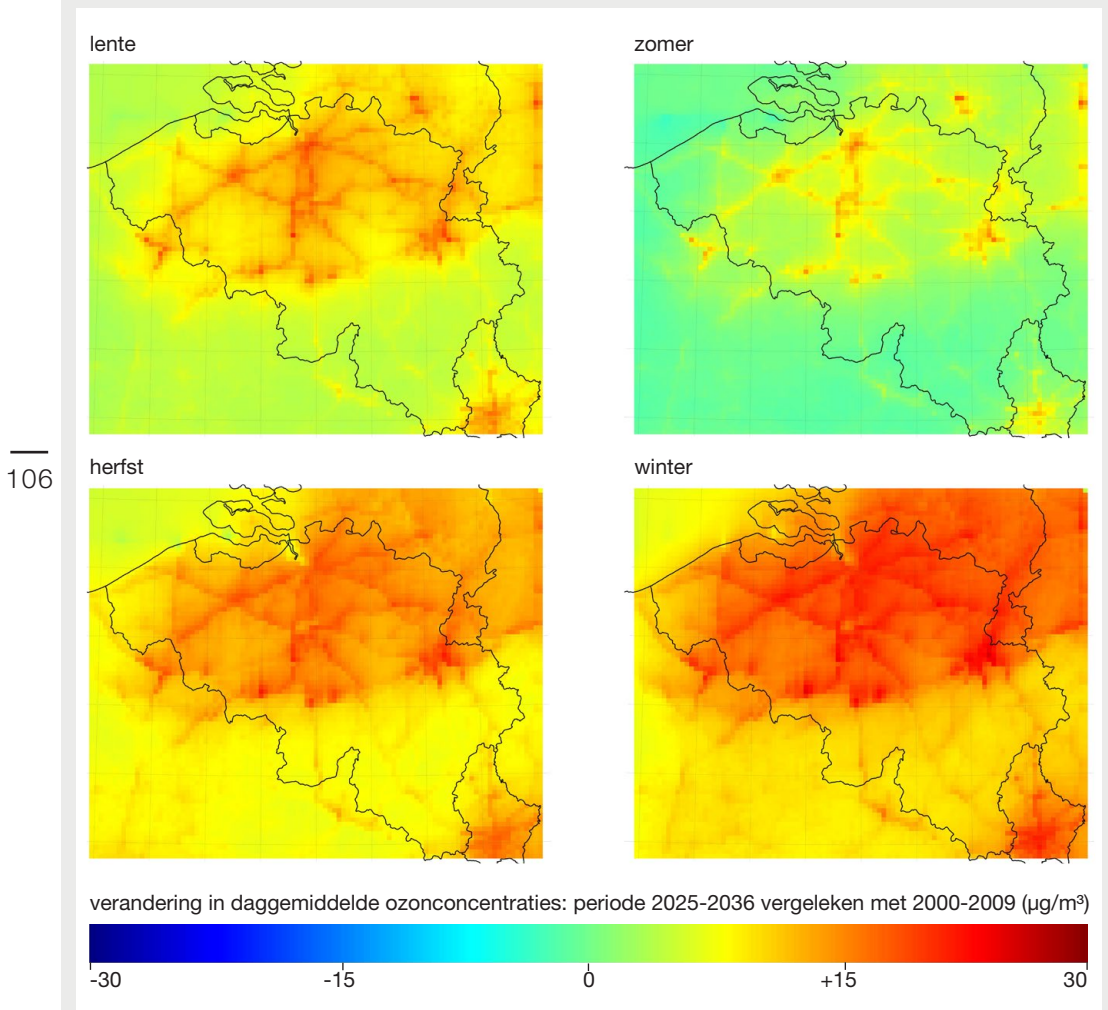
Voor België zijn enkele studies uitgevoerd die naast het effect van klimaatverandering ook de geplande emissiereducties van luchtpolluenten in rekening brengen. Doorrekening van verschillende emissiescenario's in combinatie met verschillende meteorologische condities (meteojaar 2007 als benadering voor huidig klimaat, en meteojaar 2003 met een erg warme zomer als benadering voor toekomstig klimaat) leert dat bij aanhouden van het huidige klimaat de ozonpiekconcentraties voor alle emissiescenario's beneden de door Europa opgelegde plafonds blijven binnen Vlaanderen. Maar bij aanhoudende klimaatverandering zijn belangrijke emissiereducties nodig om beneden die plafonds te blijven: voor de ozonpiekconcentraties blijken de verschillen in de meteorologische condities tussen het jaar 2003 en 2007 veel belangrijker dan de verwachte emissiereducties tot 2030. Voor het respecteren van de maximale omgevingsconcentraties aan fijn stof ( $PM_{10}$ ) blijken deze twee factoren ongeveer even belangrijk (Deutsch *et al.*, 2011).

De meteorologische condities van 2003 kunnen dan wel opgevat worden als analoog voor de toekomst, toch levert doorrekening hiervan nog geen klimaatprojectie op. Beter is dan ook om te rekenen met echte klimaatscenario's voor Vlaanderen zoals in figuur 51. Daaruit blijkt dat we bij doorrekening van het RCP4.5-scenario van het IPCC, tegen 2030 een sterke toename (tot +30 %) van de ozonconcentraties kunnen verwachten. De grootste toenames worden verwacht dicht bij de belangrijkste wegen en in het centrum van de steden. Deze stijging is te wijten aan verminderde ozonafbraak – een proces dat zich voornamelijk 's nachts voor doet – door een reductie van  $NO_x$ -emissies. De procentuele stijging is groter in de winter dan in de zomer (de periode met de hoogste  $O_3$ -concentraties) omdat de lagere  $NO_x$ -emissies ook een negatief effect hebben op de aanmaak van  $O_3$  overdag onder invloed van zonlicht, een proces dat in België voornamelijk in de zomer van belang is. Wanneer de emissies constant worden gehouden en enkel rekening wordt gehouden met het effect van de verwachte klimaatverandering in RCP4.5, dan stijgen de ozonconcentraties veel minder sterk (tot +10 % tegen 2030). Dit gebeurt onder invloed van een oplopende zomertemperatuur en een afname van zomerneerslag, waardoor de vorming van  $O_3$  wordt vergemakkelijkt.

Er kunnen ook nog andere effecten meespelen, die tot dus ver nog niet meegenomen zijn in de studies voor ons land:

- neerwaarts transport van ozon uit de stratosfeer zal op onze breedtegraden wellicht zorgen voor een toename van ozon aan het aardoppervlak;
- toenemende emissies van polluenten in andere delen van de wereld, met name Azië en Amerika, kunnen ook een effect hebben op de ozonconcentraties in Vlaanderen.

Figuur 51: Veranderingen in daggemiddelde ozonconcentraties tegen 2030 voor het RCP4.5 scenario per seizoen (lente, zomer, herfst, winter)



Bron: Lauwaet *et al.* (2014)

## 4.3 Overstromingen

---

### 4.3.1 Huidig voorkomen van overstromingen

*Klimaatverandering slechts een van de vele factoren*

Zowel het aantal als de intensiteit van de overstromingen zal toenemen onder invloed van klimaatverandering. En alhoewel zich ook in Vlaanderen altijd al overstromingen hebben voorgedaan, valt op dat we vrij recent heel wat belangrijke overstromingen hebben gekend. Daarbij werden vaak gebieden overstroomd die bij mensenheugenis nog nooit overstroomd waren. Afzonderlijk bekeken is geen enkele van die overstromingen in Vlaanderen direct toe te schrijven aan de klimaatverandering. Maar uit de scenario-studies blijkt wel dat klimaatverandering het risico op overstromingen in Vlaanderen kan beïnvloeden in de 21<sup>ste</sup> eeuw (zie § 4.3.2 tot § 4.3.7).

Klimaatverandering (meer intense neerslagperiodes en een hoger zeewaterpeil) is echter maar een van de factoren die het aantal overstromingen en de schade ten gevolge van overstromingen bepalen. Naast het effect van klimaatverandering op het totale overstromingsrisico spelen onder andere ook wijzigingen in landgebruik en bevolkingsaantallen een belangrijke rol.

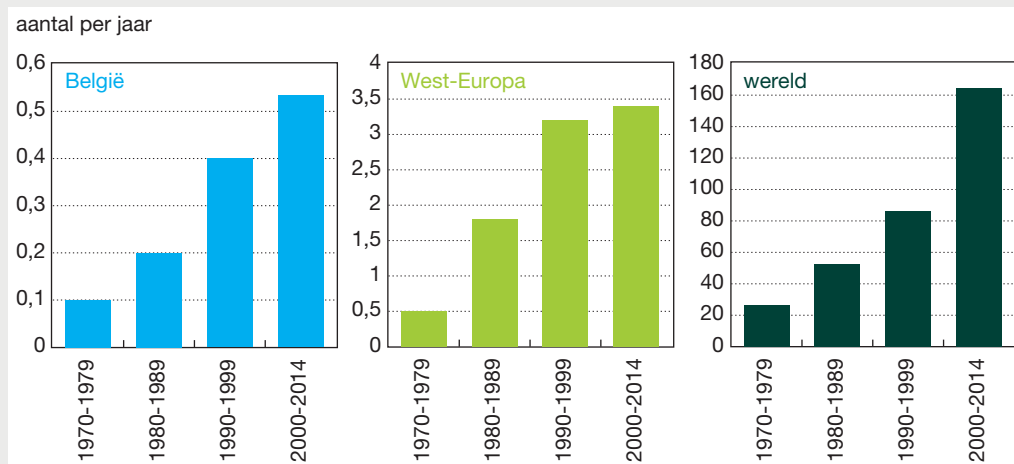
*Aantal geregistreerde overstromingen per decennium*

Het *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, geassocieerd met de Wereld Gezondheidsorganisatie en met als thuisbasis de *Université Catholique de Louvain*, houdt een databank bij met informatie over het wereldwijd voorkomen van rampen. Om opgenomen te worden in de databank moet een ramp voldoen aan een van volgende criteria:

- er zijn tien of meer doden;
- er zijn honderd of meer slachtoffers;
- de noodtoestand is uitgeroepen;
- er is internationale hulp gevraagd.

Uit consultatie van deze databank blijkt dat het aantal geregistreerde overstromingen sinds 1970 merkelijk toegenomen is, zowel in België, in West-Europa als in de wereld (figuur 52).

Figuur 52: Evolutie van het aantal geregisteerde overstromingen (1970-2014)



Bron: The OFDA/CRED International Disaster Database – [www.emdat.be](http://www.emdat.be) – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium

In de periode 1970-2012 maakten overstromingen wereldwijd 44 % uit van het aantal geregisteerde rampen. Deze overstromingen waren verantwoordelijk voor 14 % van de geregisteerde overleden slachtoffers (op een totaal van bijna 2 miljoen) en 33 % van de economische schade door rampen (op een totaal van bijna 2 400 miljard dollar) (WMO, 2014b).

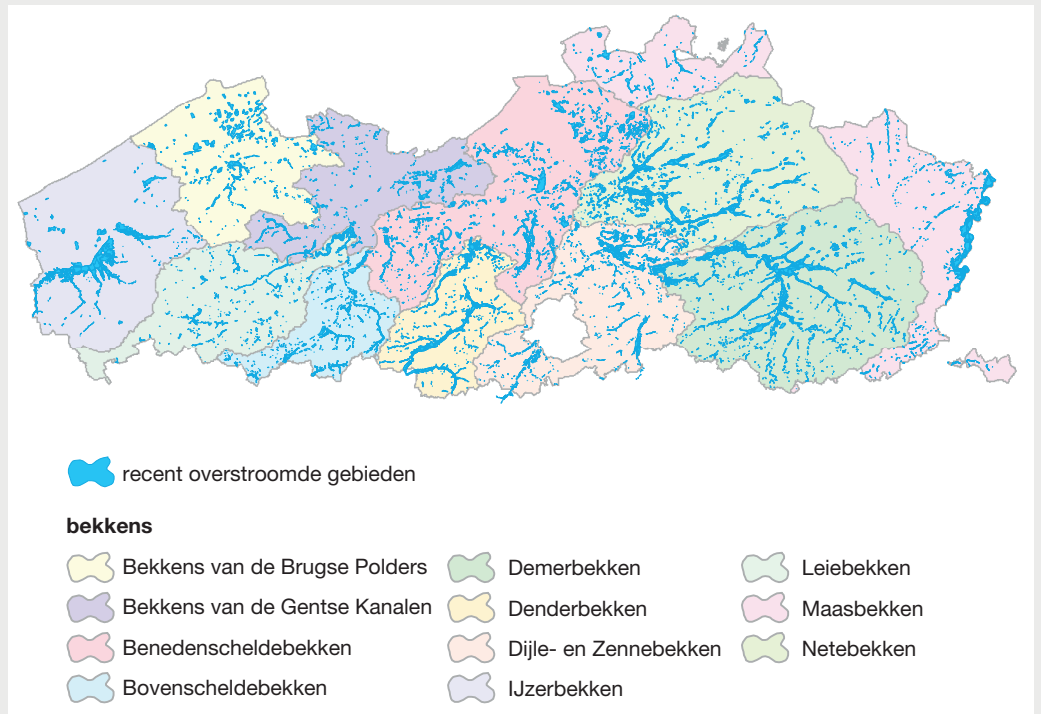
Volgens het Europees Milieuagentschap veroorzaakten overstromingen in Europa 1 126 dodelijke slachtoffers in de periode 1998-2009. Er werden meer dan drie miljoen Europeanen getroffen en de economische schade liep op tot ongeveer 52 miljard euro (EEA, 2010). Samen met stormen zijn overstromingen de natuurrampen met de grootste economische schade. De voorbije decennia steeg de economische schade van overstromingen. Die stijging wordt veroorzaakt door een toename van de bevolking en de welvaart, maar mogelijk ook door een verbeterde dataverzameling en/of de klimaatverandering.

Hoewel er robuuste bewijzen zijn voor antropogene klimaatveranderingen in Europa, is er nog geen definitief bewijs dat klimaatverandering aan de basis zou liggen van een trend in de overstromingen op continentale schaal. Wel is al aangetoond dat de door de mens verhoogde uitstoot van broeikasgassen heeft bijgedragen tot de intensifiëring van zware neerslag in het noordelijk halfrond in de tweede helft van de 20<sup>ste</sup> eeuw (zie § 2.3.3).

#### *Recent overstroomde gebieden in Vlaanderen*

Uit de kaart in figuur 53 blijkt dat de totale oppervlakte van de recent overstroomde gebieden ongeveer 5 % van het Vlaamse Gewest betreft. Deze kaart is een belangrijk beleidsinstrument, onder meer voor de advisering van vergunningen in het kader van de watertoets en de opmaak van overstromingskaarten voor de verzekering tegen natuurrampen.

Figuur 53: Recent overstroomde gebieden (Vlaanderen, 1988-2013)



Bron: VMM

### *Naar een beheer van de overstromingsrisico's*

In periodes van hoogwater werd vroeger vaak gekozen om water zo snel mogelijk af te voeren. De geschiedenis leert dat het overstromingsgevaar hierdoor niet afneemt, maar zich verplaatst naar stroomafwaartse gebieden. In de Europese Overstromingsrichtlijn ligt de nadruk daarom op het beperken van:

- de economische gevolgen (de schade die optreedt door wateroverlast);
- de gevolgen voor de mens en de sociale gevolgen (slachtoffers, getroffen);
- de ecologische schade;
- de schade aan cultureel erfgoed.

Risicoberekeningen brengen niet enkel de kans dat een bepaalde overstroming zich voordoet in rekening, maar ook de mogelijke gevolgen (schade) ervan. Die schade kan sterk verschillen naargelang het landgebruik. Het huidige beleid is er daarom op gericht overstromingen te laten plaatshebben in gebieden waar de aangerichte schade minimaal is. Daarbij wordt gekeken naar de vier bovenvermelde categorieën uit de Overstromingsrichtlijn.

Voor de berekening van zowel risico als schade werd binnen Vlaanderen de LATIS-software ontwikkeld door het Waterbouwkundig Laboratorium (Departement Mobiliteit en Openbare Werken van de Vlaamse Overheid) en de Universiteit Gent. Zo is het al mogelijk om de economische schade en het aantal slachtoffers bij een overstroming te bepalen. Deze resultaten zijn gebiedsdekkend voor gans Vlaanderen. Momenteel wordt de software nog uitgebreid met nieuwe modules (verwacht in 2016) die ook toelaten de sociale, culturele en ecologische impact van overstromingen te berekenen.

Een breed maatschappelijk overleg, gevoed door de risicoanalyses, moet leiden tot een selectie van maatregelen. Daarbij spelen niet enkel de kosten en de baten van maatregelen een belangrijke rol, maar ook de spreiding ervan over de betrokken actoren waaronder waterbeheerders, ruimtelijke ordening en verzekeringen. De geselecteerde maatregelen zal Vlaanderen tegen eind 2015 opnemen in de nieuwe overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP's) als onderdeel van de stroomgebiedbeheerplannen.

#### *Huidig overstromingsgevaar*

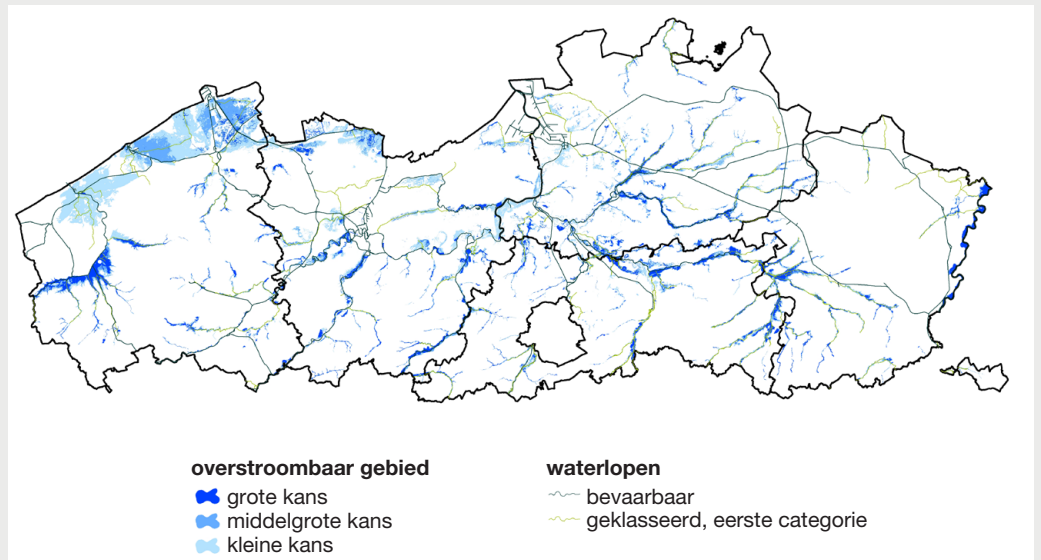
110 De overstromingsgevaarkaarten beschrijven de 'fysische eigenschappen' van de overstromingen zoals overstromingscontouren, waterdieptes en stroomsnelheden. Deze kaarten worden modelmatig bepaald vertrekkende van de potentieel risicovolle waterlopen. Een kaart van het overstroombaar gebied toont de gebieden waar er een overstromingsgevaar is, zowel door overstroming vanuit de waterlopen als vanuit de zee (figuur 54). In tegenstelling tot overstromingen vanuit de waterlopen werd voor overstromingen vanuit de zee ook rekening gehouden met bresvorming in de zeewering. De kaart toont de omvang van de overstroming voor drie verschillende overstromingsscenario's:

- een kleine kans of een uitzonderlijke gebeurtenis komt overeen met een herhalingsperiode van de grootteorde van 1 000 jaar;
- een middelgrote kans betreft een herhalingsperiode van 100 jaar;
- een grote kans komt statistisch overeen met een gebeurtenis die zich eens per 10 jaar voordoet.

Het gebied dat in Vlaanderen met een kleine kans kan overstromen, bedraagt 102 610 ha. Dit komt neer op 7,5 % van de totale oppervlakte van Vlaanderen. Verder heeft 2,35 % van Vlaanderen een grote kans op overstroming en 4,21 % een middelgrote kans. Bij die overstromingen met middelgrote en kleine kans springen vooral het IJzerbekken en het bekken van de Brugse Polders in het oog. Het gaat hier vooral over overstromingen vanuit de zee ten gevolge van bressen in de zeewering.



Figuur 54: Overstromingsgevaarkaart huidig klimaat (Vlaanderen, 2012)



Kleine kans: uitzonderlijke gebeurtenis met een herhalingsperiode van de grootteorde van 1 000 jaar.

Middelgrote kans: heeft een herhalingsperiode van 100 jaar.

Grote kans: een gebeurtenis die zich eens per 10 jaar voordoet.

Bron: [www.waterinfo.be](http://www.waterinfo.be)

De overstromingsdieptes bij overstromingen met grote kans situeren zich meestal tussen de 25 en 50 cm. In een aantal specifieke gebieden - zoals ter hoogte van de samenvloeiing van twee waterlopen - kan de waterdiepte op het overstroomde landoppervlak oplopen tot 1 meter en in de winterbedding van de Maas zelfs tot meer dan 2 meter. Bij overstromingen met middelgrote kans stijgt de waterdiepte op de meeste plaatsen met een bijkomende 10 à 30 centimeter. Bij overstromingen met kleine kans komt daar nog eens een 10 à 50 centimeter bij met uitschieters tot 1 meter en meer.

In de kustzone kunnen zich bij overstromingen hoge stroomsnelheden (1 à 2 m/s) voordoen ter hoogte van de zeedijken en aan potentiële bressen in de zeewering. Door de combinatie van hoge stroomsnelheden, hoge stijgsnelheden en hoge waterdieptes is er een hoog slachtofferrisico. Piekwaarden van stroomsnelheden tot meer dan 10 m/s worden op zeedijken in badplaatsen geïnitieerd door hoge golven, die over de kruin van de zeedijk slaan. Dit is het geval bij superstormen wanneer door stranderosie en/of zeer hoge waterstand het droog strand overspoeld wordt. Zulke golven kunnen met hun hoge snelheden veel slachtoffers maken bij de gebouwen op de zeedijk.

#### *Huidig overstromingsrisico*

De overstromingsgevaarkaart in figuur 54 geeft geen informatie wat betreft de gevolgen, de kwetsbaarheid voor of het risico van de overstromingen. De Europese Overstromingsrichtlijn definieert 'overstromingsrisico' als de kans dat zich een overstro-

ming voordoet in combinatie met de mogelijke negatieve gevolgen voor de gezondheid van de mens, het milieu, het cultureel erfgoed en de economische bedrijvigheid. Op basis van deze definitie zijn voor Vlaanderen overstromingsrisicokaarten opgemaakt die de gevolgen voor mens en economie in beeld brengen. Figuur 55 begroot het jaarlijkse gemiddelde risico op economische schade in Vlaanderen.

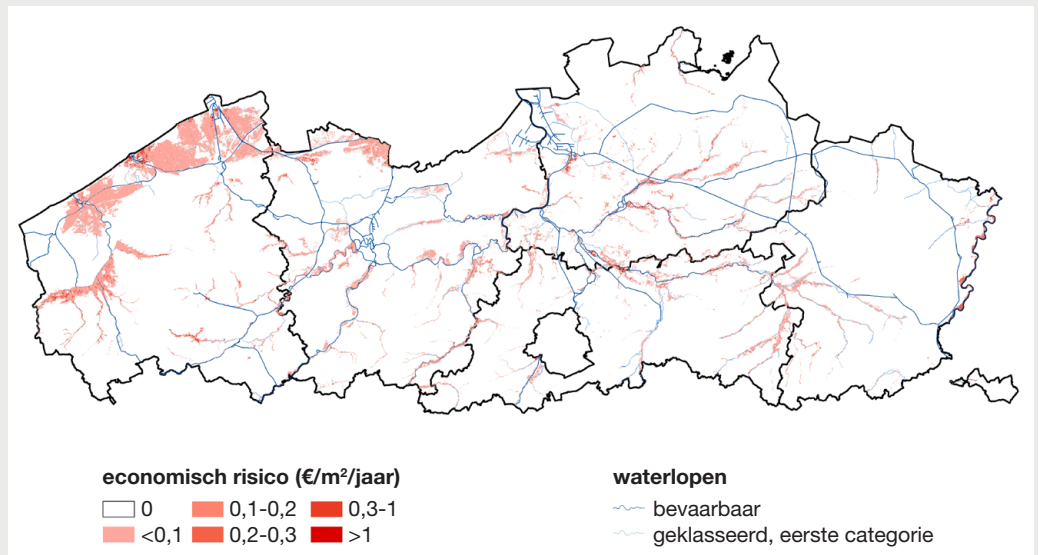
In Vlaanderen kunnen in totaal meer dan 220 000 mensen rechtstreeks getroffen worden door een overstroming die zich uitzonderlijk – grootteorde eens per 1 000 jaar – voordoet. Daarvan wonen meer dan 67 000 Vlamingen binnen het gebied met middelgrote overstromingskans (grootteorde eens per 100 jaar) en ongeveer 10 000 binnen het gebied met grote overstromingskans (grootteorde eens per 10 jaar).

De jaarlijkse gemiddelde schade voor heel Vlaanderen komt overeen met een bedrag van ruim 50 miljoen euro. De schade veroorzaakt door een overstroming die zich voordoet met een grote kans bedraagt ongeveer 100 miljoen euro, die door een overstroming met een middelgrote kans ongeveer 660 miljoen euro en die met een kleine kans ongeveer 2,4 miljard euro.

112

Bij overstromingen met een grote kans is bijna de helft van het overstroombare gebied weiland, iets meer dan een kwart is natuur en zowat 13 % is akkerland. Residentieel en industrieel gebied samen beslaan 3 % van het overstroombare gebied. De overige gebieden betreffen water, infrastructuur en recreatiegebied. Bij het scenario van overstromingen met middelgrote en kleine kans nemen de aandelen van weiland en natuur af en nemen de aandelen van de meer schadegevoelige landgebruiken (residentieel en industrieel gebied, infrastructuur, recreatie en akkerland) toe.

**Figuur 55: Economisch risico door overstroming bij huidig klimaat (Vlaanderen, 2012)**



Bron: [www.waterinfo.be](http://www.waterinfo.be)

### 4.3.2 Overstromingen bij aanhoudende zeespiegelstijging in de komende decennia

#### *Aan de kust*

Klimaatverandering verhoogt de overstromingsrisico's langs de Belgische kust door de stijging van het gemiddelde zeeniveau (zeespiegelstijging) en eventueel ook een wijzigend windklimaat (het windklimaat bepaalt de stormopzet). In enkele Belgische en Europese onderzoeksprojecten werden de gevolgen van een veranderend zeeniveau en windklimaat bestudeerd, waaronder ook de kans op bresvorming langs de Belgische kust en het overstroombaar gebied bij een storm met een terugkeerperiode van 1 000 jaar. De resultaten geven aan dat het overstromingsrisico al binnen een paar tientallen jaren – bij een zeespiegelstijging van een halve meter – met een factor tien kan toenemen ten opzichte van de bestaande situatie wanneer strand en vooroevers niet gelijktijdig worden opgehoogd. Nederland en België zijn bovendien de twee meest kwetsbare Europese landen voor overstromingen ten gevolge van een stijgend zeeniveau: meer dan 85 % van het kustgebied (tot 10 km landinwaarts) ligt er lager dan vijf meter boven het zeeniveau. In Vlaanderen ligt ongeveer 15 % van het oppervlak (Kustzone en Scheldepolders) minder dan vijf meter boven het gemiddeld zeeniveau. Daarom voorziet het Vlaamse Gewest nu al in het compenseren van een zeespiegelstijging met een structurele verhoging en versterking van de zeewering door zandtoevoer op het strand en op de vooroever.

—  
113

Naast de wijzigende overstromingsrisico's zullen de veranderende waterhoogten en waterstromingen langs de kust tot veranderingen leiden in onder andere de kusterosie, de troebelheid van het water, dus het beschikbare licht, en de instroom van zoet water. Dat kan samen met de veranderingen van de zeewatertemperatuur leiden tot habitatveranderingen en fysiologische effecten bij bepaalde dier- en plantengroepen, waardoor de voedselketens binnen ecosystemen worden beïnvloed. De mate waarin deze beïnvloeding plaatsvindt, is nog onvoldoende gekend. Zo werden bijvoorbeeld al veranderingen vastgesteld in de hoeveelheden kabeljauw en schelvis (vooral verplaatsingen naar het noorden), met - naast ecologische gevolgen - ook een economische weerslag op de visvangst en het toerisme.

Door de zeespiegelstijging verhoogt bovendien de zoutbelasting naar het ondiepe grondwater en het oppervlaktewater langs de kust (veranderingen in de zoet-zoutwaterverdeling). De zoetwaterlens in de duinengordel speelt echter een belangrijke bufferende rol bij de intrusie van zout zeewater in het hinterland.

#### *Langs de Schelde en andere waterlopen*

De zeespiegelstijging en de verhoging van de stormopzet verhogen niet enkel de overstromingsrisico's langs de Belgische kust, maar ook de risico's langs de rivieren die verbonden zijn met de Noordzee. Dit is het geval langs het Schelde-estuarium, maar ook in het IJzerbekken, de polders en wateringen waar de uitwateringsmogelijkheden worden beperkt. Voor deze gebieden worden de overstromingscondities bovendien bepaald door een samenspel van de randvoorwaarden in de op- en afwaartse gebieden.

Een analyse van de atmosferische circulatiepatronen die aan de basis liggen van extreme neerslag in het binnenland en extreem stormopzet langs de kust, geeft aan dat deze

circulatiepatronen niet geheel onafhankelijk zijn. Vooral bij sterke noordwestenwind kan er zowel zeer extreme stormopzet ontstaan, als uitzonderlijk hoge neerslag in het binnenland. De stad Dendermonde langs de Schelde is een voorbeeld van een locatie waar dit samenspel een belangrijke rol speelt. Dit is ook het geval voor het afwaartse deel van de Dender (afwaarts van Aalst). Hoewel de Dender niet rechtstreeks in verbinding staat met de Noordzee, is er wel een sterke invloed van het toenemende hoogtij langs de Schelde via de stuwwerking. Tijdens hoogtijperiodes kunnen de stuwen het bovendebiet van de Dender immers niet uitwateren. Indien er bovendien door verhoogde neerslag hogere bovendebieten ontstaan, leidt dat tot zeer sterk toenemende volumes die tijdens hoogtijperiodes tijdelijk geborgen moeten worden langs de Dender. Zo werd berekend dat het samengaan van een gemiddeld scenario van +60 cm zeespiegelstijging, een hoog scenario van +21 % stormopzet en een hoog scenario van +30 % bovendebiet de Scheldewaterhoogte in Dendermonde verhoogt met +1,8 m voor terugkeerperiodes tussen 100 en 10 000 jaar. Bij een terugkeerperiode van 1 000 jaar neemt het volume water dat overstroomt dan toe met een factor vier. In Dendermonde is de toename vooral het gevolg van de zeespiegelstijging, maar meer opwaarts langs de Dender wordt de invloed van de bovendebieten belangrijker. In de omgeving van Aalst zijn de invloed van de bovendebieten en de zeespiegelstijging ongeveer gelijkwaardig. Voor een *worst case* scenario van twee meter zeespiegelstijging is de invloed nog veel groter.

De Afdeling Kust van het Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust houdt bij de opmaak van het Masterplan Kustveiligheid, dat in 2011 werd goedgekeurd door de Vlaamse overheid, rekening met de zeespiegelstijging. Indien enkel het aspect zeespiegelstijging in rekening wordt gebracht, verlaagt een zeespiegelstijging van 60 cm de terugkeerperiode van overstroming langs de Schelde tussen Gent en Vlissingen van 350 jaar (na volledige realisatie van het 13<sup>de</sup> en laatste gecontroleerd overstromingsgebied in het eerste Sigmaplan, het overstromingsgebied van Kruibeke-Bazel-Rupelmonde met een grote totale oppervlakte van 600 ha) tot 25 jaar tegen 2100. Dit toont het belang van de realisatie van het volledig geactualiseerde Sigmaplan. Om het gewenste veiligheidsniveau te halen – terugkeerperiode overstroming langs de Schelde grootteorde 4 000 jaar – is nog ongeveer 4 000 ha bijkomend overstromingsgebied vereist. In het nieuwe Sigmaplan, dat op basis van een optimale kostenbatenanalyse werd herzien, zijn er bijkomende overstromingsgebieden voorzien tegen 2050 voor een totaal van 1 325 ha, aangevuld met 23 km dijkverhogingen en een muur in Antwerpen.

Naast de wijzigende overstromingsrisico's zullen de veranderende waterhoogte langs de kust en de veranderende bovendebieten tot veranderingen leiden in de zoutconcentraties en van de grens tussen zout en zoet water. Zoals langs de kust kan dit ook in het binnenland leiden tot veranderingen in de habitats en tot fysiologische effecten voor bepaalde dier- en plantengroepen die op hun beurt gevolgen kunnen hebben voor de voedselketen van ecosystemen. Ook hier zijn de precieze invloeden nog onvoldoende gekend.

### 4.3.3 Overstromingen bij wijzigende neerslag in de toekomst

#### *Gevolgen van een stijgende grondwatertafel*

Naast de dreiging die uitgaat van een stijgend zeeniveau, kan ook het wijzigende neerslagpatroon in België het risico op overstromingen doen toenemen. De verwachte neerslagtoename tijdens de wintermaanden zal het grondwaterniveau periodiek doen stijgen. Dat zou gedeeltelijk het risico op droogte in de zomermaanden kunnen compenseren. Doorrekening van verschillende klimaatscenario's geeft voor de wintermaanden ook een verhoogd debiet aan voor onze rivieren: een toename met 4 tot 28 % tegen 2100. Voor de Schelde zou dat vooral stroomopwaarts van Dendermonde tot een toename van overstromingen leiden, zeker wanneer de verhoogde rivierafvoer valt in een periode van waterverzadigde bodems.

#### *Gevolgen voor rioleringssystemen*

De klimaatscenario's voor de zomerperiode wijzen op een sterke toename van de extreme, kortstondige regenbuien, vooral in het geval van het hoog klimaatscenario. Daardoor zullen riolerings- en andere afwateringssystemen bijkomend belast worden in de toekomst. Bestaande rioleringsystemen werden gedimensioneerd om slechts eenmaal per twee jaar te overstromen of over te lopen. In de toekomst kunnen ze tot tweemaal zo vaak overstromen of overlopen: eenmaal per jaar in plaats van eenmaal per twee jaar. Voor bufferbekkens of andere bronmaatregelen zoals regenwaterputten is er bij het hoog klimaatscenario voor de zomer met de meest extreme zomeronweders 15 tot 35 % bijkomende bergingscapaciteit nodig om de overlaat- of overstortfrequentie op het huidige niveau te behouden. Bij behoud van de huidige bergingscapaciteit, zal onder het hoog klimaatscenario de terugkeerperiode van overstorten dalen met een factor vier: bijvoorbeeld van eens om de twee jaar naar tweemaal per jaar. Om onder meer hierop te anticiperen, werd in 2012 de Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen herzien in Vlaanderen.

Naast het ruimer dimensioneren van riolen, bufferbekkens en andere waterreservoirs, bestaat er nog een andere mogelijkheid om de terugkeerperiode van overstroming of overstorten in rioleringen en bufferbekkens op het huidige niveau te houden bij klimaatverandering. De regenwaterinstroom in rioleringen kan ook worden beperkt via bronmaatregelen zoals waterdoorlatende verharding, infiltratievoorzieningen en betere afstemming van stedelijk waterbeheer, stadsontwerp, land- en groenbeheer en ruimtelijke planning. De bijkomende infiltratie van regenwater in de bodem komt ook de aanvulling van grondwatervoorraden ten goede en helpt droogte tegen te gaan. Recent werd reeds een belangrijke stap in deze richting gezet via de aangepaste Gewestelijke Stedenbouwkundige Verordening voor Hemelwaterputten, Infiltratie- en Buffervoorzieningen die vanaf 1 januari 2014 individuele infiltratie verplicht bij nieuwbouw en grondige renovatie.

#### 4.3.4 Gevolgen van klimaatverandering versus wijzigend landgebruik

Niet enkel het klimaat, maar ook de ruimtelijke ordening verandert in Vlaanderen. Uit satellietbeelden blijkt bijvoorbeeld een duidelijke urbanisatietrend: het aandeel verharde oppervlakte steeg in Vlaanderen van 4 à 5 % in 1976 tot ongeveer 10 % in 2000. In de periode 2007-2009 liep het aandeel afgedichte bodem verder op tot 12,9 % of 175 967 ha. Hiermee scoort Vlaanderen ver boven het Europese gemiddelde (1,8 %) en ook hoger dan het geheel van België (7,4 %) en Nederland (7,3 %).

Ook in de komende decennia valt een verdere verharding van de bodem niet uit te sluiten. De effecten daarvan op de hydrologie, al dan niet in combinatie met klimaatverandering, werden in Vlaanderen bestudeerd voor het stroomgebied van de Molenbeek in het Dijlebekken. De doorrekening van een stedelijk expansiescenario met een toename van de verharding tussen 70 en 200 % geeft aan dat de piekdebieten in de waterloop kunnen stijgen tussen 6 en 16 %. De impact van overstromingen stijgt daarbij niet enkel als gevolg van deze verhoging in piekdebieten, maar ook als gevolg van het wijzigende landgebruik in de overstromingsgebieden zelf (verhoogde overstromingsschade bij eenzelfde waterstand). Wanneer tot slot de gevolgen van de klimaatscenario's worden vergeleken met deze van de stedelijke expansiescenario's (beide tot 2050), blijken de piekafvoeren langs de waterloop sterker te zullen wijzigen door de klimaatverandering dan door de stedelijke expansie.

Eerder werd in het kader van de Milieuverkenning 2030 van MIRA een meer algemene, eerste inschatting gemaakt van de economische gevolgen van de wijzigende klimaatcondities langs Vlaamse rivieren (Brouwers *et al.*, 2009). De stijging van het economisch overstromingsrisico bedroeg op Vlaams niveau 33 % volgens het toen gehanteerde hoog klimaatscenario, maar kan volgens het laag klimaatscenario ook met 56 % dalen. Vooral het Leiebekken, het Bovenscheldebekken en het Demerbekken zouden onder het hoog klimaatscenario een zeer sterke toename van het risico kennen met een factor twee tot drie. Voor het Benedenscheldebekken is de stijging kleiner. Daarnaast werden deze klimaatscenario's ook afgewogen en gecombineerd met veranderend landgebruik. Daaruit blijkt dat de wijzigingen in het landgebruik de komende decennia voor een bijkomende toename van het overstromingsrisico in Vlaanderen zullen zorgen van gemiddeld 3 à 10 % (afhankelijk van het gehanteerde landgebruiksscenario). Maar voor specifieke regio's in Vlaanderen kan die extra toename nog hoger liggen: bijvoorbeeld tot +100 % in het Leiebekken en het IJzerbekken vooral door toename van bebouwing en industrie in overstromingsgebied, ten nadele van akker- en weiland.

Ook bij de onderbouwing van het overstromingsrisicobeheerplan van de onbevaarbare waterlopen (VMM, 2014b) werden de effecten van een gematigd ('midden') klimaatscenario samen met die van economische en demografische groei in rekening gebracht en dit voor 47 gebieden. Als gevolg van deze ontwikkelingen zou het economisch risico in 2050 gemiddeld 42 % hoger liggen dan in 2010. Het aantal personen dat het risico loopt geconfronteerd te worden met wateroverlast zou gemiddeld met 54 % stijgen. De spreiding op beide gemiddelden is echter groot. De klimaatverandering heeft als voornaamste gevolg dat de kansen op overstroming met de tijd toenemen, terwijl de sociaal-economische groei als gevolg heeft dat de gevolgen van een overstroming ernstiger worden. Verschillende beleidsstrategieën kunnen de toenames van de risico's echter gedeeltelijk of geheel teniet doen en kunnen zelfs leiden tot aanzienlijk lagere risico's dan die in 2010.

## 4.4 Afvoer en beschikbaarheid van water

---

### 4.4.1 Geobserveerde trends in afgevoerde debieten

We gaan na of er trends te onderscheiden vallen in de afgevoerde debieten via de grotere, onbevaarbare waterlopen. In eerste instantie wordt gekeken naar de debieten op dag-, maand-, seizoens- en jaar(helft)basis, en dit voor de zeven meetstations verspreid over heel Vlaanderen waarvoor meetreeksen langer dan tien jaar beschikbaar zijn. Dit zijn echter nog steeds relatief korte tijdreeksen om eventuele effecten van klimaatverandering te kunnen onderscheiden. Bovendien kunnen toenemende verharding en waterbeheersmaatregelen de afvoerdebieten beïnvloeden.

Vervolgens wordt voor dezelfde meetstations een analyse gemaakt van de relatief lage waterafvoeren. Die analyse kan indicaties geven over een eventueel groeiend tekort aan water in de betreffende waterlopen. Tot slot worden evoluties van hoge waterafvoeren bekeken, wat indicaties kan geven over eventueel toenemend overstromingsgevaar.

#### *Dag-, maand-, seizoen- en jaar(helft)debieten*

Analyse van de meetwaarden toont voor geen enkele van de beschouwde periodes een eenduidige trend. Met andere woorden, geen enkele van de gemiddelde dag-, maand-, jaar-, seizoens- en jaar(helft)debieten geeft voor elk van de zeven stations een significante trend in dezelfde richting. Voor elk van de beschouwde periodes vertoont meer dan de helft van de stations geen significante trend. Er zijn evenveel stations (drie) waar minstens voor een van de periodes een significante stijging als een significante daling blijkt. Een eenduidig signaal dat wijst op de effecten van klimaatverandering en/of toenemende verharding levert deze analyse dus niet op.

#### *Laagwaterdebieten*

De *Standardized Streamflow Index* of SSI (Vicente-Serrano, 2012) wordt analoog aan de SPI berekend (zie § 2.3.3), maar in de plaats van totale neerslag worden debietgegevens gebruikt. De SSI is op dezelfde manier te interpreteren als de SPI, en zegt dus iets over de mate waarin het afgevoerde maanddebiet afwijkt van het maanddebiet in de referentieperiode.

In drie van de zeven meetstations leverde geen enkele analyse een significante trend op. In twee van de zeven stations zijn er indicaties dat de laagwaterproblematiek toeneemt. Eveneens in twee van de zeven stations zijn er indicaties dat de laagwaterproblematiek afneemt. Uit deze analyse kan dus niet besloten worden dat er momenteel in Vlaanderen reeds een algemene toename is van de laagwaterproblematiek.

#### *Hoogwaterdebieten*

Hier wordt nagegaan of specifieke hoogwaterafvoeren in 2014 frequenter voorkomen dan vroeger (tot en met 1996). Daartoe werd uit de meetreeksen statistisch bepaald welke de hoogste afgevoerde debieten zijn die eens per 2, 5, 10, 20, 50 en 100 jaar voorkomen. Die laatste zijn de terugkeerperiodes, afgekort als T. Vervolgens werden die debieten vergeleken met de resultaten uit eenzelfde analyse op de volledige meetreeksen tot

en met 2014. Op die manier kan dus nagegaan worden of extreme debieten meer of minder frequent voorkomen.

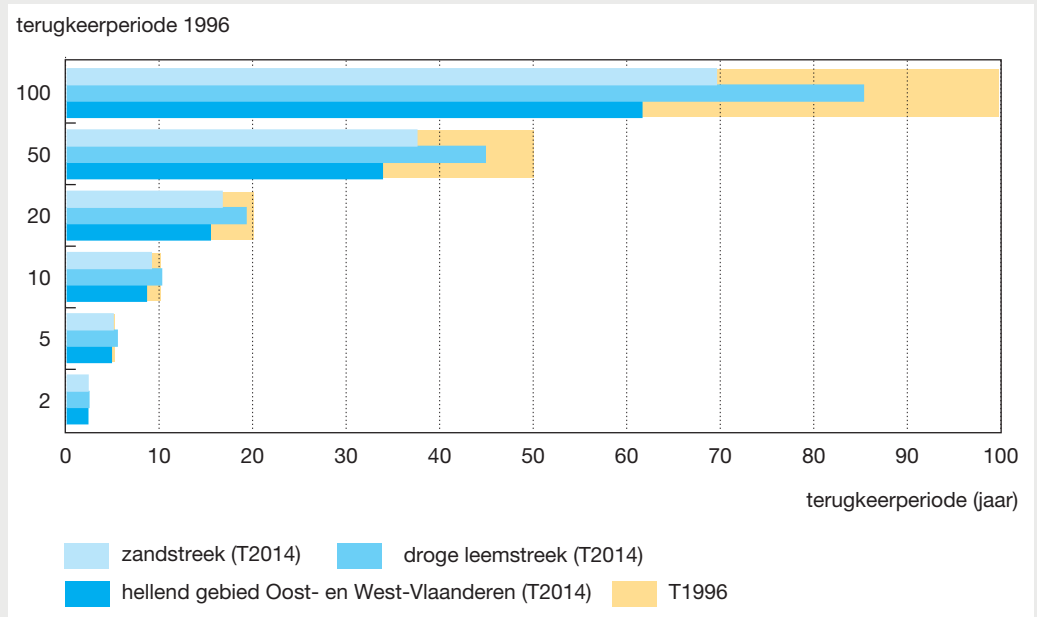
Deze analyse werd niet per individuele waterloop uitgevoerd, maar wel per hydrologisch homogene regio. Hierdoor is het mogelijk veranderingen op een grotere schaal op te sporen: van onbevaarbare waterlopen die binnen een hydrologisch homogene regio liggen, mag aangenomen worden dat ze een gelijkaardig waterafvoergedrag vertonen. Voor deze oefening werd Vlaanderen verdeeld in drie hydrologisch homogene regio's: het hellend gebied van Oost- en West-Vlaanderen, de droge leemstreek en de zandstreek (Kempen). Daarvoor waren respectievelijk 46, 20 en 29 meetstations beschikbaar. De polders zijn in deze oefening niet meegenomen omdat er te weinig metingen beschikbaar zijn.

Figuur 56 toont het resultaat van deze analyse. Hieruit blijkt bijvoorbeeld dat een hoogwaterafvoer die tot en met 1996 in de Zandstreek eens om de 100 jaar voorkwam, zich tot en met 2014 al eens per 70 jaar voordoet. Over het algemeen observeren we voor de lage terugkeerperiodes (2, 5 of 10 jaar) geen of slechts relatief kleine afnames van de terugkeerperiodes. Voor terugkeerperiode van 20 jaar en hoger worden voor elk van de drie hydrologische regio's wel afnames vastgesteld: extreme debieten die tot en met 1996 voorkwamen met een frequentie van eens in de 20, 50 of 100 jaar komen nu frequenter voor, en die evolutie is des te meer uitgesproken naarmate het grotere terugkeerperiodes betreft. Deze analyse levert dus indicaties dat zeer uitzonderlijke hoogwaterafvoeren, en dus ook het ermee samenhangende overstromingsgevaar, de laatste twee decennia wat minder uitzonderlijk zijn geworden. In welke mate dit toegeschreven mag worden aan klimaatverandering of aan andere factoren (bijv. veranderingen landgebruik, verharding) is nog niet duidelijk. Bovendien zijn de beschikbare meetreeksen nog te kort om het onderscheid te maken tussen meerjarige klimaatschommelingen en echte klimaattrends op nog veel langere termijn.

Trends op lokale schaal (op het niveau van meetstations) kunnen zich echter verschillend aftekenen. Acht van de veertien meetstations vertonen voor alle terugkeerperiodes (T's) een statistisch significante stijging die varieert van +3,0 tot +9,7 % per decennium voor het twintigjaarlijks piekdebiet. Drie vertonen een significante daling die varieert van -0,6 tot -8,0 % per decennium en nog eens drie vertonen geen trends. De tweejaarlijkse piekdebieten vertonen voor acht meetstations een statistische significante toename die varieert van +1,8 tot +7,5 % per decennium en voor drie meetstations een statistische significante afname die varieert van -1,0 tot -6,0 % per decennium. De overige drie meetstations vertonen geen significante trend. Het feit dat niet overal stijgingen gevonden worden, geeft aan dat lokale factoren soms een nog grotere rol spelen en/of dat toevallige fluctuaties de trends maskeren.



**Figuur 56: Evolutie van terugkeerperiodes voor hoogwaterafvoer in drie hydrologisch homogene zones (Vlaanderen, 2014 versus 1996)**



Bron: MIRA op basis van VMM

#### 4.4.2 Hoog- en laagwaterdebieten langs rivieren bij aanhoudende klimaatverandering

##### Piekdebieten

De nieuwe klimaatscenario's voor Vlaanderen zijn nog niet hydrologisch doorgerekend, maar bij vergelijking tussen de scenario's gehanteerd in de Milieuverkenning 2030 en scenario's uitgewerkt in dit Klimaatrapport 2015 wordt verwacht dat de impactresultaten op de piekafvoeren vergelijkbaar zullen zijn met de resultaten gekend uit reeds bestaande studies. Uit die studies bleek dat de invloed op de piekafvoeren nog onduidelijk is en sterk afhankelijk van het klimaatscenario.

Bij een hoog (of nat) klimaatscenario stijgen deze piekafvoeren significant in de winter; bij een laag (of droog) klimaatscenario blijven de winterse piekafvoeren haast ongewijzigd of dalen ze zelfs in beperkte mate. Dit laatste is het gevolg van de toenemende evapotranspiratie naast de toename in neerslag. Afhankelijk van de exacte toename in neerslag in vergelijking met de toename in evapotranspiratie, kan de balans overhellen van een toename naar eerder een status quo of afname van de piekafvoeren langs de waterlopen. In het hoog klimaatscenario loopt de toename in piekafvoeren op tot 30-35 % over een toekomstperiode van 100 jaar.

Voor kleinere waterlopen in sterk verstedelijkt gebied, die een snelle respons vertonen op extreme neerslag, kan deze toename nog meerdere tientallen procenten hoger liggen. Zo werd voor de Maarkebeek een toename in piekafvoeren tot +100 % over 100 jaar gesimuleerd. Bovendien blijkt er een duidelijk – zelfs lineair in het geval van bijvoorbeeld de Grote Nete en de Grote Laak – verband tussen het aandeel verstedelijkt gebied in een stroomgebied en de toename van de piekafvoeren onder invloed van de klimaatscenario's. De exacte impact op hydrologische extremen blijkt echter niet enkel sterk afhankelijk te zijn van het klimaatscenario, maar ook van het gebruikte hydrologisch of neerslagafvoermodel.

De nieuwe klimaatscenario's zijn dus nog niet doorgerekend tot op het niveau van afgevoerde debieten door waterlopen. Wel is uit de nieuwe scenario's al de gecombineerde invloed van de wijzigende maandneerslag en de potentiële evapotranspiratie bestudeerd en de implicaties daarvan voor de waterbeschikbaarheid. De toename van de neerslag in de winter zou, ondanks de toename van de potentiële evapotranspiratie leiden tot een toename van de waterbeschikbaarheid in de winter en dus een toename van het risico op overstromingen tijdens wintermaanden (Tabari *et al.*, 2015b).

### Laagwaterdebieten

Eerdere doorrekeningen van klimaatscenario's voor Vlaanderen wijzen voor alle bestudeerde stroomgebieden op een toekomstige daling van de laagwaterafvoeren langs onze waterlopen. De daling van de laagste zomerdebieten varieert bij het laag klimaatscenario uit de Milieuverkenning 2030 tussen -10 % en -70 % over een toekomstperiode van 100 jaar.

De gecombineerde analyses van neerslag en potentiële evapotranspiratie wijzen op een daling van de waterbeschikbaarheid in de zomer en dus een hoger risico op droogtes (Tabari *et al.*, 2015a; Tabari *et al.*, 2015b).

De eenduidige impactresultaten over de evolutie naar meer verdroging krijgt de laatste jaren alsmear meer aandacht. Het is een problematiek die nog niet zo goed gekend is bij het bredere publiek, maar die wel al is doorgedrongen bij de Vlaamse waterbeheerders en beleidsmakers. Vlaanderen en Brussel zijn immers zeer kwetsbaar voor een toenevende verdroging. De huidige waterbeschikbaarheid in Vlaanderen en Brussel bedraagt 1 100 à 1 700 m<sup>3</sup>/persoon/jaar, wat zeer laag is volgens internationale normen en lager dan vele landen in Zuid-Europa (bijv. Spanje, Portugal en Griekenland). Dit vindt zijn verklaring in onze hoge bevolkingsdichtheid en sterke afhankelijkheid van buurregio's voor waterbeschikbaarheid. Een groot deel van het water dat gebruikt wordt voor de drinkwatervoorziening (bijv. van de Maas via het Albertkanaal) is immers afkomstig van Frankrijk en Wallonië. Bovendien zijn er verdragen met Nederland (voor de Maas en het kanaal Gent-Terneuzen) voor de vereiste minimale afwaartse debieten tijdens droge zomerperiodes. In bepaalde streken van Vlaanderen, zoals in Zuid-West-Vlaanderen, worden grote hoeveelheden diep grondwater opgepompt, wat de natuurlijke grondwater-toestand drastisch heeft verstoord. Een verdere overschakeling van grondwater- naar oppervlaktewateronttrekking dringt zich op. De oppervlaktewaterbeschikbaarheid kan echter volgens de klimaatscenario's in de toekomst sterk verminderen, vooral tijdens droge zomerperiodes. Lagere beschikbaarheid betekent ook slechtere kwaliteit van het oppervlaktewater door de verminderde verdunning van de vuilvrachten, en dus hogere kosten bij zuivering van gewonnen oppervlaktewater tot drinkwater.

Klimaatadaptatie inzake verdroging en laagwater dringt zich dus op, weliswaar rekening houdend met de nog grote onzekerheden voor de klimaatscenario's en hydrologische impactberekeningen (zie ook hoofdstuk 5).

#### 4.4.3 Gevolgen van klimaatverandering voor grondwater

De gevolgen van de klimaatscenario's op de grondwaterstanden blijkt sterk variabel, zowel ruimtelijk als seizoenaal. Bij een studie voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak blijkt voor het winterseizoen de verandering in grondwaterstand over 100 jaar te variëren van enkele centimeters in de lageregelegen valleigebieden tot ongeveer een meter in de interfluviale en hoger gelegen gebieden: stijgingen voor het hoog scenario, dalingen voor het laag scenario. De zomergrondwaterstanden stagneren in de valleigebieden, maar dalen in het laag scenario tot ongeveer een meter in de hogere zones van het stroomgebied.

Een andere, nog meer gedetailleerde analyse voor het stroomgebied van de Kleine Nete gaf aan dat de gemiddelde jaarlijkse grondwateraanvulling zal wijzigen tussen -20 % en +7 %. Gemiddeld voor alle gesimuleerde klimaatscenario's bedroeg de wijziging -7 %. De meeste klimaatscenario's toonden een lichte stijging van de grondwatervoeding in de winter en een iets grotere daling in de zomer, met op jaarbasis een netto daling tot gevolg. Significante dalende grondwaterstanden werden gevonden voor de maanden september tot en met januari. Ook hier werden grotere grondwaterinvloeden waargenomen voor de interfluviale en hoger gelegen gebieden en kleinere voor de lager gelegen valleigebieden. Voor valleigebieden is de ecologische impact van die kleinere grondwaterdalingen wel groter dan voor hoger gelegen gebieden. De daling van de grondwaterstanden tot en met januari ondanks de lichte stijging in grondwatervoeding in de winter, is het gevolg van het langdurig opbouwende effect van de neerslag op de grondwaterstanden. Een grote daling van de zomerneerslag kan zich tot in de wintermaanden laten voelen. Op het einde van de zomerperiodes of herfst zijn de grondwaterstanden het laagst; tijdens deze periodes werden dalingen tot 10 % gevonden.

#### 4.4.4 Gevolgen voor landbouw en gerelateerde veranderingen in stroomgebiedshydrologie

De invloed van de klimaatverandering op landbouw treedt vooral op via de gewijzigde waterbeschikbaarheid in de bodem (bodemvochtgehalte) en de toenemende CO<sub>2</sub>-concentraties in de atmosfeer. De invloed van deze wijzigingen op de gewasgroei werd voor Vlaanderen recent bestudeerd op veld- en perceelsniveau. De gewasopbrengst kan tot 27 % stijgen, en de overeenkomstige biomassa met 23 %. Dit is vooral het gevolg van de toenemende CO<sub>2</sub>-concentraties, die de waterproductiviteit (opbrengst voor eenzelfde waterbeschikbaarheid) doet toenemen. De lagere waterbeschikbaarheid in de zomer heeft een negatieve invloed op de gewasgroei, maar die blijkt de eerstvolgende decennia minder belangrijk dan de hogere waterproductiviteit. Op langere termijn worden de effecten als gevolg van extremere temperatuur- en neerslagperiodes evenwel belangrijker, met een netto negatieve invloed op de landbouwopbrengst tot gevolg.



---

5

OVER OMSLAGPUNTEN (IN DE KLIMAATVERANDERING)  
EN OMGAAN MET ONZEKERHEDEN



## 5 OVER OMSLAGPUNTEN (IN DE KLIMAATVERANDERING) EN OMGAAN MET ONZEKERHEDEN<sup>8</sup>

---

### 5.1 Omslagpunten of *tipping points*

---

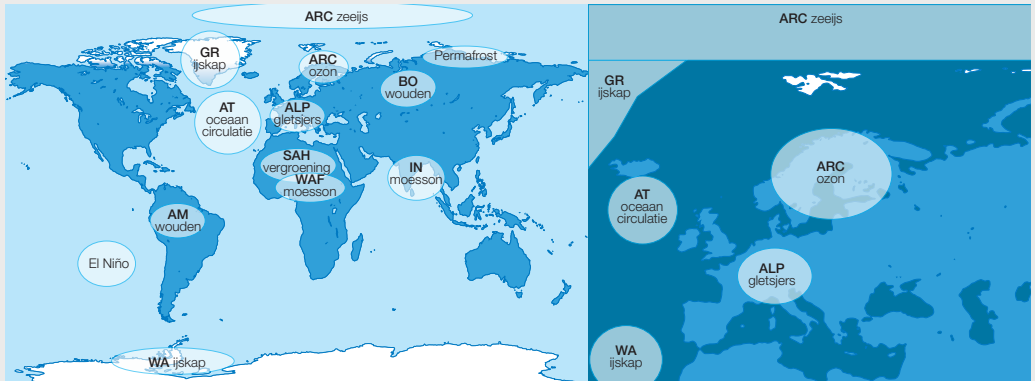
De klimaatscenario's zoals uitgewerkt in hoofdstuk 3 betreffen langzame evoluties die met een zekere vertraging of mildering de oplopende concentraties aan broeikasgassen in de atmosfeer volgen. Voor dit type scenario's zijn de meeste mechanismen goed gekend en kunnen de verschillende klimaatparameters vrij nauwkeurige worden berekend. Maar al enige tijd groeit in de wetenschappelijke wereld en daarbuiten het besef dat ook meer abrupte veranderingen van het klimaatsysteem kunnen optreden door een sterke wereldwijde opwarming.

Verschiedende elementen in het klimaatsysteem, zoals de ijskappen, zijn zeer gevoelig en reageren sterk op de versturende impulsen van de mens op het klimaatsysteem. Deze zogenaamde *tipping elements* of gevoelige elementen reageren disproportioneel sterk op verstoringen, en hebben daarom potentieel een grote impact op onze samenleving. Vaak worden mechanismen in gang gezet zodra bepaalde drempelwaarden (*tipping points*) worden overschreden, en dikwijls zijn er ook zelfversterkende mechanismen in het spel. Een prominent voorbeeld van dit laatste is de ijs-albedo-terugkoppeling: een initiële opwarming van de sneeuw- of ijsmassa induceert een regionale afsmelting. Door het afsmelten van sneeuw of ijs komen donkere oppervlakten vrij, met name bruinkleurig land of blauwe oceaan. Deze donkere oppervlakten reflecteren minder zonlicht wat resulteert in onder andere een toenemende regionale opwarming en bijkomende afsmelting.

De inschatting van de kans dat een gevoelig element een transitie ondergaat, is essentieel voor het inschatten van de risico's gerelateerd aan klimaatveranderingen. Traditioneel worden deze klimaattransities ingeschat met een kleine kans op voorkomen, maar een grote impact op de samenleving. Recent onderzoek toont echter aan dat sommige van deze gevoelige elementen nu al transities ondergaan en dat de kans groot is dat deze bij huidige projecties voor globale temperatuurveranderingen zullen optreden. Figuur 57 benoemt de gevoelige elementen die een impact hebben wereldwijd en in Europa.

8 Dit hoofdstuk is in hoofdzaak gebaseerd op van Lipzig & Willems (2015). Andere bronnen staan in de tekst zelf vermeld.

**Figuur 57: De verschillende tipping elements of gevoelige elementen in het klimaatstelsel met een impact wereldwijd (links) en met een impact in Vlaanderen (rechts)**

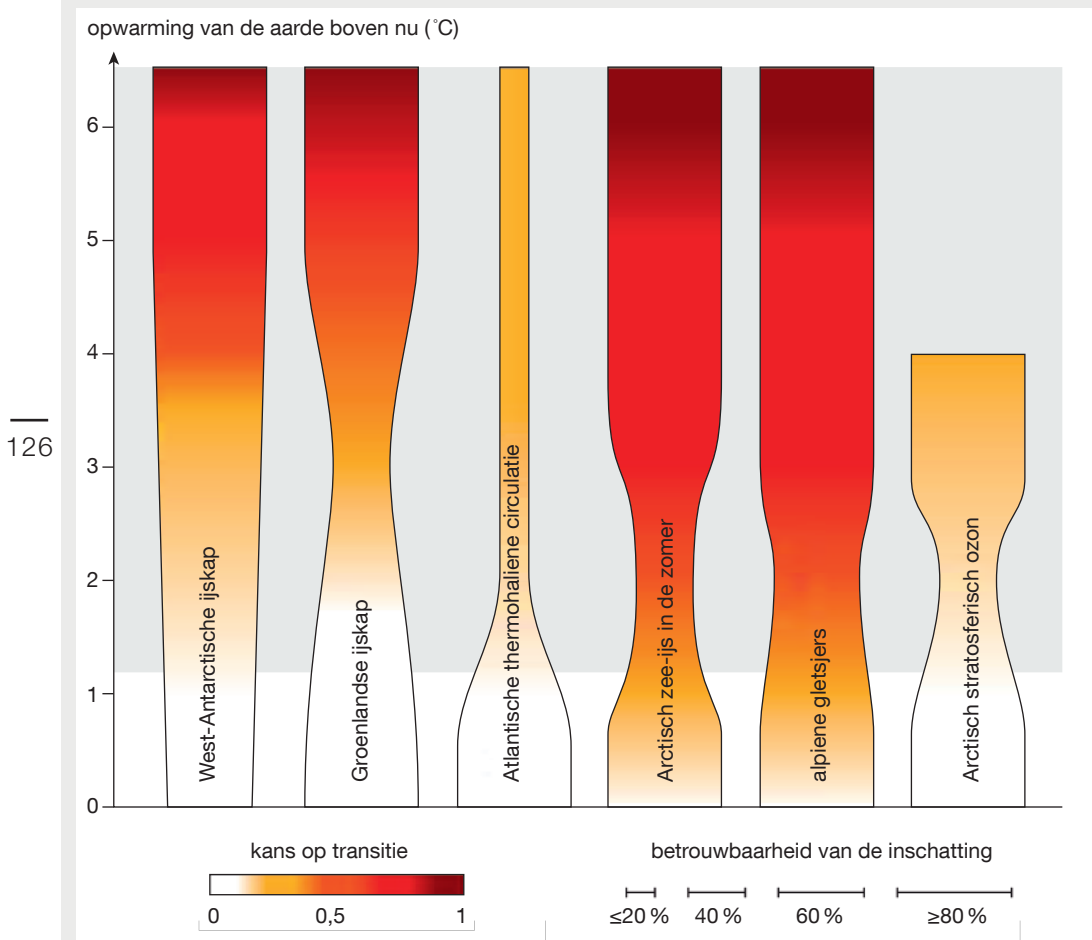


De verschillende gevoelige elementen zijn: Groenlandse (GR) ijskap, West-Antarctische (WA) ijskap, Atlantische (AT) oceaancirculatie, Arctische (ARC) ozon, Arctische (ARC) zee-ijs, Alpen (ALP) gletsjers, Boreale (BO) wouden, Permafrost, Indiase (IN) moesson, West-Afrikaanse (WAF) moesson, El Niño Zuidelijke schommeling, Amazone (AM) wouden en Sahara (SAH) vergroening.

Bron: Lenton *et al.* (2008) en Levermann *et al.* (2012)

De gevolgen van transitie in deze gevoelige elementen zullen zowel globaal als regionaal merkbaar zijn, maar een duidelijke kwantificering van deze klimaattransities ontbreekt nog. Daarom bespreken we de gevoelige elementen in het klimaatstelsel met een verwachte impact op Europa hier afzonderlijk, samen met een inschatting van hun relevantie voor Vlaanderen voor zover als momenteel mogelijk (figuur 58).

**Figuur 58:** *Inschatting van de kans dat de gevoelige elementen, relevant voor Europa (x-as), een transitie ondergaan als functie van de gemiddelde mondiale opwarming van de aarde ten opzichte van huidige condities (y-as)*



De kleuren refereren naar de kans op transitie en de breedte reflecteert de betrouwbaarheid van de inschatting.

Bron: Levermann *et al.* (2012)

### 5.1.1 De Groenlandse en West-Antarctische ijskappen

De Groenlandse en Antarctische ijskappen verliezen in versneld tempo massa: in het afgelopen decennium heeft de Groenlandse ijskap zesmaal zoveel massa verloren als gedurende het voorlaatste decennium. Het gemiddelde verlies over het laatste decennium komt overeen met een zeespiegelstijging van ongeveer 0,6 mm per jaar, en levert daarmee een bijdrage van ongeveer 20 % in de gemiddelde globale zeespiegelstijging binnen dat decennium. De schattingen voor de West-Antarctische ijskap zijn van dezelfde grootteorde. Zelfversterkende mechanismen spelen een belangrijke rol in de evolutie van



de ijskappen: als een ijskap massa verliest, zal de hoogte van de ijskap afnemen waardoor de temperatuur zal stijgen. Dit verhoogt wederom ijsverlies door smelten en eventueel door het versnellen van ijsstromingen.

Voor de Groenlandse ijskap geldt dat, bij een stijging van de temperatuur met 2 tot 4 °C boven de pre-industriële niveaus, zelfversterkende mechanismen zullen leiden tot een bijna volledig ijsverlies (equivalent aan een zeespiegelstijging van ongeveer 7 m). Het meest recente studiemateriaal sluit zo'n bijna volledig ijsverlies zelfs niet meer uit bij een lagere drempelwaarde van 1 °C. Het AR5 van het IPCC laat zien dat deze temperatuurdrempel overschreden zal worden gedurende deze eeuw. Echter, voor een volledig afsmelten zou gedurende een millennium de temperatuur enkele graden hoger moeten zijn dan de drempel, wat impliceert dat dit afsmelten niet onomkeerbaar is. De maximale snelheid waarmee de Groenlandse ijskap kan desintegreren wordt geschat op 0,54 m zeeniveaustijging-equivalent per eeuw.

Voor de West-Antarctische ijskap is nog geen gedetailleerde analyse voorhanden. Satellietwaarnemingen tonen wel aan dat de gletsjers momenteel dunner worden en dat het ijs zich terugtrekt in sommige regio's van West-Antarctica. Het kan daarom niet worden uitgesloten dat een gedeeltelijke desintegratie die kan leiden tot een aparte/bijkomende zeeniveaustijging met 1,5 m, nu al in gang is gezet. Daarom wordt in figuur 58 het risico voor West-Antarctica iets hoger ingeschat dan het risico voor Groenland.

De meeste dijken kunnen maar beperkt opgehoogd worden (vaak in de grootteorde van een meter) en hogere zeeniveauperanderingen zouden een grondige herziening van de infrastructuur vragen. De meeste kustlijnen kunnen echter niet beschermd worden tegen zeeniveauperanderingen van enkele meters.

### 5.1.2 Arctisch zee-ijs

De auteurs van figuur 58 identificeren het Arctische zee-ijs ('Noordpool') en de Alpiene gletsjers als de meest kwetsbare gevoelige elementen voor de opwarming van de aarde. In de periode 1979-2013 daalde de zee-ijsbedekking in het Noordpoolgebied met 43 000 km<sup>2</sup> per jaar in de winter (gemeten in maart wanneer de totale oppervlakte momenteel ongeveer 15 miljoen km<sup>2</sup> is) en met 95 000 km<sup>2</sup> per jaar in de zomer (gemeten in september wanneer de totale oppervlakte momenteel ongeveer 6 miljoen km<sup>2</sup> is). De omvang van de minimale zee-ijsbedekking gedurende september 2012 brak alle septemberrecords. Een vergelijking met oudere waarnemingen suggereert een halvering van de zee-ijsbedekking sinds de jaren 1950. Het Arctische zee-ijs wordt ook steeds dunner en steeds minder zee-ijs overleeft de zomer.

De meeste klimaatmodellen onderschatten de waargenomen afname in zee-ijsbedekking. Modellen die de waargenomen afname in zee-ijsbedekking het beste weergeven, projecteren een aanzienlijk snellere daling voor de toekomst dan de andere modellen. Recente studies die dit in rekening nemen, suggereren dat voor het RCP8.5-scenario uit het AR5 van het IPCC een vrijwel ijsvrije Noordelijke IJszee in september waarschijnlijk is vóór het midden van deze eeuw.

Een afname in zee-ijsbedekking heeft grote invloed op de Arctische ecosystemen. Bovendien leidt dit tot een verbeterde toegankelijkheid van potentiële bronnen van

fossiele brandstoffen in Arctische gebieden, met ecologische en geopolitieke gevolgen. Mogelijk worden ook de weerpatronen in Europa beïnvloed met een invloed op het voorkomen van extreem warme en koude periodes.

In tegenstelling tot de Arctische gebieden (zee-ijs reageert heel anders dan landijs, zo reageert landijs niet op de winden en zee-ijs wel) neemt het Antarctische zee-ijs toe, wat toe te schrijven is aan toenemende circumpolaire winden die het zee-ijs naar binnen duwen en daardoor dikker en stabielere maken.

### 5.1.3 Alpiene gletsjers

Gletsjers zijn zeer gevoelig voor kleine veranderingen in luchttemperatuur en neerslag en zijn dus uitstekende indicatoren voor klimaatverandering. De Europese gletsjers hebben de laatste honderd jaar massa verloren, vooral door de toegenomen zomertemperaturen. Het ijsvolume van de gletsjers in de Alpen is gekrompen van ongeveer 200-300 km<sup>3</sup> in 1850 tot 90 ± 30 km<sup>3</sup> op dit moment. De mummie, in 1991 ontdekt in de Ötztaler Alpen, toont aan dat het afsmelten van de gletsjers de variabiliteit van het klimaat gedurende vele duizenden jaren heeft overtroffen. De mummie is namelijk 5 300 jaren oud en kwam pas recent aan het oppervlak. Tot eind jaren 90 werden de Noorse gletsjers nog groter door toenemende neerslag, maar sindsdien trekken ze zich ook terug.

De alpiene opwarming is ongeveer tweemaal zo hoog als het wereldgemiddelde en dit komt mede door het zelfversterkend effect van de ijs-albedo-terugkoppeling. Zelfs een scenario met belangrijke emissiereducties waarbij de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur onder de 2 °C blijft (wat overeenkomt met +3 à +4 °C in de Alpen), zal leiden tot een bijna volledig verlies van de gletsjers in de Alpen binnen de komende decennia (figuur 58).

Gletsjers dienen als zoetwaterreservoirs en daarom zal een verandering in de ijsmassa van de gletsjers de waterbeschikbaarheid beïnvloeden, vooral in de zomer. Dit werkt door op de seizoensafhankelijkheid van de waterafvoer in rivieren zoals de Rijn. Verschillende andere sectoren in Europa zullen sterk beïnvloed worden, zoals de stroomproductie in waterkrachtcentrales en het toerisme. Het verlies van ijsmassa van de gletsjers draagt ook bij tot de zeespiegelstijging en beïnvloedt zo de zoetwatervoorziening, de rivierstanden en de mogelijkheden voor irrigatie.

### 5.1.4 Arctisch stratosferisch ozon

Door chemische reacties hoog in de atmosfeer beïnvloedt de menselijke uitstoot van CFK's in sterke mate de ozonconcentratie in de stratosfeer (de atmosfeerlaag tussen ongeveer 12 km en 50 km hoogte). De stratosferische ozonlaag biedt bescherming tegen huidaandoeningen, hoornvlies- en DNA-schade, huidkanker en onderdrukking van het immuunsysteem, veroorzaakt door ultraviolette zonnestraling. Het Protocol van Montreal legde in 1987 de uitstoot van CFK's sterk aan banden en sinds 1990 eindigde de neergaande trend in stratosferische ozonconcentraties.

Recent onderzoek toont echter aan dat de mens de ozonconcentraties in de stratosfeer ook beïnvloedt door de opwarming van de aarde. Broeikasgassen zorgen voor een opwarming van het aardoppervlak, maar een afkoeling van de stratosfeer. In Arctische

gebieden zal deze afkoeling waarschijnlijk leiden tot een verhoogde afbraak van ozon. Lage stratosferische temperaturen leiden tot de vorming van polaire stratosferische wolken, die over het algemeen de aantasting van de ozonlaag versterken door chemische reacties die zich aan het oppervlak van deze wolken afspelen.

Er is echter zeer grote onzekerheid over de transitie van dit gevoelig element, omdat de opwarming van de aarde ook kan leiden tot veranderingen in de luchtstromingen in de stratosfeer. Hierdoor kan wellicht warme, ozonrijke lucht naar de Arctische gebieden getransporteerd worden. Omdat de rol van deze veranderingen in luchtstromen nog onduidelijk is, zijn er geen schattingen gemaakt voor het transitiepotentieel van dit gevoelig element na 2060 (figuur 58). Tot 2060 is het onwaarschijnlijk dat dit gevoelig element een transitie zal ondergaan als de verdragen rond emissiebeperking van ozonreducerende stoffen worden opgevolgd.

### 5.1.5 Atlantische Oceaancirculatie

De Atlantische Thermohaliene Circulatie (THC) is onderdeel van een grootschalige oceaancirculatie die bijdraagt aan zachtere winters in Noord-Europa in vergelijking met de regio's op gelijkaardige breedtegraden in Noord-Amerika en Azië. Een verandering in de THC wordt veroorzaakt door veranderingen in de verdeling van zout in de Noord-Atlantische oceaan. Daarom is dit gevoelig element enkel indirect gekoppeld aan de mondiale opwarming, door middel van het smelten van de Groenlandse ijskap en veranderingen in (Arctische) neerslag. De waarschijnlijkheid van het stilvallen van deze circulatie wordt als laag ingeschat, zelfs voor hoge temperaturen (figuur 58).

Zonder het warmtetransport van de Atlantische oceaancirculatie zou de Noordzee ongeveer 2 à 3 °C koeler zijn, en de omgevingslucht in Vlaanderen 1 à 2 °C koeler dan nu het geval is. Europa zou dan aanzienlijk meer droogtes en verminderde neerslag kennen. Bovendien zou het stilvallen van de THC wellicht een (bijkomende) zeespiegelstijging in Vlaanderen teweeg brengen van 10 tot 30 cm door een herverdeling van de watermassa's. Deze regionale bijdrage zou bovenop de mondiale zeeniveaustijging komen.

### 5.1.6 Indirecte effecten

In bovenstaande paragrafen werd enkel het directe effect van transities in gevoelige elementen besproken. Er zijn echter ook indirecte effecten van klimaatverandering en de bijhorende transities in gevoelige elementen. Daarin zijn twee vormen te onderscheiden:

1. Het klimaatstelsel is een gekoppeld systeem, waardoor veranderingen aan de andere kant van de aarde ook een effect kunnen hebben bij ons. Bijvoorbeeld wanneer de permafrost zou dooien, kan dit leiden tot het vrijkomen van methaan en koolstofdioxide door biochemische processen. Dit zijn broeikasgassen die versterkt bijdragen tot de mondiale opwarming van de aarde en die dus ook in Vlaanderen een effect hebben.
2. Ook de wereld is een gekoppeld systeem en socio-economische veranderingen elders kunnen ook een effect hebben bij ons. Bijvoorbeeld in India, China en hun buurlanden wonen meer dan twee miljard mensen die aangewezen zijn op de gletsjers in de Himalaya voor de watervoorziening tijdens het droge seizoen. Door de

ijs-albedo-terugkoppeling zijn deze gletsjers kwetsbaar voor de wereldwijde opwarming. Omdat we in een geglobaliseerde economie leven, zullen regionale catastrofes ook Vlaanderen beïnvloeden.

### 5.1.7 Gevoelige elementen en gevaarlijke klimaatverandering

De gevoelige elementen en klimaattransities worden op dit moment slechts in zeer beperkte mate meegenomen in geïntegreerde beoordelingen van de gevolgen van klimaatverandering. Dit impliceert dat het risico van klimaatverandering wellicht op dit moment nog wordt onderschat. Het in rekening brengen van deze transitie in geïntegreerde beoordelingen wordt bemoeilijkt door de lange tijdschalen van deze transitie. Zo is er meer dan 50 % kans dat de ijskappen volledig zullen smelten bij een temperatuurtoename van 4 °C, maar de tijdschaal voor de realisatie van de volledige, bijhorende zeeniveaustijging, wordt ingeschat in de grootteorde van millennia: +5 à 12 m over een periode van 2 000 jaar. Voor de mate waarin de mens zich hieraan kan aanpassen is de snelheid van deze veranderingen cruciaal. Uit het paleontologisch archief blijkt dat op tijdschalen van millennia gedurende de afgelopen glaciële cycli typische snelheden van zeeniveauperanderingen van 1 m per eeuw werden waargenomen (zie ook § 2.5.1). Zelfs op korte termijn is de infrastructuur niet aangepast aan dergelijke stijgingen van zeeniveau, maar op langere termijn zijn deze lange zeeniveaustijgingen funest. Ook is het problematisch dat eens dit proces in gang is getreden, het nog moeilijk te stoppen zal zijn.

De noodzaak tot het vermijden van gevaarlijke klimaatverandering werd aangenomen als een doelstelling in het Klimaatverdrag van de VN in 1992. Een evaluatie van deze gevaarlijke veranderingen, vooral de waarschijnlijkheid van het 'potentieel' tot een transitie van een gevoelig element, is wetenschappelijk uitdagend: natuurlijke variabiliteit van het klimaat bemoeilijkt zelfs de detectie van de gevoelige elementen die op dit moment in transitie zijn. Een evaluatie van deze waarschijnlijkheden is echter cruciaal voor toekomstige maatschappelijke, politieke en economische beslissingen. Gezien de risico's die geassocieerd zijn met de omslagpunten, moet de deels onvolledige kennis toch benut worden om inzicht te verwerven in de mogelijke evolutie van ons klimaatsysteem en de mogelijke impact die daaruit volgt. Dit inzicht zal per definitie altijd voorlopig zijn, en de evaluatie zal verder evolueren wanneer nieuwe wetenschappelijke kennis ter beschikking komt.

### **5.2 Omgaan met onzekerheden en beleidsrespons**

---

Uit de voorgaande hoofdstukken blijkt duidelijk dat de toekomstige klimaattevoeltes aan grote onzekerheden onderhevig zijn. Dit betekent dat het beheer niet kan uitgaan van precieze, deterministische toekomsttevoeltes. Toch mogen de grote onzekerheden in de toekomstige klimaatverandering geen reden zijn voor het uitstellen van de aanpassing aan het veranderende klimaat (klimaatadaptatie).

Meer concreet is aan te bevelen om bij nieuwe of gewijzigde beleids- of beheersplannen of ontwerpen van nieuwe infrastructuur rekening te houden met de potentiële toekomstige klimaatverandering. Daartoe kan het risicoconcept gehanteerd worden. Het technisch 'risico' van bepaalde gebeurtenissen – meteorologische gebeurtenissen of klimaattevoeltes in dit geval – wordt gekwantificeerd als de convolutie (vermenigvuldiging

van alle mogelijke combinaties) van ‘kans op voorkomen’ van de gebeurtenissen met de ‘mogelijke gevolgen’ van deze gebeurtenissen. Het risico kan groot zijn indien ofwel de kans groot is, ofwel de gevolgen, ofwel beide.

In het geval van de klimaatscenario's is de exacte kans op het voorkomen van de klimaatscenario's niet gekend. Ze is ook uiterst moeilijk in te schatten. We kunnen wel de gevolgen van de verschillende klimaatscenario's berekenen. Daarvoor worden impactmodellen gebruikt, zoals die courant voorhanden zijn binnen de verschillende beleidsdisciplines. Voor het waterbeheer, bijvoorbeeld, bestaan er hydrologische en hydrodynamische rivieren-rioleringsmodellen. Voor de landbouw zijn er gewasgroeimodellen en modellen die de landbouwopbrengst kwantificeren onder bepaalde beheers- en weerscondities. Om de gezondheidseffecten van luchtverontreiniging te kwantificeren zijn er bijvoorbeeld luchtkwaliteitsmodellen voorhanden. Indien de klimaatscenario's in deze impactmodellen (of in andere tools voor de inschatting van de impact) worden doorgerekend, wordt een inschatting verkregen van de mogelijke gevolgen van de klimaatscenario's. Indien de gevolgen van een bepaald scenario groot zijn, is het belangrijk om – naast het voeren van een beleid dat er alles aan doet om te voorkomen dat dat scenario zich voltrekt – rekening te houden met dat potentieel scenario in de beleidsvoering en het beheer. Dit bouwt voor op het voorzorgsprincipe. Zo behoeden we ons nu al als een goede ‘huisvader’ voor risicovolle zaken door verzekeringen te nemen ook al is de kans op voorkomen klein (bijv. brand, ongevallen). Enkel indien de gevolgen van een welbepaald klimaatscenario onbeduidend zijn, hoeven we ons geen zorgen te maken over dat scenario.

Indien de gevolgen van een bepaald klimaatscenario wel belangrijk zijn, en dus het voorzorgsprincipe gehanteerd moet worden, is de volgende vraag hoe er dan best mee rekening te houden? De kans op voorkomen is immers niet gekend. Dit kan gebeuren door beleids- en beheersbeslissingen, en de bijhorende maatregelen en technische ontwerpen, zo te nemen of te maken dat ze *no regret* en *climate proof* zijn. Door de grote onzekerheid kan dit door ze flexibel-adaptief en duurzaam te maken:

- flexibel-adaptief: hierbij wordt de mogelijkheid voorzien om later liefst met zo beperkt mogelijke kost aanpassingen aan te brengen, indien zou blijken dat het klimaat in de richting van een zeer nadelig klimaatscenario opschuift. De bedoeling is zo te voorkomen dat aanpassingen worden gedaan die verdere bijstellingen in de toekomst onmogelijk of extra duur zouden maken. Dit vereist de introductie van heel wat flexibiliteit in beheersmaatregelen en bijhorende technische ontwerpen. Er wordt hierbij ook best rekening gehouden met de toekomstperiodes van de verschillende klimaatscenario's in vergelijking met de levensduur van de aanpassingen (bijv. technische ontwerpen);
- duurzaam: duurzame beslissingen zijn effectief in elk klimaatscenario, en kostenefficiënt onafhankelijk van hoe het toekomstige klimaat precies evolueert (binnen de gekende bandbreedte; hoge/midden/lage klimaatscenario's). Het betekent ook dat men aanpassingen zoekt die niet enkel in de context van de klimaatverandering voordelig zijn, maar tegelijkertijd ook voor andere doeleinden voordelen bieden. Klimaatscenario's leggen trouwens vaak pijnpunten bloot in het huidige beheer. Door de effecten van klimaatscenario's te bestuderen, dus de meteorologische situatie extremer voor te stellen dan ze momenteel is, komen problemen in het beheer – die er nu ook al zijn, maar minder zichtbaar – duidelijker aan de oppervlakte. Eenvoudige, kleine - maar niet duurzame - oplossingen op korte termijn volstaan dan vaak niet meer. Vaak moet men daarom op zoek gaan naar meer intelligente, geavanceerde en

structureel ingrijpende oplossingen die ook op lange termijn duurzaam zijn. Ook bewustmaking en -wording bij de bevolking wordt dan belangrijk (zie ook verder).

Om deze principes wat concreter te maken worden hierna enkele voorbeelden gegeven uit de sector van het overstromingsbeheer. Flexibel ontwerpen betekent dat er niet langer, zoals klassiek in de waterbouwkunde gebeurde, met vaste ontwerpregels wordt gewerkt (die gemiddeld in alle omstandigheden beste ontwerpen geven). In de plaats daarvan houdt men meer rekening met de onbekende tijd- en plaats specifieke factoren en accepteert men meer dat onze kennis onvolkomen is en in de nabije toekomst sterk kan/zal evolueren. Dat proces wordt 'actief leren' genoemd, en betekent ook dat de ontwerpen niet enkel door ingenieurs worden gestuurd, maar ook worden gedragen door en gebaseerd op kennis van alle betrokken partijen in de maatschappij. Bij stedelijke hydrologie, die zeer sterk afhankelijk is van plaatsafhankelijke, lokale kennis, betekent dat bijvoorbeeld dat (vertegenwoordigers van) lokale gemeenschappen meer betrokken worden in het beslissingsproces. Het adaptief maken van de ontwerpen betekent in deze context dat men bij vernieuwing of renovatie, rekening houdt met de al gewijzigde klimaatomstandigheden en de mogelijkheid voorziet om eventueel later (met beperkte kost) onder andere bijkomende afkoppeling van regenwater, bijkomende berging en bijkomende pompcapaciteit te realiseren.

132

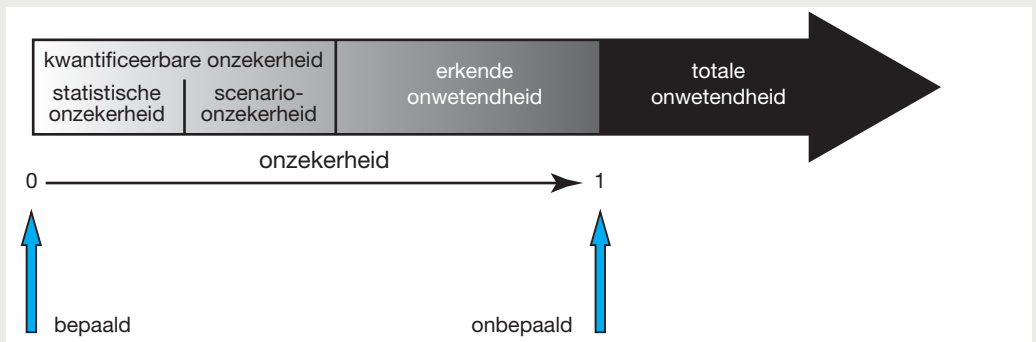
Voorbeelden van duurzame maatregelen zijn bronmaatregelen (bv. regenwater meer opwaarts afkoppelen en vasthouden, laten infiltreren, vervuiling tegengaan). Dit vraagt structurele aanpassingen, zoals een grondige herziening van de stedenbouwkundige wetgeving, betere afstemming tussen stedelijk waterbeheer en ruimtelijke ordening, stadsplanning, landbeheer, landbouw, groenbeheer, recreatiebeheer en beheer van de sportinfrastructuur. Het vraagt ook een mentaliteitswijziging bij de bevolking al dan niet ingegeven door financiële stimulansen (zoals een hemelwaterheffing), door regenwater niet langer via een goot of leiding snel af te voeren naar de riolering, maar het maximaal op eigen terrein natuurlijk te laten indringen in de ondergrond. De klassieke, eenvoudigere, gecentraliseerde 'end-of-pipe' oplossingen (bijv. aanleg buffer- of wachtbekkens, aanpassing stuwen, door overheidsdiensten) volstaan dan niet meer. Bronmaatregelen, zoals opwaartse afkoppeling van afstromend regenwater van de riool en het zo veel als mogelijk laten infiltreren van dit regenwater in publieke en private open ruimten, ook in de stedelijke omgeving, zijn sowieso kostenefficiënt, onafhankelijk van de klimaat evoluties. Ze hebben immers een positief effect op het waterbeheer en gaan ook andere problemen tegen die met een sterke urbanisatie gepaard gaan (bijv. toenemende verharding). Ze verminderen echter niet enkel de overstromingsrisico's, maar gaan onder andere ook de evoluties naar lagere waterbeschikbaarheid voor drinkwater, landbouw en industrie tegen (problematiek van verdroging en dalende grondwaterstanden) en geven meerdere functies aan open ruimten (beter beheer van de schaarse open ruimte). Bronmaatregelen zijn dus nuttige maatregelen – wat de klimaat evoluties ook zullen zijn – omdat ze niet enkel de negatieve gevolgen van de klimaatverandering tegengaan, maar ook die van andere evoluties zoals urbanisatie.

Het is nodig om in de toekomst de klimaat evoluties continu op te volgen en bij significant veranderende trends de klimaatprojecties bij te stellen (hopelijk gepaard gaande met verkleinde onzekerheden).

De klimaatscenario's, zoals beschreven in hoofdstuk 3, en de potentiële gevolgen, zoals samengevat in hoofdstuk 4, omspannen een bereik waarvan wordt verwacht dat ze de toekomstige werkelijkheid met hoge waarschijnlijkheid omvatten. Absolute zekerheid bestaat in deze echter niet. De klimaatscenario's zijn gebaseerd op een aantal broeikasgasscenario's gesimuleerd in een reeks klimaatmodellen, maar zowel de toekomstschattingen inzake broeikasgassen als de fysische klimaatkennis en dus ook de klimaatmodellen zijn onderhevig aan onzekerheden. Verder kunnen er – met een bepaalde, maar ongekende kans – klimaattransities optreden met een verregaande impact in Vlaanderen (zie § 5.1). Met deze verregaande transitie is bij de opmaak van de klimaatscenario's geen rekening gehouden. Het is onmogelijk om in het beleid reeds expliciet met deze bijkomende onzekerheden rekening te houden. Wel is het belangrijk om ons bewust te zijn van het bestaan ervan. De toekomst kan immers met een bepaalde, maar nog onbekende (hopelijk kleine) kans nog extremer zijn dan wat de huidige klimaatscenario's aangeven.

Figuur 59 geeft aan dat er verschillende soorten onzekerheden zijn. De statistische onzekerheden zijn deze die statistisch kwantificeerbaar zijn. Daar kunnen dus kansen toegekend worden aan schattingswaarden, bijvoorbeeld omdat er metingen beschikbaar zijn om deze kansbepaling door te voeren. Omdat het toekomstige klimaat zich nog niet heeft voorgedaan, zijn er echter nog geen metingen beschikbaar en kunnen de onzekerheden op het toekomstige klimaat niet statistisch gekwantificeerd worden. In de plaats daarvan werkt men met scenario's, bijvoorbeeld de klimaatscenario's. Ze kunnen gebruikt worden om scenario-onzekerheden in te schatten. Deze zijn minder nauwkeurig gekwantificeerde onzekerheden, en zijn eerder indicatief. De (klimaat)scenario's stellen hypothetisch toekomstige toekomstevoluties voor. Uiteraard is het de bedoeling om hierbij hypothesen te gebruiken die plausibel zijn, zodat het ganse bereik aan scenario's een benaderend, maar realistisch beeld geeft van de 'kwantificeerbare' onzekerheid.

**Figuur 59: Gradaties van onzekerheid**



Illustratie van de soorten onzekerheden van het ideaal waarbij alles gekend is (links) tot volledige onbekendheid (rechts)

Bron: Willems (2012)

Naast de kwantificeerbare onzekerheid zijn er nog andere onzekerheden die niet-kwantificeerbaar zijn, bijvoorbeeld door fysische processen die zich niet eerder hebben voorgedaan in het verleden, maar zich op een onvoorspelbare manier kunnen voordoen in de toekomst (bijv. onder wijzigende klimaatomstandigheden). Van bepaalde onzekerheden zijn wij ons bewust, zoals de mogelijke processen en terugkoppelingsmechanismen opgesomd in § 5.1. Wij kunnen er wel niet expliciet rekening mee houden in het beleid want ze zijn geheel onvoorspelbaar, maar het is op zich wel goed dat wij er ons van bewust zijn dat ze bestaan. Mogelijk zijn er nog andere onzekerheden die nog niet staan vermeld in § 5.1, en waar wij ons dus nog niet van bewust zijn (figuur 59). Deze laatste onzekerheden zijn uiteraard veel gevaarlijker, maar omdat het gaat om zaken (fysische processen of mechanismen) waar nog totaal niet aan gedacht is, kunnen wij ze ook niet formuleren. Wij kunnen alleen maar hopen dat ze onbestaande of klein zijn.

Kortom, ons gebrek aan kennis over het toekomstige klimaat kan worden opgedeeld in een kwantificeerbaar gedeelte en een niet-kwantificeerbaar gedeelte. In het niet-kwantificeerbaar gedeelte maken wij verder een onderscheid tussen gebrek aan kennis waarvan wij ons realiseren dat ze bestaat of – met andere woorden – waarvan ‘wij weten dat wij niet weten’, en andere onzekerheden waarvan wij ‘niet weten dat wij niet weten’.

134

Gebaseerd op onze klimaatkennis en modellen kan onze kennis over het (toekomstige) klimaat variëren van volledig gekend of ‘bepaald’ tot volledig ‘onbepaald’ in figuur 59. Onafhankelijk van ons niveau van vertrouwen, kunnen wij juist of verkeerd zijn als gevolg van het ‘verwaarlozen’ van bepaalde zaken (bijv. processen of terugkoppelingsmechanismen). En mogelijk kunnen deze verwaarlozingen zelfs belangrijker zijn dan de kwantificeerbare onzekerheid. Wij hebben over dat laatste geen idee, en – zoals hoger al gesteld – kan het beleid er onmogelijk rechtstreeks rekening mee houden, maar het is wel belangrijk om erover te communiceren, zoals hier gebeurd is in § 5.1.



---

**6** MEER INFORMATIE EN BRONNEN



## MEER INFORMATIE EN BRONNEN

---

Het MIRA Klimaatrapport 2015 is opgevat als een compilatie van het tekstmateriaal uit volgende bronnen:

1. de beschrijving van het milieuthema klimaatverandering en de indicatorfiches van dit thema op de website van het Milieurapport Vlaanderen: <http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/klimaatverandering/>
2. enkele indicatorfiches van het thema waterkwantiteit, eveneens te raadplegen op de website van het Milieurapport Vlaanderen: <http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/waterkwantiteit/>
3. het onderzoeksrapport dat recent door KU Leuven werd uitgevoerd in opdracht van MIRA: van Lipzig N.P.M. & Willems P. (2015) *Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/01, KU Leuven i.s.m. KMI. Raadpleegbaar op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)*
4. een onderzoeksrapport dat recent door VITO en KU Leuven werd uitgevoerd in opdracht van MIRA: De Ridder K., Maiheu B., Wouters H. & van Lipzig N. (2015) *Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/05, VITO en KU Leuven. Raadpleegbaar op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)*

136

Bovenstaande bronnen bevatten ook uitgebreide referentielijsten met verwijzingen naar (ander) bronmateriaal gebruikt bij hun samenstelling.

Daarnaast werden in het kader van het MIRA Klimaatrapport 2015 ook volgende informatiebronnen aangewend:

- Brisson E., Demuzere M., van Lipzig N.P.M. (2015) A study on modelling strategies for performing convective permitting climate simulations using the COSMO-CLM over a mid-latitude coastal region. *Met. Zeit.* (in press).
- Brisson E., Demuzere M., Willems P., van Lipzig N. (2014) Assessment of natural climate variability using a weather generator. *Climate Dynamics*: doi:10.1007/s00382-014-2122-8.
- Brouwers J., Peeters B., Willems P., Deckers P., De Maeyer Ph., De Sutter R. en Vanneuville W. (2009) Hoofdstuk 11: Klimaatverandering en Waterhuishouding (pp. 283-304) in: Van Steertegem M. (red.), *Milieuverkenning 2030, Vlaamse Milieumaatschappij, Aalst. Raadpleegbaar op <http://www.milieurapport.be/nl/publicaties/toekomstverkenningen/milieuverkenning-2030/copyofhoofdstuk11klimaatveranderingenwaterhuishouding/>*
- De Ridder K., Lauwaet D., Maiheu B. (2015) UrbClim – a fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 12, 21-48.
- De Troch R., Hamdi R., Van de Vyver H., Geleyn J.-F. and Termonia P. (2013) Multiscale performance of the ALARO-0 model for simulating extreme summer precipitation climatology in Belgium. *Journal of Climate*: 26, 8895-8915
- Deutsch F., Fierens F., Veldeman N., Vanpoucke Ch., Vancraeynest L., Bossuyt M., Janssen S. (2011) Air quality projections for Flanders up to 2030 using the year 2007 and 2003 meteorological conditions. Poster presented at the Air Quality and

- Climate Change: Interactions and Feedbacks, ACCENT-Plus Symposium, Urbino 13-16 September 2011.
- EEA (2004) Impacts of Europe's changing climate. EEA report no. 2/2004. Copenhagen: report (18.8.2004) + draft environmental issue report and fact sheets (18.2.2004).
  - EEA (2010) Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe – An overview of the last decade. EEA Technical report No 13/2010. doi:10.2800/62638
  - EEA (2014) Europe's climate continues to change. <http://www.eea.europa.eu/highlights/europe2019s-climate-continues-to-change>
  - EEA (2015) Atmospheric greenhouse gas concentrations - CSI 013/CLIM 052 <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-4/assessment>
  - Global Carbon Project (2014) Global Carbon Budget 2014 by C. Le Quéré, R. Moriarty, R. M. Andrew, G. P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. D. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, T. A. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. G. Canadell, F. Chevallier, C. E. Cosca, I. Harris, M. Hoppema, R. A. Houghton, J. I. House, T. Johannessen, E. Kato, A. K. Jain, R. F. Keeling, V. Kitidis, K. Klein Goldewijk, C. Koven, C. Landa, P. Landschützer, A. Lenton, I. Lima, G. Marland, J. T. Mathis, N. Metzl, Y. Nojiri, A. Olsen, W. Peters, T. Ono, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. E. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, J. Segschneider, T. Steinhoff, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, N. Viovy, Y.-P. Wang, R. Wanninkhof, G. Van der Werf, A. Wiltshire, and N. Zeng. Earth System Science Data Discussions, DOI:10.5194/essdd-7-521-2014, <http://dx.doi.org/10.5194/essdd-7-521-2014>, as released 21 September 2014 on <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>
  - Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G, Klok E.J, Jones P.D., New M. (2008) A European daily high resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. Journal of Geophysical Research: 113, 1-12.
  - Hooyberghs H., Lauwaet D., Lefebvre W., Maiheu B., De Ridder K., González-Aparicio I., Acero J.-A., Mendizabal M. (2015) Agglomeration-scale urban climate and air quality projections. Report D4.2, EU-FP7 RAMSES project. Available from [www.ramses-cities.eu/resources/](http://www.ramses-cities.eu/resources/)
  - IPCC (2013) 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
  - IPCC (2014) 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.
  - KMI (2015a) Oog voor het klimaat 2015. KMI, Brussel, mei 2015.
  - KMI (2015b) Klimaatatlas, mei 2015. Raadpleegbaar op [www.meteo.be/klimaatlas](http://www.meteo.be/klimaatlas)
  - KNMI (2014) KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands; A guide for professionals in climate adaptation, KNMI, De Bilt, The Netherlands, 34 pp. [www.climate-scenarios.nl](http://www.climate-scenarios.nl).
  - Lauwaet D., Viaene P., Brisson E., van Lipzig N.P.M., van Noije T., Strunk A., Van Looy S., Veldeman N., Blyth L., De Ridder K. and Janssen S. (2014) The effect of climate change and emission scenarios on ozone concentrations over Belgium: a high-resolution model study for policy support. Atmos. Chem. Phys.: 14, 1–12, 2014

<http://www.atmos-chem-phys.net/14/5893/2014/acp-14-5893-2014.html>  
doi:10.5194/acp-14-1-2014

- Lauwaet D., Hooyberghs H., Maiheu B., Lefebvre W., Driesen G., Van Looy S. and De Ridder K. (2015) Detailed Urban Heat Island Projections for Cities Worldwide: Dynamical Downscaling CMIP5 Global Climate Models. *Climate*, 3, 391-415.
- Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S. and Schellnhuber H.J. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *National Academy of Sciences*: 105, 1786-1793.
- Levermann A., Bamber J., Drijfhout S., Ganopolski A., Haeberli W., Harris N.R.P., Huss M., Krüger K., Lenton T.M., Lindsay R.W., Notz D., Wadhams P., Weber S. (2012) Potential climatic transitions with profound impact on Europe: review of the current state of six 'tipping elements of the climate system'. *Climatic Change*: 110, pp. 845-878.
- Loulergue L., A. Schilt, R. Spahni, V. Masson-Delmotte, T. Blunier, B. Lemieux, J.-M. Barnola, D. Raynaud, T.F. Stocker and J. Chappellaz (2008) Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years. *Nature*, Vol. 453, pp. 383-386, 15 May 2008. doi:10.1038/nature06950
- Lüthi D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura and T.F. Stocker (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, Vol. 453, pp. 379-382, 15 May 2008. doi:10.1038/nature06949
- McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- NOAA (2014) The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). NOAA Earth System Research Laboratory, Boulder, USA. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/index.html>
- Photiadou C., van der Schrier G., van Oldenborgh G.J., Verver G., Klein Tank A., Plioger M., Mänchel H., Bissoli P., Rössner S. (2015) Climate Indicator Bulletin – update 19.1.2015. [http://cib.knmi.nl/mediawiki/index.php/2014\\_warmest\\_year\\_on\\_record\\_in\\_Europe](http://cib.knmi.nl/mediawiki/index.php/2014_warmest_year_on_record_in_Europe)
- Rovers V., Bosch P., Albers R. (eindredactie) (2014) Eindrapport Climate Proof Cities 2010-2014. KvK rapport nr: 129/2014. <http://www.knowledgeforclimate.nl/climate-proofcities>
- Schilt A., M. Baumgartner, T. Blunier, J. Schwander, R. Spahni, H. Fischer, T.F. Stocker. (2010) Glacial-Interglacial and Millennial Scale Variations in the Atmospheric Nitrous Oxide Concentration during the last 800,000 Years. *Quaternary Science Reviews*, 29, 182-192.
- Tabari H., Taye M.T., Willems P. (2015a) Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen – Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5), studie uitgevoerd in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA 2015 raadpleegbaar op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be), door KU Leuven – Afdeling Hydraulica, januari 2015.
- Tabari H., Taye M.T., Willems P. (2015b) Water availability change in central Belgium for the late 21th century. *Global and Planetary Change*, 05/2015; DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.05.012
- van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J. and Rose S.K. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*: 109, 5-31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.

- Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., Beguería S., Lorenzo-Lacruz J., Azorin-Molina C. and Morán-Tejeda E. (2012) Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*: 17, 318-332.
- VKP (2013) Vlaams Klimaatbeleidsplan 2013-2020, Deel Vlaams Adaptatieplan. <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaattips/klimaattips/wat-doet-de-vlaamse-overheid/vlaams-klimaatbeleidsplan>
- VLIZ (2014) SeArch-tijdlijn. <http://www.sea-arch.be/nl/tijdlijn>
- VMM (2014a) Megatrends: ingrijpend, maar ook ongrijpbaar? Hoe beïnvloeden ze het milieu in Vlaanderen? MIRA Toekomstverkenning 2014, Vlaamse Milieumaatschappij, Aalst. Raadpleegbaar via <http://www.milieurapport.be/nl/publicaties/toekomstverkenningen/megatrends>.
- VMM (2014b) Onderbouwing van het Overstromingsrisicobeheerplan van de onbevaarbare waterlopen. ORBP-analyse Basisrapport. Erembodegem, 116p.
- Waterbouwkundig Laboratorium (2015) persoonlijke communicatie Toon Verwaest, juli 2015.
- Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid (2007) Mortaliteit in België in de zomer van 2006. Afdeling Epidemiologie, maart 2007; Brussel (België). WIV/EPI REPORTS N 2007-016. Depotnummer: D/2007/2505/16
- Willems P. (2012) Model uncertainty analysis by variance decomposition. *Physics and Chemistry of the Earth*, 42-44, 21-30.
- Willems P. (2013a) Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. *Climatic Change*: 120(4), 931-944.
- Willems P. (2013b) Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations. *Journal of Hydrology*: 490, 126-133.
- Willems P. (2014) Actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloeden aan de Belgische kust. KU Leuven - Afdeling Hydraulica, Rapport voor de Vlaamse overheid - Waterbouwkundig Laboratorium, oktober 2014, 29 p.
- WMO (2014a) Greenhouse Gas Bulletin No. 10, 6 november 2014 – The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2013. ISSN 2078-0796
- WMO (2014b) Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, WMO-No. 1123, GENEVA, 11 July 2014. [http://www.wmo.int/pages/prog/drr/transfer/2014.06.12-WMO1123\\_Atlas\\_120614.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/drr/transfer/2014.06.12-WMO1123_Atlas_120614.pdf)
- WMO (2015) Warming trend continues in 2014, press release 2.2.2015.

## BEGRIPPENLIJST

---

**Aerosol:** gas met daarin fijne vaste stofdeeltjes en/of vloeistofdruppels.

**Bovendebiet:** het debiet langs een waterloop afkomstig van de neerslagafstroming in het opwaartse stroomgebied.

**Convectieve neerslag:** neerslag als gevolg van convectie, d.i. het verschijnsel waarbij warmte zich verticaal voortplant (in de lucht, de oceaan ...). Convectieve regenbuien doen zich meestal voor tijdens warme zomerdagen. Het worden ook wel 'zomeronweers' genoemd.

**Evapotranspiratie:** gezamenlijke waterafgifte door bodem, vegetatie en hun samenstellende delen aan de atmosfeer. Dit is alle neerslag die niet via de waterloop wordt afgevoerd, maar in de atmosfeer komt door rechtstreekse verdamping of opname door planten en dieren gevolgd door verdamping. De 'potentiële evapotranspiratie' is de maximaal mogelijke evapotranspiratie, d.i. indien er steeds voldoende water beschikbaar zou zijn aan de oppervlakte of in de bodem. Indien dit laatste niet het geval is, zoals o.a. tijdens droge zomerperiodes, is de werkelijk optredende evapotranspiratie lager dan de potentiële.

**Grid (gridcel, gridgrootte):** regelmatig raster van hulplijnen om het positioneren en uitlijnen van elementen te vergemakkelijken.

**Hittegolfgraaddagen:** som van de overschrijdingen van de dagelijkse maximum- en minimumtemperaturen boven de drempelwaarden van respectievelijk 29,6 °C en 18,2 °C, voor de hittegolfdagen (volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid) in de periode 1 april tot 30 september.

**Hittestress:** beproeving van de menselijke gezondheid tijdens een periode met uitzonderlijk warm weer. Wanneer vochtverlies van het lichaam, door overmatig transpireren, niet of weinig wordt aangevuld kunnen grote problemen ontstaan. Het lichaam droogt uit en zelfs een hartaanval of een beroerte kan het gevolg zijn. Vooral ouderen en zieke mensen zijn gevoelig voor deze hittestress.

**Hydraulisch:** met betrekking tot de waterstroming (bijv. langs een rivier of riolering).

**Hydrologisch:** met betrekking tot de hydrologie, d.w.z. het gedrag, de eigenschappen, de beweging en de verdeling van water in de atmosfeer en op het aardoppervlak.

**Klimaat:** gemiddeld weer over een lange periode. Statistische beschrijving (in termen van gemiddelden en variabiliteit) van een aantal relevante weerparameters zoals temperatuur, neerslag en wind over een langere periode (bijvoorbeeld 30 jaar).

**Klimaatveranderingssignaal:** verandering van het klimaat (ook klimaatsensitiviteit genoemd) onder invloed van broeikasgasscenario's.

**Model:** een computeralgoritme op basis van wiskundige vergelijkingen die een bepaalde fysische realiteit beschrijven/nabootsen.

**Neerslagafstroming:** de afstroming van regenwater, bijvoorbeeld van een stroomgebied naar een waterloop of naar een riolering.

**Oversterfte:** sterftepercentage dat boven het gemodelleerde of verwachte niveau ligt. Het verwachte aantal doden voor een bepaalde dag wordt bekomen door het modelleren van het aantal doden geobserveerd tijdens een referentieperiode van vijf jaren die begint 5½ jaar vóór die dag en eindigt zes maanden vóór diezelfde dag. Daarbij wordt niet gewoon het aantal waargenomen sterftes tijdens de referentieperiode opgeteld, maar worden aan eventuele periodes van erg hoge sterfte gedurende de referentieperiode een kleiner gewicht in het referentiecijfer toebedeeld om een overschatting van de verwachte sterfte tegen te gaan. Het teveel (of tekort) aan doden wordt vervolgens berekend als het verschil tussen het geobserveerde en verwachte aantal doden. De significantie van deze over- (of onder-) sterfte wordt bepaald met behulp van het 95 %-betrouwbaarheidsinterval (BI).

**Overstromingsgebieden:** gebieden langs een waterloop die als gevolg van het buiten de oevers treden van de waterloop onder water kunnen komen.

**Perctiel:** waarde die met een bepaalde frequentie of kans wordt onderschreden.

**Perturbatie:** verandering (van het huidig naar een toekomstig klimaat). De perturbatiefactor is een factor die deze verandering kwantificeert; een perturbatiefactor 1.2 betekent bijvoorbeeld 20 % toename. Een klimaatperturbatie-tool is een rekeninstrument (computer algoritme) dat toelaat om een perturbatie uit te voeren op meteorologische tijdreeksen.

**Risico:** combinatie van de kans op het voorkomen van een bepaalde gebeurtenis en de bijhorende gevolgen. Het overstromingsrisico is het risico als gevolg van overstromingen.

**Sigmaplan:** plan van de Vlaamse overheid om Vlaanderen beter te beschermen tegen overstromingen vanuit de Schelde en haar zijrivieren.

**Standardized Precipitation Index (SPI):** deze index geeft de genormaliseerde afwijking weer van de neerslag gedurende een aantal maanden (inclusief de maand waarvoor de indexwaarde berekend wordt) ten opzichte van de neerslag tijdens dezelfde maanden in de referentieperiode. Als referentieperiode wordt in dit rapport de periode 1850-1899 gebruikt. De N voorafgaande maanden worden de accumulatieperiode genoemd, en de SPI die ermee overeenkomt wordt aangeduid met SPI-N.

**Stedelijk hitte-eiland:** het fenomeen dat de luchttemperatuur in steden doorgaans hoger is dan in de nabijgelegen landelijke gebieden, vooral dan 's nachts.

**Stormopzet(hoogte):** kortstondige verhoging van de zeespiegel ten gevolge van zeestormen (windkrachten).

**Stralingsforcering (radiative forcing):** een indicator waarmee de invloed van de verschillende factoren op de uitwisseling van energie tussen de aarde en de ruimte gekwantificeerd kan worden. Het staat voor het verschil tussen de radiatieve energie (warmte) die door het klimaatsysteem ontvangen wordt en de radiatieve energie die terug de ruimte in wordt gestuurd. Een positieve stralingsforcering is een nettobijdrage aan de opwarming (meer energie ontvangen dan afgegeven), een negatieve waarde betekent een bijdrage aan de afkoeling (meer energie verloren dan ontvangen).

**Stormvloed:** door stormweer veroorzaakt hoogwater aan de kust. Stormvloeden aan de Belgische kust treden op bij stormen uit westelijke tot noordelijke richtingen. De wind zorgt dan voor extra wateropzet, dat wil zeggen de wind stuwt het water extra op tegen de kust.

**Terugkeerperiode:** de gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende overschrijdingen.

**Versteningsgraad:** de mate waarin het grondoppervlak bedekt is met artificiële verharding (huizen, bestrating, parkeervlaktes ...).

## AFKORTINGEN

---

**ALARO:** atmosferisch model gebruikt door het KMI voor het maken van weersvoorspellingen, en ook gebruikt door het KMI voor fijnmazige Belgische klimaatmodellering

**AOW:** Afdeling Operationeel Waterbeheer (VMM)

**AR4:** Fourth Assessment Report (IPCC)

**AR5:** Fifth Assessment Report (IPCC)

**CCLM:** klimaatmodel gebruikt door KU Leuven binnen het MACCBET-project voor fijnmazige Belgische klimaatmodellering

**CFK:** chloorfluorkoolwaterstof

**CLIMAQS:** Climate and Air Quality Modelling for Policy Support

**CMIP5:** Coupled Model Intercomparison Project nr. 5

**COP:** Conferentie van de Partijen (Conference of Parties), vergadering – en tevens het hoogste beslissingsorgaan – van alle partijen die het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties ondertekend hebben.

**CORDEX:** Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments

**EU:** Europese Unie

**EURO-CORDEX:** Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments voor Europa

**GCM:** General Circulation Model of Global Climate Model (mondiaal klimaatmodel)

**HCFK:** gehydrogeneerde chloorfluorkoolwaterstof

**HFk:** fluorkoolwaterstof

**HIP-index:** Hot Island Population Index

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change

**KMI:** Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

**KNMI:** Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

**KU Leuven:** Katholieke Universiteit Leuven

**MACCBET:** acroniem van het onderzoeksproject Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory voor Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO)

**MIRA:** Milieurapport Vlaanderen

**MODIS-satellietsensor:** Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

**ORBP:** overstromingsrisicobeheerplan



**PET:** potentiële evapotranspiratie  
**PFK:** perfluorkoolwaterstof  
**ppb<sub>v</sub>:** parts per billion (deeltjes per miljard), volume-eenheid  
**ppm<sub>v</sub>:** parts per million (deeltjes per miljoen), volume-eenheid  
**RCM:** Regional Climate Model (regionaal klimaatmodel)  
**RCP:** Representative Concentration Pathway (IPCC)  
**SAR:** Second Assessment Report (IPCC)  
**SF:** stralingsforcering  
**SPI:** Standardized Precipitation Index  
**SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (IPCC)  
**SUHI:** surface urban heat island  
**TAR:** Third Assessment Report (IPCC)  
**TAW:** Tweede Algemene Waterpassing  
**THC:** Thermohaliene Circulatie  
**UHI:** urban heat island  
**UNEP:** United Nations Environment Programme  
**UNFCCC:** United Nations Framework Convention on Climate Change  
**VITO:** Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek  
**VMM:** Vlaamse Milieumaatschappij  
**VN:** Verenigde Naties  
**WMO:** Wereld Meteorologische Organisatie

## VOORVOEGSELS EENHEDEN

---

$10^1$	= da	(deca)	$10^{-1}$	= d	(deci)
$10^2$	= h	(hecto)	$10^{-2}$	= c	(centi)
$10^3$	= k	(kilo)	$10^{-3}$	= m	(milli)
$10^6$	= M	(mega)	$10^{-6}$	= μ	(micro)
$10^9$	= G	(giga)	$10^{-9}$	= n	(nano)
$10^{12}$	= T	(tera)	$10^{-12}$	= p	(pico)
$10^{15}$	= P	(peta)	$10^{-15}$	= f	(femto)

INDEX

---

adaptatie 99, 100, 121, 130, 139

albedo 25, 124, 128, 130

broeikasgas 19, 22–27, 29, 30, 32, 34, 63, 70–72, 74, 82, 108, 124, 128, 129, 133, 140

bronmaatregel 115, 132

debiet 100, 114–120, 140

droogte 20, 24, 58, 60, 61, 100, 101, 104, 115, 120, 129

erfgoed 109, 112

— 144 evapotranspiratie 43, 50, 51, 58, 59, 85, 91, 92, 101, 104, 119, 120, 140, 143

fijn stof 39, 101, 102, 104, 105

hitte 20, 24, 35, 39, 41–49, 80–84, 101–104, 136, 140, 141

ijskap 24, 63, 96, 124–127, 129, 130

impactanalyse 73, 74

IPCC 19, 24–26, 29, 34, 70–72, 74, 75, 85, 96, 105, 127, 137, 142, 143

klimaatmodel 19, 45, 46, 67, 70–74, 78, 80, 82, 84, 87, 90, 93, 95, 127, 133, 138, 142, 143

klimaattransitie 124, 125, 130, 133

kustverdediging 100

Kyoto-protocol 19, 29, 30

luchtkwaliteit 30, 104, 131

Masterplan Kustveiligheid 114

Montreal-protocol 30, 128

onzekerheid 17, 30, 67, 73, 75, 78, 88, 93, 129, 131, 133, 134

oversterfte 42, 46, 102, 103, 141

overstroming 24, 57, 63, 65, 72, 100, 104, 107–118, 120, 132, 139, 141

overstromingsrisicobeheerplan 101, 110, 116, 139, 142

overstromingsrichtlijn 109, 111

ozon 27, 30, 39, 101–106, 125, 126, 128, 129, 137

rampen 107, 108

RCP-scenario 19, 70–72, 74, 75, 82, 85, 105, 106, 127, 143

risico 78, 101–103, 107, 109–116, 120, 124, 127, 130–132, 139, 141, 142

ruimtelijke ordening 110, 116, 132

Sigmaplan 114, 141

stormopzet 20, 65, 96, 113, 114, 141

stralingsbalans 29, 30

superstorm 97, 111

terugkeerperiode 67, 88–90, 97, 113–115, 117–119, 142

tipping point 20, 124

verdroging 57, 85, 86, 90, 120, 121, 132

vergrijzing 103

verstening 81, 82, 142

verzekeringen 110, 131

volksgezondheid 44, 100, 102, 139, 140

waterbeheer 19, 100, 110, 115, 117, 120, 131, 132, 138, 142

watercyclus 85

WMO 19, 28, 33, 108, 139, 143

zeespiegel 24, 63, 65, 66, 96, 100, 113, 114, 126–129, 141

zee-ijs 125–128

ziekte 24, 100, 101

De **Vlaamse Milieumaatschappij (VMM)** draagt bij tot de realisatie van de doelstellingen van het milieubeleid door het voorkomen, beperken en ongedaan maken van schadelijke effecten bij watersystemen en de atmosfeer. Verder rapporteert ze over de staat van het leefmilieu en draagt ze bij tot de realisatie van het integraal waterbeleid. Meer informatie over de Vlaamse Milieumaatschappij op [www.vmm.be](http://www.vmm.be).

De decretale<sup>9</sup> opdracht van het **Milieurapport Vlaanderen (MIRA)** is drieledig:

- een beschrijving, analyse en evaluatie van de bestaande toestand van het milieu;

- een evaluatie van het tot dan toe gevoerde milieubeleid;
- een beschrijving van de verwachte ontwikkeling van het milieu bij ongewijzigd beleid en bij gewijzigd beleid volgens een aantal relevant geachte scenario's.

Bovendien moet aan de milieurapporten een ruime bekendheid worden gegeven. MIRA zorgt voor de wetenschappelijke onderbouwing van de milieubeleidsplanning in Vlaanderen. Meer informatie over de milieurapportering Vlaanderen en de MIRA-publicaties op [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

<sup>9</sup> DABM, Decreet houdende algemene bepalingen inzake milieubeleid van 5 april 1995, BS 3 juni 1995.

## Colofon

**MIRA Klimaatrapport 2015, over waargenomen en toekomstige klimaatveranderingen** is een uitgave van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) en uitgewerkt door de dienst Milieurapportering (MIRA) van de Afdeling Lucht, Milieu en Communicatie (ALMC).

## Wijze van citeren

Brouwers J., Peeters B., Van Steertegem M., van Lipzig N., Wouters H., Beullens J., Demuzere M., Willems P., De Ridder K., Maiheu B., De Troch R., Termonia P., Vansteenkiste Th., Craninx M., Maetens W., Defloor W., Cauwenberghs K. (2015) MIRA Klimaatrapport 2015, over waargenomen en toekomstige klimaatveranderingen. Vlaamse Milieumaatschappij i.s.m. KU Leuven, VITO en KMI. Aalst, Belgium, 147 p.

U kan de publicatie downloaden via [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be). Mits bronvermelding wordt overname van de teksten aangemoedigd.

## Bestellen

Infoloket Vlaamse Milieumaatschappij:  
[info@vmm.be](mailto:info@vmm.be)

## Vragen en suggesties

VMM, MIRA, T 053 72 67 35,  
[mira@vmm.be](mailto:mira@vmm.be)

## Verantwoordelijke uitgever

Michiel Van Peteghem, VMM  
D/2015/6871/029  
ISBN: 9789491385469  
september 2015

## Vormgeving en omslagontwerp

Kaat Flamey, KA.AD  
Opmaak en illustraties:  
Vanden Broele Productions  
Druk: Graphius Group, Geers Offset  
Gedrukt op: Cocoon,  
100 % gerecycleerd





-----  
'In welke mate is de klimaatverandering nu al zichtbaar in Vlaanderen en België?' en 'Wat zijn de verwachtingen voor de toekomst?', dat zijn de belangrijkste onderzoeksvragen van dit MIRA Klimaatrapport 2015.

Analyse van bestaande milieu-indicatoren, aangevuld met nieuwe indicatoren voor droogte en het stedelijk hitte-eilandeffect, geven het antwoord op de eerste vraag. Scenario-analysen brengen de bandbreedte van de verwachtingen voor de toekomst in beeld. Ze zijn gebaseerd op de meest recente scenario's van het Intergovernmental Panel on Climate Change van de Verenigde Naties (IPCC). Bovendien wordt voor het eerst nagegaan welke ruimtelijke verschillen in klimaatverandering zich kunnen aftekenen binnen Vlaanderen en omgeving. Ook de mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor de volksgezondheid en het waterbeheer krijgen de nodige aandacht. Tot slot staat dit rapport even stil bij de dreiging van een plotse omslag in ons klimaat, en hoe om te gaan met de onzekerheden die inherent verbonden zijn met de klimaatscenario's.

Met dit rapport wil MIRA eens te meer de brug slaan tussen wetenschap en beleid. Daarbij kon MIRA een beroep doen op een diverse groep experts van de Katholieke Universiteit Leuven, de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België en de Vlaamse Milieumaatschappij. Zij bundelden de meest recente cijfers en inzichten in dit rapport met het oog op een brede verspreiding en doorstroming ervan naar het beleid.

