

Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen

Hoofdrapport



Studie uitgevoerd in opdracht van
MIRA, Milieurapport Vlaanderen

Onderzoeksrapport

MIRA/2015/01, januari 2015

Dankwoord

Resultaten uit dit rapport bouwden verder op verschillende onderzoeksprojecten, met name CLIMAQS (Climate and Air Quality Modelling for Policy Support) gefinancierd door het Vlaams agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie (IWT) en MACCBET (Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory) gefinancierd door het Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO) - <http://ees.kuleuven.be/maccbet/>. Wij zijn IWT en BELSPO zeer dankbaar voor de steun. Ook de resultaten van het onderzoek 'Bijsturing van de Vlaamse klimaatscenario's voor hydrologische en hydrodynamische impactanalyse inclusief hydrologische extremen' uitgevoerd door Hossein Tabari, Meron Teferi Taye en Patrick Willems van de Afdeling Hydraulica aan de KU Leuven in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de VMM werden in dit rapport verwerkt. In eerdere fases van voormelde projecten werd belangrijk werk verricht door verschillende onderzoekers werkzaam aan de KU Leuven met name Erwan Brisson, Sam Vanden Broucke, Sajjad Saeed en Annemarie Devis. Zij verzorgden ook enkele figuren voor dit rapport. Voor de modelsimulaties gebruikten we de infrastructuur van de VSC Vlaamse Supercomputer Centrum gefinancierd door de Hercules Stichting en het Departement EWI van de Vlaamse overheid. Wij danken de CLM gemeenschap voor het beschikbaar stellen van de modelcode en het gebruik van het model. Wij erkennen het World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling, die verantwoordelijk is voor CMIP en de onderzoeksgroepen voor het produceren en het ter beschikking stellen van hun modeluitkomsten. Voor CMIP zorgt het U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison voor de coördinatie van de steun. Zij leidde bovendien de ontwikkeling van software-infrastructuur in samenwerking met de Global Organization for Earth System Science Portals. We zijn erkentelijk aan het EURO-CORDEX programma en alle betrokken onderzoeksgroepen om hun modeldata beschikbaar te stellen.

Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen

Hoofdrapport

Nicole van Lipzig en Patrick Willems,
m.m.v. Jochem Beullens, Sam Vanden Broucke, Hossein Tabari, Meron Teferi Taye,
Rozemien De Troch en Piet Termonia

Afdeling Aard- en Omgevingswetenschappen en Afdeling Hydraulica, KU Leuven
i.s.m. Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

**Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA,
Milieurapport Vlaanderen**

MIRA/2015/01

Januari 2015

Documentbeschrijving

Titel

Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen

Dit rapport verschijnt in de reeks MIRA Ondersteunend Onderzoek van de Vlaamse Milieumaatschappij. Deze reeks bevat resultaten van onderzoek gericht op de wetenschappelijke onderbouwing van het Milieurapport Vlaanderen.

Samenstellers

Nicole van Lipzig en Patrick Willems, m.m.v.:

Jochem Beullens en Sam Vanden Broucke, medewerkers KU Leuven - Afdeling Aard- en Omgevingswetenschappen

Hossein Tabari en Meron Teferi Taye, medewerkers KU Leuven - Afdeling Hydraulica

en i.s.m. Rozemien De Troch en Piet Termonia, Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

Wetenschappelijke begeleidingsgroep

Dit rapport kwam tot stand in samenwerking met de volgende wetenschappelijke begeleidingsgroep:

Johan Brouwers (MIRA VMM)

Bob Peeters (MIRA VMM)

Johan Bogaert (Dept. LNE)

Michel Craninx, Kris Cauwenberghs (Afdeling Operationeel Waterbeheer VMM)

Juliette Dujardin, Sandy Adriaenssens (IRCEL & VMM)

Fernando Pereira (MOW, Waterbouwkundig Laboratorium)

Koen De Ridder (VITO)

Martine Vanderstraeten (BELSPO)

Dominique Fonteyn (BIRA, Federaal instituut voor klimaatdiensten)

Jean-Pascal van Ypersele (UCL/IPCC)

Inhoud

Een overzicht is gegeven van de huidige kennis m.b.t. de klimaatverandering in Vlaanderen. Dit overzicht is gebaseerd op de resultaten van recente klimaat- en klimaatimpactstudies, en de statistische verwerking van de nieuwste klimaatmodelresultaten voor België en Vlaanderen. Deze laatste resultaten zijn uitgebreid gerapporteerd in de 3 Appendices die dit hoofdrapport vergezellen.

Wijze van refereren

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.

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij

Milieurapportering (MIRA)

Van Benedenlaan 34

2800 Mechelen

tel. 015 45 14 61

mira@vmm.be

D/2015/6871/004

ISBN 9789491385391

NUR 973/943

Inhoudstafel

Inhoudstafel	3
Inhoudstafel figuren	5
Inhoudstafel tabellen	7
Samenvatting.....	8
Summary	10
1. Inleiding	12
1.1. De klimaatverandering.....	12
1.2. Nieuwe broeikasgasscenario's	14
1.3. Nieuwe mondiale klimaatmodelsimulaties.....	15
1.4. Nieuwe Europese klimaatmodellen	16
1.5. Nieuwe Belgische fijnmazige klimaatmodellen.....	16
1.6. Opmaak van klimaatscenario's.....	17
1.7. Opbouw van dit rapport	18
2. Methode en datasets.....	20
2.1. Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen	20
2.2. Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5) en actualisatie klimaatscenario's	20
2.3. Ruimtelijke patronen voor België op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen	21
2.4. Tijdshorizonten voor modelprojecties en klimaatscenario's	22
3. Klimaatprojecties voor Vlaanderen	23
3.1. Temperatuur	23
3.1.a. Gemiddelde	23
3.1.b. Extremen	28
3.1.c. Ruimtelijke patronen.....	28
3.2. Neerslag en potentiële evapotranspiratie.....	31
3.2.a. Gemiddelde neerslag	31
3.2.b. Extreme neerslag.....	35
3.2.c. Ruimtelijke patronen in de neerslag	37
3.2.d. Gemiddelde evapotranspiratie.....	38
3.3. Wind.....	40
3.3.a. Windsnelheid	40
3.3.b. Windrichting.....	44
3.4. Zeeklimaat	44
3.5. Klimaatschommelingen	46
4. Gevolgen van de klimaatprojecties voor Vlaanderen.....	47
4.1. Inleiding en Europese context	47
4.2. Gevolgen voor hoog- en laagwaterdebieten langs rivieren.....	48
4.3. Gevolgen voor rioleringsystemen	51

4.4.	Gevolgen voor grondwater	52
4.5.	Gevolgen voor landbouw en gerelateerde veranderingen in stroomgebiedshydrologie	53
4.6.	Gevolgen voor overstromingsrisico's langs de kust	53
4.7.	Gevolgen voor overstromingsrisico's langs de Schelde	54
4.8.	Gevolgen van klimaatverandering vs. landgebruik/urbanisatietrends	56
4.9.	Socio-economische en ecologische invloeden van gewijzigde waterloopgebieden	56
4.10.	Luchtkwaliteit	57
5.	Klimaattransities met een verregaande impact in Vlaanderen	60
5.1.	De Groenlandse en West-Antarctische ijskappen	60
5.2.	Arctisch zee-ijs	62
5.3.	Alpine gletsjers	63
5.4.	Arctisch stratosferisch ozon	63
5.5.	Atlantische Oceaancirculatie	64
5.6.	Indirecte effecten	64
5.7.	Tipping elementen en gevaarlijke klimaatverandering	64
6.	Hoe omgaan met de grote onzekerheden in de klimaatprojecties?	66
7.	Conclusies	69
8.	Referenties	74
9.	Begrippen	81
10.	Afkortingen	82

Inhoudstafel figuren

Figuur 1: Stralingsforcering door veranderingen in zonneactiviteit (witte balk) en de stralingsforcering veroorzaakt door de mens in 2011, 1980 en 1950 in vergelijking met 1750 (grijze balk).....	13
Figuur 2: Tijdsevolutie van (links) de stralingsforcering volgens de nieuwe RCP-broeikasgasscenario's en de oude SRES scenario's (rechts) de mondiale CO ₂ -uitstoot volgens de nieuwe RCP-broeikasgasscenario's, samen met de waargenomen uitstoot tot 2013	15
Figuur 3: Schematisch overzicht van de beschikbaarheid van klimaatmodellen bij verschillende tijdschalen en hoe deze met statistische neerschalingmethoden gecombineerd moeten worden om klimaatscenario's af te leiden voor lokale impactanalyses.....	18
Figuur 4: Evolutie van de 30-jarige gemiddelde temperatuur tot het einde van de eeuw voor de 11 EURO-CORDEX modellen voor het RCP4.5 scenario (boven) en het RCP8.5 scenario (onder)	24
Figuur 5: Kansdichtheidsverdeling van de temperatuuroptename over een periode van 100 jaar op basis van de EURO-CORDEX, CCLM en ALARO modeluitvoer voor RCP4.5 (links) en RCP8.5 (rechts).....	25
Figuur 6: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar: vergelijking tussen CMIP5 en EURO-CORDEX runs.....	26
Figuur 7: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar	27
Figuur 8: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts).....	27
Figuur 9: Regionaal patroon van de temperatuurverandering aan het einde van de eeuw ten opzichte van Ukkel (BELG-HR ensemble bestaande uit 14 klimaatprojecties).....	29
Figuur 10: Regionaal patroon van de verandering in het aantal dagen per jaar boven de 25 °C (links) en onder de 0 °C aan het einde van de eeuw (BELG-HR ensemble).....	30
Figuur 11: Geprojecteerde verandering in de jaarlijkse (links) en zomer (rechts) neerslag (%) in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor RCP8.5	31
Figuur 12: Kansdichtheidsverdeling van de neerslagverandering (mm per seizoen) over een periode van 100 jaar op basis van de EURO-CORDEX, CCLM en ALARO modeluitvoer voor zomer (onder), winter (boven), RCP4.5 (links) en RCP8.5 (rechts)	32
Figuur 13: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 100 jaar: vergelijking tussen CMIP5 en EURO-CORDEX runs	33
Figuur 14: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 100 jaar.....	33
Figuur 15: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts).....	34
Figuur 16: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal natte dagen (links) en aantal droge dagen (rechts) te Ukkel over 100 jaar	35
Figuur 17: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de winter (links) en in de zomer (rechts) te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode.....	36
Figuur 18: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de winter (links) en in de zomer (rechts) te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode + vergelijking RCP4.5 en RCP8.5 scenario's.....	36

Figuur 19: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de zomer te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode....	37
Figuur 20: Neerslagverandering (perturbatiefactoren) aan het einde van de eeuw op basis van het BELG-HR ensemble, bestaande uit 14 klimaatprojecties	38
Figuur 21: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie te Ukkel over 100 jaar.....	39
Figuur 22: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts).....	39
Figuur 23: Veranderingen in windsnelheid op 00 UTC aan het einde van de eeuw op basis van een ensemble van CMIP5 GCMs, met de ondergrens (links), mediaan (midden) en bovengrens (rechts)	41
Figuur 24: Verandering van extreme wind aan het einde van de eeuw (analoog aan Figuur 23)	42
Figuur 25: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid te Ukkel over 100 jaar.....	43
Figuur 26: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts).....	43
Figuur 27: De windrichting (pijlen) in de verschillende CCLM projecties nl. het heden, de periode rond 2030 voor RCP4.5 en de periode rond 2064 voor zowel RCP4.5 als RCP8.5	44
Figuur 28: Stijging van de gemiddelde zeespiegel tussen start van de metingen en 2010	45
Figuur 29: Factor wijziging in piekafvoeren over 100 jaar voor het hoog/nat klimaatscenario, voor 5 verschillende hydrologische of neerslagafvoermodellen voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak (deelfiguur links) en verschillende kalibratiemethodes toegepast op het VHM-model (deelfiguur rechts).....	49
Figuur 30: Factor wijziging in laagwaterafvoeren over 100 jaar voor drie klimaatscenario's (deelfiguur links: laag/droog; midden: midden; rechts: hoog/nat), voor 5 verschillende hydrologische of neerslagafvoermodellen voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak	50
Figuur 31: Aantal meter daling in laagste jaarlijkse grondwaterstand in drie verschillende grondwaterlagen (HCOV 0100, 0230 en 0350) over 100 jaar voor het lage/droge klimaatscenario, op basis van het model MIKE-SHE voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak	52
Figuur 32: Factor toename in overstroomd volume (risicofactor in de figuur) aan de samenvloeiing van Schelde en Dender te Dendermonde voor een hoog klimaatscenario met +60 cm zeespiegelstijging, +21 % toename in stormopzet en +30 % toename in bovendebieten (Theseus-project): aan de samenvloeiing van Schelde en Dender te Dendermonde (deelfiguur boven), langs de Dender afwaarts (deelfiguur onder)	55
Figuur 33: Veranderingen in ozonconcentraties tegen 2030 voor het RCP4.5 scenario's per seizoen (lente, zomer, herfst, winter).....	59
Figuur 34: De verschillende tipping elementen (TE-en) in het klimaatsysteem a) met een impact wereldwijd en b) met een impact in Vlaanderen.....	60
Figuur 35: Inschatting van de kans dat de TE-en, 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).....	62
Figuur 36: Illustratie van de soorten onzekerheden van het ideaal waarbij alles gekend is (links) tot volledige onbekendheid (rechts)	68

Inhoudstafel tabellen

Tabel 1: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in jaargemiddelde temperatuur te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	26
Tabel 2: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in seizoensgemiddelde temperatuur in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	28
Tabel 3: Hoge-midden-lage 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) te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	28
Tabel 4: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in seizoensneerslag in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	34
Tabel 5: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal natte dagen in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	35
Tabel 6: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal droge dagen in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	35
Tabel 7: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering, gemiddeld voor neerslagintensiteiten met terugkeerperioden groter dan 0,1 jaar in de winter te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	36
Tabel 8: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagintensiteiten met terugkeerperioden tussen 1 en 30 jaar in zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	37
Tabel 9: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	40
Tabel 10: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in windsnelheid in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar	43
Tabel 11: Toename in daggemiddelde ozon- en PM ₁₀ -concentraties voor de vier KNMI'14 scenario's voor het midden van de 21 ^e eeuw	58
Tabel 12: Samenvattend overzicht van de gevolgen van de klimaatverandering voor Vlaanderen, volgens het laag, midden en hoog klimaatscenario over 30, 50 en 100 jaar	70

Samenvatting

In deze studie werden klimaatscenario's afgeleid door statistische analyses uit te voeren op verschillende onlangs beschikbaar gekomen resultaten van klimaatmodellen. Dit werd gedaan door deze resultaten voor Ukkel voor een toekomstperiode (standaard 2071-2100) te vergelijken met deze van de historische periode en vervolgens te herschalen naar perioden van 30, 50 en 100 jaar. Uit een breed bereik aan klimaatmodelprojecties werden drie klimaatscenario's (hoog, midden, laag) gedistilleerd.

Projecties voor de temperatuur tonen een jaargemiddelde stijging tussen 0 °C en 7,2 °C over een periode van 100 jaar. Voor de wintermaanden zijn de stijgingen kleiner dan voor de jaargemiddelde temperatuuroptocht: 0 °C à 6,2 °C: en voor de zomermaanden groter: 0 °C à 8,9 °C. Het aantal extreem warme dagen met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C neemt toe met 0 à 64 dagen gemiddeld per jaar. Het aantal extreem koude dagen met een daggemiddelde temperatuur onder de 0 °C neemt af met 1 à 33 dagen gemiddeld per jaar. De kust heeft een temperende werking op de opwarming, maar dit effect is klein ten opzichte van het klimaatveranderingssignaal. Het aantal dagen warmer dan 25 °C neemt het sterkst toe in het centrum van België, terwijl het aantal dagen kouder dan 0 °C het sterkst afneemt in de Ardennen. Het klimaatveranderingssignaal in Vlaanderen is sterk afhankelijk van het de mondiale emissies van broeikasgassen. Zowel wereldwijd als voor Vlaanderen, is de temperatuuroptocht ongeveer dubbel zo groot voor het RCP8.5-scenario in vergelijking met het RCP4.5 scenario. Ook zijn de te verwachten neerslagveranderingen groter voor de scenario's met hogere concentraties aan broeikasgassen in de atmosfeer.

Wat de neerslag betreft, neemt de totale neerslaghoeveelheid in de winter toe en in de zomer voor twee van de drie scenario af. De gemiddelde verandering in de winterneerslag varieert over een periode van 100 jaar tussen ongeveer 0 % en +38 %. Voor de zomermaanden varieert de gemiddelde neerslagverandering tussen -52 % en +18 %. Ondanks de afname in de totale zomerneerslaghoeveelheid, blijkt dat de zomerextremen sterk kunnen toenemen. Voor Vlaanderen worden er verschillen gevonden tussen de kust (polderstreek) en het Vlaamse binnenland. De neerslagvolumes zijn in de winter sterker toenemend langs de kust. In de zomer is er dan eerder een noord-zuid patroon te zien met een grotere verdroging in het zuiden van het land. De potentiële evapotranspiratie neemt bij alle scenario's en zowel in winter als zomer toe. Veranderingen in de windsnelheid zijn voor Vlaanderen in het algemeen niet significant en er is grote onzekerheid over het teken van de verandering. Ook zijn de veranderingen in de windrichting klein. Voor de extreem hoge windsnelheden is het wel waarschijnlijk dat deze zullen toenemen.

Naast deze scenario's, is er ook wetenschappelijke kennis beschikbaar over klimaattransities met verregaande gevolgen voor Vlaanderen. Dit komt omdat bepaalde elementen in het klimaatsysteem, de zogenaamde 'tipping' elementen, disproportioneel sterk reageren op een verstoring. Zo kan een bepaalde wijziging in het klimaat een kettingreactie teweeg brengen en abrupte klimaattransities veroorzaken. Enkele voorbeelden hiervan zijn het desintegreren van de Groenlandse of West-Antarctische ijskap, verlies van Arctisch zee-ijs, verdwijnen van de Alpine gletsjers, enz. De kans op zulke abrupte klimaattransities wordt groter naarmate de mondiale opwarming van de aarde stijgt. Emissiereducties mitigeren de klimaatverandering en zullen dus het risico op de abrupte klimaattransities doen dalen.

De gevolgen voor de waterhuishouding wijzen op een daling van de laagste zomerdebieten langs Vlaamse rivieren tot 60 % à 70 % over een toekomstperiode van 100 jaar. Deze evolutie naar meer verdroging is problematisch. Vlaanderen is immers zeer kwetsbaar voor deze toenemende verdroging door de lage waterbeschikbaarheid als gevolg van de hoge bevolkingsdichtheid. Langere droge zomerperioden zorgen voor lagere oppervlaktewater-beschikbaarheid voor drinkwaterproductie, industriële productieprocessen en de landbouw. Ook de scheepvaart zal meer gehinderd worden, het zoutbezwaar zal toenemen (hogere chlorideconcentraties, vb. langs het kanaal Gent-Terneuzen) en de waterkwaliteit zal door de verminderde verdunning verslechteren. Dat laatste verhoogt de kosten voor de drinkwaterproductie door de sterkere zuivering die nodig is van het oppervlaktewater tot drinkwater.

De invloed van de klimaatscenario's op de piekafvoeren langs Vlaamse rivieren is minder duidelijk en sterk afhankelijk van het precieze klimaatscenario. Bij het hoog klimaatscenario stijgen de piekafvoeren langs de Vlaamse rivieren tot meerdere tientallen % over 100 jaar (30-tal % voor grotere

rivieren, hoger voor kleine waterlopen). Langs rioleringsstelsels kunnen overstromingen zich over een toekomstperiode van 100 jaar tot 2 keer zo vaak voordoen. Voor bufferbekkens of andere bronmaatregelen (vb. regenwaterputten) is er bij het hoog klimaatscenario voor de zomer (meest extreme zomeronweders) 15 % tot 35 % bijkomende bergingscapaciteit nodig om de overlaat- of overstortfrequentie op het huidig niveau te behouden.

Een belangrijke uitdaging zal er in bestaan om het beheer in de verschillende sectoren (waterbeheer, landbouw, ruimtelijke ordening, volksgezondheid incl. luchtkwaliteit, scheepvaart, natuurbeheer, enz.) aan te passen aan deze wijzigende klimaatomstandigheden. Klimaatscenario's zijn aan grote onzekerheden onderhevig, en het aangepast beheer kan dus niet uitgaan van precieze, deterministische toekomstevoluties. Door die onzekerheden bestaat er het gevaar dat beleidsmakers en beheerders de waarschuwing voor toekomstige klimaatverandering negeren. Dit zou een verkeerde reactie zijn. Zoals ook in andere domeinen, zoals demografische evoluties waaronder bevolkingsveroudering, veilig stellen van de pensioenen, verzekeringen, enz., houden beleidsmakers en beheerders best rekening met de beschikbare informatie inclusief de onzekerheid die hieraan gekoppeld is. Dit gebeurt best door de beschikbare klimaatscenario's in rekening te brengen, de impacts van deze scenario's op de verschillende sectoren te kwantificeren en bij grote gevolgen het voorzorgsprincipe te hanteren. De principes van risicobeheer volgend, is er nood aan duurzame adaptatiestrategieën, die op lange termijn kosten-efficiënt zijn in elk klimaatscenario.

Summary

In this study, climate scenarios were derived by performing statistical analyses on several data sets of climate model outputs that recently became available. This was done by analyzing the climate model results for Uccle for a future period (2071-2100 standard) in relation to a recent historical period and then rescale for periods of 30, 50 and 100 years. From a wide range of climate model projections three climate scenarios (high, medium, low) were distilled.

Projections for the annual average temperature show an increase of 0 °C to 7,2 °C over a period of 100 years. For the winter months the increases are smaller than the annual average temperature increase: 0 °C to 6.2 °C and higher for the summer months: 0 °C – 8.9 °C. The number of extremely hot days with a daily mean temperature above 25 °C increases by 0-64 days on average per year. The number of extremely cold days with a daily average temperature below 0 °C decreases by 1-33 days on average per year. Coastal regions warm up less than inland areas, but this effect is small compared to the magnitude of the climate change signal. The number of days hotter than 25 °C increases the most in the center of Belgium, while the number of days colder than 0 °C decreases the most in the Belgian Ardennes. The climate change signal in Flanders is highly dependent on the global emissions of greenhouse gases. Both globally and for Flanders, the temperature increase is approximately twice as large for the RCP8.5 scenario compared to the RCP4.5 scenario. Also, the changes in precipitation are expected to be larger for the scenarios that involve higher concentrations of greenhouse gases in the atmosphere.

Projections for precipitation show an increase in winter precipitation for all scenarios and a decrease in summer precipitation for two of the three scenarios. The mean change in winter precipitation varies over a period of 100 years between about 0 % and +38 %. For the summer months, the average rainfall change varies between -52 % and +18 %. Despite the decline in total summer precipitation, the summer extremes can greatly increase. For Flanders, differences were found between the coast (polders) and the inland region. The precipitation increase is stronger along the coast for the winter season. For the summer season, a north-south pattern is determined with more severe droughts in the south of the country. Potential evapotranspiration increases in all scenarios both in winter and summer. Changes in wind speed for Flanders are generally not significant and there is considerable uncertainty about the sign of the change. Also, the changes in the wind direction is small. For the extremely strong winds it is likely that this will increase.

In addition to these scenarios, there is also scientific knowledge available about climate transitions with far-reaching implications for Flanders. This is because certain elements in the climate system, called tipping elements, react disproportionately strong to a disturbance. Thus, a given change in climate can cause a chain reaction leading to abrupt climate transitions. Some examples are the disintegration of the Greenland or West Antarctic Ice Sheet, loss of Arctic sea ice, disappearance of Alpine glaciers, etc. The risk of these abrupt climate transitions increase with rising global warming. Emission reductions mitigate climate change and will thus decrease the risk of abrupt climate transitions.

The projections for precipitation and evapotranspiration indicate a decrease of the lowest summer flows along Flemish rivers to 60 %-70 % over a future period of 100 years. This evolution towards more droughts is problematic. Flanders is very vulnerable to droughts due to the low availability of water associated with the high population density. Long dry summer periods lowers surface water availability for drinking water, industrial production and agriculture. The shipping might be affected, salt intrusion will increase (higher chloride concentrations, e.g. along the canal Ghent-Terneuzen) and water quality might deteriorate due to the reduced dilution. The latter increases the cost for the production of drinking water due to the stronger treatment that is required of the surface water into drinking water.

The influence of climate scenarios on the high peak flows along Flemish rivers is less clear and highly dependent on the precise climate scenarios. The high climate scenario is associated with an increase in the peak flows along the Flemish rivers up to several tens % over 100 years (about 30 % for larger rivers, higher for small watercourses). Along sewer systems, floods over a future period of 100 years might occur 2 times as likely. For storage reservoirs or other source control measures (e.g. rainwater tanks), for the high climate scenario in summer (most extreme summer storms), 15 % to 35 %

additional storage capacity would be necessary in order to maintain the overflow frequency at the current level.

A major challenge consists of managing the various sectors (water, agriculture, spatial planning, health incl. air quality, shipping, nature conservation, etc.) to adapt to the changing climatic conditions. Climate scenarios are subject to significant uncertainties, and the appropriate management cannot rely on precise, deterministic future evolutions. Because of these uncertainties, there is a danger that policy makers and administrators ignore the existing information on future climate change. As in other areas, such as demographic changes including population aging, secure pensions, insurance, etc., policymakers and managers would benefit from considering the best available information, including the uncertainty associated with it. This is best done by bringing the available climate scenarios into account, to quantify the impacts of these scenarios on the various sectors and use the precautionary principle. Following the principles of risk management, there is a need for sustainable adaptation strategies that are cost-effective in the long term in each climate scenario.

1. Inleiding

1.1. De klimaatverandering

Sinds 1750 hebben steeds toenemende bevolkingsaantallen, mondiale industrialisatie, landbouw en transport de verbranding van fossiele brandstoffen grondig versterkt. Daardoor is de atmosferische CO₂-concentratie sterk gestegen in een op geologische tijdschaal zeer korte tijd; van 278 ppm in 1750 tot de 400 ppm die bereikt werd in mei 2013. Deze waarde ligt maar liefst 100 ppm hoger dan de maximale CO₂-concentraties, zoals afgeleid uit ijskernen voor de laatste 800 000 jaar (Lüthi et al., 2008). Bovendien versnelt de CO₂-toename in de tijd, met een toename van 0,85 ppm per jaar in de jaren 1960 tot meer dan 2 ppm per jaar in het eerste decennium van de 21^e eeuw. Als gevolg daarvan is de temperatuur op aarde sterk gestegen.

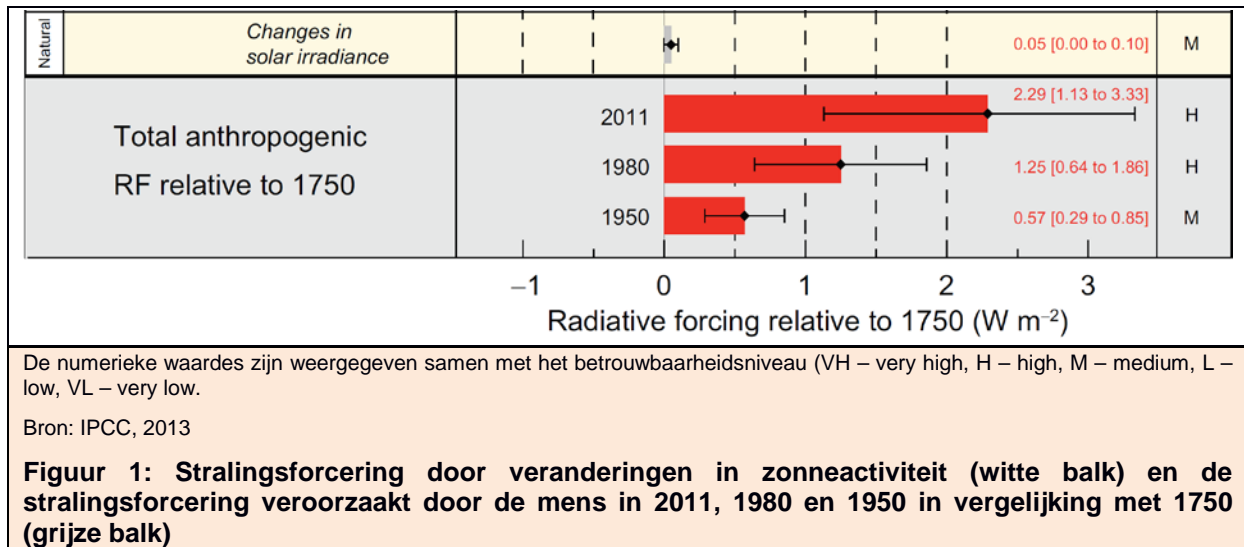
De toonaangevende organisatie voor de evaluatie van de klimaatverandering is het 'International Panel on Climate Change' of het IPCC. Het werd opgericht in 1988 om de wereld te voorzien van objectieve wetenschappelijke informatie over klimaatverandering en potentiële milieu- en socio-economische impacts. Inmiddels acht het IPCC het bewezen dat de mens het belangrijkste deel van de klimaatopwarming sinds 1950 heeft veroorzaakt. De antropogene uitstoot van broeikasgassen (koolstofdioxide CO₂, methaan CH₄, stikstofoxide N₂O, ozon O₃ en F-gassen) zorgt voor een verhoging van de absorptie van infrarode straling waardoor minder van deze straling de top van de atmosfeer kan verlaten. Dit effect wordt gekwantificeerd via de zogenaamde stralingsforcering (zie kaderstuk).

De stralingsforcering

De enige manier waarop het systeem aarde inclusief de atmosfeer energie kan uitwisselen met de ruimte is via straling. De energiebalans van de aarde wordt dan ook bepaald door de hoeveelheid zonnestraling die invalt aan de top van de atmosfeer, het aandeel dat hiervan gereflecteerd wordt, en de warmtestraling die uitgezonden wordt door de aarde en de atmosfeer. De stralingsforcering drukt het verschil uit tussen de invallende energie van de zon en de energie van de uitgaande straling die de aarde verlaat. Deze uitgaande straling bestaat uit gereflecteerde zonnestraling en warmtestraling uitgezonden door de aarde en de atmosfeer.

De stralingsforcering is de hoeveelheid extra energie beschikbaar gemaakt aan de top van de atmosfeer door verschillende factoren die het klimaat beïnvloeden. Wanneer bijvoorbeeld de concentratie van broeikasgassen stijgt, dan zal een groter deel van de warmtestraling die door het aardoppervlak wordt uitgezonden in de atmosfeer worden geabsorbeerd. Dit deel van de warmtestraling bereikt dus niet meer de top van de atmosfeer waardoor de totale uitgezonden warmtestraling door het systeem aarde inclusief de atmosfeer gereduceerd wordt. Dit resulteert in een positieve stralingsforcering, waardoor de aarde opwarmt.

De stralingsforcering die rechtstreeks door de mens wordt veroorzaakt wordt geschat op 1,1-3,3 W m⁻² in het jaar 2011 (relatief tot het jaar 1750); in vergelijking hiermee is de natuurlijke stralingsforcering door veranderingen in zonneactiviteit zeer gering geweest (0,05 W m⁻²). Met andere woorden, de invloed van de mens op de stralingsforcering is 20 tot 70 keer zo groot als de invloed van natuurlijke variaties.



De uitstoot van broeikasgassen hangt sterk af van verschillende factoren, zoals de evolutie van de bevolking, de economische ontwikkeling, het gebruik van energiebronnen, enz. Omdat de toekomstige evolutie van deze factoren onzeker is, zijn door het IPCC in 2011 een set van broeikasgasscenario's ontwikkeld, de zogenaamde Representative Concentration Pathways (RCP; Van Vuuren et al., 2011). Deze set omvat een spectrum van scenario's, variërend van gematigde scenario's, waarin de mens in staat wordt geacht de emissies grondig te beperken (lage broeikasgasscenario's), tot hoge broeikasgasscenario's waarin de mensheid de huidige emissietoenames zal behouden, of zelfs versnellen. Het effect van deze broeikasgasscenario's wordt vervolgens doorgerekend met verschillende klimaatmodellen.

Klimaatmodellen simuleren met numerieke technieken de natuurkundige wetten die het weer en klimaat bepalen op een discreet modelrooster, en dat voor de gehele aardbol. Sinds het vorige IPCC-rapport van 2007 ('Fourth Assessment Report' of kortweg AR4) is heel wat vooruitgang geboekt in de ontwikkeling van deze modellen, zowel betreffende hun oplossend vermogen (de onderlinge afstand tussen roosterpunten is kleiner), als aangaande de beschrijving van de onderliggende fysische processen (in het bijzonder wolken, straling, aerosolen, zee-ijs, en de koolstofcyclus). Hierdoor slagen de klimaatmodellen er goed in het historisch temperatuurverloop op aarde te reproduceren, en is het vertrouwen in hun voorspellend vermogen gegroeid. Met deze klimaatmodellen kan inzicht verkregen worden in het effect van de verschillende emissies op de temperatuur, neerslag, wind, enz. Hierdoor wordt er een waaier aan toekomstmogelijkheden verkregen die kunnen helpen bij het nemen van beleidsbeslissingen.

Op wereldschaal wordt er voor de periode 2081-2100 in vergelijking met 1986-2005 een temperatuurstijging van 2,6 °C tot 4,8 °C verwacht voor het scenario waar een stevig beleid op het vlak van de uitstoot uitblijft (IPCC, 2013). De opwarming gaat gepaard met het smelten van gletsjers in de bergen en (een deel van) het ijs in Groenland en Antarctica en met het uitzetten van het zeewater en dus een stijging van de zeespiegel. Zo wordt er voor dezelfde periode een mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging van 45 cm tot 82 cm verwacht voor dit scenario. Bij een scenario met drastische emissiereducties en zelfs negatieve emissies (door koolstofopvang en -opslag) aan het einde van de eeuw liggen de waarden voor de opwarming en zeeniveaustijging beduidend lager (0,3-1,7 °C en 26-55 cm respectievelijk).

De globale opwarming gaat gepaard met een verandering in de regionale spreiding van de neerslag. Klimaatmodellen projecteren een verdroging van de subtropische streken en het Middellandse zeegebied en een vernatting van Scandinavië. Modellen projecteren ook een intensivering van regenbuien en grotere risico's voor overstromingen, doordat een warmere atmosfeer meer waterdamp kan bevatten. De klimaatverandering zal ecologische en economische gevolgen hebben (vb. door maatregelen die genomen moeten worden om ons aan te passen aan de verandering). Voor een overzicht van klimaatverandering en biodiversiteitsverandering zie ook De Meester et al. (2015). De meer concrete gevolgen van de klimaatverandering voor Vlaanderen komen verder in dit rapport aan bod.

1.2. Nieuwe broeikasgasscenario's

De nieuwe RCP-gebaseerde broeikasgasscenario's zijn het resultaat van een intensieve samenwerking tussen klimaatmodelleerders en experts in terrestrische ecosystemen en broeikasgasemissies (van Vuuren et al., 2011). Ze bestrijken vier mogelijke trajecten voor de toekomst. Deze vier trajecten, RCP2.6, RCP4.5, RCP6 en RCP8.5, omvatten een waaier aan mogelijke toekomstige stralingsforcering tot het jaar 2100 (zie ook kaderstuk). Het RCP4.5 traject wil dus zeggen dat de antropogene forcing op het klimaatsysteem tegen het einde van deze eeuw $4,5 \text{ W/m}^2$ is ten opzichte van 1750 (figuur 1). Figuur 2 toont ook hoe de nieuwe scenario's gerelateerd kunnen worden aan de vorige SRES scenario's die door het IPCC in het verleden (na 2001) werden gebruikt.

RCPbroeikasgasscenario's

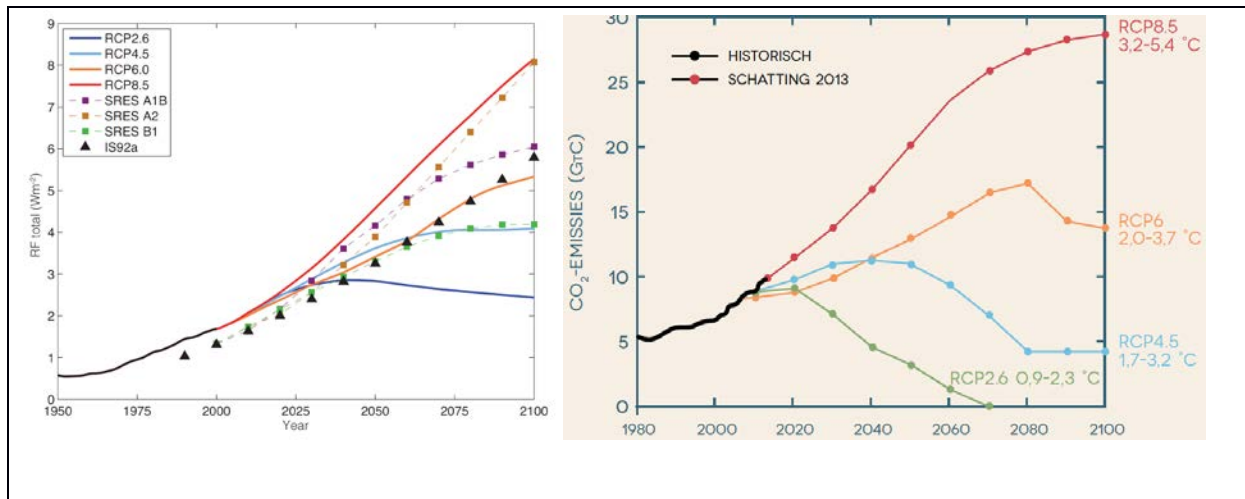
RCP8.5 Dit scenario wordt gekenmerkt door groeiende broeikasgasemissies over de tijd. Het scenario is representatief voor scenario's in de literatuur die leiden tot hoge broeikasgas concentraties. RCP8.5 is een hoog energie-intensief scenario met een hoge groei van de bevolking tot ongeveer 12 miljard in 2100 en een lage technologische ontwikkeling (Van Vuuren et al., 2011).

RCP6.0 Dit is een scenario waar de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert zonder overshoot. Dit scenario wordt gekenmerkt door een reeks aan technologieën en strategieën om energieverbruik en broeikasgasemissies te beperken. Er is echter nauwelijks een vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. In het scenario wordt een midden-projectie voor populatie tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen (Van Vuuren et al., 2011).

RCP4.5 Dit is een scenario waar de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert zonder overshoot. Dit scenario wordt gekenmerkt door een grotere range aan technologieën en strategieën om broeikasgasemissies te beperken dan in RCP6. In het scenario wordt een midden-projectie voor populatie tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Het verschilt vooral van RCP6, omdat dit scenario uitgaat van een sterke vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. Kenmerkend voor RCP4.5 is dat het gebruik van bio-energie en koolstofopvang en –opslag (Van Vuuren et al., 2011).

RCP2.6 Dit scenario is een 'zogenamd 'piek-en-afname' scenario, waar de stralingsforcering eerst waarden van $3,1 \text{ W m}^{-2}$ bereikt aan het einde van de eeuw en daarna afneemt tot $2,6 \text{ W m}^{-2}$ in 2100. Om deze niveaus te bereiken zijn substantiële reducties in emissies van broeikasgassen noodzakelijk. In het scenario wordt een midden-projectie voor populatie tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Kenmerkend voor RCP2.7 is dat emissies laag zijn door het gebruik van bio-energie en dat koolstofopvang en –opslag zal leiden tot negatieve emissies.

Deze nieuwe RCPscenario's verschillen van de vorige SRES (Special Report on Emissions Scenarios) scenario's die het IPCC hanteerde. De RCPscenario's worden gegroepeerd op basis van hun stralingsforcering en niet meer op basis van de emissies zoals in SRES. Het voordeel is dat de RCPscenario's representatief zijn en dat ze dus verschillende emissie-scenario's met een soortgelijke stralingsforcering omvatten zonder dat al deze verschillende emissie-scenario's met de klimaatmodellen doorgerekend moeten worden. Noteer dat bovenstaande aannames die gespecificeerd werden voor de verschillende RCPscenario's, indicatief zijn: het is net zo goed mogelijk dat een andere combinatie van aannames dezelfde stralingsforcering met zich meebrengt.



Bron: IPCC (2013) en Peters et al. (2012)

Figuur 2: Tijdsevolutie van (links) de stralingsforcering volgens de nieuwe RCP-broeikasgasscenario's en de oude SRES scenario's (rechts) de mondiale CO₂-uitstoot volgens de nieuwe RCP-broeikasgasscenario's, samen met de waargenomen uitstoot tot 2013

Het is belangrijk op te merken dat er geen waarschijnlijkheid of kans toegekend kunnen worden aan elk van de broeikasgasscenario's. Het zijn immers scenario's die mogelijke toekomstscenario's voorstellen. Wel wordt er van uitgegaan dat – op basis van de huidige wetenschappelijke kennis – het totale bereik dat de scenario's omspannen met hoge waarschijnlijkheid de werkelijke toekomstige evolutie omvat.

Van de volledige set aan scenario's is het RCP8.5 het meest extreme scenario, maar helemaal niet zo onrealistisch zoals uit Figuur 2 blijkt. Wanneer de recente historische gegevens van de mondiale uitstoot aan 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 van de reductie in de mondiale uitstoot door mitigatie-effecten nog geen sprake is. Het RCP8.5 scenario leunt dus het dichtst aan bij de ontwikkelingen gedurende de laatste jaren.

1.3. 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 zijn publiek beschikbaar en werden uitgevoerd in het kader van het zogenaamde Coupled Model Intercomparison project nr. 5 (CMIP5). De CMIP-projecten zorgen voor een internationaal gecoördineerd kader voor het simuleren, evalueren en vergelijken van klimaatprojecties voor de toekomst op basis van mondiale klimaatmodellen (General Circulation Models of Global Climate Models; GCMs). Deze modellen hebben gemiddeld een ruimtelijke resolutie van 150 km, en een tijdsresolutie van 1 dag. Binnen het CMIP5-project werden modelsimulaties uitgevoerd voor twee tijdshorizonten. Enerzijds is er de periode tot 2035, die overeenstemt met de nabije toekomst, en anderzijds is er de periode tot 2100 en verder, wat overeenstemt met de verre toekomst. In het CMIP5-project werd er ook getracht om factoren die verantwoordelijk zijn voor verschillen in modelprojecties en het kwantificeren van feedbacks beter te begrijpen. Daarnaast werd er nagegaan hoe realistisch de modellen het verleden simuleren.

Voor deze studie waren er voor Vlaanderen een 200-tal mondiale klimaatmodelsimulaties beschikbaar (zie het deelrapport in Appendix 2). Door de grove ruimtelijke resolutie werden enkel de resultaten geanalyseerd voor de roostercel die het hoofdmeteorologisch station van het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) te Ukkel bestrijkt. Deze analyse gebeurde voor alle RCP-broeikasgasscenario's (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 en RCP8.5).

1.4. Nieuwe Europese klimaatmodellen

Omdat een gemiddelde ruimtelijke resolutie van 150 km erg laag is voor heel wat toepassingen, worden ook klimaatmodellen met hogere resolutie gebruikt. Dit zijn de zogenaamde regionale klimaatmodellen (Regional Climate Models; RCMs). Om de rekentijden aanvaardbaar te houden, worden ze tot een kleiner gebied beperkt. Aan de rand van dat gebied worden de resultaten van een mondiaal klimaatmodel opgelegd.

De tegenhanger van de CMIP-projecten voor het simuleren, evalueren en vergelijken van mondiale klimaatmodellen binnen een internationaal gecoördineerd kader, zijn de Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments (CORDEX). Er zijn verschillende CORDEX-projecten die elk een specifieke regio bestrijken. EURO-CORDEX is het project voor de Europese regio. Typisch hebben de regionale klimaatmodellen binnen CORDEX een ruimtelijke resolutie van 12 km, 25 km en 50 km, en is modeluitvoer beschikbaar op een tijdsresolutie van 1 dag.

Naast de Europese gecoördineerde projecten, werden ook in onze omgeving klimaatprojecties opgesteld bijvoorbeeld in Nederland (KNMI, 2014; van den Hurk et al., 2014) en Wallonië (ECORES and TEC, 2011). De Nederlandse klimaatscenario's zijn gebaseerd op twee kenmerken van klimaatverandering; namelijk de wereldwijde temperatuurstijging en de veranderingen van de luchtstromingspatronen, welke in zeer belangrijke mate het regionale en lokale klimaatveranderingssignaal bepalen. Er werden vier scenario's opgesteld (G_L , G_H , W_L en W_H) die twee uiteenlopende waarden voor wereldwijde temperatuurstijging (gematigd (G) en warm (W)) combineren met twee mogelijke veranderingen van luchtstromingspatronen (lage (L) en hoge waarde (H)). In het H-scenario waait de wind vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype impliceert dan het L-scenario. Deze aanpak geeft een samenhangend beeld van veranderingen in meteorologische variabelen. De KNMI-scenario's omvatten 60-80 % van de CMIP5 spreiding in temperatuur en neerslagkarakteristieken (van den Hurk et al., 2014). De klimaatprojecties voor Wallonië werden gemaakt op basis van 3 GCMs uit het ENSEMBLES project nl. RegCM3 aangedreven door ECHAM5, HADRM3 aangedreven met HadCM3 en HIRHAM5 aangedreven met BCM. Deze modelprojecties voor Wallonië zijn echter nog gebaseerd op de SRES scenario's.

1.5. Nieuwe Belgische fijnmazige klimaatmodellen

Omdat de ruimtelijke resolutie van de Europese regionale klimaatmodellen nog steeds grof is voor heel wat toepassingen, wordt er door enkele Belgische onderzoeksgroepen gewerkt aan de ontwikkeling van fijnmazige klimaatmodellen voor de Belgische regio. Zo is het bekend dat convectieve zomeronweders, die verantwoordelijk zijn voor bijvoorbeeld rioleringsoverstromingen, enkel expliciet en nauwkeurig beschreven kunnen worden door klimaatmodellen bij een roostercelgrootte van 3-4 km of kleiner (Kendon et al., 2012; Prein et al., 2013; Ban et al., 2014). Prein et al. (2013) toonden aan dat de nauwkeurigheid van de uurlijkse neerslagverschillen binnen een dag sterk verbeterd is in klimaatmodellen met een ruimtelijke resolutie van 3 km. Ook de neerslagextremen (vb. 90-percentielwaarden) en neerslagpatronen blijken bij die ruimtelijke modelschaal veel nauwkeuriger (Prein et al., 2013; Ban et al., 2014; Brisson et al., 2014c).

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

1. door de KU Leuven met het COSMO-CLM model (CCLM) 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) (Brisson et al., 2014b; Brisson et al., 2014c; Saeed et al., 2014), en
2. door het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) met het ALARO model (Hamdi et al., 2012; De Troch et al., 2013).

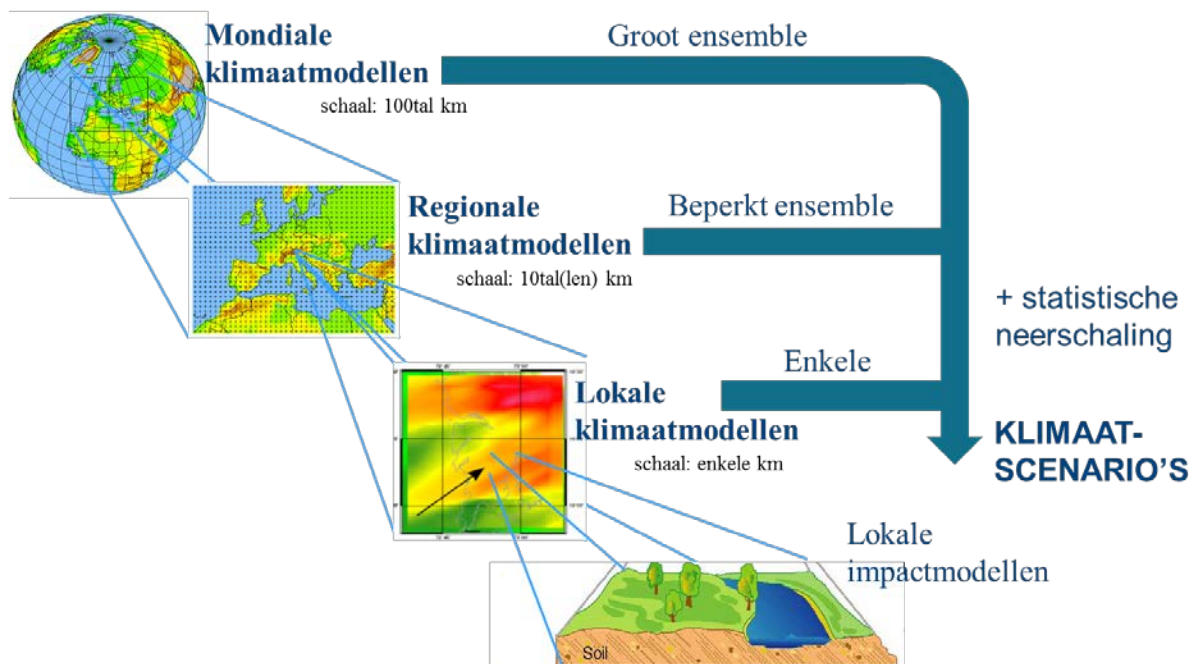
Zowel het CCLM als ALARO model worden ook voor numerieke weersvoorspelling gebruikt. Appendix 1 geeft een overzicht van de beschikbare simulaties met deze modellen.

1.6. Opmaak van klimaatscenario's

Helaas zijn er vooralsnog slechts twee fijnmazige Belgische klimaatmodellen beschikbaar (CCLM voor KULeuven, en ALARO voor KMI). Ook het aantal beschikbare regionale klimaatmodelsimulaties voor Europa (EURO-CORDEX) is nog beperkt. Dit betekent dat de klimaatscenario's niet enkel op deze modellen gebaseerd mogen worden. Door de nog grote onzekerheid in de klimaatmodellering, dienen klimaatscenario's gebaseerd te worden op een ruime set aan klimaatmodelresultaten. Omdat deze set momenteel enkel beschikbaar is voor de grofschalige modellen, 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 (zie verder in dit rapport), werden de CMIP5-modelresultaten in deze studie als basis gebruikt voor de klimaatscenario's. Het gaat dus om de 200-tal nieuwe CMIP5-klimaatmodelruns. Ze geven een algemeen beeld van het klimaatveranderingssignaal voor onze regio.

Het is evenwel belangrijk op te merken dat voor meer specifieke impactanalyses, zoals bijvoorbeeld de impact op de waterhuishouding zoals rivier- en rioleringsoverstromingen en droogte, meer specifieke/gedetailleerde klimaatscenario's vereist zijn. Deze worden afgeleid van de klimaatmodelresultaten beschikbaar op de verschillende ruimte- en tijdschalen, na verdere neerschaling op basis van statistische technieken. Een voorbeeld van een statistische neerschalingstechniek is deze waarbij op basis van historische waarnemingen het verschil wordt geanalyseerd tussen de kansverdeling van een bepaalde klimaatvariabele op de grove schaal (deze van de klimaatmodellen) versus deze op de fijne schaal (deze die nodig is voor de impactanalyse). Dit verschil wordt daarna toegepast op de klimaatmodelresultaten voor de toekomst, om ook voor de fijne schaal klimaatmodelprojecties te bekomen. Deze laatste noemt men dan klimaatmodelprojecties bekomen na statistische neerschaling. Een andere methode bestaat erin om voor elke toekomstgebeurtenis die het grofschalig klimaatmodel genereert een meest analoge gebeurtenis in het verleden te gaan zoeken en de fijnschalige neerslag van deze gebeurtenis uit het verleden ook in de toekomst over te nemen. En er zijn tal van andere methodes, vb. die gebruik maken van stochastische modellen of disaggregatietechnieken. Een overzicht van al deze methodes, samen met de voor- en nadelen, en met toepassing op het neerschalen van extreme neerslag kan gevonden worden in het boek van Willems et al. (2012).

Finaal dienen dus mondiale, regionale en lokale klimaatmodellen gecombineerd te worden met statistische neerschalingstechnieken om klimaatscenario's af te leiden en specifieke lokale impactanalyses uit te voeren. Dit is schematisch geïllustreerd in Figuur 3. De recente artikels van Willems & Vrac (2011), Willems (2013) en Ntegeka et al. (2014) geven een voorbeeld van hoe dat kan gebeuren voor impactanalyse op stedelijke hydrologie en rivierbekkenhydrologie. In een parallelle studie voor VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer (Tabari et al., 2015) werd deze methode toegepast op dezelfde klimaatmodelresultaten die aan de basis liggen van het voorliggend MIRA-rapport. In die studie werden dus klimaatscenario's afgeleid die specifiek bruikbaar zijn voor hydrologische en hydraulische impactanalyses in België. Ook werd in die studie een software-algoritme afgeleid (klimaatperturbatietool) die toelaat om historische meetreeksen van neerslag, temperatuur en potentiële evapotranspiratie aan te passen aan deze klimaatscenario's. Ze laat toe om de tijdreeksen die courant gebruikt worden als invoer voor hydrologische en hydraulische impactmodellen aan te passen (te perturberen) aan de klimaatscenario's, dus om klimaatimpactanalyses uit te voeren via hydrologische en hydraulische modelsimulaties op basis van historische en geperturbeerde meteorologische invoertijdreeksen.



Figuur 3: Schematisch overzicht van de beschikbaarheid van klimaatmodellen bij verschillende tijdschalen en hoe deze met statistische neerschalingmethoden gecombineerd moeten worden om klimaatscenario's af te leiden voor lokale impactanalyses

Dit rapport beoogt geen klimaatscenario's te rapporteren die specifiek geldig zijn voor impactanalyses in specifieke sectoren. Ze beoogt eerder een algemeen beeld te geven van het klimaatveranderingssignaal voor België en Vlaanderen.

1.7. Opbouw van dit rapport

Het belangrijkste bestanddeel van dit rapport vormen de klimaatprojecties en klimaatscenario's die in het kader van deze studie werden opgesteld voor Vlaanderen. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de methodes en datasets die in deze studie gebruikt werden. In Hoofdstuk 3 worden de klimaatprojecties voor Vlaanderen besproken in relatie met de beschikbare literatuur. Hoofdstuk 4 bespreekt de gevolgen van de klimaatverandering.

Naast de conventionele klimaatprojecties en klimaatscenario's zoals boven aangehaald, wordt er in de wetenschappelijke literatuur veel gesproken over de toenemende kans dat, door een sterke wereldwijde opwarming, abrupte veranderingen van het klimaatsysteem optreden. Het klimaatsysteem bevat gevoelige elementen (tipping elementen), welke drastische transitieën kunnen ondergaan bij een relatief kleine verstoring van het klimaatsysteem (Lenton et al., 2008). Enkele voorbeelden van 'tipping elements' zijn: het desintegreren van de Groenlandse of West-Antarctische ijskap, verlies van Arctisch zee-ijs, verdwijnen van de Alpine gletsjers enz. De gevolgen van transitieën in deze gevoelige elementen zullen zowel globaal als regionaal merkbaar zijn, maar een duidelijke kwantificatie van deze transitieën ontbreekt nog. Daarom werd ervoor gekozen om deze gevoelige elementen in het klimaatsysteem apart te bespreken van de meer conventionele klimaatscenario's. Hoofdstuk 5 is aan dit thema gewijd.

Een belangrijke uitdaging zal er in bestaan om het beheer in de verschillende sectoren (waterbeheer, landbouw, volksgezondheid incl. luchtkwaliteit, scheepvaart, natuurbeheer, enz.) aan te passen aan de wijzigende klimaatomstandigheden. In de beschrijving van de klimaatscenario's hierna zal duidelijk blijken dat de toekomstige klimaatevoluties aan grote onzekerheden onderhevig zijn. Dit betekent dat het aangepast beheer niet kan uitgaan van precieze, deterministische toekomstevoluties. Door die onzekerheden bestaat er het gevaar dat beleidsmakers en beheerders de waarschuwing voor toekomstige klimaatverandering negeren. Dit zou een verkeerde reactie zijn. Net als in andere domeinen – bv. het veilig stellen van de pensioenen bij wijzigende demografie – houden

beleidsmakers en beheerders best rekening met de toekomstprojecties inzake klimaatverandering. Hoe dit best gebeurt wordt in Hoofdstuk 6 toegelicht.

Tot slot komen de besluiten van deze studie aan bod in Hoofdstuk 7.

2. Methode en datasets

2.1. Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen

Als onderdeel van het CORDEX mondiale framework, biedt EURO-CORDEX regionale klimaatprojecties voor Europa aan op een resolutie van 50 km en 12 km. Voor België zijn klimaatprojecties met een nog hogere resolutie beschikbaar in het bijzonder van het CCLM model (3 km roosterpuntsafstand) en het ALARO model (4 km roosterpuntsafstand). Uit een evaluatie van het CCLM model op verschillende resoluties (3 km, 7 km en 25 km) werd een duidelijke verbetering gevonden in de representatie van 1) de dagelijkse gang in neerslag 2) de extreme neerslag en 3) de grote ruimtelijke variaties in de neerslag binnen Vlaanderen gedurende dagen met convectieve neerslag (Appendix 1; Brisson et al., 2014c). Omdat het vooral deze extreme neerslag is die een hoge impact heeft op de maatschappij is er een grote stap voorwaarts gezet door deze fijnmazige modellen voor België beschikbaar te maken.

De roosterpuntsafstand die voor de Belgische fijnmazige modellen gebruikt werd, is kleiner dan de internationale standaard. Dit vergt grote rekencapaciteit en dataopslagcapaciteit. Daarom werden de CCLM-berekeningen uitgevoerd voor periodes van slechts 10 jaar. Deze periode is voldoende om statistisch significante resultaten te behalen met name voor de gemiddelde waarden (Brisson et al., 2014a). Het blijft echter belangrijk om de resultaten te plaatsen in de context van andere modelresultaten.

Het deelrapport in Appendix 1 geeft een uitgebreide beschrijving van de statistische analyses op de 11 beschikbare EURO-CORDEX projecties met een ruimtelijke resolutie van 50 km, en de specifieke Belgische CCLM en ALARO projecties met een resolutie tot 3 km, voor de variabelen temperatuur en neerslag. De analyse van de Europese regionale klimaatmodelresultaten werd beperkt tot de modelprojecties die aan de start van deze VMM studie beschikbaar waren, namelijk de RCP-broeikasscenario's RCP4.5 en RCP8.5. Noteer dat in de toekomst, er meer projecties beschikbaar zullen komen binnen EURO-CORDEX (Jacobs et al., 2013).

2.2. Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5) en actualisatie klimaatscenario's

Het deelrapport in Appendix 2 geeft een uitgebreide beschrijving van de nieuwe statistische analyses op de meer dan 200 CMIP5-klimaatmodelsimulaties. Omdat de klimaatscenario's op basis van CMIP5 afgeleid zijn van grofschalige mondiale klimaatmodellen blijft de vraag in hoeverre deze klimaatscenario's representatief zijn voor het lokale, fijnschaligere klimaat. De vergelijking van de klimaatgevoeligheid afgeleid van de fijnschalige/fijnmazige klimaatmodellen met deze van de globale klimaatmodellen, laat toe om daar een uitspraak over te doen. In Appendix 2 wordt deze vergelijking gemaakt voor de fijnmazige CCLM- en ALARO-resultaten. De ALARO-resultaten werden geanalyseerd bij gridgroottes van 40 km, 10 km en 4 km, en bij een tijdschaal van 1 dag. De CCLM-resultaten werden enkel bij een gridgrootte van 3 km geanalyseerd, en bij tijdschalen van 1 dag, 1 uur en 10 minuten. Uit deze resultaten blijkt dat vooral voor de extreme zomerneerslag het aantal mm neerslag nauwkeuriger gesimuleerd wordt bij hogere modelresoluties in zowel ruimte als tijd. Maar wanneer de relatieve veranderingen van het huidig tot het toekomstig klimaat worden geanalyseerd, dan blijken deze niet systematisch afhankelijk van de ruimte- en tijdschaal. Dit geeft aan dat de relatieve neerslagverandering, zoals afgeleid uit de grofschalige klimaatmodelresultaten (CMIP5, EURO-CORDEX) ook geldig/toepasbaar zijn op de kleinere schaalgroottes. Let wel: deze conclusie is gebaseerd op slechts 2 fijnmazige modellen; dus moet met de nodige voorzichtigheid worden beschouwd. Zolang het tegendeel niet wordt aangetoond (vb. na latere analyse van een groter aantal fijnmazige modellen), wordt de relatieve neerslagverandering zoals hiervoor voor CMIP5 weergegeven, ook geldig beschouwd voor de kleinere tijd- en ruimteschalen.

In het deelrapport van Appendix 2 worden ook de nieuwe klimaatscenario's beschreven. Ze stellen een update voor van de klimaatscenario's beschreven in de MIRA 2009 rapportering (Brouwers et al.,

2009; Willems et al., 2009) alsook de NARA 2009 rapportering voor het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO). Deze scenario's in de vorige MIRA rapportering waren in hoofdzaak gebaseerd op de klimaatscenario's afgeleid door KU Leuven en KMI in het CCI-HYDR onderzoeksproject voor Federaal Wetenschapsbeleid (<http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR.htm>) (2006-2010) (Baguis et al., 2009; Willems et al., 2010) en aanvullende studies (Willems & Vrac, 2011; Willems, 2013a). Er werden toen klimaatscenario's afgeleid voor neerslag, temperatuur, potentiële evapotranspiratie (ET_o) en windsnelheid. Dit gebeurde uiteindelijk voor een totaal aantal van 47 geanalyseerde regionale klimaatmodelsimulaties voor Ukkel en 69 mondiale klimaatmodelsimulaties. Al deze simulaties waren nog gebaseerd op de SRES-broeikasgasemissiescenario's. Omdat de geanalyseerde regionale klimaatmodellen aan de rand gebruik maakten van een eerder beperkt aantal mondiale klimaatmodellen, werden schaalfactoren toegepast om rekening te houden met een ruimere set aan simulaties met mondiale modellen. Deze schaalfactoren werden bekomen na statistische analyse van alle mondiale klimaatmodelsimulaties die beschikbaar waren voor Ukkel, en gebruikt aan de basis van het 4de klimaatrapport van het IPCC.

Uit het breed bereik aan klimaatmodelprojecties werden in 2009 3 klimaatscenario's gedistilleerd, genaamd hoog/nat, midden en laag/droog. Deze lieten toe dat eindgebruikers met een beperkt aantal scenario's toch het ganse bereik aan klimaatmodelprojecties konden beschouwen. De 3 scenario's waren zodanig afgeleid dat ze bij hydrologische impactanalyse leiden tot de hoogste/middelste/laagste impact op natte/droge condities in winter/zomer, niet enkel voor waterbalansstudies maar ook voor impactanalyse op hydrologische extremen zoals overstromingen en laagwater (Ntegeka et al., 2014). De scenario's hielden rekening met de seizoensafhankelijkheid tussen de klimaatveranderingen in neerslag en in ET_o, dit om de intrinsieke fysische consistentie in de veranderingen tussen seizoenen en variabelen te behouden.

Ook in dit MIRA-rapport zijn op basis van de nieuwe klimaatmodelresultaten 3 klimaatscenario's afgeleid (hoog, midden, laag). De hoge en lage klimaatscenario's zijn gebaseerd op de boven- en ondergrens van het 95 %-betrouwbaarheidsinterval berekend op basis van het ganse bereik aan beschikbare en geanalyseerde klimaatmodelprojecties voor België. De hoge en lage klimaatscenario's beogen dus dit ganse bereik bij benadering te omspannen. Ze werden gebaseerd op de 95 %-intervalgrenzen en niet op de absolute hoogste en laagste waarden, om de invloed van de steekproefgrootte (aantal beschikbare klimaatmodelprojecties) op de klimaatscenario's te beperken. Deze aanpak is identiek aan deze gevolgd voor de vorige klimaatscenario's van 2009.

De hoge en lage klimaatscenario's stellen dus pessimistische (voor het hoge klimaatscenario) en optimistische (voor het lage klimaatscenario) klimaatprojecties voor, en dit binnen de huidige set aan 'plausibele' klimaatmodelprojecties voor de toekomst. Het midden klimaatscenario komt overeen met de mediaan van alle klimaatmodelprojecties. Merk op dat de toekomstige klimaatverandering met een bepaalde, waarschijnlijk kleine, maar onbekende kans extremer kan zijn dan wat omspannen wordt door de 3 klimaatscenario's (zie ook Deel 6 van dit rapport).

2.3. Ruimtelijke patronen voor België op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen

De ruimtelijke patronen van de klimaatveranderingen werden geanalyseerd op basis van een multi-model ensemble bestaande uit zowel EURO-CORDEX modellen op 12 km resolutie als de fijnmazige Belgische CCLM en ALARO modellen. Projecties voor zowel RCP4.5 als RCP8.5 waren beschikbaar voor vijf EURO-CORDEX modellen, met een resolutie van 12 km. Twee projecties voor RCP4.5 waren beschikbaar met CCLM en één projectie voor RCP8.5. Het ALARO model werd gebruikt met een projectie voor SRES-A1B. Dit scenario situeert zich volgens Figuur 2 tussen de scenario's RCP4.5 en RCP8.5. Noteer dat Appendix 1 een volledige beschrijving geeft van alle beschikbare klimaatprojecties. Wegens het lage aantal projecties op hoge resolutie werd er gekozen om het ensemble, bestaande uit 14 klimaatprojecties, in zijn geheel te bekijken. We refereren naar dit multi-model ensemble BELG-HR ensemble. Significantie niveaus werden berekend op basis van het criterium dat een signaal significant is wanneer twee-derde van de modellen een verandering weergeven met hetzelfde teken (zie ook IPCC, 2013). De resultaten voor alle afzonderlijke modellen en scenario's zijn beschikbaar in Appendix 3.

2.4. Tijdshorizonten voor modelprojecties en klimaatscenario's

Het klimaatveranderingssignaal wordt hierna voorgesteld in de vorm van de cumulatieve absolute verandering of de relatieve verandering (% verandering) voor een periode van 100 jaar. Ook zijn interpolaties doorgevoerd voor perioden van 30 jaar en 50 jaar. Voor neerslag worden de absolute en relatieve veranderingen beschouwd, en voor temperatuur de absolute veranderingen (aantal graden Celsius). Deze cumulatieve verandering is afgeleid van de beschikbare klimaatmodelresultaten, die wat verschillen in referentie- en toekomstperioden. Daarom wordt voor elk van de klimaatmodelsimulaties de gemiddelde verandering van de referentie- naar de toekomstperiode berekend, en lineair herschaald naar eenzelfde periode (100 jaar, 30 jaar of 50 jaar). Het klimaatveranderingssignaal voor 100 jaar kan 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. Het klimaatveranderingssignaal wordt soms ook 'klimaatsensitiviteit' genoemd.

3. Klimaatprojecties voor Vlaanderen

In dit hoofdstuk worden de analyses besproken die, in het kader van deze VMM studie, werden uitgevoerd met de globale, Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen. Bovendien worden de resultaten gekaderd binnen de bevindingen van het vijfde klimaatrapport van het IPCC (2013), waarin een heel hoofdstuk aan Europa werd gewijd. Naast het IPCC, bracht het Europees Milieuoagentschap (EMA) recent (aug. 2014) een actualisatie uit van haar belangrijkste toestandindicatoren m.b.t. klimaatverandering (EAA, 2014). Daarbij gaat de aandacht zowel naar de evaluatie van de waarnemingen in de laatste decennia, als naar de verwachtingen en mogelijke scenario's tot 2100. Ook deze bevindingen worden in onderstaande bespreking geïntegreerd, net als recent studiemateriaal uit Nederland (KNMI, 2014; van den Hurk et al., 2014) en Wallonië (ECORES and TEC, 2011).

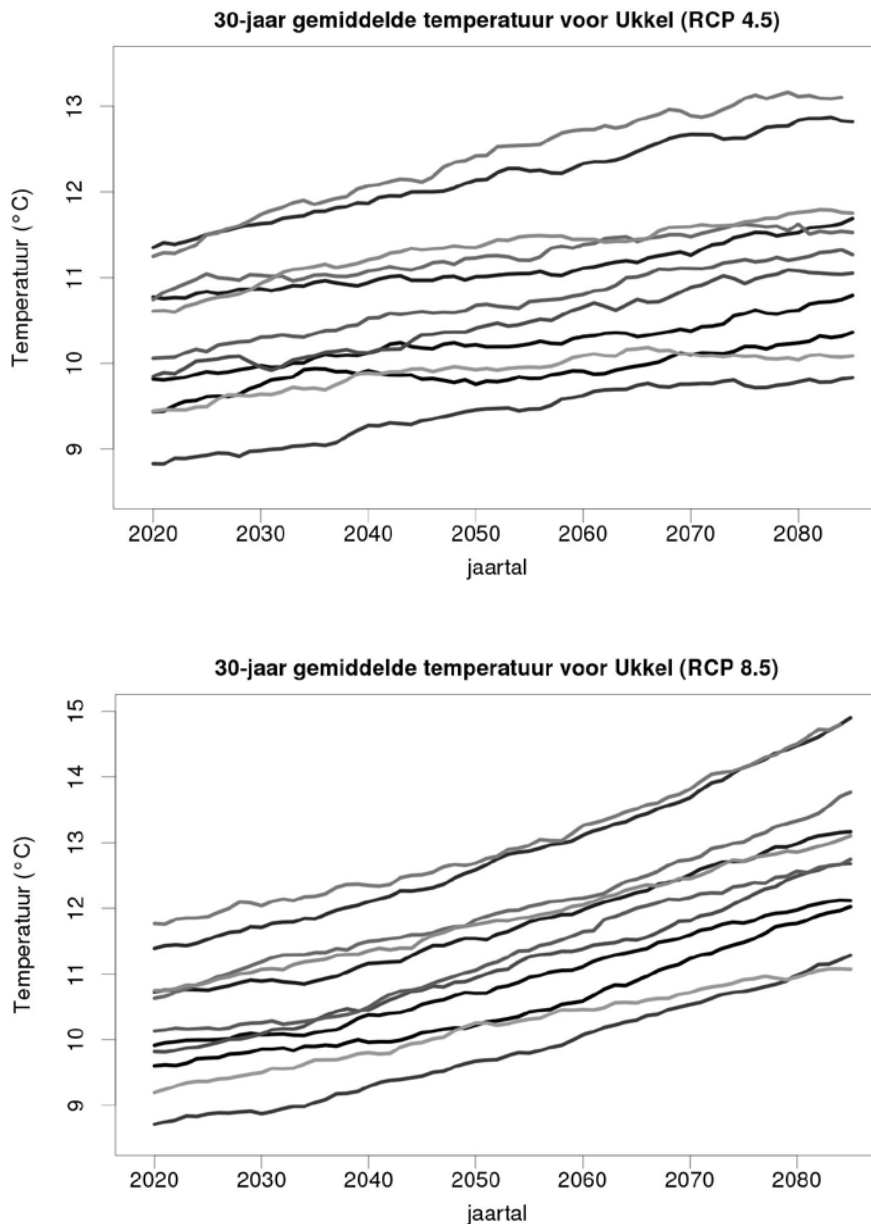
3.1. Temperatuur

3.1.a. Gemiddelde

De mate waarin de wereldgemiddelde temperatuur zal stijgen is sterk afhankelijk van toekomstige emissies van broeikasgassen. De temperatuuroename voor het einde van deze eeuw (2081-2100 in vergelijking tot 1986-2005) zal volgens het AR5 van 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). Arctische gebieden en landoppervlaktes zullen sneller opwarmen dan het wereldgemiddelde.

De mediaan van de projecties voor het jaar waarin 2 °C temperatuurstijging (ten opzichte van de periode 1881–1910) wordt overschreden, ligt tussen 2042 en 2050 voor drie van de vier RCP scenario's: RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5 (Vautard et al., 2014). Noteer dat er hier een andere referentieperiode werd gehanteerd dan in het AR5 van IPCC, omdat door de EU en de UNFCCC het 2 °C plafond van toelaatbare temperatuurstijging werd bepaald ten opzichte van 'pre-industriële waarden'.

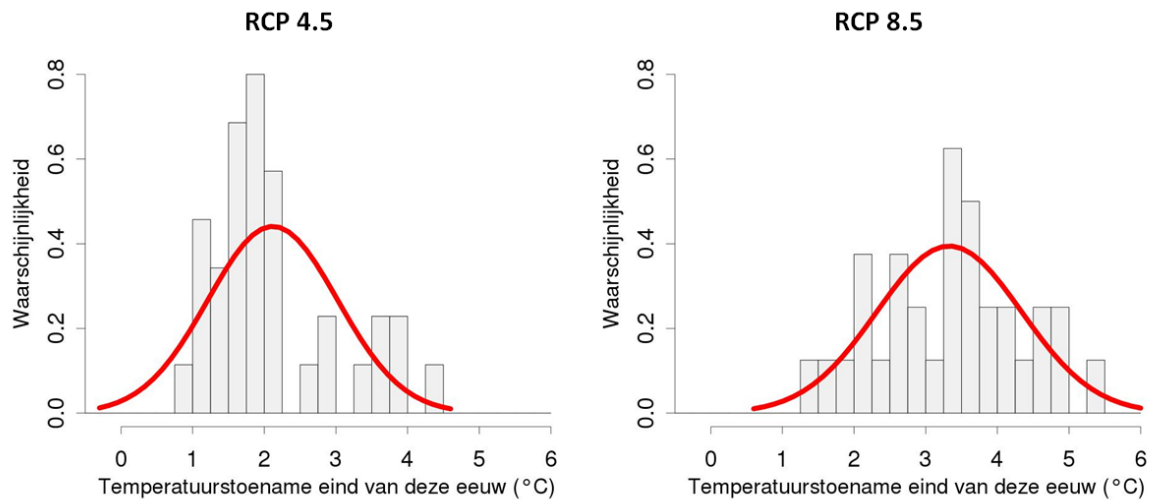
Voor Europa worden veranderingen in landtemperatuur verwacht, die groter zijn dan de veranderingen in het wereldgemiddelde (Jacob et al., 2013). Voor het EURO-CORDEX multi-model ensemble wordt een toename van ongeveer 2,4 °C voor RCP4.5 en 4,1 °C voor RCP8.5 geprojecteerd voor een periode van 100 jaar (eind 20^e eeuw vergeleken met eind 21^e eeuw). De toename is het grootste in de winter voor noordoost Europa en Scandinavië en in de zomer voor zuid Europa (Kjellström et al., 2011). Voor Vlaanderen liggen de waarden van de EURO-CORDEX modellen dan weer eerder in de lijn van de eerder genoemde mondiale veranderingen. Ook hier worden de temperatuuroenames sterk beïnvloed door de emissies: voor Ukkel is de gemiddelde toename in temperatuur over 100 jaar in het EURO-CORDEX multi-model ensemble 4,1 °C voor RCP8.5 en 1,7 °C voor RCP4.5. Ook laten alle modellen een stijgende vrijwel lineaire trend zien voor deze eeuw (Figuur 4), weliswaar met een beperkte versnelling naar het einde van de eeuw toe voor RCP8.5 en een beperkte vertraging voor RCP4.5. De modellen kunnen onderling in absolute waarden wel een 2-tal graden Celsius verschillen. Hoewel KNMI (2014) geen onderscheid maakt tussen de emissiescenario's vinden zij voor Nederland gelijkaardige temperatuuroenames in de range van 1,3-3,7 °C over 90 jaar. Ook de projecties voor Wallonië zijn consistent met een toename van 2,0-4,2 °C over 110 jaar.



Figuur 4: Evolutie van de 30-jarige gemiddelde temperatuur tot het einde van de eeuw voor de 11 EURO-CORDEX modellen voor het RCP4.5 scenario (boven) en het RCP8.5 scenario (onder)

Om deze stijgende trends verder te analyseren werden voor de 11 EURO-CORDEX modellen, en de fijnmazige Belgische CCLM en ALARO berekeningen gedaan om de trend over een periode van 100 jaar af te leiden (Figuur 5, Appendix 1). Ook hier werden de duidelijke verschillen tussen RCP4.5 en RCP8.5 bevestigd. Dit betekent dat ook in Vlaanderen de temperatuur zal veranderen als functie van de wereldwijde emissies van broeikasgassen. Uit de modelanalyse blijkt verder dat het waarschijnlijk is (kans >66 %) dat de opwarming op het einde van de eeuw voor Ukkel tussen de 1,5-2,9 °C ligt voor RCP4.5 en tussen de 2,2-4,2 °C ligt voor RCP8.5. Deze analyse laat zien dat een degelijke toekomstprojectie voor Vlaanderen niet mag bestaan uit slechts één model, omdat dit model zich buiten dit waarschijnlijkheidsinterval kan bevinden. Elk model is slechts een mogelijke projectie van een toekomstig klimaat en kan dus niet in isolatie van andere modellen worden geanalyseerd.

Waarschijnlijkheidsverdeling van de temperatuurstoename aan het einde van deze eeuw voor Ukkel

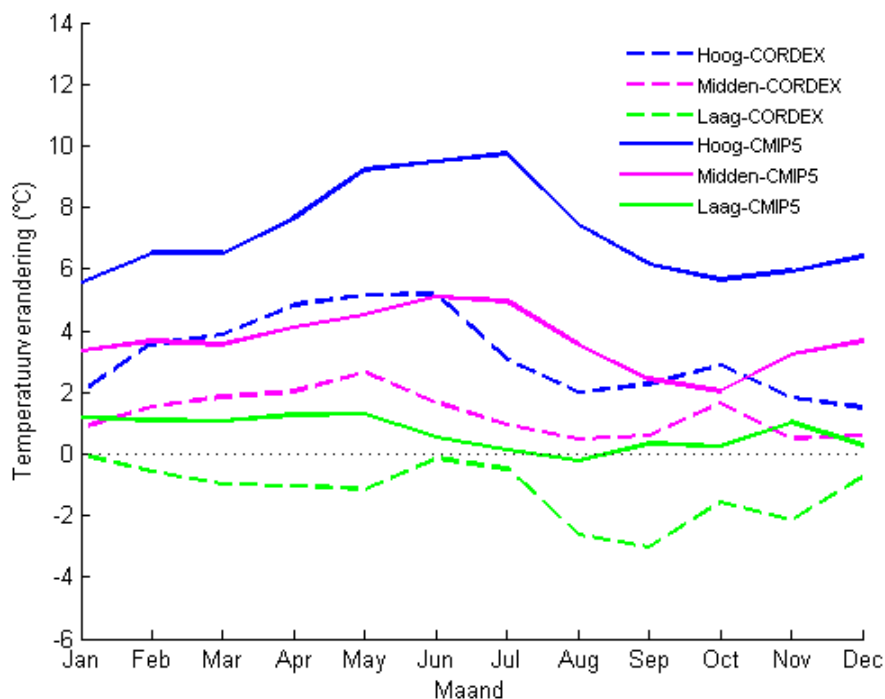


Het staafdiagram geeft de verdeling weer van de individuele modellen, en de rode lijn de benaderende normaalverdeling. De waarde op de y-as geeft de kans per eenheid van temperatuurstoename (eenheid $^{\circ}\text{C}^{-1}$). Wanneer men dit vermenigvuldigt met de breedte van het temperatuurinterval, verkrijgt men de kans op voorkomen van waarden binnen dit temperatuurinterval. Bijvoorbeeld de kansdichtheid voor een temperatuurstoename tussen de 1,75 en 2 $^{\circ}\text{C}$ is 0,8. Dit betekent een kans van 0,2 (oftewel 20 %) dat er zich een temperatuurstoename voordoet tussen de 1,75 en 2 $^{\circ}\text{C}$.

Figuur 5: Kansdichtheidsverdeling van de temperatuurstoename over een periode van 100 jaar op basis van de EURO-CORDEX, CCLM en ALARO modeluitvoer voor RCP4.5 (links) en RCP8.5 (rechts)

Wanneer de EURO-CORDEX klimaatmodelresultaten worden vergeleken met de CMIP5 klimaatscenario's, worden temperatuurveranderingen bekomen in dezelfde richting en met gelijkaardige grootteorde (Tabel 1, Figuur 6). De hoge veranderingen van de EURO-CORDEX klimaatmodelresultaten zijn wel minder extreem dan deze van de CMIP5 resultaten. Dat betekent echter niet dat de hoge veranderingen in de CMIP5 resultaten overschat blijken wanneer deze worden vergeleken met de regionale Europese resultaten. De EURO-CORDEX modellen maken immers aan hun rand gebruik van slechts een beperkt aantal CMIP5 runs (zie de deelrapporten in Appendix 1 en Appendix 2). Deze bestrijken slechts een deel van het totale bereik aan CMIP5 runs. De CMIP5 gebaseerde klimaatscenario's geven dus een vollediger beeld van de toekomstige klimaatprojecties. Deze laatste zijn daarom gebruikt voor de opmaak van de nieuwe klimaatscenario's voor Vlaanderen.

Nadat later meer EURO-CORDEX modellen ter beschikking komen dient wel het verschil tussen de CMIP5 mondiale modelresultaten en de EURO-CORDEX regionale modelresultaten onderzocht. Indien dit verschil systematisch blijkt, dan is correctie van de klimaatscenario's op basis van de mondiale klimaatmodelresultaten noodzakelijk. Zoals hiervoor uitgelegd, kan de lagere temperatuurstijging voor het hoog scenario in Figuur 6 voor de regionale EURO-CORDEX resultaten in vergelijking met de mondiale CMIP5 resultaten het gevolg zijn van het kleiner aantal regionale modelresultaten. Indien deze redenering wordt doorgetrokken naar het laag scenario, zouden de mondiale modelresultaten minder hoge temperatuurveranderingen moeten geven dan de regionale modellen (grotere spreiding van de mondiale klimaatmodelresultaten door het groter aantal). Dit blijkt niet het geval in Figuur 6. Mogelijks dient het lage temperatuurscenario op basis van de mondiale klimaatmodelresultaten dus later bijgesteld te worden. In ieder geval geeft het lage klimaatscenario temperatuurveranderingen dicht bij nul; het laag scenario komt dus benaderend overeen met het huidig klimaat. De bandbreedtes voor de temperatuurverandering worden daarom hierna gedefinieerd van 0 $^{\circ}\text{C}$ tot de maximale toename bij het hoog klimaatscenario.



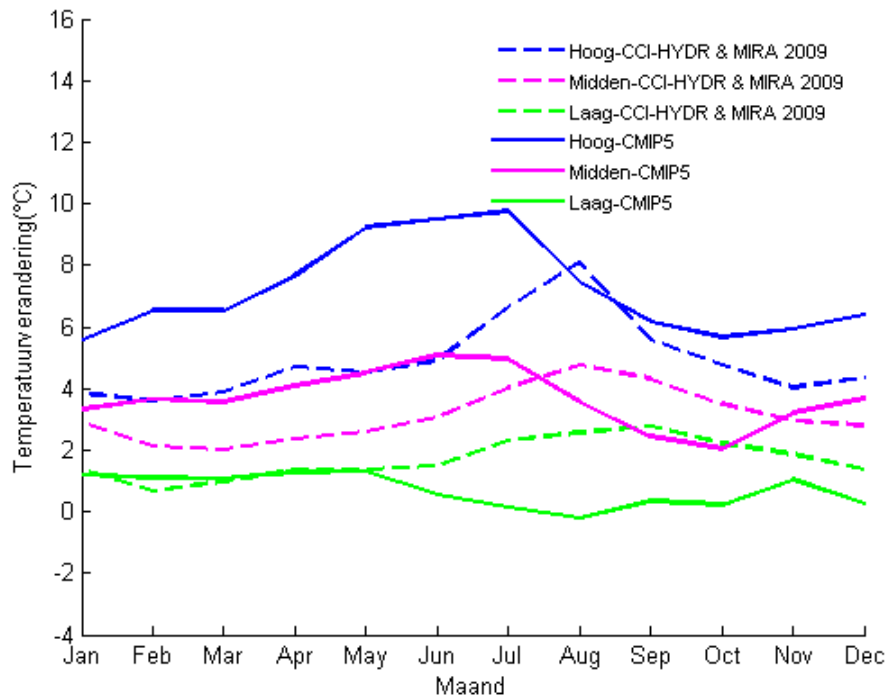
Figuur 6: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar: vergelijking tussen CMIP5 en EURO-CORDEX runs

De CMIP5-resultaten geven een toename van de jaargemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar tussen 0,7 °C en 7,2 °C (Tabel 1). Zoals hiervoor toegelicht, dient het laag scenario mogelijks later gecorrigeerd; het laag scenario kan bij benadering +0 °C verondersteld worden.

Tabel 1: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in jaargemiddelde temperatuur te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar

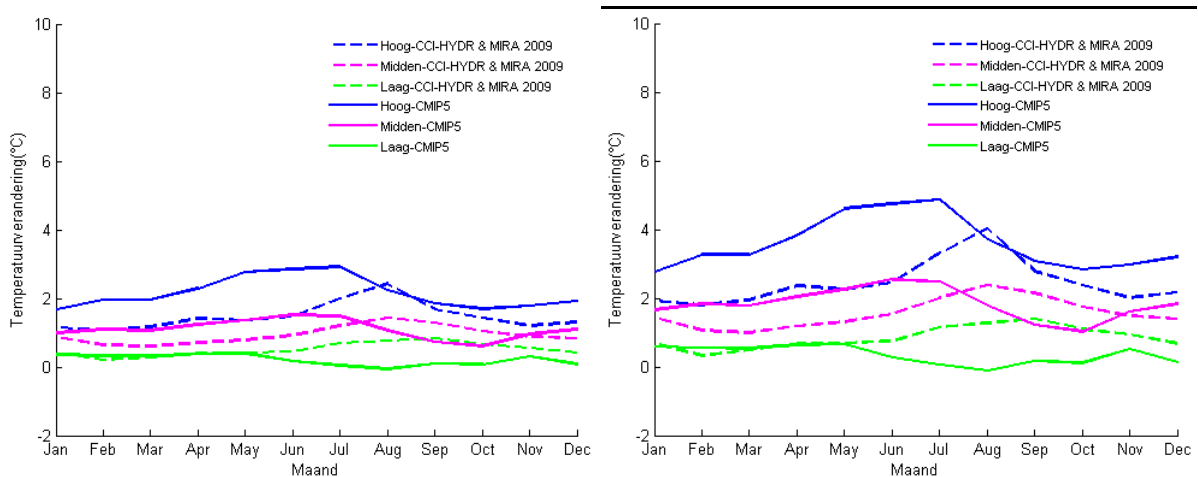
	100 jaar	50 jaar	30 jaar
hoog	+7,2 °C	+3,6 °C	+2,2 °C
midden	+3,7 °C	+1,8 °C	+1,1 °C
laag	+0,7 °C	+0,3 °C	+0,2 °C

Wanneer de jaargemiddelde temperatuurstijging wordt opgedeeld over de 12 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 7, Tabel 2). De toenames in seizoen- en maandgemiddelden kunnen dus heel wat sterker zijn dan de jaargemiddelde stijgingen.



Figuur 7: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 100 jaar

Over 50 en 30 jaar zijn deze stijgingen min of meer proportioneel lager (Figuur 8, Tabel 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 8: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts)

Tabel 2: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in seizoensgemiddelde temperatuur in winter en zomer te 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

In vergelijking met de temperatuurwijziging zoals gerapporteerd in MIRA 2009, zijn deze maandgemiddelde temperatuurveranderingen in grootteorde vergelijkbaar. De bandbreedte is wel toegenomen, wat het gevolg kan zijn van de ruimere set aan verschillende klimaatmodellen die nu beschouwd zijn. De nieuwe klimaatmodelresultaten geven voor bepaalde maanden en scenario's wel wat grotere toenames; vooral voor de eerste zes maanden van het jaar (jan-jun) en 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 dit verschil veel minder (gemiddeld slechts 0,1 °C lager).

3.1.b. Extremen

De jaar-, maand-, en seizoensgemiddelde temperatuur geven een beeld van de gemiddelde stijging over langere tijdsduren, maar voor veel sectoren zijn de risico's vooral toe te schrijven aan het voorkomen van extreme warme of extreme koude dagen. Daarom werden ook de extremen in dagtemperatuur geanalyseerd.

Tabel 3 geeft de verandering in het aantal dagen met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C, en het aantal dagen met een daggemiddelde temperatuur onder de 0 °C. Dit is gebaseerd op alle dagen van het jaar. Over 100 jaar kan het aantal extreem warme dagen (daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C) 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 (daggemiddelde temperatuur onder de 0 °C) kan over 100 jaar afnemen met 1 dag (laag scenario) tot 33 dagen (hoog scenario) gemiddeld per jaar. Over 30 jaar gaat deze afname tot 10 dagen.

Tabel 3: Hoge-midden-lage 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) te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar

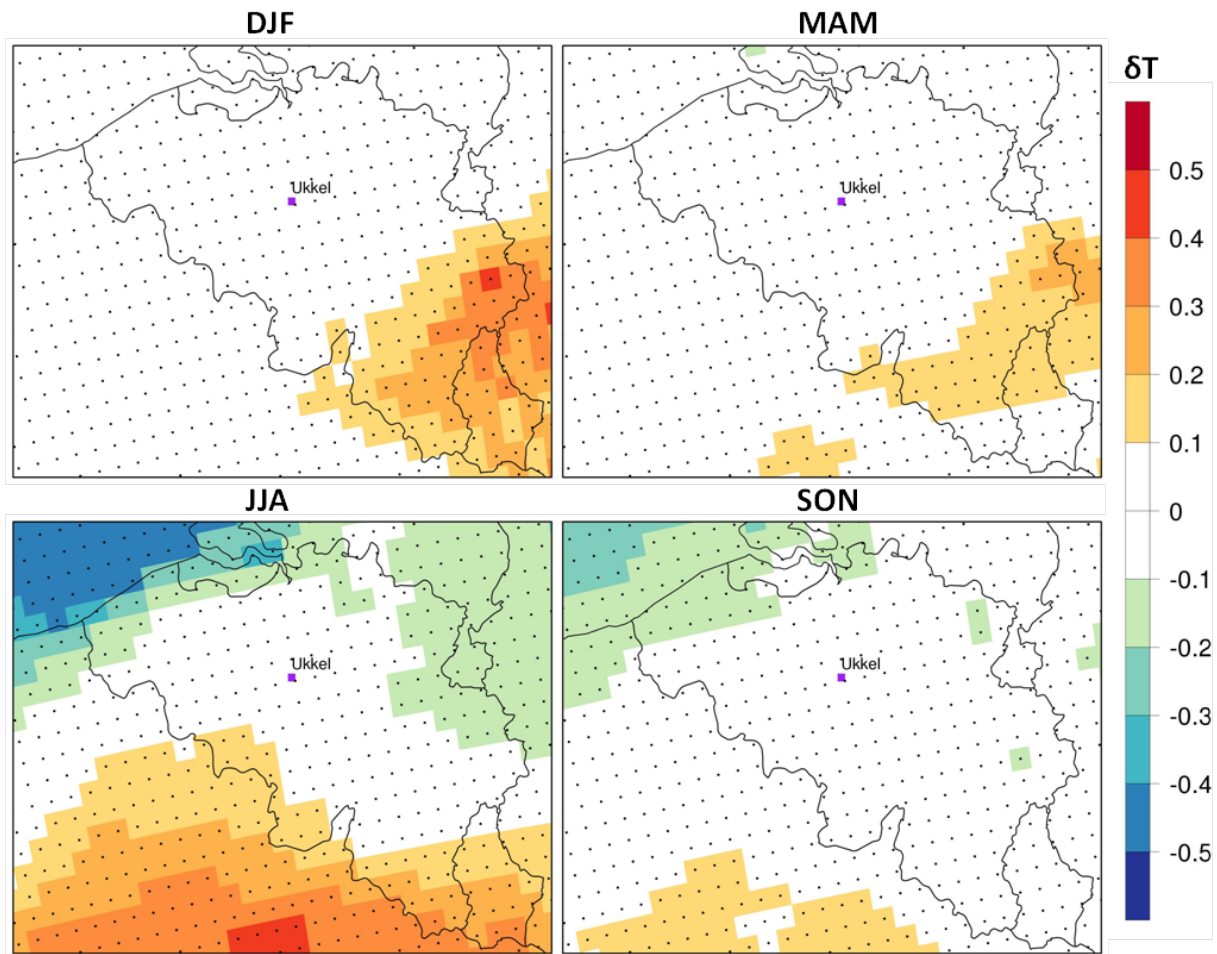
	100 jaar		50 jaar		30 jaar	
	>25 °C	<0 °C	>25 °C	<0 °C	>25 °C	<0 °C
hoog	64 (10)	-33 (33)	32 (10)	-17 (33)	19 (10)	-10 (33)
midden	16 (4)	-7 (10)	8 (4)	-4 (10)	5 (4)	-2 (10)
laag	0 (0)	-1 (3)	0 (0)	-1 (3)	0 (0)	0 (3)

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.

3.1.c. Ruimtelijke patronen

De jaargemiddelde geprojecteerde opwarming aan het einde van de eeuw, in het BELG-HR ensemble bestaande uit 14 klimaatprojecties, neemt toe van noord naar zuid (Figuur 9). 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 warmer. Deze verschillen worden vooral bepaald door de nabijheid van de kust, die een temperende werking heeft op de opwarming. Noteer dat er grote verschillen zijn tussen de modellen in de amplitude van dit regionale patroon (Appendix 3).

Relatieve temperatuursverandering aan het einde van de eeuw

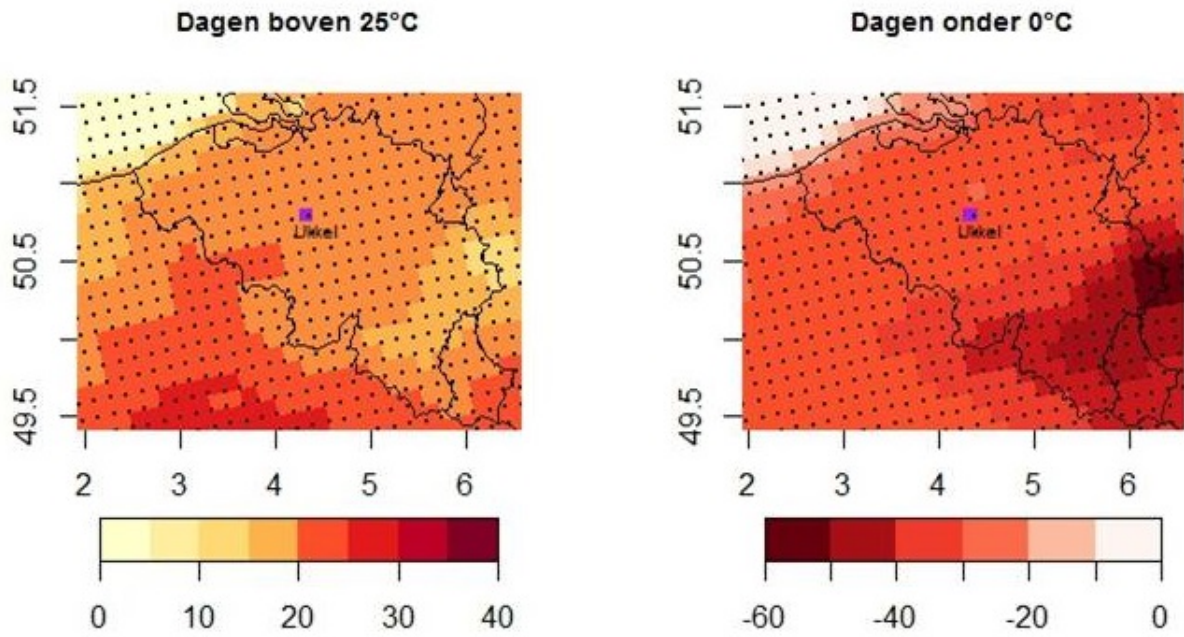


De stippen geven aan dat in alle gebieden de verandering significant is.

Figuur 9: Regionaal patroon van de temperatuurverandering aan het einde van de eeuw ten opzichte van Ukkel (BELG-HR ensemble bestaande uit 14 klimaatprojecties)

De regionale patronen worden duidelijker als we kijken naar de verandering in de frequentie van extremen aan het einde van de eeuw. Zo zal volgens het BELG-HR ensemble het aantal dagen boven de 25 °C met ongeveer 15 tot 25 dagen zijn toegenomen aan het einde van de eeuw. In 85 % van de modellen is binnen België de sterkste toename van het aantal dagen boven de 25 °C te vinden in het centrum met zwakkere signalen nabij de kust en in de Ardennen (Appendix 3). De afname van het aantal extreem koude dagen situeert zich vooral in de Ardennen (Figuur 10), waarschijnlijk omdat het aantal koude dagen in het huidige klimaat hier hoger is.

Verandering in frequentie van extremen aan het einde van de eeuw



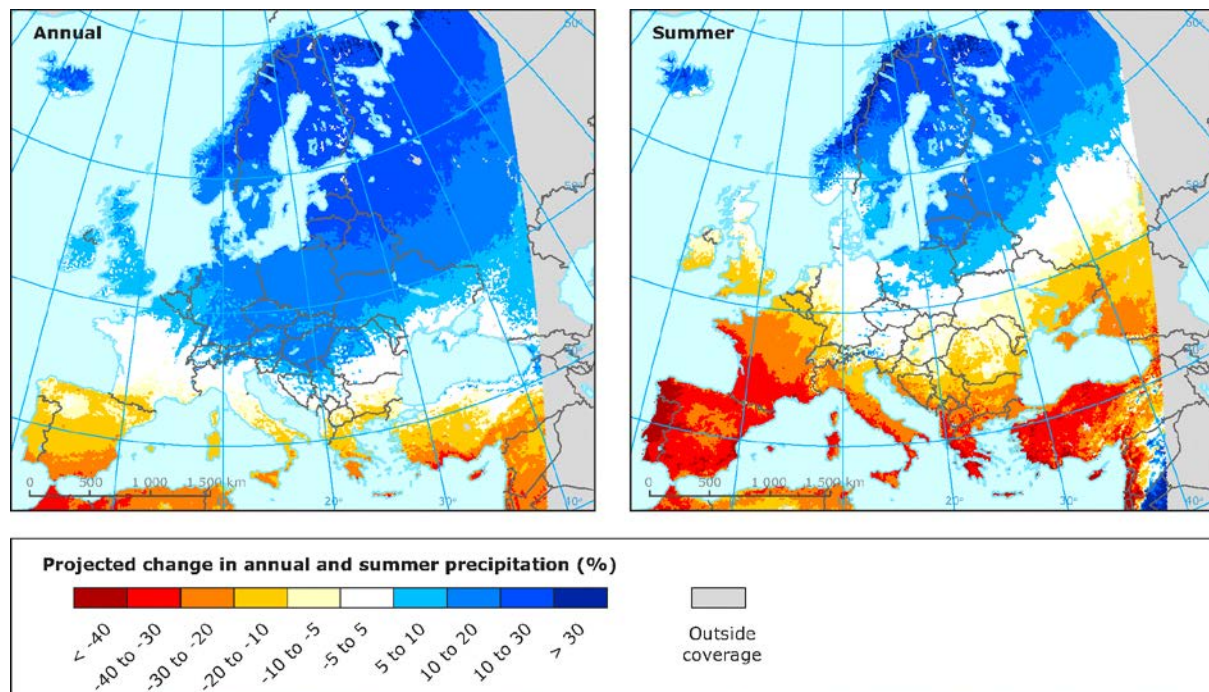
Eén model met een zeer afwijkend ruimtelijk patroon werd niet opgenomen in deze analyse. De stippen geven aan dat in alle gebieden de verandering significant is.

Figuur 10: Regionaal patroon van de verandering in het aantal dagen per jaar boven de 25 °C (links) en onder de 0 °C aan het einde van de eeuw (BELG-HR ensemble)

3.2. Neerslag en potentiële evapotranspiratie

3.2.a. Gemiddelde neerslag

Het is duidelijk dat de mondiale water cyclus zal reageren op de opwarming van de aarde en dat de veranderingen in neerslag niet uniform zijn over de aarde (IPCC, 2013). In het algemeen kan gesteld worden, dat het contrast tussen droge en natte regio's en tussen de seizoenen verder zal versterkt worden (IPCC, 2013). Ook voor Europa tonen de RCMs dit patroon: De projecties voor het einde van de eeuw, op basis van het multi-model EURO-CORDEX ensemble, laten een toename zien in centraal en Noord Europa tot 30 % en een afname in Zuid Europa tot 40 % (Figuur 11; Jacob et al., 2013; Kjellström et al., 2011). Gedurende de zomer verschuift de regio waar een verdroging optreedt verder naar het Noorden. De patronen zijn gelijkaardig in RCP4.5 en RCP8.5, maar de signalen zijn in het algemeen sterker in RCP8.5. 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 in het Iberische schiereiland, vooral in Portugal, de neerslag met 90 mm per decennium afnam (Haylock, 2008).



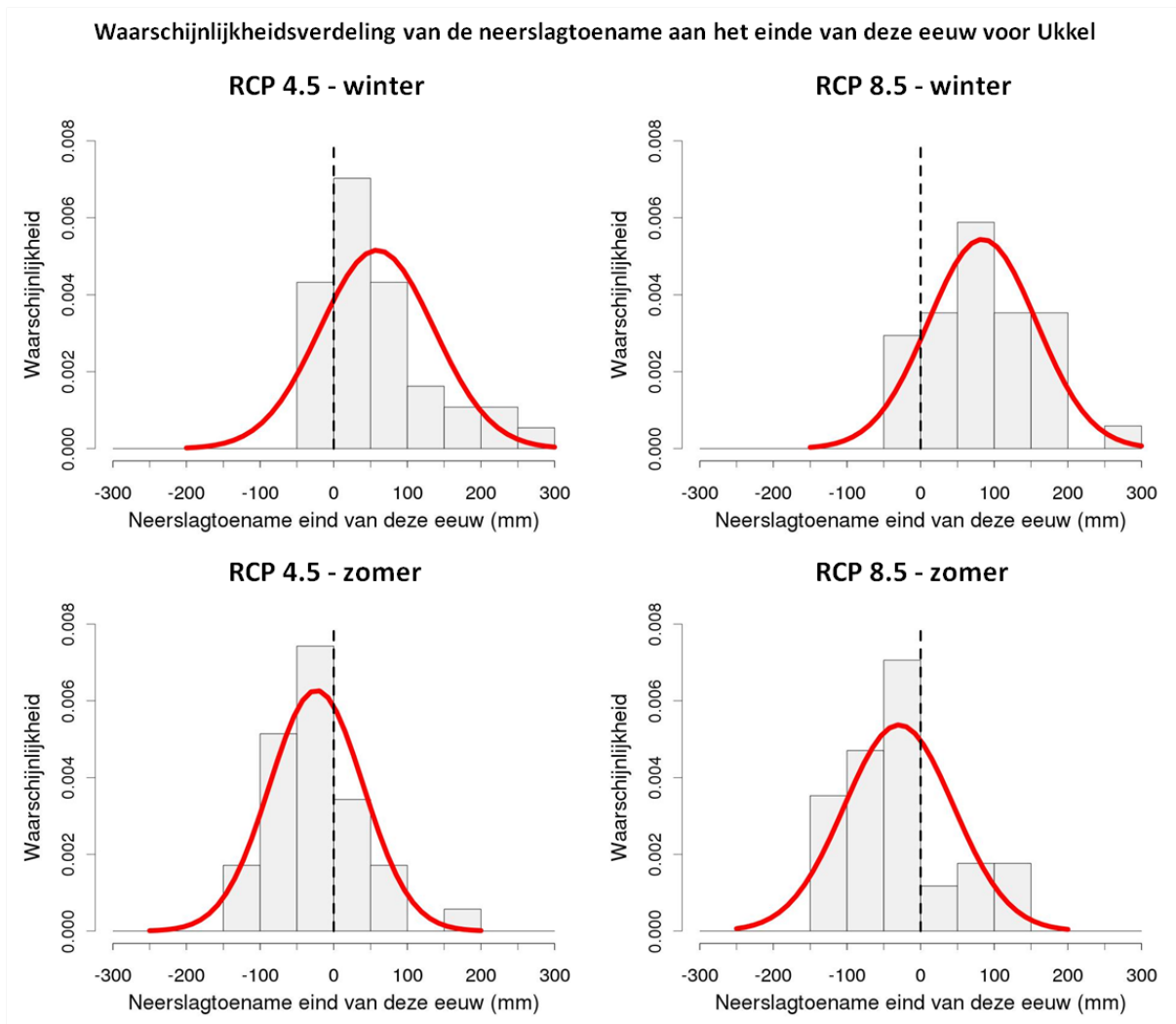
De analyse is gebaseerd op een Multi-model ensemble van het EURO-CORDEX initiatief (Jacobs et al., 2013).

Bron: EAA, 2014

Figuur 11: Geprojecteerde verandering in de jaarlijkse (links) en zomer (rechts) neerslag (%) in de periode 2071-2100 in vergelijking met 1971-2000 voor RCP8.5

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 11). De meeste EURO-CORDEX modellen tonen een daling van de totale hoeveelheid zomerneerslag (juni-juli-augustus), en een stijging van de totale hoeveelheid winterneerslag (dec-jan-feb) (Figuur 12). Voor de totale winterneerslag geeft 66 % van de EURO-CORDEX modellen een stijging met een waarde tussen de 0 mm en 160 mm. Voor de totale zomerneerslag geeft 66 % van de modellen een verandering tussen de -100 mm en +50 mm. RCP8.5 geeft een vernatting over het gehele winterseizoen die groter is dan RCP4.5 (gemiddeld 60 mm in RCP4.5 en 90 mm in RCP8.5). Dit is een indicatie dat grotere mondiale emissies ook in België de verandering van neerslag in de winter versterken. Net als voor temperatuur illustreert deze analyse dat elk model slechts een mogelijke projectie van een toekomstig klimaat is en kan dus niet in isolatie van andere modellen worden beschouwd.

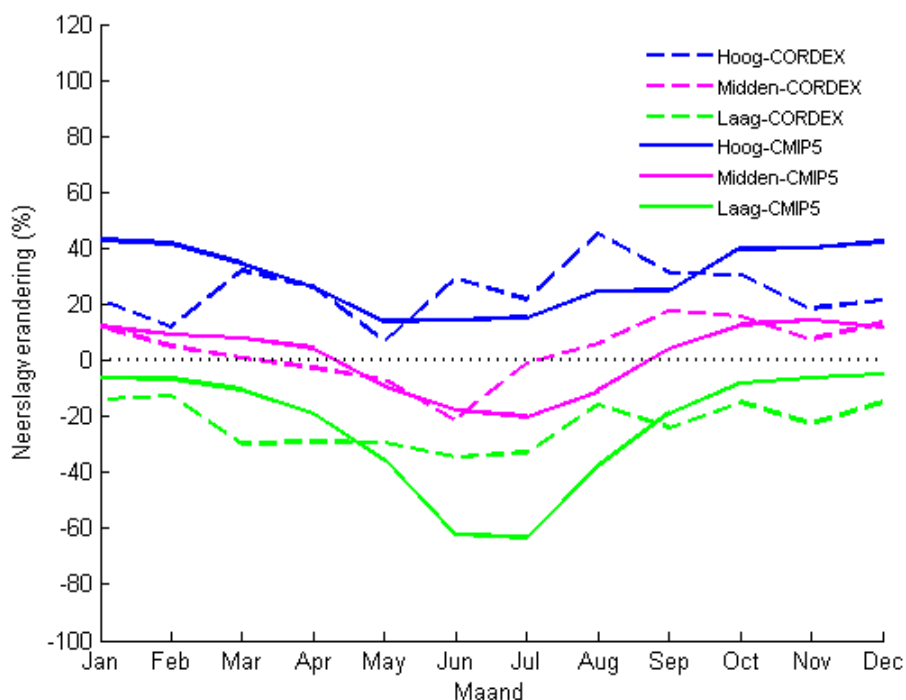
In vergelijking met deze analyse wijzen de projecties van KNMI (2014) in dezelfde richting maar is het nauwkeurighedsinterval van de KNMI (2014) projecties kleiner met tussen de 10-60 mm toename in de winter en tussen de 52 mm afname en 2 mm toename in de zomer. De projecties voor Wallonië hebben dan weer een iets sterker signaal met een toename in winter tussen de 20-80 mm en een afname van 20-60 mm in de zomer.



Figuur 12: Kansdichtheidsverdeling van de neerslagverandering (mm per seizoen) over een periode van 100 jaar op basis van de EURO-CORDEX, CCLM en ALARO modeluitvoer voor zomer (onder), winter (boven), RCP4.5 (links) en RCP8.5 (rechts)

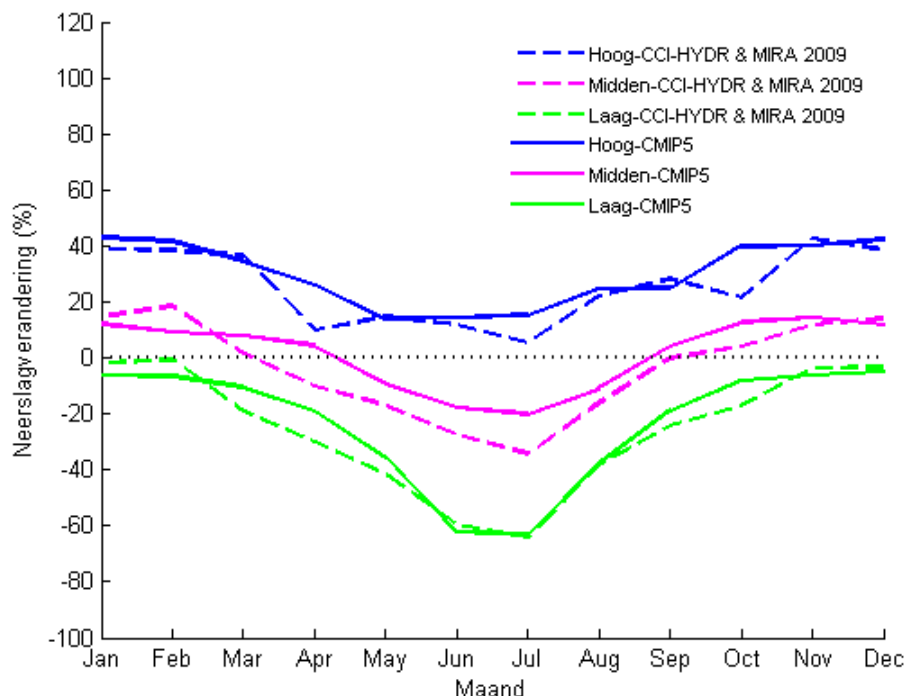
Wanneer de EURO-CORDEX klimaatmodelresultaten voor neerslag worden vergeleken met de CMIP5 klimaatscenario's, worden opnieuw veranderingen bekomen in dezelfde richting en met gelijkaardige grootteorde (Figuur 13). De hoge veranderingen zijn wel minder extreem. Opnieuw bestrijken de EURO-CORDEX runs slechts een deel van het totale bereik aan CMIP5 runs. De CMIP5 gebaseerde klimaatscenario's geven dus opnieuw een vollediger beeld van de toekomstige klimaatprojecties.

De CMIP5-gebaseerde klimaatscenario's geven relatieve neerslagveranderingen tussen ongeveer 0 % en +38 % in winterneerslagvolume over 100 jaar en tussen +18 % en -52 % in zomerneerslagvolume (Figuren 13, 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 %.

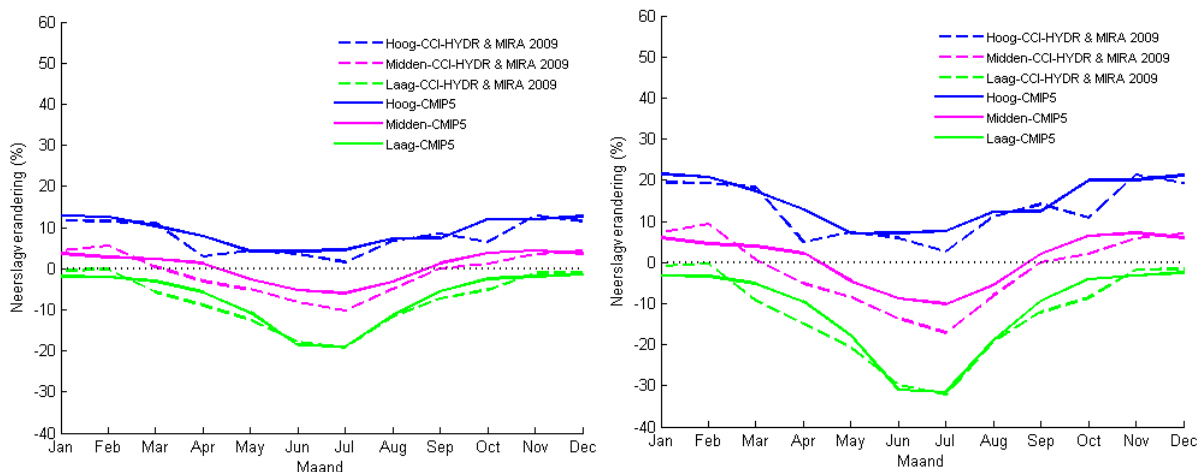


Figuur 13: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 100 jaar: vergelijking tussen CMIP5 en EURO-CORDEX runs

Vergelijking met de vorige MIRA-rapportering in 2009 toont dat de winter- en zomerneerslag respectievelijk in dezelfde mate toe- en afneemt, zowel op een termijn van 100 (Figuur 14) als 50 en 30 jaar (Figuur 15).



Figuur 14: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 100 jaar

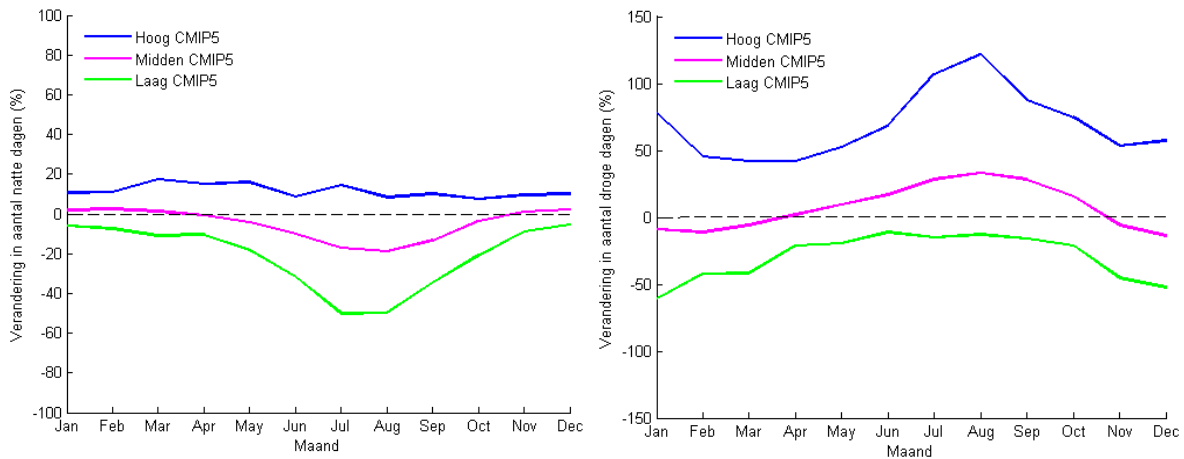


Figuur 15: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in maandgemiddelde neerslag te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts)

Tabel 4: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in seizoensneerslag in winter en zomer te 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 %

Figuur 16, Tabel 5 en Tabel 6 geven de veranderingen weer in het aantal natte en droge dagen. Iedere dag wordt ofwel 'nat' ofwel 'droog' beschouwd. Wanneer de dagneerslag gelijk of lager is dan 0,1 mm wordt een dag droog beschouwd, en nat als deze hoger is dan 0,1 mm. De percentages toename in aantal natte dagen en afname in het aantal droge dagen zijn niet identiek omdat het aantal natte of droge dagen in huidig klimaat verschilt (andere noemer in de berekening van het relatieve verschil). In de Figuur 16, Tabel 5 en Tabel 6 blijkt dat de toename in winterneerslag het gevolg kan zijn van een toename van het aantal natte dagen of afname van het aantal droge dagen, maar de verandering in het aantal natte dagen is voor de drie klimaatscenario's wel meer gecentreerd rond de 0-waarde dan de totale maand- of seizoensneerslag. Dit betekent dat in de wintermaanden het niet zozeer het aantal natte dagen is die de neerslagvolumes doet toenemen, maar ook – en vooral – de dagneerslagintensiteiten (zie ook verder in Deel 3.2.b). Voor de zomer is dat anders. Tijdens de zomermaanden neemt het aantal natte dagen sterk af en het aantal droge dagen sterk toe. Deze af- en toenames zijn bovendien voor de drie klimaatscenario's sterk niet-gecentreerd rond de 0-waarde. 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). Merk op dat in Figuur 16 de hoog-midden-laag scenario's afzonderlijk werden 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, dus niet noodzakelijk consistent.



Figuur 16: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal natte dagen (links) en aantal droge dagen (rechts) te Ukkel over 100 jaar

Tabel 5: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal natte dagen in winter en zomer te 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	+8 %	+4 %	+4 %	+2 %	+2 %	+1 %
midden	+1,5 %	-15 %	+0,8 %	-8 %	+0,5 %	-5 %
laag	-5 %	-41 %	-2 %	-21 %	-1 %	-12 %

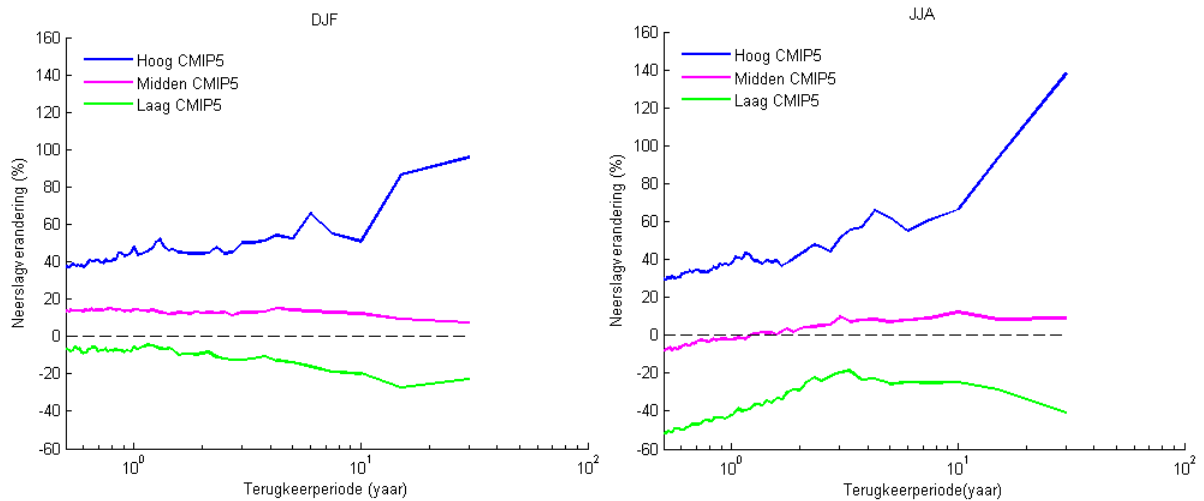
Tabel 6: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in aantal droge dagen in winter en zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar

	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	+42 %	+90 %	+21 %	+45 %	+13 %	+27 %
midden	-11 %	+28 %	-5 %	+14 %	-3 %	+9 %
laag	-44 %	-6 %	-22 %	-3 %	-13 %	-2 %

3.2.b. Extreme neerslag

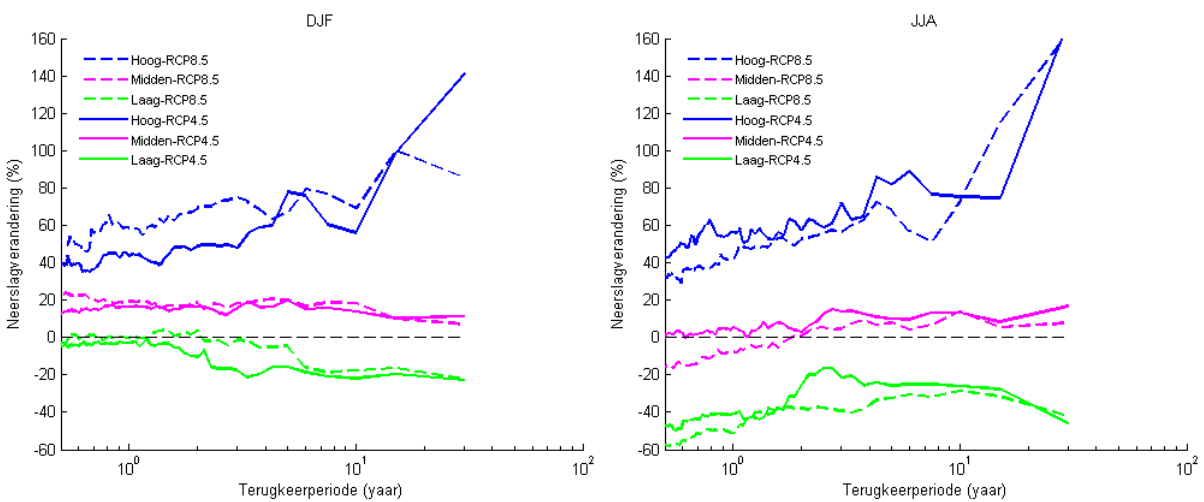
Voor de neerslagextremen (dagneerslagintensiteiten) is het % neerslagverandering geanalyseerd in functie van de terugkeerperiode (Figuur 17). Indien rekening wordt gehouden met de hogere onzekerheid in de neerslagverandering voor de grotere terugkeerperioden (dus groter verschil tussen hoog en laag scenario), blijkt voor de winter het % neerslagverandering niet systematisch (voor alle scenario's) toe te nemen met de terugkeerperiode. Voor de zomer is dat wel het geval. Het midden en hoog klimaatscenario geven voor de zomer een systematische toename van het % neerslagverandering i.f.v. de terugkeerperiode.

Voor de wintermaanden is in Tabel 7 het % neerslagverandering berekend, gemiddeld voor alle neerslagintensiteiten met een terugkeerperiode groter dan 0,1 jaar. Dit % varieert van -10 % voor het laag scenario tot +53 % voor het hoog scenario over 100 jaar.



Figuur 17: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de winter (links) en in de zomer (rechts) te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode

Vergelijking van de resultaten voor de verandering in neerslagextremen voor de RCP-scenario's 8.5 en 4.5 geeft geen significante verschillen (Figuur 18).



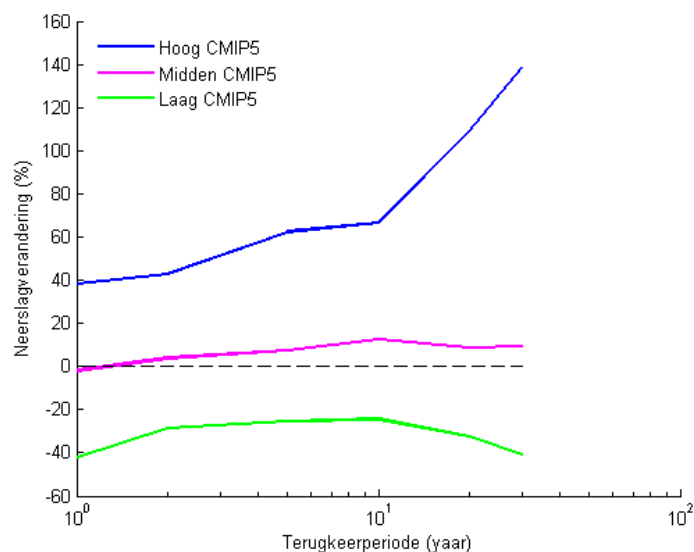
Figuur 18: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de winter (links) en in de zomer (rechts) te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode + vergelijking RCP4.5 en RCP8.5 scenario's

Tabel 7: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering, gemiddeld voor neerslagintensiteiten met terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar in de winter te 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 %

Voor de zomermaanden had zulke uitmiddeling weinig zin, omdat het % verandering toeneemt met toenemende terugkeerperiode. Daarom werd voor de zomer het % verandering per terugkeerperiode berekend (Figuur 19, Tabel 8) na toepassing van extreme-waarden-statistiek (zie Willems et al., 2013a, voor meer details bij de methode). Voor een terugkeerperiode van 2 jaar, bijvoorbeeld, loopt dat op tot +43 % over 100 jaar. Hoe uitzonderlijker de neerslag, hoe groter het %: 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 meest in neerslagvolume kunnen toenemen.



Figuur 19: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagextremen in de zomer te Ukkel over 100 jaar: meer specifiek voor neerslagintensiteiten i.f.v. de terugkeerperiode

Tabel 8: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in neerslagintensiteiten met terugkeerperiodes tussen 1 en 30 jaar in zomer te Ukkel over 100, 50 en 30 jaar

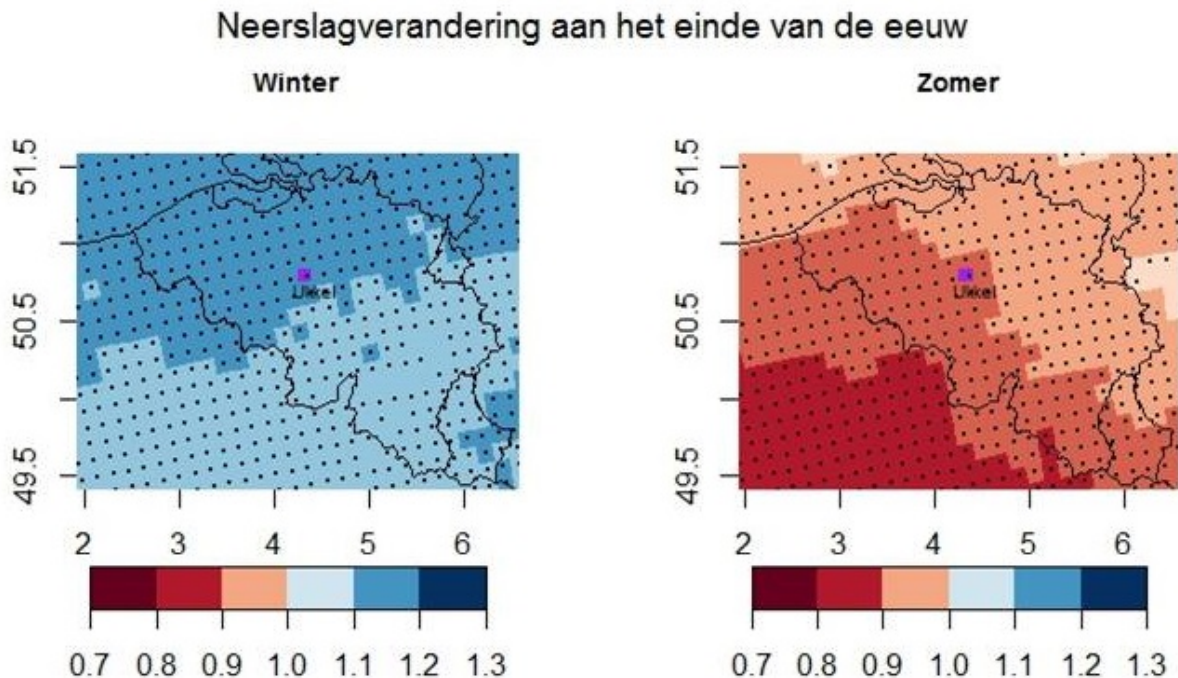
100 jaar						
	1 jaar	2 jaar	5 jaar	10 jaar	20 jaar	30 jaar
hoog	+38 %	+43 %	+62 %	+66 %	+109 %	+138 %
midden	-2 %	+4 %	+8 %	+13 %	+9 %	+9 %
laag	-42 %	-29 %	-25 %	-25 %	-33 %	-41 %
50 jaar						
	1 jaar	2 jaar	5 jaar	10 jaar	20 jaar	30 jaar
hoog	19 %	22 %	31 %	33 %	55 %	69 %
midden	-1 %	2 %	4 %	7 %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

Vergelijking met de vorige MIRA-rapportering in 2009 toont dat de veranderingen in neerslagextremen (in grootteorde) nagenoeg dezelfde zijn.

3.2.c. Ruimtelijke patronen in de neerslag

Om de regionale patronen binnen België van de neerslagtoename in de winter en de afname in de zomer beter te kunnen analyseren, werden de neerslagveranderingen (perturbatiefactoren) in het multi-model BELG_HR ensemble gemiddeld. Uit deze analyse blijkt dat de toename in winterneerslag sterker is nabij de kust. Als we de perturbatiefactoren van Oostende en Luik met elkaar vergelijken vinden we een waarde van 1,16 voor Oostende en 1,11 voor Luik. Het kusteffect hangt sterk af van de

wisselwerking tussen veranderingen in luchtstromingen, temperatuurcontrast tussen land en zee en stijging van de temperatuur (KNMI, 2014). Opvallend is dat de modellen met de sterkste toename in de neerslag nabij de kust ook degenen zijn met de grootste temperatuurgradiënt tussen de Noordzee en Ukkel (Appendix 3). Voor de zomer wordt een ander ruimtelijk patroon gevonden: De verdroging wordt sterker naar het zuiden toe, wat overeenkomt met de grootschalige Europese patronen (Figuur 20). De perturbatiefactor neemt af van 0,91 in Antwerpen tot 0,87 in Charleroi.



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

Figuur 20: Neerslagverandering (perturbatiefactoren) aan het einde van de eeuw op basis van het BELG-HR ensemble, bestaande uit 14 klimaatprojecties

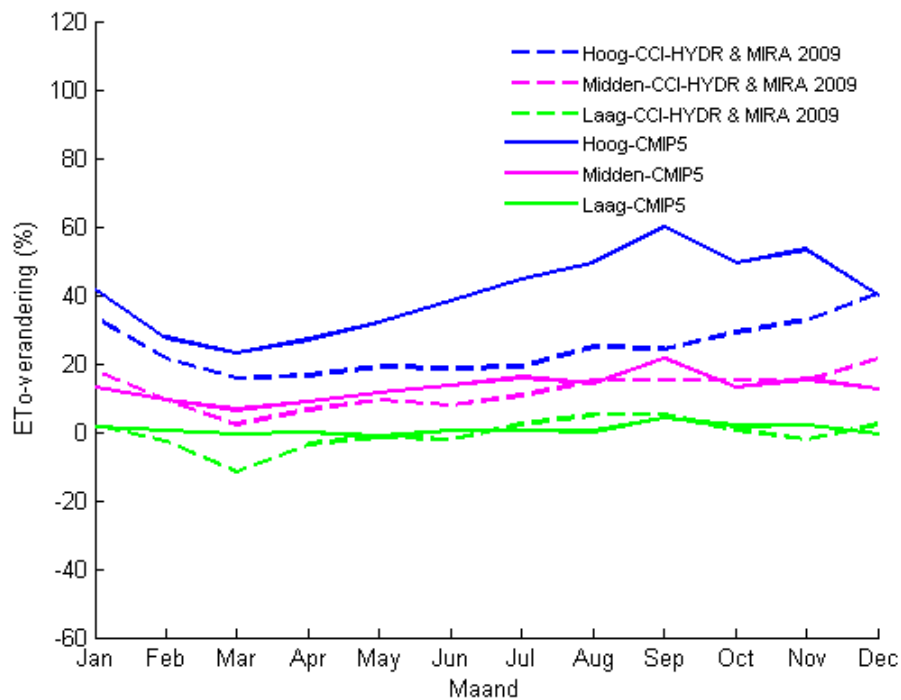
Het aantal dagen met een dagelijkse neerslag boven de 10 mm werd ook geanalyseerd (Appendix 3). In 75 % van de modellen namen de dagen met deze extreme neerslag met 0 tot 15 dagen toe in het noorden van België. In het zuiden van België werd een dergelijke toename van extremen niet door de modellen gerepresenteerd en was het verschil tussen de modellen groter dan het klimaatveranderingssignaal.

3.2.d. Gemiddelde evapotranspiratie

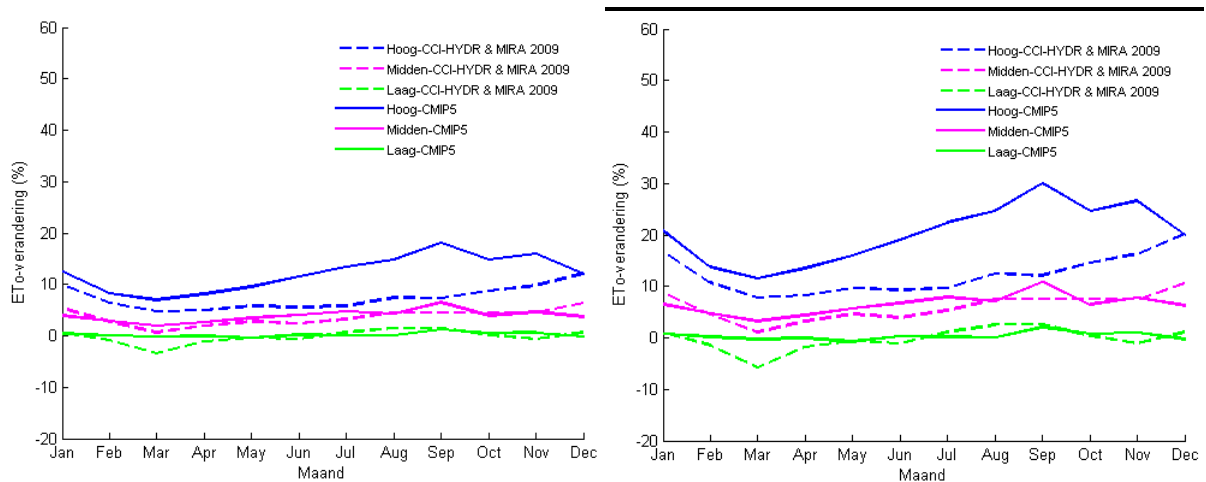
Omdat waterbeschikbaarheid niet enkel door de neerslag maar ook door de evapotranspiratie wordt bepaald, werd het klimaatveranderingssignaal ook voor evapotranspiratie bepaald. De werkelijke evapotranspiratie is echter sterk afhankelijk van gebied tot gebied en functie van de waterbeschikbaarheid aan de oppervlakte en in de bodem. Een bosgebied of een sterk verstedelijkt gebied hebben daardoor een sterk verschillende evapotranspiratie. Daarom wordt de analyse hier gedaan voor de potentiële evapotranspiratie, die niet afhankelijk is van de waterbeschikbaarheid; het is de maximaal mogelijke evapotranspiratie. De vertaling van de verandering in potentiële evapotranspiratie naar de verandering in werkelijke evapotranspiratie kan nadien gebeuren via hydrologische modellering.

Voor de potentiële evapotranspiratie worden conform de temperatuurstijging ook toenames gevonden (Figuur 21, Figuur 22, Tabel 9). Deze bedraagt gemiddeld over de winterperiode tussen +2 % (dus ongeveer huidig klimaat) en +35 %, en gemiddeld over de zomerperiode tussen +2 % (huidig klimaat) en +47 % over 100 jaar. Vergelijking met de klimaatscenario's opgenomen in de MIRA 2009 rapportering geeft – zoals voor de temperatuur – voor het hoog klimaatscenario beduidend sterkere toenames (Figuur 21, Figuur 22). Deze zijn het gevolg van de sterke toename in temperatuur voor dat

scenario, maar ook van een sterkere toename in de netto inkomende zonnestraling (door toenemende broeikasgasconcentratie daalt de uitgaande of dus de door het aardoppervlak weerkaatste radiatie; zie ook RCP-scenario's en Appendix 2).



Figuur 21: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie te Ukkel over 100 jaar



Figuur 22: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts)

Tabel 9: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in potentiële evapotranspiratie in winter en zomer te 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 %

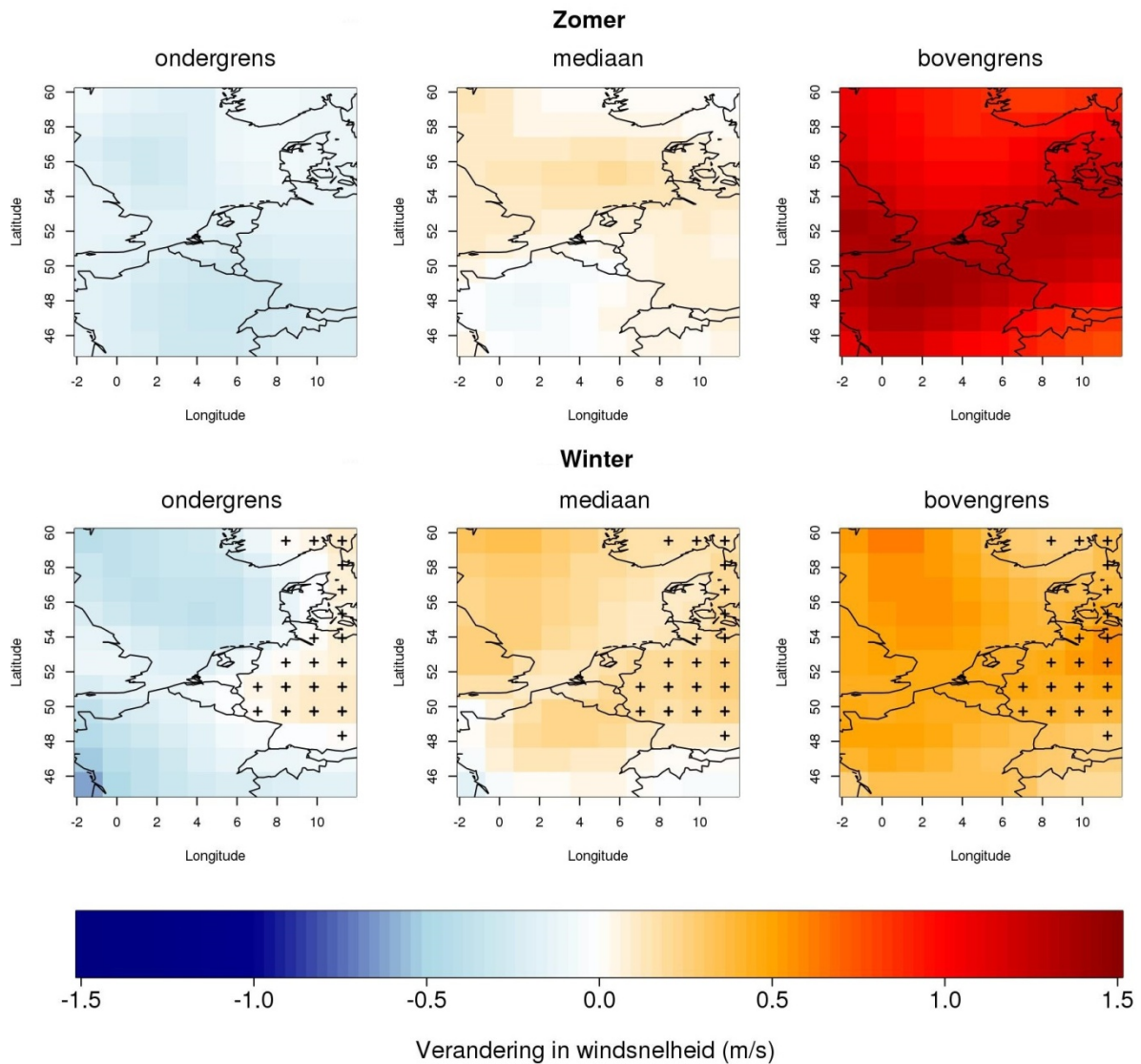
3.3. Wind

3.3.a. Windsnelheid

Veranderingen in de windsnelheid zijn voor België in het algemeen niet significant (Figuur 23) en er is grote onzekerheid over het teken van de verandering. Dit komt overeen met de resultaten van KNMI (2014), waar gesteld wordt dat de veranderingen binnen de natuurlijke variabiliteit vallen.

Voor de extremen werd wel een significant signaal voor België gevonden (Figuur 24) voor de winter. Het is waarschijnlijk (kans >66 %) dat extreme windsnelheden in Ukkel tussen de 0 % en 30 % toenemen. Noteer dat hier de extremen gedefinieerd zijn als het 90^e percentiel van de windsnelheid op 00 UTC (Universal Time Coordinated). Dit resultaat is in overeenstemming met Donat et al. (2011), die voor een hoog emissie-scenario een toename van de sterkste stormen vinden in het noordelijke deel van Centraal- en West-Europa en een afname in Zuid-Europa.

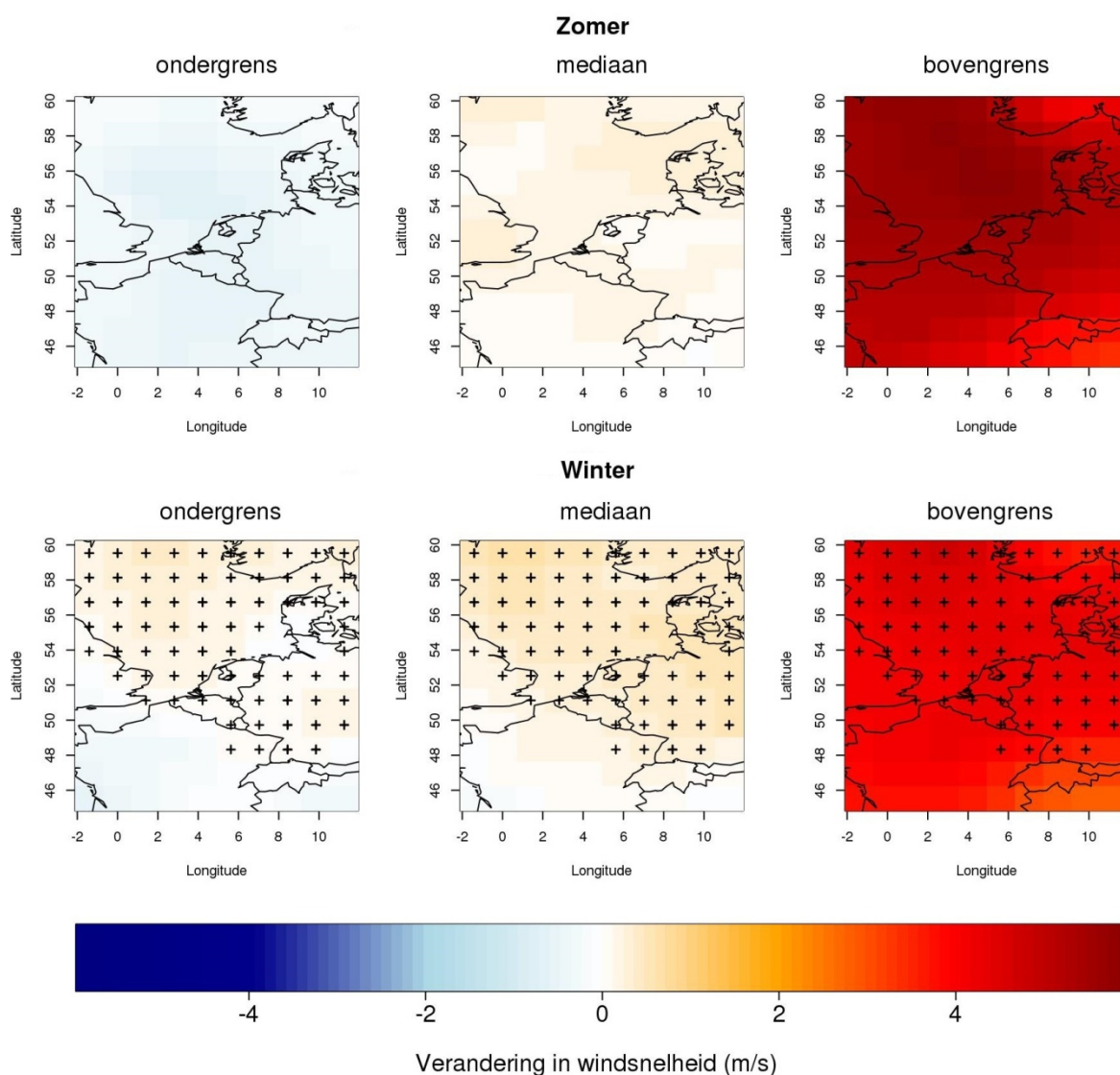
Verandering in windsnelheid aan het einde van de eeuw



Volgens CMIP5 modeluitvoer is het waarschijnlijk (kans >66 %) dat de verandering tussen de ondergrens en de bovengrens zal blijven. 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 vastgelegd worden. Voor meer informatie over de methode zie Devis et al., 2014.

Figuur 23: Veranderingen in windsnelheid op 00 UTC aan het einde van de eeuw op basis van een ensemble van CMIP5 GCMs, met de ondergrens (links), mediaan (midden) en bovengrens (rechts)

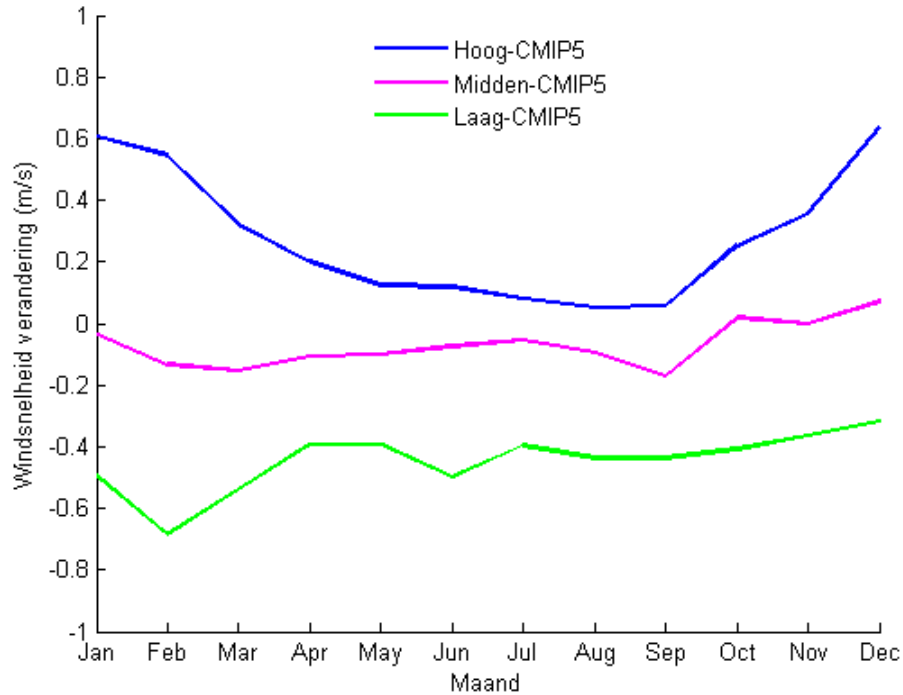
Verandering in windextremen aan het einde van de eeuw



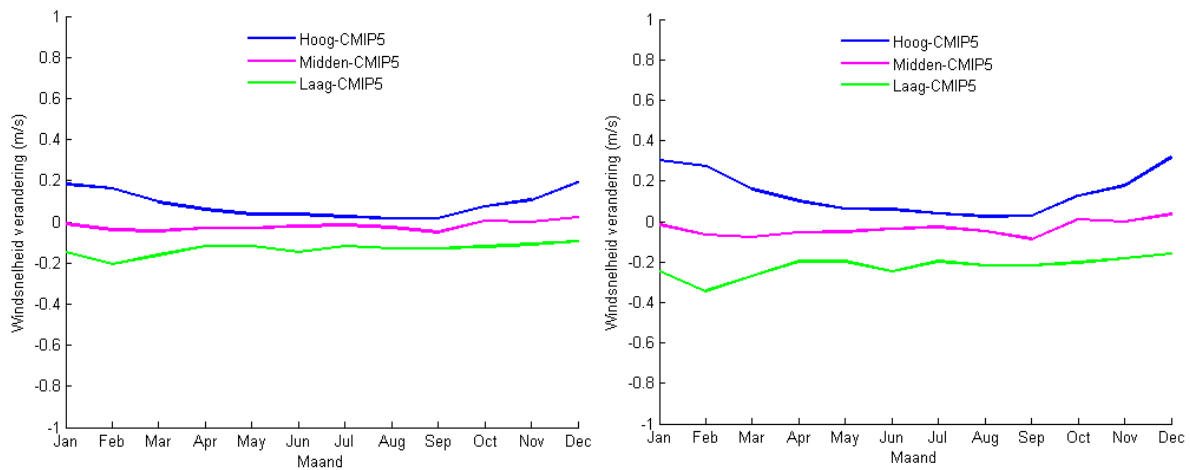
De extreme windsnelheid is hier gedefinieerd als het 90e percentiel van de windsnelheid op 00 UTC (9 m s⁻¹ voor de zomer en 14 m s⁻¹ voor de winter).

Figuur 24: Verandering van extreme wind aan het einde van de eeuw (analoog aan Figuur 23)

Dat de windsnelheid voor onze regio weinig verandert blijkt ook uit de CMIP5-gebaseerde klimaatscenario's (Figuur 24, Figuur 25 en Tabel 10). De klimaatscenario's zijn min of meer gecentraliseerd rond de 0-waarde, 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 ongeveer gehalveerd.



Figuur 25: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid te Ukkel over 100 jaar



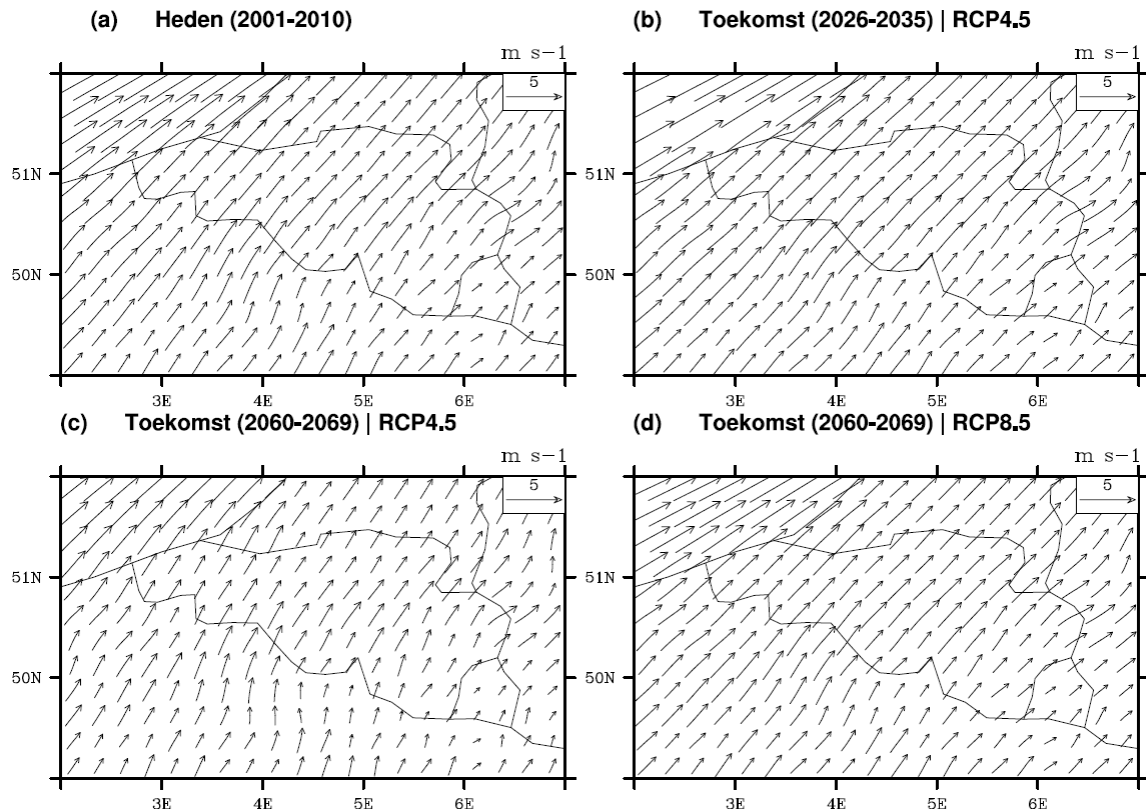
Figuur 26: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor de absolute verandering in windsnelheid te Ukkel over 30 jaar (links) en 50 jaar (rechts)

Tabel 10: Hoge-midden-lage klimaatscenario's voor het % verandering in windsnelheid in winter en zomer te 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 %

3.3.b. Windrichting

Ook de veranderingen in de windsnelheid in de CCLM simulaties zijn klein. Verder zijn er geen duidelijke veranderingen in de gemiddelde windrichting (Figuur 27). Gemiddeld gezien blijft de wind uit het zuid-westen komen. Voor Nederland werd een analyse gedaan van frequentie van voorkomen van verschillende windrichtingen (KNMI, 2014). Uit deze analyse bleek dat de frequentie van deze zuid-westelijke stromingen in de helft van de scenario's 2 % groter wordt en in de andere helft ongeveer 2 % lager.



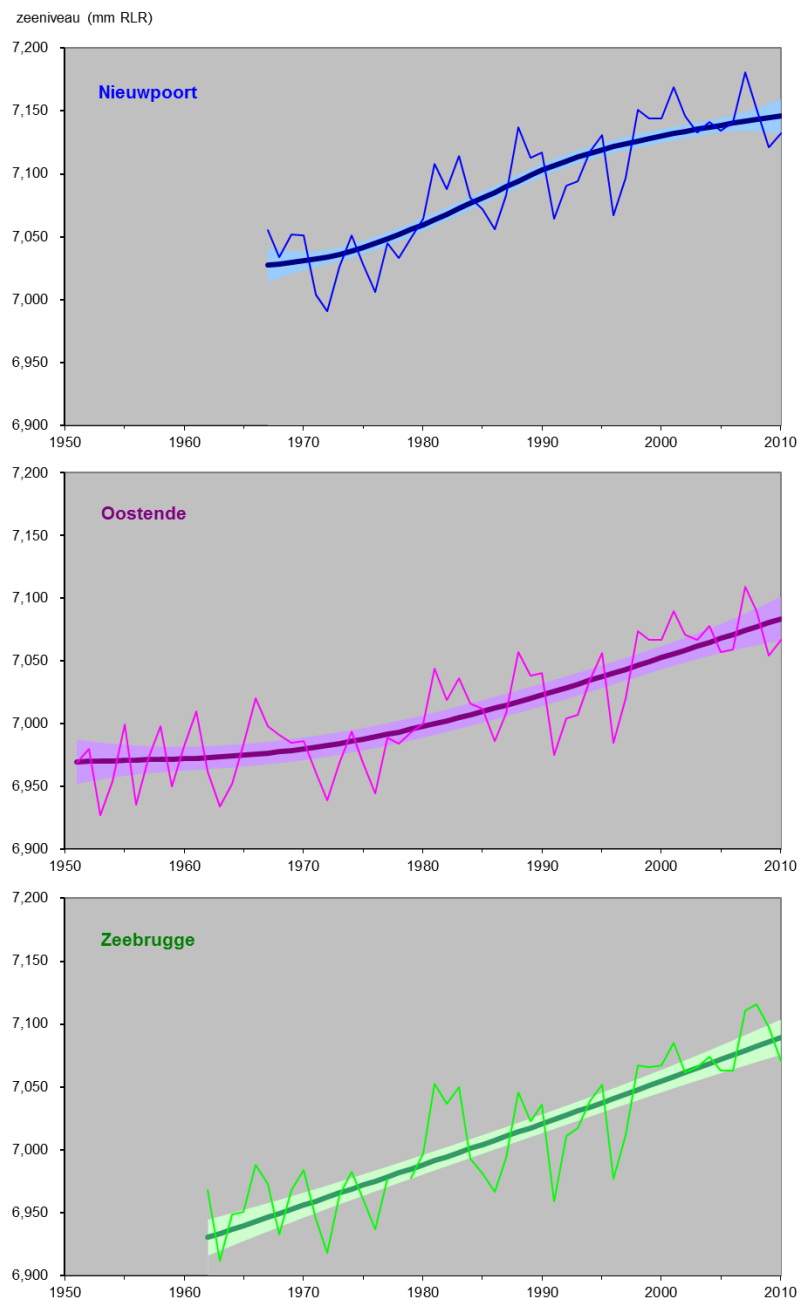
Figuur 27: De windrichting (pijlen) in de verschillende CCLM projecties nl. het heden, de periode rond 2030 voor RCP4.5 en de periode rond 2064 voor zowel RCP4.5 als RCP8.5

3.4. Zeeklimaat

Een volgende belangrijke verandering die waargenomen wordt, is een stijging van de gemiddelde zeespiegel. Voor de toekomstprojecties is de grootte van deze stijging afhankelijk van het scenario. Voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging voor 2081–2100 in vergelijking met 1986–2005 liggen de projecties voor het RCP2.6 scenario tussen 26 en 55 cm, voor het RCP4.5 scenario tussen 32 en 63 cm, voor het RCP6.0 scenario tussen 33 en 63 cm en voor het RCP8.5 scenario tussen 45 en 82 cm (IPCC, 2013). In de KNMI'14 scenario's wordt de zeeniveaustijging aan Nederlandse kust tegen 2100 geschat op 50 tot 100 cm (KNMI, 2014). De verschillen tussen de scenario's worden groter wanneer er een langere periode dan 100 jaar wordt beschouwd (IPCC, 2013).

De meest recente trendanalyse van de gemiddelde zeespiegel te Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge tot 2010 wordt getoond in Figuur 28. De trendlijn op het gemiddeld zeeniveau is voor elk van deze drie locaties continu stijgend. Voor Oostende ligt de trendlijn anno 2010 bijna 114 mm hoger dan in 1951; voor Nieuwpoort ligt deze bijna 118 mm hoger dan in 1967; voor Zeebrugge is dat 159 mm hoger dan in 1962. De laatste jaren stijgt de trendlijn minder snel, maar dit kan evengoed het gevolg zijn van langjarige schommelingen in de zeespiegel (Willems, 2014). In een recente studie van de extreme hoogwaters te Oostende, en van de afzonderlijke astronomische en

stormopzetcomponenten, trends en langjarige schommelingen, concludeert Willems (2014) dat de gemiddelde zeespiegelstijging 0,20 cm per jaar is (20 cm over 100 jaar). Het stormopzet vertoont geen stijgende trend. De zeespiegel en ook het hoogwater zijn onderhevig aan een langjarige schommeling met een periode van 18,6 jaar, het zogenaamde nodale getij. Verdere extrapolatie van het gemiddelde zeeniveau tot 2100 geeft een stijging tussen +20 cm tot +200 cm (Ozer et al., 2008; Van den Eynde et al., 2009).



De dunne lijnen geven het jaargemiddelde weer van het gemeten zeeniveau; de dikke lijnen de trendlijnen samen met op de achtergrond de 95 %-betrouwbaarheidsbanden op de trendlijn.
 Het zeeniveau is uitgedrukt in mm RLR (Revised Local Reference)

Figuur 28: Stijging van de gemiddelde zeespiegel tussen start van de metingen en 2010

Naast de zeespiegelstijging is er de verandering in windklimaat. In Deel 3.3.a bleek reeds dat er slechts beperkte veranderingen te verwachten zijn in de windsnelheid. De invloed op het stormopzet zal daardoor ook beperkt zijn.

In het kader van het Europese onderzoeksproject Theseus werden klimaatscenario's opgemaakt voor impactanalyses op overstromingen langs de Belgische kust en het Schelde-estuarium. De klimaatscenario's voor neerslag, temperatuur en ETo in het Belgische binnenland werden daarvoor uitgebreid met scenario's voor zeespiegelstijging, stormopzet en windklimaat (windrichting en windsnelheid). Ook werden de correlaties onderzocht tussen de klimaatveranderingen voor neerslag in het binnenland en stormopzet langs de kust. Er is immers een niet te verwaarlozen kans op het gezamenlijk voorkomen van extreme neerslag in het binnenland (en dus bovenafvoeren langs de Schelde, de IJzer, de wateringen in de polderstreek ...) en hoog stormopzet. Noordwest-circulatie boven de Noord-Atlantische Oceaan kan immers zowel aanleiding geven tot extreme stormopzetcondities in de Noordzee en tegelijkertijd ook veel neerslag geven. De veranderingen in extreem stormopzet werden afgeleid uit de veranderingen in luchtdrukpatronen boven de Noord-Atlantische Oceaan en vooral de Baltische Zee. Deze werden gecorreleerd aan veranderingen in extreem stormopzet aan de monding van de Schelde te Vlissingen (Ntegeka et al., 2012; Weisse et al., 2014). De impact hiervan op de overstromingsrisico's langs de Schelde komen in deel 4.7 van dit rapport aan bod.

Andere evoluties, zoals de temperatuur van het zeewater (historisch 3,4 °C over 100 jaar), staan beschreven in MIRA (2009), maar werden nog niet geactualiseerd.

3.5. Klimaatschommelingen

Naast de klimaatrends is het belangrijk te beseffen dat het klimaat onderhevig is aan belangrijke klimaatschommelingen. Daardoor kunnen kortetermijntrends sterk afwijken van de langetermijntrends, of kunnen er kortetermijnevoluties zijn die 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 (Willems, 2013b, 2013c). Voor ons land betekende dat perioden met meer en hogere extreme neerslag rond de jaren 1910-1920, 1950-1960 en 1990-2000, en perioden met minder extreme neerslag daartussen. Brisson et al. (2014a) heeft onderzocht welke invloed dit kan hebben op statistische analyses van resultaten van klimaatmodellen, die gebaseerd zijn op beperkte tijdreeksen (typisch 30 jaar of minder): Op basis van neerslagmetingen in Westdorpe werd vastgesteld dat de onzekerheid aan het gebruik van een 30-jarige periode, 11 % is voor de jaargemiddelde neerslag en 37 % wanneer men 10-jarige terugkeerperiodes analyseert. Wanneer men dus twee klimaatprojecties van 30 jaar met elkaar vergelijkt, dan is, tenminste voor in-situ metingen, 11 % van de verandering potentieel het gevolg van klimaatschommelingen voor de 30-jaar gemiddeldes en 37 % voor de 10-jarige terugkeerperiodes. Dit geldt voor de puntmetingen. Wanneer er veranderingen optreden over een grotere regio wordt het effect van de klimaatschommelingen kleiner.

4. Gevolgen van de klimaatprojecties voor Vlaanderen

4.1. Inleiding en Europese context

De klimaatverandering zal heel wat invloeden hebben. De sector die typisch sterk beïnvloed wordt door het klimaat is het waterbeheer. Zo wordt verwacht dat extreem hoge rivierdebieten in continentaal Europa de volgende decennia frequenter zullen voorkomen, terwijl ze zich in delen van Zuid-Europa minder frequent zullen voordoen (Rojas et al., 2012). Ook zijn er verschillende studies in afzonderlijke stroomgebieden die een stijging van extreme debieten modelleren, bijvoorbeeld in het stroomgebied van de Maas (Leander et al., 2008). Deze stijging in extreme debieten zal zich voornamelijk voordoen gedurende de winter in Noord-Europa, omwille van de stijging in winterneerslag (Lawrence & Hisdal, 2011). In het zuiden van Europa zullen er meer en intensere droogtes zijn, terwijl in alle andere regio's er geen significant patroon vast te stellen is (Sousa et al., 2011).

Rivieren zullen in de toekomst vaker buiten hun oevers treden. Doordat meer mensen zich vestigen in overstromingsgebieden, zullen er meer mensen en bezittingen blootgesteld worden aan de gevolgen van overstromingen (Barredo, 2009). Er wordt verwacht dat rivieroverstromingen tegen 2080 per jaar 250 000 – 400 000 extra mensen zullen treffen in Europa en dat de jaarlijkse schade van deze overstromingen kan verdubbelen. De delen van Europa die het meest gevoelig zijn voor rivieroverstromingen zijn het Verenigd Koninkrijk, Centraal- en Noord-Europa, waaronder dus ook België (Ciscar et al., 2011).

De stijging van de zeespiegel zou in de toekomst tot kustoverstromingen kunnen leiden. Dit kan gevolgen hebben voor verschillende Europese steden, havenfaciliteiten en andere infrastructuur (Hallegatte et al., 2011). Wanneer adaptaties uitblijven, is het mogelijk dat er tegen 2100 17 biljoen euro aan schade per jaar zal zijn (Hinkel et al., 2010). De landen die de grootste schade zullen oplopen zijn Nederland, Duitsland, Frankrijk, België, Denemarken, Spanje en Italië. Een aanpassing van de kustverdedigingen (vb. dijken) kan de impact en de kost sterk reduceren (Hinkel et al., 2010). Het grote probleem is dat het aantal bezittingen en het aantal mensen die beschermd moeten worden door kustverdedigingen aan het toenemen is, waardoor het verlies als gevolg van overstromingen in de toekomst ook groter zal zijn (Hallegatte et al., 2013).

Enkele andere gevolgen voor de waterhuishouding worden hieronder kort opgesomd:

- De aanvulling van het grondwater en het niveau van de watertafel zal 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 (Goderniaux et al., 2011).
- De hogere temperaturen in de zomer en droogte leiden in vele rivieren, waaronder de Maas, tot gunstige condities voor de bloei van algen en zorgen ervoor dat het afvalwater van industrieën minder sterk verdund zal zijn (van Vliet & Zwolsman, 2008).

Verder zijn er andere invloeden, vooral als gevolg van de temperatuurstijging, op volksgezondheid, op natuur en ecologie, en op bepaalde andere sectoren zoals de windenergiesector:

- Oververhitting van gebouwen (huizen, scholen, ziekenhuizen) tijdens warm weer (Crump et al., 2009). Hierdoor zal in Europa bijgevolg meer vraag zijn naar koelingsenergie (Dolinar et al., 2010).
- Meer ziekte en sterftegevallen als het gevolg van de warmte, zeker bij oudere mensen (Corobov et al., 2012). Het aantal sterftegevallen als gevolg van de koude zal dan weer dalen (Ballester et al., 2011).
- Na 2050 zal de windenergie in Noord- en Centraal Europa stijgen gedurende de winter en dalen gedurende de zomer. Voor Zuid-Europa wordt er een daling verwacht in beide seizoenen (Nolan et al., 2012).

- Door langere perioden van droogte zal er meer boomsterfte zijn en een afname van bosareaal in België (Kint et al., 2012).

Wat de specifieke invloeden voor Vlaanderen zijn, werd nog niet gekwantificeerd voor de nieuwe klimaatprojecties, zoals in Deel 3 beschreven. Dit betekent dat de concrete gevolgen van de nieuwste klimaatprojecties op de specifieke sectoren nog niet gekend zijn. Omdat met de vroegere klimaatscenario's, zoals in MIRA 2009 gerapporteerd, wel reeds heel wat impactmodelleringen gebeurden, ook enkele zeer recente, kunnen op basis van het verschil tussen de vroegere en de nieuwe klimaatscenario's wel indicaties worden gegeven over deze gevolgen. Indien de nieuwe klimaatscenario's vergelijkbaar zijn met de vroegere, blijven ook de vroegere impactberekeningen geldig. Indien de nieuwe klimaatscenario's afwijken, zullen ook de impacts afwijken; de precieze afwijking van deze impacts is dus nog niet gekend, maar er kunnen wel indicaties worden gegeven.

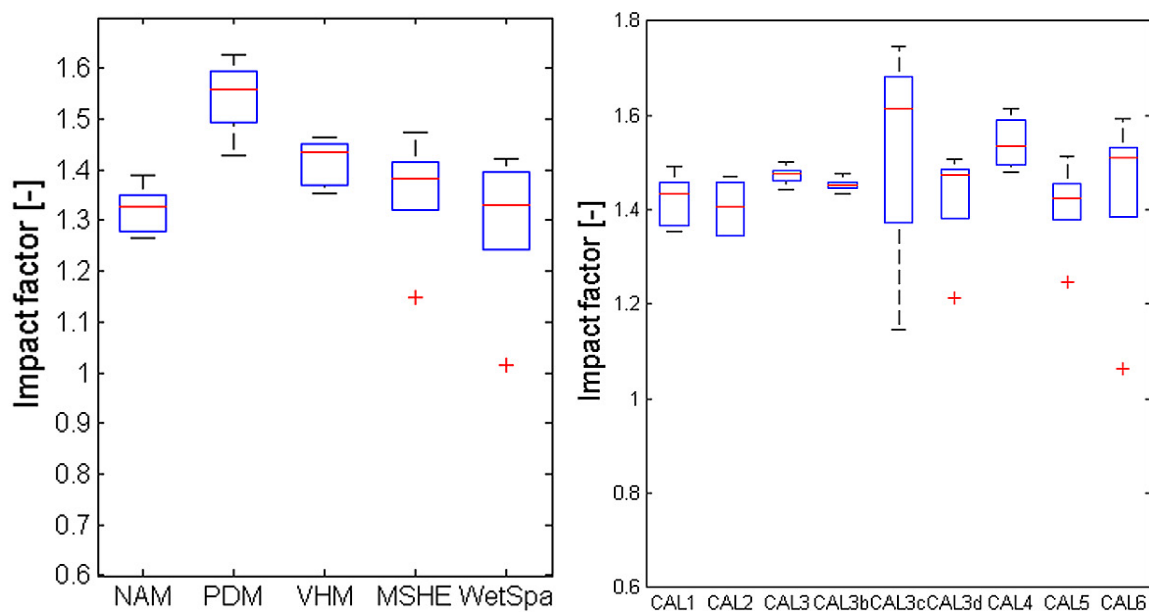
Hierna worden op basis van de meest recente impactberekeningen en nieuwe klimaatprojecties gevolgen geschetst voor een aantal sectoren.

4.2. Gevolgen voor hoog- en laagwaterdebieten langs rivieren

De hydrologische gevolgen van de Belgische klimaatscenario's werden door Baguis et al. (2010) op grote schaal bestudeerd voor de Schelde- en Maas-rivierbekkens, gebruik makend van het hydrologisch model SCHEME ontwikkeld door het KMI. Voor het Scheldebekken werden deze scenario's ook doorgerekend in conceptuele neerslagafvoermodellen. Dit laatste gebeurde voor het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse overheid voor 67 deelstroomgebieden van het Scheldebekken (Boukhris et al., 2008). Voor één van deze deelstroomgebieden, deze van de Grote Nete en de Grote Laak, werd een vergelijking gemaakt van de impactresultaten voor vijf verschillende neerslagafvoer- of hydrologische modellen: NAM (het neerslagafvoermodel dat standaard door het WL wordt gebruikt), PDM (het standaard neerslagafvoermodel van VMM-AOW), VHM (een veralgemeend neerslagafvoermodel), MIKE-SHE (een gedetailleerd, ruimtelijk verdeeld hydrologisch model) en Wetspa (een semi-ruimtelijk verdeeld hydrologisch model) (Vansteenkiste et al., 2012, 2014). Deze laatste studie liet toe om de onzekerheid in de hydrologische impactresultaten te analyseren. Verder werden door VMM-AOW de klimaatscenario's doorgerekend in PDM-modellen van meerdere Vlaamse stroomgebieden, dit als onderdeel van de opmaak van de overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP's). De gemodelleerde neerslagafvoerdebieten werden ook vertaald naar bijhorende rivierdebieten, door simulatie in volledig hydrodynamische riviermodellen. Dit gebeurde via de MIKE11-modellen van het WL en InfoWorks-RS modellen van VMM-AOW, die naast de rivierbedding ook de overstromingsgebieden bevatten langs de gemodelleerde rivieren (bevaarbare en onbevaarbare waterlopen 1^e categorie).

De resultaten geven samen aan dat de impact van de klimaatscenario's op de hydrologische extremen (piek- en laagwaterafvoeren) slechts in zeer beperkte mate afhangen van de topografische en bodemeigenschappen van de stroomgebieden. De hydrologische impactresultaten wijzen voor alle bestudeerde stroomgebieden op een toekomstige daling van de laagwaterafvoeren langs onze Vlaamse waterlopen. De daling van de laagste zomerdebieten varieert bij het laag scenario tussen 10 % en 70 % daling over een toekomstperiode van 100 jaar. De invloed op de piekafvoeren is vaak minder duidelijk en sterk afhankelijk van het precieze klimaatscenario. Bij een hoog/nat klimaatscenario stijgen deze piekafvoeren significant; bij een laag/droog klimaatscenario blijven de 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 precieze toename in neerslag in vergelijking met de toename in evapotranspiratie, welke sterk kunnen verschillen van klimaatmodel tot klimaatmodel, kan de balans overhellen van een toename naar eerder een status quo of afname van de piekafvoeren langs onze Vlaamse 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 dus een snelle respons vertonen op extreme neerslag, kan deze toename nog meerdere tientallen % hoger liggen. Zo werden voor de Maarkebeek toenamen in piekafvoeren tot +100 % over 100 jaar gesimuleerd (Willems et al., 2014a). Vansteenkiste et al. (2014) vonden voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak een lineair verband tussen het % verstedelijkt gebied in een stroomgebied en het % toename in de piekafvoeren als gevolg van de klimaatscenario's.

De precieze impact op hydrologische extremen blijkt niet enkel sterk afhankelijk van het klimaatscenario, maar ook van het gebruikt hydrologisch of neerslagafvoermodel. Niet enkel het verschil in de manier waarop een model de fysische realiteit schematiseert (de zogenaamde modelstructuur) is hierbij van belang, maar ook de wijze waarop het model wordt gekalibreerd. Voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak werd de invloed van de modelstructuur onderzocht door 5 verschillende hydrologische of neerslagafvoermodellen toe te passen (Vansteenkiste et al., 2012, 2014) (zie Figuur 29). Voor één van deze modellen werden bovendien een reeks kalibratiemethoden toegepast (Willems et al., 2014b) (zie ook Figuur 29). De overeenkomstige verschillen in hydrologische klimaatscenario's bleken aanzienlijk, maar kleiner dan de verschillen tussen de verschillende klimaatscenario's (Vansteenkiste et al., 2014). Zo simuleerde het PDM-neerslagafvoermodel (het model dat standaard wordt gebruikt door VMM-AOW) voor een toekomstperiode van 100 jaar piekafvoeren die een 20-tal % hoger liggen dan het gemiddeld resultaat van de andere modellen. Het kon verklaard worden door de specifieke modelstructuur van dat model; vooral de sterkere toename van de neerslagafvoercoëfficiënt (d.i. de hoeveelheid neerslagafstroming langs de oppervlakte per eenheid neerslag) in relatie tot de verzadigingstoestand van de ondergrond; echter zonder een uitspraak te doen over de nauwkeurigheid daarvan in vergelijking met de andere modellen.

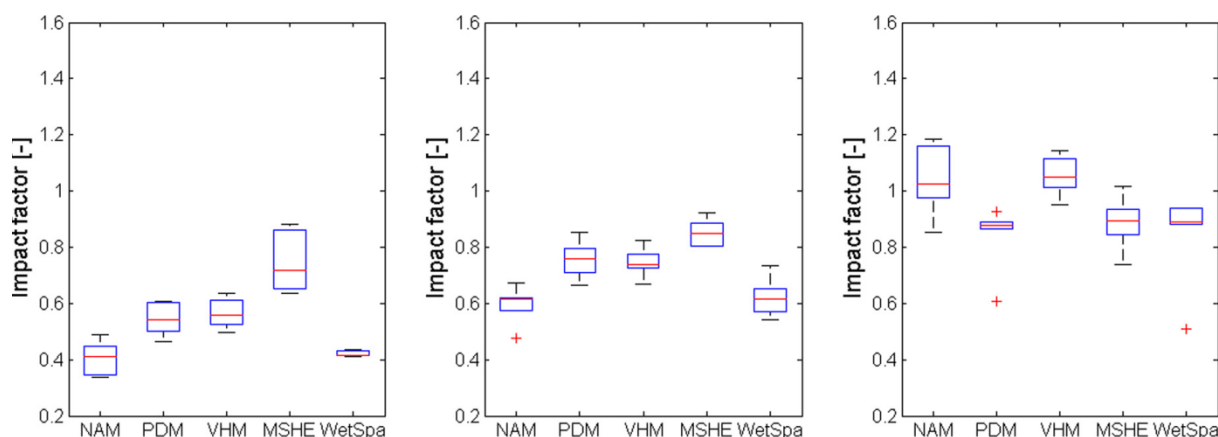


Een factor 1,3 betekent +30 % stijging.

Bron: Vansteenkiste et al. (2014)

Figuur 29: Factor wijziging in piekafvoeren over 100 jaar voor het hoog/nat klimaatscenario, voor 5 verschillende hydrologische of neerslagafvoermodellen voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak (deelfiguur links) en verschillende kalibratiemethodes toegepast op het VHM-model (deelfiguur rechts)

Bij de vergelijking van de hydrologische modelresultaten tussen de verschillende modellen bleek dat de klimaatimpact op de laagwaterdebieten heel wat onzekerder is dan de klimaatimpact op de piekafvoeren (Figuur 30). Dit heeft vooral te maken met de manier waarop de (nog sterk onzekere) grondwaterinvloed wordt ingerekend in de modellen. Van de 5 bestudeerde modellen bleek voor het model dat de grondwatercomponent het meest gedetailleerd simuleert (het model MIKE-SHE), de daling in laagwaterdebieten ongeveer 30 % kleiner te zijn. Deze conclusies werden later bevestigd voor twee andere Vlaamse stroomgebieden: deze van de Dijle opwaarts van Sint-Joris Weert, en van de Maarkebeek (Willems et al., 2014a).



Een factor 0,4 betekent 60 % daling.

Bron: Vansteenkiste et al. (2014)

Figuur 30: Factor wijziging in laagwaterafvoeren over 100 jaar voor drie klimaatscenario's (deelfiguur links: laag/droog; midden: midden; rechts: hoog/nat), voor 5 verschillende hydrologische of neerslagafvoermodellen voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak

Zoals hiervoor toegelicht zijn de nieuwe klimaatscenario's – zoals in delen 2 en 3 beschreven – nog niet hydrologisch doorgerekend. De nieuwe klimaatscenario's vergelijkend met de vroegere, wordt verwacht dat de impactresultaten op de piekafvoeren vergelijkbaar zullen zijn met deze die hiervoor werden samengevat o.b.v. vroegere scenario's. Voor de laagwaterdebieten worden wel verschillen verwacht. Door de hogere evapotranspiratie tijdens de zomermaanden worden lagere laagwaterdebieten, en dus sterkere droogtetrends, verwacht voor het lage/droge klimaatscenario. De precieze impacts moeten nog berekend worden.

De eenduidige impactresultaten m.b.t. de evolutie naar meer verdroging trekt de laatste jaren alsmaar meer aandacht. Het is een problematiek die nog niet zo goed gekend is bij het bredere publiek, maar Vlaamse waterbeheerders en beleidsmakers beginnen zich hierover grote zorgen te maken. Vlaanderen en Brussel zijn immers zeer kwetsbaar voor een toenemende verdroging. De huidige waterbeschikbaarheid in Vlaanderen en Brussel bedraagt 1 100-1 700 m³/persoon/jaar, wat zeer laag is volgens internationale normen en lagere dan vele landen in Zuid-Europa (vb. Spanje en Portugal). Het heeft zijn verklaring in de hoge bevolkingsdichtheid en de sterke afhankelijkheid van onze buurregio's wat waterbeschikbaarheid betreft. Een groot deel van het water dat gebruikt wordt voor de drinkwatervoorziening (vb. 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) m.b.t. de vereiste minimale debieten naar afwaarts tijdens droge zomerperiodes. In bepaalde streken van Vlaanderen, zoals in Zuid-West Vlaanderen worden grote hoeveelheden diep grondwater opgepompt, wat de natuurlijke grondwatertoestand drastisch heeft verstoord. Nog meer overschakeling van grondwater- op oppervlaktewateronttrekking dringt zich op, maar het is helaas net de oppervlaktewaterbeschikbaarheid die volgens de klimaatscenario's in de toekomst sterk kan verminderen, vooral tijdens droge zomerperiodes. Lagere oppervlaktewaterbeschikbaarheid betekent ook slechtere oppervlaktewaterkwaliteit door de verminderde verdunning van de vuilvrachten; dus hogere kosten voor de drinkwaterproductie bij zuivering van gewonnen oppervlaktewater tot drinkwater. Klimaatadaptatie inzake verdroging en laagwater dringt zich dus op; weliswaar rekening houdend met de nog grote onzekerheden aanwezig op de klimaatscenario's en hydrologische impactberekeningen (zie Deel 5 van dit rapport voor een bespreking over het omgaan met onzekerheden in het beleid). Langs het kanaal Gent-Terneuzen kan die evolutie naar verdroging tot belangrijke invloeden leiden. Het verdrag dat werd afgesloten met Nederland vraagt een minimaal debiet van 13 m³/s, gemiddeld over 2 maanden. Wanneer de historische periode 1967-2009 wordt geanalyseerd, blijkt die waarde niet gehaald in 37 van de 40 jaar. Gemiddeld is het debiet 1,5 m³/s lager, maximaal zelfs 6,5 m³/s. De lagere zomerdebieten zullen ook zorgen voor hogere chlorideconcentraties. Het verdrag met Nederland vraagt dat het 'zoutbezwaar' wordt beperkt. Indien de bovendebieten langs het kanaal worden gereduceerd tot 50 % (gemiddeld klimaatscenario), stijgt de gemiddelde zoutconcentratie van 2,42 g/l naar 3,72 g/l chloride (Pereira & Mostaert, 2012). Er ontstaat wel geen continue toename in de zoutconcentratie (geleidelijke verzilting, maar er wordt

eerder een nieuw, hoger concentratieniveau bereikt. Om het zoutbezwaar te beperken zullen in de winter spoeldebieten toegepast moeten worden.

Om tegemoet te komen aan het grote verschil in tijd- en ruimteschalen tussen de beschikbare klimaatmodellen en deze die typisch nodig zijn voor hydrologische impactanalyse, maar ook aan de systematische fouten waaraan de klimaatmodellen onderhevig zijn (wanneer wordt vergeleken met waarnemingen) alsook om de klimaatscenario's gemakkelijk in de praktijk te kunnen toepassen voor hydrologische impactanalyses, werd in het CCI-HYDR onderzoeksproject een 'klimaatperturbatietool' ontwikkeld (Ntegeka & Willems, 2008b; Ntegeka et al., 2014). Deze perturbatietool laat toe om historische Belgische meetreeksen of invoertijdreeksen van hydrologische modellen voor neerslag en ETo aan te passen (te perturberen) aan de verschillende klimaatscenario's. Elke neerslag- of ETo-reeks wordt door de tool dus omgezet in aangepaste tijdreeksen conform de klimaatscenario's. Hydrologische impactmodelleerders moeten dan de huidige invoertijdreeksen in hun modellen vervangen door de aangepaste en het impactmodel opnieuw doorrekenen om de hydrologische impact van de klimaatscenario's te begroten. Voor neerslag past de perturbatietool eerst het aantal natte en droge dagen aan (aan de klimaatscenario's), en daarna ook de neerslagintensiteiten in functie van hun extremiteit. De tijdreeksen kunnen een lengte hebben van enkele jaren tot maximaal 100 jaar en een dagelijkse of uurlijkse tijdstap. Ze kunnen worden aangepast aan toekomstscenario's tot 2100 (vb. 2020, 2030, ..., 2100). Recent werd de tool in het kader van een studie voor VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer aangepast aan de nieuwe RCP-gebaseerde klimaatscenario's voor Vlaanderen (Tabari et al., 2015). Dit zijn dezelfde scenario's als in de Appendix 2 bij dit rapport.

4.3. Gevolgen voor rioleringsystemen

Vermits de klimaatscenario's voor de zomerperiode wijzen op een sterke toename van de extreme, kortstondige regenbuien, zullen rioleringsystemen en andere afwateringssystemen bijkomend belast worden. Voor VMM – Afdeling Operationeel Waterbeheer werd daarom de impact berekend van deze wijziging in extreme zomeronweders op Vlaamse rioleringsystemen en kleinschalige bufferbekkens (vb. bergingsbekkens langs rioleringen) (Willems & Vrac, 2011; Willems, 2009, 2013a). De resultaten van deze laatste uitbreiding vormden de basis van de herziening van de ontwerpneerslag en ontwerpbuien in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen (CIW, 2012).

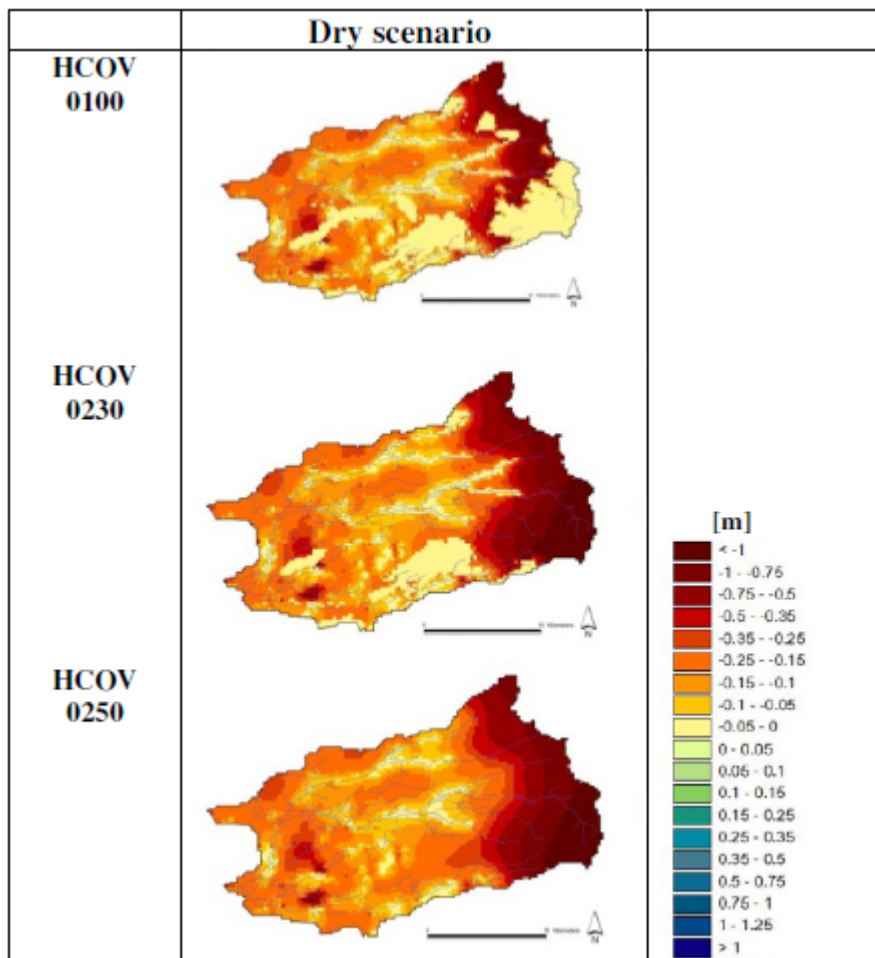
Er werd geconcludeerd dat rioleringsystemen die gedimensioneerd zijn voor een terugkeerperiode van 2 jaar voor overstroming of overloop in de toekomst tot twee keer zo vaak kunnen overstromen of overlopen, dus 1 keer per jaar i.p.v. 1 keer per 2 jaar. Voor bufferbekkens of andere bronmaatregelen (vb. regenwaterputten) is er bij het hoog klimaatscenario voor de zomer (meest extreme zomeronweders) 15 % tot 35 % bijkomende bergingscapaciteit nodig om de overlaat- of overstortfrequentie op het huidig niveau te behouden. Indien de bergingscapaciteit behouden zou worden, zou bij datzelfde scenario de terugkeerperiode van overstorting dalen van 2 jaar naar een half jaar, ongeveer 2 keer per jaar dus. Indien de terugkeerperiode van overstorting onder het huidig klimaat 5 jaar zou bedragen, zou dit (opnieuw bij datzelfde scenario) dalen tot 1-1,5 jaar. Meer specifieke ontwerptabellen werden opgemaakt voor de benodigde bergingscapaciteit in functie van de terugkeerperioden voor overstorting, en een reeks van gangbare infiltratie- of doorvoerdebieten. Dezelfde resultaten en ontwerptabellen gelden ook voor het hydraulisch ontwerp van erosiebestrijdingsmaatregelen (Meert en Willems, 2013a). In een studie voor het Departement LNE - Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON) van de Vlaamse overheid werd bovendien een rekentool ontwikkeld die toelaat om de precieze invloed door te rekenen van de klimaatscenario's op de overlooffrequentie bij een ongewijzigde bergingscapaciteit, of op de benodigde bergingscapaciteit bij een bepaalde gewenste overlooffrequentie i.f.v. de specifieke karakteristieken van het stroomgebied (Meert en Willems, 2013b).

Een andere mogelijkheid om de terugkeerperiode van overstroming of overstorting van rioleringen en bufferbekkens op de niveau van het huidig klimaat te houden, is door de regenwaterinstroom in de riolering te beperken. Dit kan bijvoorbeeld via bronmaatregelen zoals doorlatende verharding, infiltratievoorzieningen en betere afstemming van stedelijk waterbeheer, stadsontwerp, land- en groenbeheer en ruimtelijke planning (Nolf et al., 2012a,b,c; De Vleeschauwer et al., 2012, 2014). De bijkomende infiltratie die daardoor ontstaat komt ook ten goede van de grondwateraanvulling, dus het tegengaan van droogte. Recent werd reeds een belangrijke stap in deze richting gezet via de aangepaste Gewestelijke Stedenbouwkundige Verordening voor Hemelwaterputten, Infiltratie- en

Buffervoorzieningen (vanaf 1 januari 2014; Vlaamse overheid, 2013), die individuele infiltratie verplicht bij nieuwbouw en grondige renovatie. Verder werden in de Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen (CIW, 2012) de terugkeerperiode voor het ontwerp van rioleringen (controleberekeningen voor de langetermijntoestand van deze systemen, maar voor de huidige klimaatcondities) verhoogd van 5 jaar tot 20 jaar. Een bui met een terugkeerperiode van 20 jaar in het huidige klimaat wordt immers een bui met een terugkeerperiode van 5 jaar onder het hoog klimaatscenario. Dezelfde problematiek geldt ook in vele andere streken van de wereld, en krijgt daardoor ook internationaal uitgebreide aandacht (Willems et al., 2012).

4.4. Gevolgen voor grondwater

De gevolgen van de klimaatscenario's op grondwater werden in een paar recente studies bestudeerd. Eén van de 5 hydrologische modellen die door Vansteenkiste et al. (2014) werden doorgerekend voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak (zie deel 3.1), het MIKE-SHE model, bevatte een gedetailleerde grondwatercomponent. De klimaatimpact op de grondwaterresultaten bleek sterk variabel, zowel ruimtelijk als in functie van het seizoen. In het winterseizoen varieerde de verandering in grondwaterstanden van enkele centimeters in de lagergelegen valleigebieden tot ongeveer 1 meter in de interfluviale en hoger gelegen gebieden: stijgingen voor het hoog scenario, dalingen voor het laag scenario. De zomer-grondwaterstanden stagneerden in de valleigebieden, maar daalden in het laag scenario tot ongeveer 1 meter in de hogere zones van het stroomgebied (Figuur 31).



Bron: Vansteenkoste et al. (2014)

Figuur 31: Aantal meter daling in laagste jaarlijkse grondwaterstand in drie verschillende grondwaterlagen (HCOV 0100, 0230 en 0350) over 100 jaar voor het lage/droge klimaatscenario, op basis van het model MIKE-SHE voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak

Een meer gedetailleerde analyse van de impact van de klimaatverandering op grondwater werd voor het stroomgebied van de Kleine Nete doorgevoerd door Dams et al. (2012). Er werd gebruik gemaakt

van een hydrologisch model (WetSpa), gekoppeld aan een grondwatermodel (MODFLOW). De resultaten gaven 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 gaven 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. Significant dalende grondwaterstanden werden gevonden voor de maanden van september t.e.m. januari. Gemiddeld werden dalingen van 7 cm gevonden, met een standaardafwijking van 5 cm. Ook hier werden grotere grondwaterinvloeden waargenomen voor de interfluviale en hoger gelegen gebieden en kleinere voor de lagergelegen valleigronden. De ecologische impact van die kleinere grondwaterdalingen in de valleigebieden kan wel groter zijn dan in de hoger gelegen gebieden. De daling van de grondwaterstanden t.e.m. januari, ondanks de lichte stijging in grondwatervoeding in de winter is het gevolg van het langdurig opbouwend effect van de neerslag op de grondwaterstanden. Een grote daling van de zomerneerslag kan zich tot de wintermaanden laten voelen. Op het einde van de zomerperioden of herfst zijn de grondwaterstanden het laagst; tijdens deze perioden werden dalingen tot 10 % gevonden.

4.5. Gevolgen voor landbouw en gerelateerde veranderingen in stroomgebiedshydrologie

De invloed van de klimaatwijziging op landbouw treedt vooral op via de gewijzigde waterbeschikbaarheid in de bodem (bodemvochtgehalte) en de toenemende CO₂-concentraties in de atmosfeer. De invloed van deze wijzigingen op de gewasgroei werd voor Vlaanderen recent bestudeerd door Vanuytrecht et al. (2011, 2012, 2014). Dit gebeurde op veld- en perceelsniveau op basis van het gewasgroeimodel AquaCrop. De toenemende CO₂-concentraties werden gebaseerd op de toekomstconcentraties die aan de basis liggen van de broeikasscenario's (de SRES-scenario's in dit geval). De gewasopbrengst bleek tot 27 % te stijgen, en de overeenkomstige biomassa met 23 %. Deze stijging is vooral het gevolg van de toenemende CO₂-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 de langere termijn worden de effecten als gevolg van extremere temperatuur- en neerslagepisodes belangrijker.

Gewijzigde gewasgroei en andere vegetatie aan de oppervlakte beïnvloedt ook de stroomgebiedshydrologie. Deze invloed werd in de studies gerapporteerd in deel 4.2 (invloed op oppervlaktewater) verwaarloosd. Er wordt echter verwacht dat die invloed van secundair belang is.

4.6. Gevolgen voor overstromingsrisico's langs de kust

De klimaatverandering verhoogt de overstromingsrisico's langs de Belgische kust door de stijging in het gemiddeld zeeniveau (zeespiegelstijging) en het wijzigend windklimaat. Het windklimaat bepaalt het stormopzet. Inzake windklimaat is er veel onzekerheid; de windsnelheid kan zowel stijgen als dalen (zie deel 3.4), wat zich doorvertaalt naar een gelijklopende onzekerheid op het stormopzet.

In de projecten CLIMAR (Federaal Wetenschapsbeleid), SafeCoast (Interreg IIIB North Sea Programme) en Theseus (EU-FP7) werden deze gevolgen van veranderend zeeniveau en windklimaat bestudeerd. In het CLIMAR-project werd voor deze klimaatscenario's ook de kans op bresvorming bestudeerd langs de Belgische kust, en het overstroombaar gebied voor een storm met een terugkeerperiode van 1 000 jaar (Van den Eynde et al., 2011). Resultaten geven aan dat – zonder adaptatie – het overstromingsrisico al binnen een paar tientallen jaren met een factor 10 kan toenemen.

Naast de wijzigende overstromingsrisico's zullen de veranderende waterhoogte- en stromingscondities langs de kust tot veranderingen leiden in de kusterosie, de troebelheid van het water, dus het beschikbare licht, de instroom van zoet water, enz. Dat kan leiden tot veranderingen in de habitats en fysiologische effecten voor bepaalde dier- en plantengroepen. Dat dit de voedselketen van ecosystemen beïnvloedt staat vast, maar hoe precies is nog onvoldoende gekend. Ze werden bijvoorbeeld al veranderingen vastgesteld in de hoeveelheden kabeljauw en schelvis (vooral

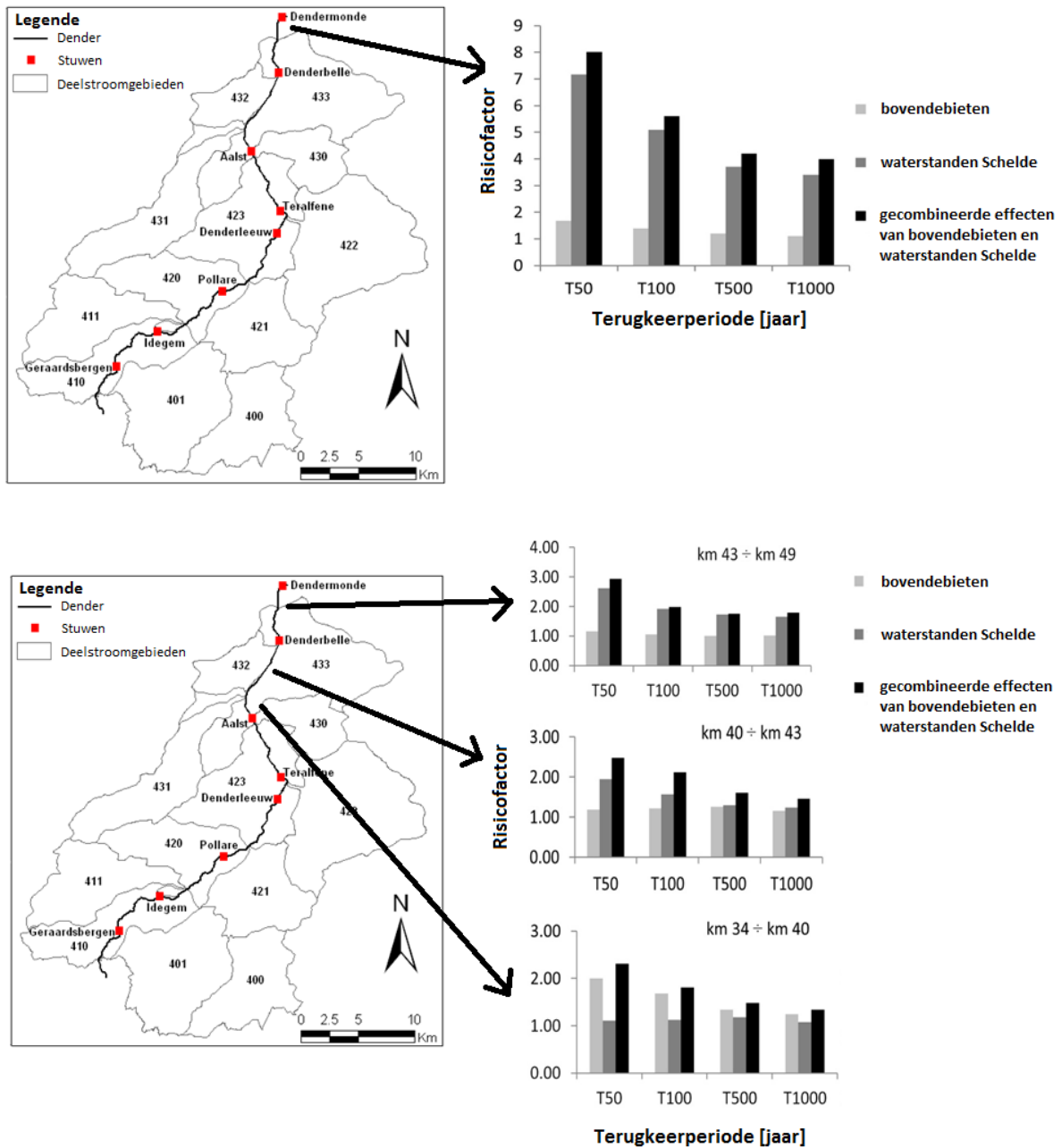
verplaatsingen naar het noorden) (Van den Eynde et al., 2011). Naast de ecologische gevolgen zorgt dit voor economische gevolgen zoals voor de visvangst en het toerisme (Van den Eynde et al., 2011).

Door de zeespiegelstijging verhoogt verder de zoutbelasting naar het ondiepe grondwater en het oppervlaktewater langs de kust (veranderingen in de zoet-zoutwater verdeling). De zoetwaterlens in de duinengordel speelt echter een belangrijke bufferende rol bij de intrusie van zout zeewater in het hinterland (Van den Eynde et al., 2011).

4.7. Gevolgen voor overstromingsrisico's langs de Schelde

De zeespiegelstijging en verhoging van het stormopzet verhogen niet enkel de overstromingsrisico's langs de Belgische kust, maar ook de risico's langs de rivieren die in verbinding staan 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 op- en afwaartse randvoorwaarden. Daarom werd in het EU-project Theseus de correlatie onderzocht tussen het stormopzet langs de kust en de bovendebieten, als gevolg van wijzigende neerslag en ETo in het binnenland. Voor een deel van de Schelde, de IJzer, en de polders en wateringen treden de hoogste waterpeilen immers op als gevolg van het samengaan van hoog stormopzet en hoge bovendebieten. Dit fenomeen van 'coïncidentie' krijgt ook internationaal meer en meer aandacht.

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 extreem 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 afwaarts deel van de Dender (afwaarts van Aalst). Alhoewel de Dender niet rechtstreeks in verbinding staat met de Noordzee, is er wel een sterke invloed van het toenemend hoogtij langs de Schelde via de stuwwerking. Tijdens hoogtijperioden kunnen de stuwen het bovendebiet van de Dender immers niet uitwateren. Indien er bovendien hogere bovendebieten ontstaan, leidt dat tot zeer sterk toenemende volumes die tijdens hoogtijperioden tijdelijk geborgen moeten worden langs de Dender. In het Theseus-project werd berekend dat het samengaan van een gemiddeld scenario van +60 cm zeespiegelstijging, met een hoog scenario van +21 % stormopzet, en een hoog scenario van +30 % bovendebiet, tot een verhoging leidt van de Schelde-waterhoogte in Dendermonde met +1,8 m voor terugkeerperioden tussen 100 en 10 000 jaar (Ntegeka et al., 2012; Monbaliu et al., 2014). Bij een terugkeerperiode van 1 000 jaar neemt het volume water dat overstroomt, toe met een factor 4 (Figuur 32). In Dendermonde is de toename vooral het gevolg van de zeespiegelstijging, maar meer opwaarts langs de Dender wordt de invloed van de bovendebieten belangrijker (Figuur 32). In de omgeving van Aalst zijn de invloed van de bovendebieten en de zeespiegelstijging ongeveer gelijkwaardig (Figuur 32). Voor een 'worst case' scenario van 2 meter zeespiegelstijging is de invloed nog veel meer desastreus. De Afdeling Kust houdt bij de opmaak van de Masterplan Kustveiligheid, dat in 2011 werd goedgekeurd door de Vlaamse overheid, rekening met de zeespiegelstijging.



Figuur 32: Factor toename in overstromd volume (risicofactor in de figuur) aan de samenvloeiing van Schelde en Dender te Dendermonde voor een hoog klimaatscenario met +60 cm zeespiegelstijging, +21 % toename in stormopzet en +30 % toename in bovendebieten (Theseus-project): aan de samenvloeiing van Schelde en Dender te Dendermonde (deelfiguur boven), langs de Dender afwaarts (deelfiguur onder)

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^e en laatste gecontroleerd overstromingsgebied in het eerste Sigmoplan, het overstromingsgebied van Kruikeke-Bazel-Rupelmonde met een grote totale oppervlakte van 600 ha) tot 25 jaar tegen 2100 (gebaseerd op eerdere berekeningen; Meyvis et al., 2003). Dit geeft het belang aan van het realiseren van het volledig geactualiseerde Sigmoplan. Om het gewenste veiligheidsniveau te halen (terugkeerperiode overstroming langs de Schelde grootorde 4 000 jaar) is nog ongeveer 4 000 ha bijkomend overstromingsgebied vereist. In het nieuwe Sigmoplan, dat op basis van een optimale kostenbatenanalyse werd herzien (Meyvis et al., 2003; RA, 2005; De Nocker et al., 2006; Broekx et al., 2011), 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 tot veranderingen leiden in de habitats, de fysiologische effecten voor bepaalde dier- en plantengroepen en dus van de voedselketen van ecosystemen. Ook hier zijn de precieze invloeden nog onvoldoende gekend.

4.8. Gevolgen van klimaatverandering vs. landgebruik/urbanisatietrends

Naast de klimaatverandering zijn er evoluties in landgebruik waaronder urbanisatietrends, die via de socio-economische scenario's die aan de basis liggen van de klimaatscenario's hieraan gekoppeld zijn. Een aantal recente studies hebben daarom naast de klimaatscenario's ook landgebruiksscenario's doorgerekend in hydrologische modellen. Poelmans et al. (2011) ontwikkelde stedelijke expansiescenario's voor Vlaanderen op basis van extrapolatie van satellietbeelden voor 1976, 1988 en 2000. Via deze satellietbeelden werd vastgesteld dat het percentage verharding de afgelopen decennia steeg van 4 tot 5 % in 1976 tot ongeveer 10 % in 2000. Er werd een extrapolatie gemaakt tot 2050, rekening houdend met onzekerheden. Net zoals voor de klimaatscenario's werd er gewerkt met hoog-midden-laag scenario's voor stedelijke expansie. In het midden of 'business as usual' scenario wordt een verdere verdubbeling bekomen van de hoeveelheid verharding in Vlaanderen tot ongeveer 20 % tegen 2050.

Simulatie van de stedelijke expansiescenario's van Poelmans et al. (2011) in een hydrologisch model voor het stroomgebied van de Molenbeek in het Dijlebekken, geeft aan dat een toename van de hoeveelheid verharding tussen 70 % en 200 % de piekdebieten in de waterloop doet stijgen tussen de 6 % en de 16 % (Poelmans et al., 2011). De overstromingsgevolgen stijgen niet enkel als gevolg van deze verhoging in piekdebieten, maar ook als gevolg van het wijzigend landgebruik in de overstromingsgebieden zelf (verhoogde overstromingsschade bij eenzelfde waterstand). Deze laatste invloed blijkt zelfs belangrijker dan de invloed van de wijzigende hydrologie. Wanneer 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 wijzigen onder de klimaatscenario's dan onder de stedelijke expansiescenario's. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de grotere onzekerheid in de klimaatscenario's ook een rol speelt.

In een andere vergelijking van de hydrologische impactresultaten tussen de klimaatscenario's en de stedelijke expansiescenario's van Poelmans et al. (2011), door Vansteenkiste et al. (2014) voor het stroomgebied van de Grote Nete en de Grote Laak, werden gelijkaardige resultaten gevonden. In die studie werden bovendien de resultaten van twee hydrologische modellen (MIKE-SHE en WetSpa) vergeleken. Beide modellen simuleerden een toename in de piekafvoeren in de winter en een afname in de laagwaterdebieten en afvoervolumes in de zomer, als gevolg van de stedelijke expansiescenario's. De impactresultaten blijken wel zeer gevoelig voor de specifieke veronderstellingen bij de modelparameterisatie. Dit laatste leidde tot de conclusie dat naast de onzekerheid in de scenario's er best ook rekening wordt gehouden met de modelonzekerheid. Het vergelijken van de impactresultaten van verschillende modellen is hiervoor zeer nuttig. Onafhankelijk van het model, blijkt de hydrologische impact van stedelijke expansie niet enkel afhankelijk te zijn van het % expansie maar ook van de huidige condities. Meer verstedelijkte stroomgebieden reageren sterker op een bepaald % stedelijke expansie. Het verband blijkt nagenoeg lineair.

4.9. Socio-economische en ecologische invloeden van gewijzigde waterloopdebieten

Naast de hydrologische en hydraulische invloed van de klimaatscenario's werden/worden in bepaalde projecten ook de ruimere gevolgen van deze invloed, zoals de socio-economische en ecologische gevolgen, bestudeerd. In het onderzoeksproject ADAPT (Federaal Wetenschapsbeleid) gebeurde dit

voor de overstromingsgevolgen langs het opwaarts Vlaams deel van de Dender (omgeving Geraardsbergen) (Giron et al., 2010).

In het kader van de MIRA 2009 rapportering (MIRA, 2009; Brouwers et al., 2009), werden de economische gevolgen van de wijzigende klimaatcondities gekwantificeerd langs Vlaamse rivieren op basis van de neerslagafvoer- en hydraulische modellen van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse overheid. De stijging van het economisch overstromingsrisico bedroeg op Vlaams niveau 33 % onder het hoog klimaatscenario, maar kan onder het laag klimaatscenario ook met 56 % dalen. Vooral het Leiebekken, het Bovenscheldebekken en het Demerbekken kennen onder het hoog klimaatscenario een zeer sterke toename van het risico met een factor 2 tot 3. Voor het Benedenscheldebekken is de stijging kleiner. Verder werden deze veranderende risico's afgewogen en gecombineerd met wijzigende risico's als gevolg van veranderend landgebruik (ditmaal gebruik makend van de MIRA 2009 landgebruiksscenario's; Gobin et al., 2009). Gemiddeld voor Vlaanderen stijgt het risico met 3 à 10 %, afhankelijk van het landgebruiksscenario, maar voor specifieke regio's in Vlaanderen kan de stijging hoger zijn (vb. tot +100 % in het Leiebekken en IJzerbekken, vooral door toename van bebouwing en industrie in overstromingsgebied, ten nadele van akker- en weiland).

In het ADAPT-project zijn naast de economische gevolgen van de gewijzigde overstromingsrisico's ook de sociale en ecologische gevolgen ingeschat (Giron et al., 2010). Dit is uiteraard niet evident. De sociale gevolgen zijn bovendien niet uit te drukken in monetaire termen, en daardoor moeilijk af te wegen tegen de economische gevolgen. Het ADAPT-project toonde aan dat een kosten-baten-afweging die enkel gebaseerd is op de economische gevolgen, leidt tot een te hoge bescherming van de rijkere wijken in vergelijking met armere wijken. Bovendien zijn armere bevolkingsgroepen kwetsbaarder voor de gevolgen van overstromingen.

Het aspect ecologische gevolgen (vb. wijziging in vegetatie langs overstromingsgebieden) werd verder onder de loep genomen in het project SUDEM-CLI (Federaal Wetenschapsbeleid) (Staes et al., 2012). De ecologische gevolgen blijken sterk afhankelijk van de frequentie, duur, periode (maand van het jaar) en waterdiepte van de overstromingen. Ook de implicaties voor maatschappij, waterbeheerders en beleidsmakers werden er opgelijst. Een uitgebreide analyse daarvan gebeurde in het kader van de opmaak van het Vlaams Klimaatadaptatieplan; zie: <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/adaptatie/vlaams-adaptatieplan/vlaams-adaptatieplan>.

Voor overstromingsrisico's langs rioleringen zijn nooit eerder de socio-economische gevolgen ingeschat. Een eerste analyse op dat vlak gebeurt momenteel in het kader van het project PLURISK (Federaal Wetenschapsbeleid; <http://www.kuleuven.be/hydr/plurisk>).

4.10. Luchtkwaliteit

Vlaanderen is één van de regio's in Europa met de hoogste luchtvervuiling (EEA, 2012). Naast de emissies van pollutanten, hebben veranderingen in het klimaat een impact op de luchtkwaliteit. Ozon is gevoelig voor de temperatuur en gedurende 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 gedurende windstille condities en gedurende episodes waarbij verticale menging in de atmosfeer klein is (stabiele atmosferische grenslaag). Ook wordt de concentratie van fijn stof in omgevingslucht beïnvloed door de neerslagfrequentie en -intensiteit. Transport van pollutanten wordt beïnvloed door de heersende windcondities, bijvoorbeeld bij aanvoer van lucht vanuit de geïndustrialiseerde gebieden in Duitsland.

Voor Nederland werden het effect van een veranderend klimaat, uitgaande van de vier KNMI'14 klimaatscenario's doorgerekend voor luchtkwaliteitparameters (Tabel 11; van den Hurk et al., 2014). Hiervoor werd een statistisch model gebruikt (Jansen, 2013) waar gemeten waarden voor ozon en PM₁₀ (deeltjes kleiner dan 10 µm) werden gerelateerd aan meteorologische condities. De statistische analyse werd uitgevoerd op basis van de hedendaagse condities en houdt daarom geen rekening met veranderingen in emissies door bijvoorbeeld de industrie of het verkeer.

Tabel 11: Toename in daggemiddelde ozon- en PM₁₀-concentraties voor de vier KNMI'14 scenario's voor het midden van de 21^e eeuw

MOC scenario	Ozone Summer	Ozone Winter	PM10 Summer	PM10 Winter
G _L	7.6 ± 2.3 (92.7)	1.8 ± 0.8 (49.5)	1.5 ± 0.5 (24.3)	0.0 ± 0.6 (29.3)
G _H	11.0 ± 3.3 (91.1)	3.1 ± 1.3 (48.8)	2.1 ± 0.7 (24.0)	-0.6 ± 1.0 (29.7)
W _L	13.6 ± 3.7 (93.2)	3.5 ± 1.2 (49.5)	2.9 ± 1.0 (24.3)	0.2 ± 1.1 (29.6)
W _H	18.7 ± 5.2 (90.5)	5.0 ± 1.7 (48.8)	3.7 ± 1.3 (23.7)	-0.7 ± 1.5 (29.5)

De foutenrange geeft de standaarddeviatie van de zes stations waarvoor de statistische relaties werden afgeleid en de acht leden van elk klimaatscenario. Tussen haakjes staan de gemiddelde waarden voor de referentieperiode. Eenheid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Bron: van den Hurk et al. (2014)

De ozonconcentraties tonen de hoogste klimaatgevoeligheid met een toename van 20 % voor het midden van de eeuw voor het WH-scenario (Tabel 11; van den Hurk et al., 2014). Dit komt vooral door de positieve relatie tussen temperatuur en ozon, maar ook de drogere zomers en veranderingen in atmosfeerstroming spelen hier een rol. Ook gedurende de winter is er een toename van 4 tot 10 %. De vier scenario's projecteren een toename van 50 % tot 400 % in het aantal episodes waar de EU-limiet van $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wordt overschreden. PM₁₀ neemt ook toe in de zomer met 6 tot 16 % door veranderingen in atmosfeercirculatie en iets vaker optreden van windstille condities, terwijl er in de winter nauwelijks veranderingen zijn.

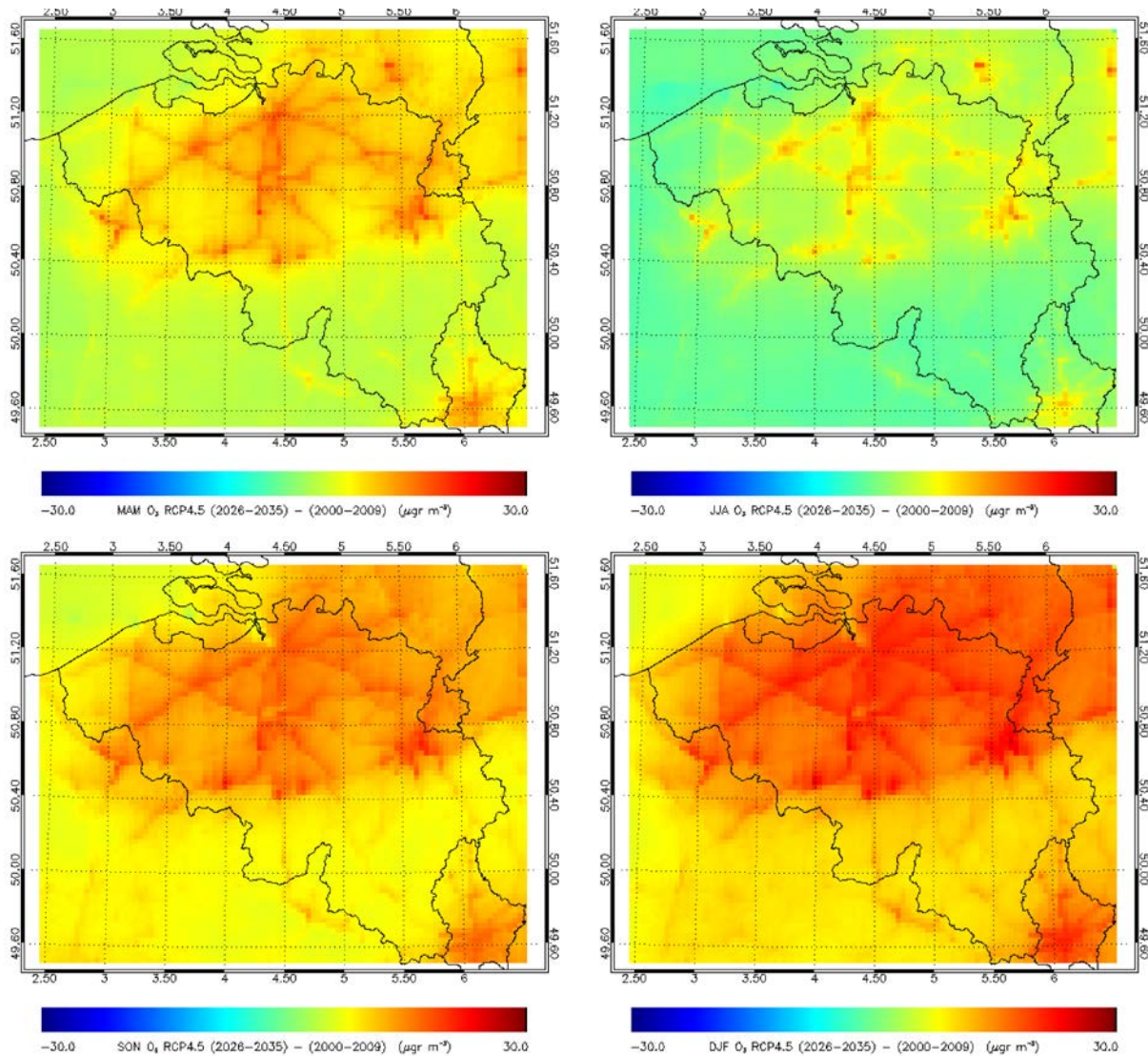
Voor België werden een aantal studies gedaan die naast het effect van klimaatveranderingen ook de geplande emissiereducties in rekening brengen (Deutsch et al., 2011; Lauwaet et al., 2014). Deutsch et al. (2011) gebruikte drie emissie-scenario's namelijk een scenario gebaseerd op huidig beleid (REF), een scenario gebaseerd op de doelstellingen van de 'European Thematic Strategy on Air Pollution' (TSAP), en de 20-20-20 doelstellingen van het 'European Climate and Energy Package' (EUR). Voor de klimaatscenario's gebruikten ze het jaar 2007 om huidige meteorologische condities te representeren en het jaar 2003 (met een erg warme zomer, en in zijn geheel behorend tot de top 10 van warmste jaren sinds de metingen in Ukkel startten) als een analoog voor de toekomst.

De ozonpiek concentraties in Vlaanderen vallen binnen de EU-limiet voor alle emissiescenario's voor de meteorologische condities van 2007 (Deutsch et al., 2011). Echter, wanneer de condities van 2003 een goed analoog zouden zijn voor de toekomst, is minstens een emissiereductie in de lijn van TSAP noodzakelijk om binnen de EU-limiet te blijven. Voor de ozon piekconcentraties blijken de verschillen in de meteorologische condities tussen het jaar 2003 en 2007 veel belangrijker dan de emissiereducties tot 2030. Voor de PM10 dagelijkse limietwaarden zijn deze twee factoren ongeveer even belangrijk.

Het jaar 2003 kan worden opgevat als analoog voor de toekomst, maar is natuurlijk geen klimaatprojectie. Wanneer er met meer realistische toekomstscenario's (CCLM model aangedreven met het RCP4.5 scenario) gewerkt wordt (Lauwaet et al., 2014) blijkt het effect van de klimaatveranderingen kleiner te zijn. Lauwaet et al. (2014) gebruikte de CCLM klimaatscenario's om het luchtkwaliteit AURORA aan te drijven voor de 10-jarige periode rond 2004 (2000-2009) en de 10-jarige periode rond 2030 (2026-2035). Noteer dat de CCLM klimaatscenario's dezelfde zijn als beschreven in dit VMM rapport.

Tegen 2030 moeten we rekenen met een sterke toename (tot 30 %) in ozonconcentraties, vooral dicht bij de wegen en het centrum van de stad (Figuur 33; Lauwaet et al., 2014). Deze stijging is te wijten aan verminderde ozonafbraak door een reductie van NOx emissies. Veranderingen in lokale emissies,

zoals voorgesteld door de Vlaamse administratie, hebben lokaal wel een effect, maar de impact op de gemiddelde ozonconcentraties in Vlaanderen is eerder klein. Deze worden namelijk bepaald door de meer grootschalige achtergrondcondities.



Bron: Lauwaet et al. (2014)

Figuur 33: Veranderingen in ozonconcentraties tegen 2030 voor het RCP4.5 scenario's per seizoen (lente, zomer, herfst, winter)

De resultaten bevestigen deze van Hedegaard et al. (2013) die voor de Benelux een dominant effect van emissiereducties vinden, resulterende in een vermindering van ozonafbraak. De resultaten van van den Hurk et al. (2014) bevestigen eerder werk van Juda-Rezler et al. (2012), die een toename van 10 % voor Europa vonden voor het IPCC A1B scenario aan het einde van de 21^e eeuw door een toename van zomertemperatuur en afname van zomerneerslag. Het is dus waarschijnlijk dat een deel van de emissiereducties in de toekomst teniet zullen worden gedaan door een veranderend klimaat, met name voor de piekconcentraties in ozon (Deutsch et al., 2011; van den Hurk et al., 2014).

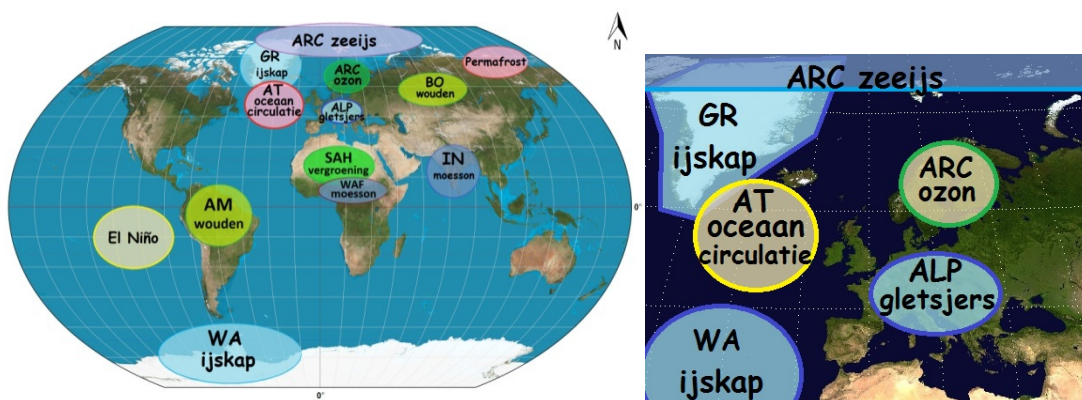
In alle bovenstaande studies werd er geen rekening gehouden met twee effecten die mogelijk een rol spelen: 1) neerwaarts transport van ozon uit de stratosfeer zal op onze breedtegraden wellicht zorgen voor een toename van ozon aan het aardoppervlak en 2) toenemende emissies van polluenten in andere delen van de wereld, met name Azië en Amerika, kunnen mogelijk een effect hebben op de ozonconcentraties in Vlaanderen (van den Hurk et al., 2014).

5. Klimaattransities met een verregaande impact in Vlaanderen

Verschillende elementen in het klimaatsysteem, zoals de ijskappen, zijn zeer gevoelig van aard en reageren daarom sterk op de versturende impulsen die door de mens op het klimaatsysteem worden uitgeoefend. Deze zogenaamde 'Tipping Elementen' (TE-en) reageren disproportioneel sterk op verstoringen, en hebben daarom potentieel een grote impact op onze samenleving. Vaak zijn er zelfversterkende mechanismen in het spel: Een prominent voorbeeld van een dergelijk zelfversterkend mechanisme is de ijs-albedo-terugkoppeling: Een initiële opwarming van de sneeuw of het ijs induceert een regionale smelt. Hierdoor komen donkere oppervlaktes vrij, met name bruinkleurig land of blauwe oceaan. Deze donkere oppervlaktes reflecteren minder zonlicht wat resulteert in een toenemende regionale opwarming, toenemende smelt, enz.

De inschatting van de kans dat een TE een transitie ondergaat is essentieel voor het inschatten van de risico's gerelateerd aan klimaatveranderingen. Traditioneel worden deze transities ingeschat met een kleine kans op voorkomen maar een grote impact op de samenleving. Recent onderzoek toont echter aan dat sommige van deze TE-en nu al transities ondergaan en dat de kans groot is dat deze bij huidige projecties voor globale temperatuurveranderingen zullen optreden (Lenton en Ciscar, 2013; Levermann et al., 2012). Het afgelopen decennium is er veel onderzoek gedaan naar het identificeren van TE-en die een impact hebben wereldwijd (Figuur 34a; Lenton et al., 2008) en in Europa (Figuur 34b; Levermann et al., 2012).

We bespreken hierna de TE-en met impact op Europa en maken de link met Vlaanderen voor zover als momenteel mogelijk.



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

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

Figuur 34: De verschillende tipping elementen (TE-en) in het klimaatsysteem a) met een impact wereldwijd en b) met een impact in Vlaanderen

5.1. De Groenlandse en West-Antarctische ijskappen

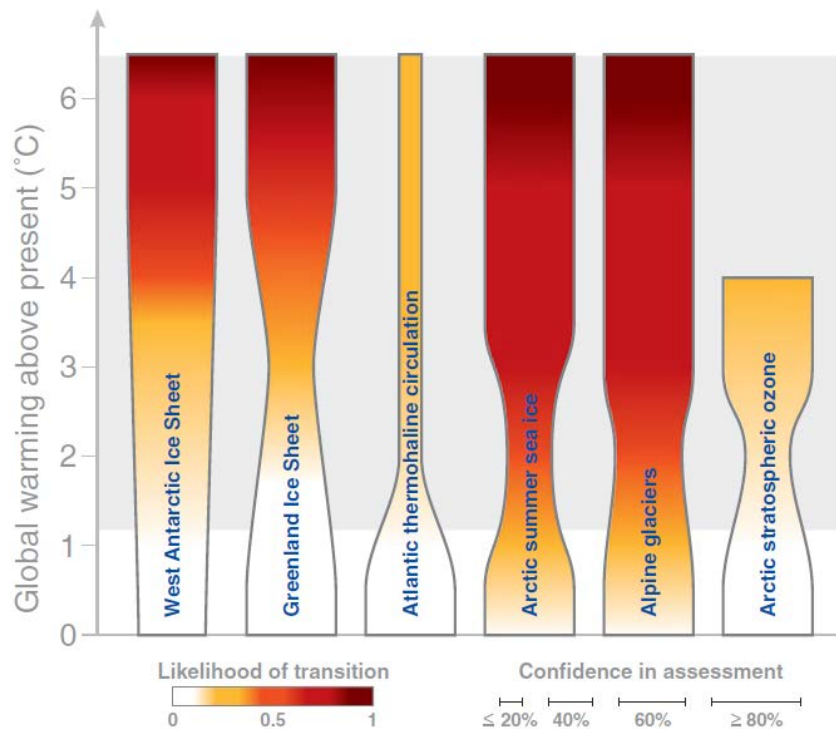
De Groenlandse en Antarctische ijskappen verliezen in versneld tempo massa (Velicogna, 2009). Gedurende het afgelopen decennium heeft de Groenlandse ijskap zes keer zoveel massa verloren als gedurende het voorlaatste decennium. Het gemiddelde verlies over het laatste decennium komt overeen met een zeespiegelstijging van ongeveer 0,6 mm per jaar, en levert daarmee een bijdrage van ongeveer 20 % in de gemiddelde zeespiegelstijging binnen dat decennium (Vaughan et al., 2013). De schattingen voor de West-Antarctische ijskap zijn van dezelfde orde grootte (Velicogna, 2009). Op Groenland wordt dit ijsverlies veroorzaakt door het sneller smelten en het sneller afkalven van het landijs terwijl op West-Antarctica het afkalven domineert (van den Broeke et al., 2009).

Zelfversterkende mechanismen (met name de oppervlakte-hoogte-terugkoppeling) 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.

We moeten tot het Eemien – 130 000 tot 115 000 jaar geleden – terug gaan om een situatie te vinden die warmer was dan de huidige situatie. Tijdens deze periode lag de zeespiegel minstens 4-6 m hoger dan vandaag terwijl in de zomer de temperaturen ‘slechts’ 3 °C tot 6 °C warmer waren dan nu (Sime et al. 2009). Het is duidelijk dat in het verleden het zeeniveau gereageerd heeft op temperatuurveranderingen van enkele graden.

Voor de Groenlandse ijskap geldt dat, wanneer de temperatuur met 2 °C tot 4 °C stijgt boven de pre-industriële niveaus, zelfversterkende mechanismen zullen leiden tot een bijna volledig ijsverlies (equivalent aan een zeespiegelstijging van ongeveer 7 m) (Rea et al., 2012). Een recente studie geeft zelfs indicaties van een lagere drempelwaarde van 1 °C (Robinson et al., 2012). Het IPCC-AR5 laat zien dat deze drempel overschreden zal worden gedurende deze eeuw. Echter, voor een volledige smelt zou gedurende een millennium de temperatuur enkele graden hoger moeten zijn dan de drempel, wat impliceert dat deze smelt niet onomkeerbaar is (Robinson et al., 2012). De maximale snelheid waarmee de Groenlandse ijskap kan desintegreren wordt geschat op 0,54 m zeeniveaustijging equivalent per eeuw (Pfeffer et al., 2008).

Voor de West-Antarctische ijskap is een dergelijke gedetailleerde analyse niet voorhanden. Paleoklimatologische data tonen wel dat de West-Antarctische ijskap ten minste één keer is gedesintegreerd tijdens de afgelopen 750 000 jaar, hoogstwaarschijnlijk ongeveer 400 000 jaar geleden (Scherer et al., 1998). Paleo-klimatologisch bewijs (Naish et al., 2009) in combinatie met modelsimulaties (Pollard & Deconto, 2009) suggereren dat abrupte ijsontladingen hebben plaatsgevonden bij temperaturen die 1-2 °C hoger lagen dan nu. Satellietwaarnemingen tonen aan dat de gletsjers momenteel dunner worden en dat het ijs zich terugtrekt in sommige regio's van West-Antarctica (Pritchard et al., 2009). 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 gezet is (Pritchard et al. 2009). Daarom schatten Levermann et al. (2012) het risico voor West-Antarctica iets hoger in dan het risico voor Groenland (Figuur 35).



De kleuren refereren naar de kans op transitie en de breedte reflecteert de betrouwbaarheid van de inschatting door Levermann et al. (2012).

Bron: Levermann et al. (2012)

Figuur 35: Inschatting van de kans dat de TE-en, 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 meeste dijken kunnen maar beperkt opgehoogd worden (vaak in de ordegrootte van een meter) en er zou een grondige herziening van de infrastructuur nodig zijn om hogere zeeniveauperanderingen op te vangen. De meeste kustlijnen kunnen niet beschermd worden tegen zeeniveauperanderingen van enkele meters (Levermann et al., 2012).

5.2. Arctisch zee-ijs

Levermann et al. (2012) identificeren het Arctische zee-ijs ('Noordpool') en de Alpine gletsjers als de meest kwetsbaar TE-en voor de opwarming van de aarde (Figuur 35). In de periode 1979-2013 daalde de zee-ijsbedekking in het Noordpoolgebied met 43 000 km² per jaar in de winter (gemeten in maart wanneer het totale oppervlak momenteel ongeveer 15 10⁶ km² is) en met 95 000 km² per jaar in de zomer (gemeten in september wanneer het totale oppervlak momenteel ongeveer 6 10⁶ km² is) (Collins et al., 2013). De omvang van de minimale zee-ijsbedekking gedurende september 2012 brak alle september-records (NSIDC, 2012). Een vergelijking met oudere waarnemingen suggereert een halvering van de zee-ijsbedekking sinds de jaren 1950 (Meier et al., 2007). Het Arctische zee-ijs wordt ook steeds dunner en steeds minder zee-ijs overleeft de zomer.

In tegenstelling tot de Arctische gebieden (zee-ijs reageert heel anders dan landijs: landijs reageert niet op de winden, 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 stabiel maken (Zhang, 2014). De meeste klimaatmodellen onderschatten de waargenomen afname in zee-ijsbedekking. Modellen die het beste de waargenomen afname in zee-ijsbedekking representeren, projecteren een aanzienlijk snellere daling voor de toekomst dan de andere modellen. Recente studies, die dit in rekening nemen, suggereren dat voor een RCP8.5-scenario, een vrijwel ijsvrije Noordelijke IJszee in september waarschijnlijk is vóór het midden van de eeuw (Collins et al., 2013; Overland et al., 2013).

Een afname in zee-ijsbedekking heeft grote invloed op Arctische ecosystemen. Bovendien leidt dit tot een verbeterde toegankelijkheid van potentiële bronnen van fossiele brandstoffen in Arctische gebieden, met milieu en geo-politieke implicaties. Mogelijk worden weerpatronen in Europa beïnvloed (Kattsov en Kallen, 2004). Petoukhov en Semenov (2010) vonden een tot drie maal verhoogde kans op extreme kou gebeurtenissen op noordelijke continenten in reactie op de Barentsz-Kara zee-ijs reductie in de winter. Momenteel wordt onderzocht of er door de afname in zee-ijsbedekking, naast extreme warme periodes, ook extreme koude periodes vaker zullen optreden in Europa (Mori et al., 2014).

5.3. Alpine 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 gereduceerd van ongeveer 200-300 km³ in het jaar 1850 tot 90 ± 30 km³ op dit moment (Farinotti et al., 2009). De mummie, die in 1991 in de Ötztaler Alpen werd ontdekt, toont aan dat het afsmelten van de gletsjers de variabiliteit van het klimaat gedurende vele duizenden jaren heeft overtroffen (Solomina et al., 2008). De mummie is namelijk 5 300 jaren oud en kwam pas recent aan het oppervlak. Tot eind jaren negentig werden de Noorse gletsjers nog groter door toenemende neerslag, maar sinds dan heeft zich ook hier een terugtrekking ingezet (Andreassen, 2005).

De Alpine opwarming is ongeveer twee keer zo hoog als het wereldgemiddelde (Auer et al., 2006) en dit komt mede door het zelfversterkend effect van de ijs-albedo-terugkoppeling. Zelfs een mitigerend scenario, waar de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur onder de 2 °C blijft (wat overeenkomend met +3-4 °C in de Alpen) zal leiden tot een bijna volledig verlies van de gletsjers in de Alpen (Zemp et al., 2006) (Figuur 35).

Gletsjers dienen als zoetwater reservoirs en daarom zal een verandering in de ijsmassa van de gletsjers de beschikbaarheid van water beïnvloeden, met name in de zomer. Dit werkt door op de seizoensafhankelijkheid van de waterafvoer in de rivieren zoals de Rijn. Verschillende andere sectoren in Europa zullen sterk beïnvloed worden zoals de waterkrachtproductie (Schaeffli et al., 2007) en het toerisme (Beniston, 2003). Het verlies van ijsmassa van de gletsjers draagt bij aan zeespiegelstijging en het beïnvloedt zoetwatervoorziening, rivierstanden, irrigatie en energieopwekking.

5.4. 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 beschermt tegen huidaanandoeningen, cornea en DNA schade, huidkanker en suppressie van het immuunsysteem doordat deze laag ultraviolette zonnestraling absorbeert (Stick et al., 2006). Het Protocol van Montreal legde in 1987 de uitstoot van CFK's sterk aan banden en sinds 1990 eindigde de neergaande trend in ozonconcentraties. Recent onderzoek toont echter aan dat de mens ook op een andere manier de ozonconcentraties in de stratosfeer beïnvloedt, namelijk 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 aantasting van de ozonlaag versterken door chemische reacties die zich aan het oppervlak van deze wolken afspelen (Weatherhead et al., 2004).

Er is echter zeer grote onzekerheid over de transitie van dit TE, omdat de opwarming van de aarde ook kan leiden tot veranderingen in de luchtstromingen in de stratosfeer met alle gevolgen van dien. Hierdoor kan wellicht warme, ozonrijke lucht naar de Arctische gebieden getransporteerd worden (Schnadt et al., 2002). Omdat de rol van deze veranderingen in luchtstromen nog onduidelijk is zijn er geen schattingen gemaakt voor dit TE potentieel voor transitie na 2060 (Fig 35). Tot 2060 is

het onwaarschijnlijk dat dit TE een transitie zal ondergaan (Fig 35), tenminste als de verdragen die de beperking van de ozon-reducerende chemicaliën worden opgevolgd.

5.5. Atlantische Oceaancirculatie

De Atlantisch ThermoHaliene Circulatie (THC) is onderdeel van een grootschalige oceaancirculatie die bijdraagt aan zachtere winters in Noord-Europa in vergelijking met de regio's van vergelijkbare 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 TE 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 zijnde laag ingeschat, zelfs voor hoge temperaturen (Figuur 35).

Zonder het warmtetransport van de Atlantische oceaancirculatie zou de Noordzee ongeveer 2-3 °C koeler, en de omgevingslucht in Vlaanderen 1-2 °C koeler zijn dan nu het geval is (Vellinga en Wood, 2002). Europa zou lijden aan aanzienlijke droogtes en verminderde neerslag. Bovendien zou het stilvallen van de THC wellicht een (bijkomende) zeespiegelstijging in Vlaanderen teweeg brengen van 10 cm tot 30 cm (Levermann et al., 2005) door een herverdeling van de watermassa's. Deze regionale bijdrage zou komen bovenop de mondiale zeeniveaustijging.

5.6. Indirecte effecten

In bovenstaande tekst werd enkel het directe effect van TE-transities besproken. Er zijn echter ook indirecte effecten van klimaatverandering en TE-transities. We kunnen hier twee vormen onderscheiden. Ten eerste is het klimaatstelsel een gekoppeld systeem en kunnen veranderingen aan de andere kant van de aarde een effect hebben bij ons. Bijvoorbeeld wanneer het permafrost zou dooien, kan dit leiden tot het vrijkomen van methaan en koolstofdioxide door biogeochemische processen. Dit zijn broeikasgassen die versterkt bijdragen aan de mondiale opwarming van de aarde en dus ook in Vlaanderen een effect hebben.

Ten tweede is de wereld een gekoppeld systeem en kunnen socio-economische veranderingen elders een effect hebben bij ons. Bijvoorbeeld, de gletsjers in de Himalaya voeden de rivieren van India, China en de buurlanden. In deze landen wonen meer dan twee miljard inwoners die aangewezen zijn op deze gletsjers 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 economische wereld leven zullen de effecten van mogelijke regionale catastrofes de situatie in Vlaanderen beïnvloeden, al is het momenteel onmogelijk om deze te specificeren.

5.7. Tipping elementen en gevaarlijke klimaatverandering

De tipping elementen (TE) en klimaattransities worden op dit moment slechts in zeer beperkte mate meegenomen in geïntegreerde beoordelingen van de gevolgen van klimaatverandering. De modellen die gebruikt worden voor deze beoordelingen maken op zijn best gebruik van klimaatprojecties van globale klimaatmodellen, die niet noodzakelijk al deze TE-transities meenemen. Dit impliceert dat het risico van klimaatverandering wellicht op dit moment nog wordt onderschat (Lenton en Ciscar, 2013).

Het in rekening brengen van deze transities in geïntegreerde beoordelingen wordt verder bemoeilijkt door de lange tijdschalen waarop deze transities een rol spelen. Zo is er een >50 % kans dat de ijskappen volledig zullen smelten bij een temperatuuroename van 4 °C, maar de tijdschaal waarop de volledige zeeniveaustijging gerealiseerd wordt, wordt ingeschat in de orde van grootte van millennia. Levermann et al. (2013) schatten voor een temperatuuroename van 4 °C een zeeniveaustijging van 5,7 tot 12,1 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 (Grant et al., 2012). 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 gang is getreden het nog moeilijk te stoppen zal zijn.

De noodzaak tot het vermijden van gevaarlijke klimaatverandering (Schellnhuber et al., 2009) werd aangenomen als een doelstelling van de UNFCCC in het jaar 1992. Een evaluatie van deze gevaarlijke veranderingen, vooral de waarschijnlijkheid van potentieel van een transitie van een TE, is wetenschappelijk uitdagend: Natuurlijke variabiliteit van het klimaat bemoeilijkt zelfs de detectie van de TE-en die op dit moment in transitie zijn. Echter een evaluatie van deze waarschijnlijkheden is cruciaal voor toekomstige maatschappelijke, politieke en economische beslissingen. Gezien geassocieerde risico's, moet de deels onvolledige kennis worden benut om inzicht te bieden op basis van de beschikbare kennis van het klimaatsysteem en hoe dit systeem kan evolueren (Figuur 35 op basis van Levermann et al., 2012). Een dergelijke beoordeling zal per definitie altijd voorlopig zijn en de evaluatie zal verder evolueren wanneer nieuwe wetenschappelijke kennis ter beschikking komt.

6. Hoe omgaan met de grote onzekerheden in de klimaatprojecties?

De grote onzekerheden in de toekomstige klimaatverandering mogen geen reden zijn voor het uitstellen van klimaatadaptatie. Wel wordt aanbevolen om bij nieuwe of gewijzigde beleids- of beheersplannen of ontwerpen van nieuwe infrastructuur rekening te houden met de potentiële toekomstige klimaatverandering. Het waarom ervan en wanneer wel en wanneer niet, kan via het risicoconcept worden verduidelijkt. Het technisch 'risico' (van bepaalde gebeurtenissen; meteorologische gebeurtenissen of klimaatevoluties in dit geval) wordt gekwantificeerd als de convolutie (vermenigvuldiging van alle mogelijke combinaties) van 'kans op voorkomen' van de gebeurtenissen met de 'gevolgen' van deze gebeurtenissen. Indien ofwel de kans groot is, ofwel de gevolgen, of beide, kan het risico groot zijn, en is het belangrijk om met de gebeurtenissen rekening te houden. In het geval van de klimaatscenario's is het belangrijk te vermelden dat de precieze kans op voorkomen van de klimaatscenario's niet gekend is. Ze is ook uiterst moeilijk in te schatten. Maar wat wel kan gebeuren is het berekenen van de gevolgen van de klimaatscenario's. Daarvoor worden impactmodellen gebruikt, zoals die courant voorhanden zijn binnen de verschillende beleidsdisciplines. Binnen het waterbeheer, bijvoorbeeld, bestaan er hydrologische en hydrodynamische rivier- en rioleringsmodellen. Binnen de landbouw zijn er gewasgroei modellen en modellen die de landbouwopbrengst kwantificeren onder bepaalde beheers- en weerscondities. Om de volksgezondheid inzake luchtverontreiniging te beheersen zijn er luchtkwaliteitsmodellen voorhanden. Enzovoort. Indien de klimaatscenario's in deze impactmodellen (of in andere tools voor de inschatting van de impact) worden doorgerekend, wordt een (al dan niet nauwkeurige of grootteorde) inschatting bekomen van de concrete 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 wij in dat scenario terecht komen – rekening te houden met dat potentieel scenario in de beleidsvoering en het beheer. Het zou van onverantwoord gedrag getuigen om dat niet te doen; net zoals wij als goede huismoeder of huisvader onze kinderen verbieden om risicovolle zaken te doen, allerhande verzekeringen nemen (ook al is de kans op voorkomen klein, vb. brand, ongevallen), enz. Enkel indien de gevolgen van een bepaald klimaatscenario niet belangrijk zijn, hoeft men zich 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 gehouden wordt? De kans op voorkomen is immers niet gekend. Dit kan gebeuren door beleids- en beheersbeslissingen, en bijhorende maatregelen en technische ontwerpen, zo te nemen/maken dat ze 'no regret' en 'climate proof' zijn. Dat gebeurt door – in het licht van de grote onzekerheden – ze flexibel-adaptief en duurzaam te maken.

Adaptief maken betekent dat men de mogelijkheid voorziet om later – indien zou blijken dat het klimaat in de richting van een zeer nadelig klimaatscenario opschuift – aanpassingen aan te brengen (liefst met zo beperkt mogelijke kost). Er moet worden voorkomen dat aanpassingen worden gedaan die verdere bijstellingen in de toekomst (zie de klimaatscenario's) onmogelijk of extra duur zou kunnen maken. Dit vereist het introduceren van een hoge mate van flexibiliteit in beheersmaatregelen en bijhorende technische ontwerpen. Uiteraard wordt hierbij ook best rekening gehouden met de toekomstperioden van de verschillende klimaatscenario's in vergelijking met de levensduur van de aanpassingen (vb. technische ontwerpen).

Duurzaam maken betekent dat beslissingen worden genomen die effectief zijn in elk klimaatscenario; dus die kosten-efficiënt zijn onafhankelijk van hoe het toekomstig 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 sowieso 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, kortetermijn-, niet duurzame oplossingen volstaan dan vaak niet meer, en daarom dient men op zoek te gaan naar meer intelligente, meer geavanceerde, meer structureel ingrijpende oplossingen die ook op de lange termijn duurzaam zijn. Ook bewustmaking en -wording bij de bevolking wordt dan belangrijk (zie ook verder).

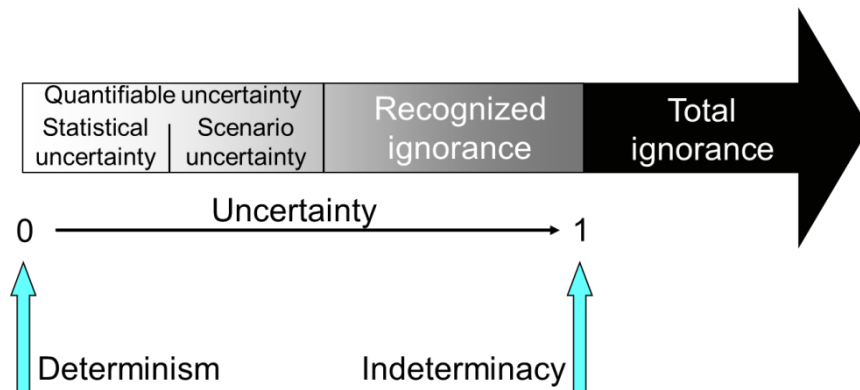
Om deze principes wat concreter te maken worden hierna enkele voorbeelden gegeven uit de sector van het overstromingsbeheer. Flexibel ontwerpen betekent dat er niet langer, zoals klassiek in de waterbouwkunde gebeurde, met vaste ontwerpregels (die gemiddeld in alle omstandigheden beste ontwerpen geven) wordt gewerkt, maar men meer rekening houdt met de onbekende tijds- en plaats-specifieke factoren en meer accepteert 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 gedragen worden door en gebaseerd worden op kennis van alle betrokken partijen in de maatschappij. Bij stedelijke hydrologie, dat 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) bijkomende afkoppeling van regenwater, bijkomende berging, bijkomende pompcapaciteit, enz. te realiseren. Voorbeelden van duurzame maatregelen zijn bronmaatregelen (regenwater meer opwaarts afkoppelen en vasthouden, laten infiltreren, vervuiling tegengaan, enz.). Dit vraagt structurele aanpassingen, zoals grondige herziening van de stedenbouwkundige wetgeving, betere afstemming tussen stedelijk waterbeheer en ruimtelijke ordening, stadsplanning, landbeheer, landbouw, groenbeheer, recreatiebeheer, beheer van de sportinfrastructuur, enz. Het vraagt ook een mentaliteitswijziging bij de bevolking (of 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 (vb. aanleg buffer- of wachtbekkens, aanpassing stuwen, door overheidsdiensten) volstaan dan niet meer. Bronmaatregelen zoals opwaartse afkoppeling van afstromend regenwater van de regenwaterriool en het zo veel als mogelijk laten infiltreren van dit regenwater in publieke en private open ruimtes, ook in de stedelijke omgeving, zijn sowieso kosten-efficiënt, onafhankelijk van de klimaatevoluities. Ze gaan immers ook de waterbeheer- en andere problemen tegen als gevolg van de sterke urbanisatie (vb. toenemende verharding). Ze verminderen echter niet enkel de overstromingsrisico's maar gaan ook de evoluities naar lagere waterbeschikbaarheid voor drinkwater, landbouw en industrie tegen (problematiek van verdroging en dalende grondwaterstanden), geven meerdere functies aan open ruimtes (beter beheer van de schaarse open ruimte), enz. Bronmaatregelen zijn dus een goed voorbeeld van maatregelen die in ieder geval – welke de klimaatevoluities ook zullen zijn – zeer nuttig zijn, door niet enkel de negatieve gevolgen van de klimaatverandering tegen te gaan maar ook die bij de andere evoluities zoals urbanisatie.

Uiteraard dient men in de toekomst de klimaatevoluities continu op te volgen en bij significant veranderende trends de klimaatprojecties bij te stellen (hopelijk gepaard gaande met verkleinde onzekerheden).

Hier kan ook nog aan toegevoegd worden dat de klimaatscenario's, zoals beschreven in Deel 3 van dit rapport, en de potentiële gevolgen, zoals samengevat in Deel 4, een bereik omspannen waarvan verwacht wordt dat ze de toekomstige werkelijkheid met hoge waarschijnlijkheid omvatten. Met kan echter nooit zeker zijn van deze werkelijkheid. 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 Deel 5 van dit rapport). Met deze verregaande transities is bij de opmaak van de klimaatscenario's geen rekening gehouden. Het is onmogelijk en ook niet nodig 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, dus dat de toekomst met een bepaalde, maar nog onbekende (hopelijk kleine) kans nog extremer kan zijn dan wat de huidige klimaatscenario's aangeven.

Figuur 36 geeft aan dat er verschillende soorten onzekerheden zijn. De statistische onzekerheden zijn deze die statistisch kwantificeerbaar zijn, dus waar kansen kunnen toegekend worden aan schattingswaarden, bijvoorbeeld omdat er metingen beschikbaar zijn om deze kansbepaling door te voeren. Omdat het toekomstig klimaat zich nog niet heeft voorgedaan, zijn er echter nog geen metingen beschikbaar, en kunnen de onzekerheden op het toekomstig 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, maar zijn eerder indicatief. De (klimaat)scenario's

stellen hypothetisch toekomstige toekomstevolaties 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.



Bron: Willems (2012)

Figuur 36: Illustratie van de soorten onzekerheden van het ideaal waarbij alles gekend is (links) tot volledige onbekendheid (rechts)

Naast de kwantificeerbare onzekerheid zijn er nog andere onzekerheden die niet-quantificeerbaar 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 (bijvoorbeeld onder wijzigende klimaatomstandigheden). Van bepaalde onzekerheden zijn wij ons bewust, zoals de mogelijke processen en terugkoppelingsmechanismen opgesomd in Deel 5 van dit rapport. Wij kunnen er wel niet expliciet mee rekening houden in het beleid ('ignorance' in Figuur 36), want ze zijn geheel onvoorspelbaar, maar het is op zich wel goed dat wij er ons van bewust zijn dat ze bestaan ('recognized ignorance' in Figuur 36, ook wel eens 'accepted ignorance' genoemd). Mogelijks zijn er nog andere onzekerheden, die nog niet staan vermeld in Deel 5, dus waar wij ons nog niet van bewust zijn. Deze worden dus geheel niet beschouwd ('total ignorance' in Figuur 36). 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 toekomstig klimaat kan opgedeeld worden in een kwantificeerbaar gedeelte (zie de kwantificeringen in Deel 3 en Deel 4) en een niet-quantificeerbaar gedeelte. In het niet-quantificeerbaar gedeelte maken wij verder een onderscheid tussen gebrek aan kennis waarvan wij ons realiseren dat ze bestaat (zie Deel 5), of – in andere woorden – waarvan 'wij weten dat wij niet weten', en andere onzekerheden waarvan wij 'niet weten dat wij niet weten'.

Gebaseerd op onze klimaatkennis en modellen kan onze kennis over het (toekomstig) klimaat variëren van volledig gekend of 'bepaald' ('determinism' in Figuur 36) tot volledig 'onbepaald' (nul vertrouwen, 'indeterminacy' in Figuur 36). Onafhankelijk van ons niveau van vertrouwen, kunnen wij juist of verkeerd zijn als gevolg van het 'verwaarlozen' van bepaalde zaken (vb. processen of terugkoppelingsmechanismen). En mogelijks 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 (van der Sluijs et al., 2003), en dat is wat er in Deel 5 van dit rapport werd gedaan.

7. Conclusies

Klimaatprojecties voor de toekomst tonen wereldwijd een sterke stijging van de temperatuur en een toename in het voorkomen van klimatologische extremen zoals extreme regenval en lange droge perioden. Dit zal ecologische en economische gevolgen hebben, zoals reducties in de ijsmassa's op Groenland en Antarctica, zeespiegelstijging, meer overstromingen, zowel langs rivieren als rioleringen, maar ook meer tijdsvariatie van de neerslag, met langere droge periodes en meer neerslag gedurende natte periodes ...

Recent heeft het IPCC nieuwe klimaatprojecties gepresenteerd in haar vijfde 'assessment report', kortweg AR5 (IPCC, 2013). Deze projecties zijn gebaseerd op een groot aantal klimaatmodelsimulaties, gebruik makend van een nieuw type scenario's: de zogenaamde RCP-broeikasgasscenario's. Ook is er een nieuwe generatie aan mondiale en regionale klimaatmodellen beschikbaar gekomen (CMIP5, EURO-CORDEX). Voor deze studie waren er voor België een 200-tal mondiale klimaatmodelsimulaties beschikbaar, en een 10-tal regionale Europese klimaatmodellen. Door de grove ruimtelijke resolutie van deze modellen werden enkel de resultaten geanalyseerd van de gridcel die het hoofdmeteorologisch station van het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) te Ukkel bestrijkt. Deze analyse gebeurde voor alle RCP-broeikasscenario's (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 en RCP8.5), die gebaseerd zijn op verhaallijnen voor de socio-economische ontwikkelingen op wereldniveau.

Naast deze mondiale en regionale klimaatmodellen implementeren het KMI en de KU Leuven hoge resolutie klimaatmodellen voor België, tot een ruimtelijke resolutie van 3 km. Deze klimaatprojecties worden gebruikt om andere modellen aan te drijven zoals bijvoorbeeld het luchtkwaliteitsmodel van het KMI en van VITO. De hoge ruimtelijke resolutie is noodzakelijk om de kleinschalige processen, zoals bijvoorbeeld lokale convectieve regenbuien (de extreme zomeronweders) expliciet en nauwkeurig te modelleren. De simulatieresultaten met de fijnmazige modellen laten ook toe om de regionale verschillen in België en Vlaanderen grondiger te onderzoeken.

Nieuwe klimaatscenario's werden afgeleid na statistische analyse van de beschikbare modeloutput. Dit hield twee hoofdstappen in:

1. valideren van de nieuwe klimaatmodelresultaten door vergelijking met de historische waarnemingen te Ukkel voor een historische periode (die is standaard 1961-1990);
2. berekenen en statistisch analyseren van het klimaatveranderingssignaal door vergelijking van de simulatieresultaten voor een toekomstperiode (standaard 2071-2100) met deze van de historische periode; en herschalen van dit klimaatveranderingssignaal naar perioden van 30, 50 en 100 jaar.

Ook werd een vergelijking gemaakt met de vorige klimaatscenario's, zoals opgenomen in de vorige MIRA 2009 milieuverkenning. Conform de MIRA 2009 rapportering, werden uit het breed bereik aan klimaatmodelprojecties 3 klimaatscenario's (hoog, midden, laag) gedistilleerd. De hoge en lage klimaatscenario's stellen dus pessimistische (voor het hoge klimaatscenario) en optimistische (voor het lage klimaatscenario) klimaatprojecties voor, en dit binnen de huidige set aan 'plausibele' klimaatmodelprojecties voor de toekomst. Tabel 12 geeft een samenvattend overzicht van de resultaten.

Tabel 12: Samenvattend overzicht van de gevolgen van de klimaatverandering voor Vlaanderen, volgens het laag, midden en hoog klimaatscenario over 30, 50 en 100 jaar

verandering voor	over aantal jaar	laag	midden	hoog	bijkomende info (elementen rond extremen, ruimtelijke patronen, tipping elements)
jaargemiddelde temperatuur	30	+0,2 °C	+1,1 °C	+2,2 °C	ruimtelijk: de kust heeft een tempererende werking op de opwarming, maar effect is klein t.o.v. klimaatverandering
	50	+0,3 °C	+1,8 °C	+3,6 °C	
	100	+0,7 °C	+3,7 °C	+7,2 °C	
gemiddeld aantal extreme warme dagen per jaar	30	0	5	19	ruimtelijk: aantal extreem warme dagen neemt het sterkst toe in het centrum van België
	50	0	8	32	
	100	0	16	64	
gemiddeld aantal extreme koude dagen per jaar	30	0	-2	-10	ruimtelijk: 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 %	ruimtelijk: sterker toenemend langs de kust
	50	-0,6 %	+6 %	+19 %	
	100	-1 %	+12 %	+38 %	
totale zomerneerslag	30	-16 %	-4 %	+5 %	extreme zomerneerslagintensiteiten kunnen sterk stijgen ruimtelijk: noord-zuid patroon 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 %	

Statistische analyse van het klimaatveranderingssignaal voor Ukkel (deel 2 van het rapport), toont voor de temperatuur een jaargemiddelde temperatuurstijging tussen 0 °C en 7,2 °C over een periode van 100 jaar. Maandgemiddeld variëren de temperatuurstijgingen van maand tot maand. Voor de wintermaanden zijn deze kleiner dan voor de jaargemiddelde temperatuurtoename: 0 °C-6,2 °C: en voor de zomermaanden groter: 0 °C-8,9 °C. Wat de temperatuurextremen betreft, neemt het aantal extreem warme dagen met een daggemiddelde temperatuur boven de 25 °C toe met 0 à 64 dagen gemiddeld per jaar. Het aantal extreem koude dagen met een daggemiddelde temperatuur onder de

0 °C neemt af met 1 à 33 dagen gemiddeld per jaar. De kust heeft een temperende werking op de opwarming, maar dit effect is klein ten opzichte van het klimaatveranderingssignaal. Het aantal dagen warmer dan 25 °C neemt het sterkst toe in het centrum van België, terwijl het aantal dagen kouder dan 0 °C het sterkst afneemt in de Ardennen. Het klimaatveranderingssignaal in Vlaanderen is sterk afhankelijk van het de mondiale emissies van broeikasgassen. Zowel wereldwijd als voor Vlaanderen, is de temperatuuroptocht ongeveer dubbel zo groot voor het RCP8.5-scenario in vergelijking met het RCP4.5 scenario. Ook zijn de te verwachten neerslagveranderingen groter voor de hogere RCP-scenario's.

Wat de neerslag betreft, neemt de totale neerslaghoeveelheid in de winter toe en in de zomer voor het midden en laag scenario af. De gemiddelde verandering in de winterneerslag varieert over een periode van 100 jaar tussen ongeveer 0 % en +38 %. Voor de zomermaanden varieert de gemiddelde neerslagverandering tussen -52 % en +18 %. De afname in zomerneerslag voor het midden en laag scenario is het gevolg van een reductie in het aantal natte dagen in de zomer (15 % afname gemiddeld voor de zomermaanden voor het midden scenario; 41 % afname voor het laag scenario). Ondanks de afname in de totale zomerneerslaghoeveelheid, blijkt dat de zomerextremen sterk kunnen toenemen. Deze toename stijgt met grotere terugkeerperiode. Voor de winterperiode is de verandering in neerslagextremen minder afhankelijk van de terugkeerperiode. Voor Vlaanderen worden er verschillen gevonden tussen de kust (polderstreek) en het Vlaamse binnenland. De neerslagvolumes zijn in de winter sterker toenemend langs de kust. In de zomer is er dan eerder een noord-zuid patroon te zien met een grotere verdroging in het zuiden van het land. Dit is consistent met de Europese veranderingen die een toename van neerslag laten zien in Centraal- en Noord-Europa en een afname in Zuid-Europa. In de meeste fijnmazige klimaatmodellen neemt ook de extreme neerslag (dagelijkse neerslag groter dan 10 mm) toe met name in het noorden van België.

De potentiële evapotranspiratie neemt bij alle scenario's en zowel in winter als zomer toe. De toename bedraagt gemiddeld voor de winter tussen +2 % (dus ongeveer huidig klimaat) en +35 %, en gemiddeld over de zomerperiode tussen +2 % (huidig klimaat) en +47 % over 100 jaar. Dit is het gevolg van de toename in temperatuur in combinatie met een toename van de netto inkomende zonnestraling (totale inkomende min de – door het aardoppervlak weerkaatste – uitgaande straling). Veranderingen in de windsnelheid zijn voor Vlaanderen in het algemeen niet significant en er is grote onzekerheid over het teken van de verandering. Ook zijn de veranderingen in de windrichting klein. Voor de extreem hoge windsnelheden is het wel waarschijnlijk dat deze zullen toenemen.

Het rapport (Deel 4) illustreert verder dat, naast de klimaatprojecties tot eind van deze eeuw, ook wetenschappelijke kennis beschikbaar is over klimaattransities met verregaande gevolgen voor Vlaanderen. Dit komt omdat bepaalde elementen in het klimaatsysteem, zogenaamde tipping elementen, disproportioneel sterk reageren op een verstoring. Zo kan een bepaalde wijziging in het klimaat een kettingreactie teweeg brengen en abrupte klimaattransities veroorzaken. Enkele voorbeelden hiervan zijn het desintegreren van de Groenlandse of West-Antarctische ijskap, verlies van Arctisch zee-ijs, verdwijnen van de Alpine gletsjers, enz. In de huidige geïntegreerde beoordelingen van de gevolgen van de klimaatverandering, worden deze klimaattransities slechts in beperkte mate meegenomen. De reden hiervoor is dat de huidige generatie klimaatmodellen niet noodzakelijk al deze tipping elementen goed representeren. Een betere evaluatie van de waarschijnlijkheden van deze klimaattransities zal evolueren wanneer nieuwe wetenschappelijke kennis beschikbaar komt. De onvolledige kennis zal echter nu al zoveel mogelijk moeten worden meegenomen bij toekomstige maatschappelijke, politieke en economische beslissingen, zeker in het licht van het vermijden van gevaarlijke klimaatverandering, dat werd aangenomen als doelstelling van het klimaatverdrag (of UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) in 1992. Het staat namelijk wel vast dat de kans op deze abrupte klimaattransities groter wordt naar mate de mondiale opwarming van de aarde stijgt. Emissiereducties mitigeren de klimaatverandering en zullen dus het risico op de abrupte klimaattransities doen dalen.

De gevolgen van deze klimaatscenario's voor de verschillende sectoren zijn voor Vlaanderen nog niet uitgebreid gekend. Voor een aantal sectoren zijn er wel enkele concrete kwantificeringen uitgevoerd. Deze zijn nog gebaseerd op de vorige scenario's, maar het lijkt erop dat de nieuwe scenario's tot zeer gelijkaardige conclusies gaan leiden (zie Deel 3 van dit rapport). De gevolgen voor de waterhuishouding wijzen op een daling van de laagste zomerdebieten langs Vlaamse rivieren tot 60 % à 70 % over een toekomstperiode van 100 jaar. Deze evolutie naar meer verdroging is problematisch. Vlaanderen is immers zeer kwetsbaar voor deze toenemende verdroging door de lage waterbeschikbaarheid als gevolg van de hoge bevolkingsdichtheid. Langere droge zomerperioden

zorgen voor lagere oppervlaktewater-beschikbaarheid voor drinkwaterproductie, industriële productieprocessen en de landbouw. Ook de scheepvaart zal meer gehinderd worden, het zoutbezwaar zal toenemen (hogere chlorideconcentraties, vb. langs het kanaal Gent-Terneuzen) en de waterkwaliteit zal door de verminderde verdunning verslechteren. Dat laatste verhoogt de kosten voor de drinkwaterproductie door de sterkere zuivering die nodig is van het oppervlaktewater tot drinkwater. Klimaatadaptatie inzake verdroging en laagwater dringt zich daarom op. Gerelateerd aan deze verdroging, zullen de grondwaterstanden in de Vlaamse stroomgebieden sterk wijzigen: grondwaterdalingen in de zomer, grondwaterstijgingen in de winter. Deze wijzigen zijn wel sterk variabel, met kleinere wijzigingen in de lagergelegen valleigebieden en sterkere in de hoger gelegen gebieden. Voor het einde van de zomerperiodes of de herfst worden voor bepaalde Vlaamse stroomgebieden dalingen in grondwaterhoogte (piëzometrische stijghoogte) tot 10 % gesimuleerd. Ook de waterbeschikbaarheid in de bodem (bodemvochtgehalte) zal wijzigen. Dit kan significante gevolgen hebben voor de gewasgroei en de landbouw, niet enkel door de wijzigende waterbeschikbaarheid in de bodem maar ook door de toenemende CO₂-concentraties in de atmosfeer. De eerstkomende decennia resulteert dit voor Vlaanderen in een stijging van de gewasopbrengst en de overeenkomstige biomassa, vooral als gevolg van de toenemende CO₂-concentraties die de waterproductiviteit (opbrengst voor eenzelfde waterbeschikbaarheid) doet toenemen. Op de langere termijn worden de (negatieve) effecten als gevolg van extremere temperatuur- en neerslagepisodes belangrijker.

De invloed van de klimaatscenario's op de piekafvoeren langs Vlaamse rivieren is minder duidelijk en sterk afhankelijk van het precieze klimaatscenario. Bij het hoog klimaatscenario stijgen de piekafvoeren langs de Vlaamse rivieren tot meerdere tientallen % over 100 jaar (30-tal % voor grotere rivieren, hoger voor kleine waterlopen). Langs rioleringsstelsels kunnen overstromingen zich over een toekomstperiode van 100 jaar tot 2 keer zo vaak voordoen. Voor bufferbekkens of andere bronmaatregelen (vb. regenwaterputten) is er bij het hoog klimaatscenario voor de zomer (meest extreme zomeronweders) 15 % tot 35 % bijkomende bergingscapaciteit nodig om de overlaat- of overstortfrequentie op het huidig niveau te behouden. De precieze socio-economische en ecologische gevolgen van de wijzigende klimaatcondities zijn moeilijk te kwantificeren, maar eerste studies wijzen op grote potentiële gevolgen. Zo werden voor wijzigende piekafvoeren langs Vlaamse rivieren in het binnenland, stijgingen gekwantificeerd van het economisch overstromingsrisico tot 33 % (of meer in combinatie met wijzigend landgebruik) voor het Vlaamse niveau.

Langs de kust, het Schelde-estuarium, het stroomgebied van de IJzer en de polders verhoogt het overstromingsrisico's door de zeespiegelstijging en (minder belangrijk) het wijzigend windklimaat. Het windklimaat bepaalt het stormopzet. Voor de IJzer, de polders en andere rivieren zoals de Dender zorgt de zeespiegelstijging voor een beperking van de uitwateringsmogelijkheden. Voor deze gebieden en het Schelde-estuarium worden de overstromingscondities bovendien bepaald door een samenspel van het stormopzet langs de kust en de toename in bovendebieten, als gevolg van wijzigende neerslag in het binnenland. Voor een deel van de Schelde, de IJzer, en de polders en wateringen treden de hoogste waterpeilen immers op als gevolg van het samengaan van hoog stormopzet en hoge bovendebieten. Om het gewenste veiligheidsniveau te halen zijn er, naast het nieuwe Sigmaphan, een groot aantal bijkomende overstromingsgebieden vereist, naast dijkverhogingen.

Naast de klimaatverandering zijn er evoluties in landgebruik waaronder urbanisatietrends, die via de socio-economische scenario's aan de klimaatscenario's gekoppeld zijn. De gevolgen van een hoog landgebruiksscenario zijn voor Vlaanderen minder groot dan voor het hoog klimaatscenario, maar piekafvoeren kunnen voor een hoog landgebruiksscenario langs Vlaamse waterlopen tot meer dan 10 % stijgen.

Een belangrijke uitdaging zal er in bestaan om het beheer in de verschillende sectoren (ruimtelijke ordening, waterbeheer, landbouw, volksgezondheid incl. luchtkwaliteit, scheepvaart, natuurbeheer, enz.) aan te passen aan deze wijzigende klimaatomstandigheden. In de beschrijving van de klimaatscenario's bleek dat de toekomstige klimaattevoeltes aan grote onzekerheden onderhevig zijn. Dit betekent dat het aangepast beheer niet kan uitgaan van precieze, deterministische toekomsttevoeltes. Door die onzekerheden bestaat er het gevaar dat beleidsmakers en beheerders de waarschuwing voor toekomstige klimaatverandering negeren. Dit zou een verkeerde reactie zijn. Zoals ook in andere domeinen, zoals demografische evoluties waaronder bevolkingsveroudering, veilig stellen van de pensioenen, verzekeringen, enz., houden beleidsmakers en beheerders best rekening met de toekomstprojecties inzake klimaatverandering. Dit gebeurt best door de beschikbare

klimaatscenario's in rekening te brengen, de impacts van deze scenario's op de verschillende sectoren te kwantificeren en bij potentieel grote gevolgen het voorzorgsprincipe te hanteren. De principes van risicobeheer volgend, is er nood aan duurzame adaptatiestrategieën, die op lange termijn kosten-efficiënt zijn in elk klimaatscenario. Deel 6 van dit rapport gaf enkele voorbeelden daarvan vanuit de waterbeheersector.

Voor de technische details bij al de cijfers die in dit MIRA hoofdrapport werden samengevat, wordt de lezer verwezen naar de **3 technische bijlagen** (Engelstalig) die dit hoofdrapport vergezellen:

- Appendix 1: Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen
- Appendix 2: Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5) en actualisatie klimaatscenario's
- Appendix 3: Ruimtelijke patronen voor België op basis van Europese en Belgische fijnmazige klimaatmodellen

8. Referenties

- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, Ch., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*; 27(1), 17–46.
- Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., Ntegeka, V., 2009. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theoretical and Applied Climatology*: 99(3-4), 273-286.
- Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., Ntegeka, V., 2010. Climate change and hydrological extremes in Belgian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*: 7, 5033-5078.
- Ballester, J., Robine, J., Herrmann, F.R., Rodo, X. 2011. Long-term projections and acclimatization scenarios of temperature-related mortality in Europe. *Nature Communications*: 2(1), Article number 358.
- Ban, N., Schmidli, J., Schaer, C., 2014. Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*: 119 (13), 7889-7907.
- Beniston, M., 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*: 59, 5–31.
- Boukhris, O., Willems, P., Vanneville, W. 2008. The impact of climate change on the hydrology in highly urbanized Belgian areas. In: *Water & Urban Development Paradigms: Towards an integration of engineering, design and management approaches*, J.Feyen, K.Shannon, M.Neville (ed.), CRC Press, Taylor & Francis Group, 271-276.
- Brisson, E., Demuzere, M., Willems, P., van Lipzig N., 2014a. Assessment of natural climate variability using a weather generator. *Climate Dynamics*: doi:10.1007/s00382-014-2122-8.
- Brisson, E., M. Demuzere, and N.P.M. van Lipzig, 2014b. A study on modelling strategies for performing convective permitting climate simulations using the COSMO-CLM over a mid-latitude coastal region: *Meteorologische Zeitschrift* (minor revisions).
- Brisson, E., K. Van Weverberg, M. Demuzere, A. Devis, S. Saeed, M. Stengel, and N.P.M. van Lipzig, 2014c. How well does a convection permitting model reproduce decadal statistics of precipitation temperature and cloud characteristics? To be submitted to *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Broekx, S., Smets, S., Liekens, I., Bulckaen, D., De Nocker, L., 2011. Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach. *Natural Hazards*: 57(2), 245-266.
- Brouwers, J., Peeters, B., Willems, P., Deckers, P., De Maeyer, Ph., De Sutter, R., Vanneville W. 2009. MIRA 2009: Milieuverkenning 2030, Hoofdstuk 11 'Klimaatverandering en waterhuishouding', Milieuraapport Vlaanderen, Vlaamse Milieumaatschappij, 283-304.
- Ciscar, J.C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: 108(7), 2678-2683.
- CIW, 2012. *Herziene Code van Goede Praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringsystemen*. Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid (CIW), augustus 2012; <http://www.integraalwaterbeleid.be/nl/publicaties/code-goede-praktijk-rioleringsystemen>.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *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. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf.
- Corobov, R., Sheridan, S., Opopol, N., Ebi, K., 2012. Heat-related mortality in Moldova: the summer of 2007. *International Journal of Climatology*: 33(11), 2551-2560.
- Crump, D., Dengel, A., Swainson, M., 2009. *Indoor Air Quality in Highly Energy Efficient Homes - A Review*. (NF18). NHBC Foundation, IHS BRE Press, Milton Keynes, United Kingdom, pp. 1-84.
- Dams, J., Salvadore, E., Van Daele, T., Ntegeka, V., Willems, P. & Batelaan, O. 2012. Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. *Hydrology and Earth System Sciences*: 16(5), 1517-1531.

- De Meester, Luc, Jan Lenaerts, Johan Eyckmans, Tom Peter Jones, Sandra Rousseau, Nicole van Lipzig en Olivier Honnay, 2015. Biodiversiteit en global change. In: 'Hoe word ik Einstein of Da Vinci? Een inleiding tot wetenschappen vandaag voor de homo universalis van morgen.' LannooCampus (in press).
- De Nocker, L., Broekx, S., Liekens, J., Bulckaen, D., Smets, S., Gauderis, J., Dauwe, W., 2006. Cost-benefit analysis to select the optimal flood protection strategy along the Scheldt. *Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*, Transaction: Ecology and the Environment, 91, Eds. V. Popov, C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK.
- 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.
- De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J. & Willems, P., 2012. Vergelijking van buffering op- en afwaarts langs de riolering en waterloop. Een kwantitatieve studie voor Turnhout. *WT-Afvalwater*, jaargang 12, nr.5, 346-359.
- De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Nolf, C., Wolfs, V., De Meulder, B., Shannon, K. & Willems, P., 2014. Green - blue water in the city: quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods. *Water Science and Technology*, doi:10.2166/wst.2014.306.
- Deutsch, Felix, Frans Fierens, Nele Veldeman, Charlotte Vanpoucke, Line Vancraeynest, Myriam Bossuyt, Stijn Janssen, 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.
- Devis, A., M. Demuzere and N.P.M. van Lipzig, 2014. Future changes in wind power potential over Europe from a Earth System Model ensemble. To be submitted in *Journal of Climate*.
- Dolarin, M., Vidrih, B., Kajfež-Bogataj, L., Medvec, S. 2010. Predicted changes in energy demands for heating and cooling due to climate change. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(1-2), 100-106.
- Donat, M.G., et al., 'Future Changes in European Winter Storm Losses and Extreme Wind Speeds Inferred from GCM and RCM Multi-Model Simulations', *Natural Hazards and Earth System Science* 11, no. 5 (May 12, 2011): 1351–1370, doi:10.5194/nhess-11-1351-2011.
- ECORES and TEC., 2011. Région wallonne - Agence Wallonne de l'Air et du Climat - L'adaptation au changement climatique en Région wallonne.
- EEA, 2012. *Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe, 2012. An Indicator-Based Report*. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, pp. 1-304.
- EEA, 2014. Europe's climate continues to change. <http://www.eea.europa.eu/highlights/europe2019s-climate-continues-to-change>.
- Farinotti D, Huss M, Bauder A, Funk M, 2009. An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Glob Planet Change*: 68(3), 225–231.
- Giron, E., Joachain, H., Degroof, A., Hecq, W., Coninx, I., Bachus, K., Dewals, B.J., Ernst, J., Piroton, M., Staes, J., Meire, P., De Smet, L., De Sutter, R. 2010. Towards an integrated decision tool for adaptation measures - Case study: floods – ADAPT. Final report for Belgian Science Policy Office, 124p.
- Gobin, A., Uljee, I., Van Esch, L., Engelen, G., de Kok, J., van der Kwast, H., Hens, M., Peymen, J., Van Reeth, W., Overloop, S., Maes, F., 2009. *Landgebruik in Vlaanderen. Wetenschappelijk rapport*, MIRA 2009 & NARA 2009.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Blenkinsop, S., Burton, A., Fowler, H.J., Orban, P., Dassargues, A. 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. *Water Resources Research*: 47(12), Article num. W12516.
- Grant, K.M., E. J. Rohling, M. Bar-Matthews, A. Ayalon, M. Medina-Elizalde, C. Bronk Ramsey, C. Satow & A. P. Roberts. 2012. Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years. *Nature* 491, 744–747. doi:10.1038/nature11593.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Wood, R., 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*: 104, 113-137.
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J., Corfree-Morlot, J. 2013. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*: doi:10.1038/nclimate1979.
- Hamdi, R., H. Van de Vyver, and P. Termonia, 2012. New cloud and microphysics parameterisation for use in high-resolution dynamical downscaling: Application for summer extreme temperature over Belgium. *International Journal of Climatology*: 32, 2051–2065.
- 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.

- Hedegaard, G. B., Christensen, J. H., and Brandt, J., 2013. The relative importance of impacts from climate change vs. emissions change on air pollution levels in the 21st century, *Atmos. Chem. Phys.*: 13, 3569–3585, doi:10.5194/acp-13-3569-2013.
- Hinkel, J., Nicholls, R., Vafeidis, A., Tol, R., Avagianou, T., 2010. Assessing risk of adaptation to sea-level rise in the European Union: an application of DIVA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*: 15(7), 703-719.
- 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.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. and Yiou, P., 2013. *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research* Regional Environmental Change, Springer Berlin Heidelberg, 2013, 1-16.
- Jansen, L., 2013. The influence of climate change on air pollution in the Netherlands: Statistical analysis based on RACMO, Stageverslag 31-1-2013, KNMI wetenschappelijk rapport 2013/01, <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmi/pub/WR/WR2013-01.pdf>.
- Juda-Rezler, K., Reizer, M., Huszar, P., Krüger, B. C., Zanis, P., Syrakov, D., Katragkou, E., Trapp, W., Melas, D., Chervenkov, H., Tegoulas, I., and Halenka, T., 2012. Modelling the effects of climate change on air quality over Central and Eastern Europe: concept, evaluation and projections: *Climate Res.*, 53, 179–203.
- Kattsov VM, Källén E, 2004. *Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic*. Cambridge University Press, Cambridge. <http://www.acia.uaf.edu/>.
- Kendon, E. J., N. M. Roberts, C. a. Senior, and M. J. Roberts, 2012. Realism of Rainfall in a Very High-Resolution Regional Climate Model. *Journal of Climate*: 25(17), 5791-5806.
- Kint, V., Aertsen, W., Campioli, M., Vansteenkiste, D., Delcloo, A., Muys, B. 2012. Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901-2008. *Climatic Change*, 115, 343-363.
- Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus*: 63A(1), 24-40.
- KNMI, 2014. *KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands; A guide for professionals in climate adaptation*, KNMI, De Bilt, The Netherlands, 34 pp. www.climatescenarios.nl.
- Lauwaet, D., P. Viaene, E. Brisson, N.P.M. van Lipzig, T. van Noije, A. Strunk, S. Van Looy, N. Veldeman, L. Blyth, K. De Ridder, and S. Janssen, 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 www.atmos-chem-phys.net/14/1/2014/ doi:10.5194/acp-14-1-2014.
- Lawrence, D., Hisdal, H., 2011. *Hydrological Projections for Floods in Norway Under a Future Climate*. NVE Report no. 2011-5. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Norway, pp. 1-54.
- Leander, R., Buishand, T.A., van den Hurk, B.J.J.M., de Wit, M.J.M., 2008. Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*: 351(3-4), 331-343.
- Lenton, T. M., Ciscar, J. C., 2013. Integrating tipping points into climate impact assessments. *Climatic Change*: 117, pp. 585-597.
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *National Academy of Sciences*: 105, 1786-1793.
- Levermann A, Griesel A, Hofmann M, Montoya M, Rahmstorf S, 2005. Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Clim Dyn* 24: 347–354.
- Levermann, A., Bamber, J., Drijfhout, S., Ganopolski, A., Haeblerli, 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.
- Levermann, A., P.U. Clark, B. Marzeion, G. Milne, D. Pollard, V. Radic, A. Robinson, 2013. The multi-millennial sea-level commitment of global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*: 110, 34, 13745–13750. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1219414110.

- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola JM, Siegenthaler U, Raynaud D, Jouzel J, Fischer H, Kawamura K, Stocker TF., 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*: 15; 453(7193):379-82. doi: 10.1038/nature06949.
- Meert, P. & Willems, P., 2013a. Evaluatie van berekeningsmethoden voor het bepalen van de benodigde buffercapaciteit van kleinschalige opvangsystemen in het kader van erosiebestrijding. Eindrapport voor Vlaamse overheid - Departement LNE - Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, augustus 2013, 243 p.
- Meert, P. & Willems, P., 2013b. Rekeninstrument buffercapaciteit – Handleiding. juli 2013, 28 p.
- Meier, W.N., Stroeve, J., Fetterer, F., 2007. Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally, and extending beyond the satellite record. *Annals of Glaciology*: 46(1), 428-434.
- Meyvis, L., Graré, W. & Dauwe, W., 2003. Actualisatie van het SIGMAPLAN. *Tijdschrift Water*, september 2003, 11 p.
- MIRA, 2009. Milieuverkenning 2030, Milieuraapport Vlaanderen, Vlaamse Milieumaatschappij, 2009.
- Monbaliu, J., Chen, Z., Felts, D., Ge, J., Hissel, F., Kappenberg, J., Narayan, S., Nicholls, R.J., Ohle, N., Schuster, D., Sothmann, J. & Willems P., 2014. Risk assessment of estuaries under climate change: lessons from Western Europe. *Coastal Engineering*: 87, 32-49.
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., & Kimoto, M., 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2277.
- Naish T, Powell R, Levy R, Wilson G, Scherer R, Talarico F, Krissek L, Niessen F, Pompilio M, Wilson T, Carter L, Deconto R, Huybers P, McKay R, Pollard D, Ross J, Winter D, Barrett P, Browne G, Cody R, Cowan E, Crampton J, Dunbar G, Dunbar N, Florindo F, Gebhardt C, Graham I, Hannah M, Hansaraj D, Harwood D, Helling D, Henrys S, Hinnov L, Kuhn G, Kyle P, Läufer A, Maffioli P, Magens D, Mandernack K, McIntosh W, Millan C, Morin R, Ohneiser C, Paulsen T, Persico D, Raine I, Reed J, Riesselman C, Sagnotti L, Schmitt D, Sjunneskog C, Strong P, Taviani M, Vogel S, Wilch T, Williams T, 2009. Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature*: 458, 322–328.
- Nolan, P., Lynch, P., Mcgrath, R., Semmler, T., Wang, S., 2012. Simulating climate change and its effect on the wind energy resource of Ireland. *Wind Energy*: 15, 593-608.
- Nolf, C., Putseys, I., De Meulder, B., Shannon, K., Willems, P. & Devisch, O., 2012a. Ruimte voor water in de stad: naar een meer geïntegreerde steden- en waterbouwkundige benadering. *WT-Afvalwater*, jaargang 12, nr.1, 3-15.
- Nolf, C., Putseys, I., De Meulder, B., Shannon, K., Devisch, O. & Willems, P., 2012b. Water in de stad: Betere verwevenheid van stedenbouw en waterbeheer. *Vakblad Riolering*, jaargang 18, maart 2012, 22-24.
- Nolf, C., De Meulder, B., Shannon, K. & Willems, P., 2012c. Turnhout als (regen)water lab. *Vakblad Riolering*, jaargang 18, maart 2012, 18-20.
- NSIDC, 'Press Release: Arctic Sea Ice Shatters Previous Low Records; Antarctic Sea Ice Edges to Record High', 2012, http://nsidc.org/news/press/20121002_MinimumPR.html.
- Ntegeka, V. & Willems, P. 2008a. Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100 years time series of 10 minutes rainfall intensities at Uccle, Belgium. *Water Resources Research*: 44, W07402.
- Ntegeka, V. & Willems, P. 2008b. CCI-HYDR Perturbation Tool: a climate change tool for generating perturbed time series for the Belgian climate. Manual version December 2008, KU Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, December 2008, 7 p.
- Ntegeka, V., Decloedt, L-C., Willems, P. & Monbaliu, J. 2012. Quantifying the impact of climate change from inland, coastal and surface conditions. In: *Comprehensive Flood Risk Management – Research for policy and practise* (Eds. F.Klijn & T.Schweckendiek), CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands.
- Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E. & Willems P., 2014. Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *Journal of Hydrology*: 508C, 307-321.
- Overland, James E. and Muyin Wang, 2013. When Will the Summer Arctic Be Nearly Sea Ice Free? *Geophysical Research Letters*: 40, no. 10 (2013): 2097–2101, doi:10.1002/grl.50316.
- Ozer, J., Van den Eynde, D. & Ponsar, S., 2008. Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities: CLIMAR - Trend analysis of the relative mean sea level at Oostende (Southern North Sea – Belgian coast). CLIMAR project voor Federaal Wetenschapsbeleid.
- Pereira, F., Mostaert, F., 2012. Waterbalans Seine-Schelde West: Advies Waterbouwkundig Laboratorium. Versie 3_0. WL Adviezen, 765_55. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Petoukhov V, Semenov VA, 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J Geophys Res*: 115. D21111.

- Pfeffer WT, Harper JT, O'Neel S, 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st century sea-level rise. *Science* 321:1340–1343.
- Poelmans, L., Van Rompaey, A., Ntegeka, V. & Willems, P., 2011. The relative impact of climate change and urban expansion on river flows: a case study in central Belgium. *Hydrological Processes*: 25(18), 2846-2858.
- Pollard D, Deconto RM, 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature*: 458, 329–332.
- Prein, A.F., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N.K., Keuler, K., Georgievski, G., 2013. Added value of convection permitting seasonal simulations. *Climate Dynamics*: 41, 2655-2677.
- Pritchard HD, Arthern RJ, Vaughan DG, Edwards LA, 2009. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*: 461, 971–975.
- RA, 2005. Social cost-benefit analysis of the Sigma plan (in Dutch: Actualisatie van het Sigma plan: maatschappelijke KostenBatenAnalyse), Final reports [CD-ROM], Project consortium MKBA Sigma plan, lead: Resource Analysis, Antwerp.
- Robinson, Alexander, Reinhard Calov, and Andrey Ganopolski, 2012. Multistability and Critical Thresholds of the Greenland Ice Sheet. *Nature Climate Change*: 2, no. 6, 429–432, doi:10.1038/nclimate1449.
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., Dosio, A., 2012. Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 117(17), art. no. D17109.
- Schaefli B, Hingray B, Musy A, 2007. Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrol Earth Syst Sci*: 11(3), 1191–1205.
- Schellnhuber HJ, 2009. Tipping elements in the Earth System. *Proc Natl Acad Sci* 106(49):20561–20563.
- Scherer RP, Aldahan A, Tulaczyk S, Possnert G, Engelhardt H, Kamb B, 1998. Pleistocene collapse of the West Antarctic Ice Sheet. *Science*: 281, 82–85.
- Schnadt C, Dameris M, Ponater M, Hein R, Grewe V, Steil B, 2002. Interaction of atmospheric chemistry and climate and its impact on stratospheric ozone. *Clim Dyn* 18:501–517.
- Sime LC, Wolff EW, Oliver KIC, Tindall JC, 2009. Evidence for warmer interglacials in East Antarctic ice cores. *Nature* 462:342–345.
- Solomina O, Haeberli W, Kull C, Wiles G, 2008. Historical and holocene glacier climate variations: general concepts and overview. *Glob Planet Change*: 60, 1–9.
- Sousa, P.M., Trigo, R.M, Aizpurua, P., Nieto, R., Gimeno, L., Garcia-Herrera, R., 2011. Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Science*: 11(1), 33-51.
- Staes, J., Willems P., Marbaix, Ph., Vrebos, D., Bal, K. & Meire, P., 2011. Impact of climate change on river hydrology and ecology: A case study for interdisciplinary policy oriented research. Final report for Belgian Science Policy Office, U.Antwerp - ECOBE, KU Leuven – Hydraulics Section & UCL - ASTR, July 2011, 103 p.
- Stick C, Krüger K, Schade NH, Sandmann H, Macke A, 2006. Episode of unusual high solar ultraviolet radiation over central Europe due to dynamical reduced total ozone in May 2005. *Atmos Chem Phys*: 6, 1771–1776.
- Tabari, H., Taye, M.T., Willems, P., 2015. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen – Nieuwe modelprojecties voor Ukel 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, door KU Leuven – Afdeling Hydraulica, januari 2015.
- Van den Eynde, D., Francken, F., Ponsar, S. & Ozer, J., 2008. Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities (CLIMAR) - Bepaling van de primaire impacten van klimaatsverandering: statistische analyse van metingen van golven, windsnelheid en –richting en van zeevatertemperatuur. CLIMAR project voor Federaal Wetenschapsbeleid.
- Van den Eynde, D., De Sutter, R., De Smet, L., Francken, F., Haelters, J., Maes, F., Malfait, E., Ozer, J., Polet, H., Ponsar, S., Reyns, J., Van der Biest, K., Vanderperren, E., Verwaest, T., Volckaert A., Willekens, M., 2011. Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities (CLIMAR). Final Report, CLIMAR project voor Federaal Wetenschapsbeleid.
- van den Hurk, Bart, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.climatescenarios.nl.

- van der Sluijs, J.P., J.S. Risbey, P. Klopogge, J.R. Ravetz, S.O. Funtowicz, S.C. Quintana, A.G. Pereira, B. De Marchi, A.C. Petersen, P.H.M. Janssen, R. Hoppe, and S.W.F. Huijs (2003). RIVM/MNP Guidance for Uncertainty Assessment and Communication: Detailed Guidance (RIVM/MNP Guidance for Uncertainty Assessment and Communication Series, Volume 3), Utrecht University, Utrecht, 2003.
- Vansteenkiste, Th. 2012. Climate change and urban expansion impact on high and low flows and the overall water availability. PhD manuscript, KU Leuven – Faculty of Engineering, December 2012.
- Vansteenkiste, Th., Tavakoli, M., Ntegeka, V., Willems, P., De Smedt, F. & Batelaan, O. 2013. Climate change impact on river flows and catchment hydrology: a comparison of two spatially distributed models. *Hydrological Processes*: 27(25), 3649-3662.
- Vansteenkiste, Th., Tavakoli, M., Ntegeka, V., De Smedt, F., Batelaan, O., Pereira, F. & Willems P., 2014. Intercomparison of hydrological model structures and calibration approaches in climate scenario impact projections. *Journal of Hydrology*, 519, 743–755.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. & Willems, P. 2011. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*: 151(12), 1753-1762.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P. & Geerts, S. 2012. Quantifying field-scale effects of elevated carbon dioxide concentration on crops. *Climate Research*: 54, 35-47.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P. & Semenov, M.A., 2014. Comparing climate change impacts on cereals based on CMIP3 and EU-ENSEMBLES climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*: 195–196, 12–23.
- Van Vliet, M.T.H., Zwolsman, J.J.G., 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *Journal of Hydrology*: 353, 1-17.
- 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. & Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*: 109, 5–31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Vaughan, D.G., J.C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang, 2013: Observations: Cryosphere. In: *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.
- Vautard, R., A. Gobiet, S. Sobolowski, E. Kjellström, A. Stegehuis, P. Watkiss, T. Mendlik, O. Landgren, G. Nikulin, C. Teichmann, D. Jacob, 2014. The European Climate under a 2°C Global Warming. *Environ. Res. Lett.*: 9, p. 034006 <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034006>.
- Velicogna I, 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophys Res Lett*: 36, L19503.
- Vellinga M, Wood RA, 2002. Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. *Clim Change*: 54, 251–267.
- Vlaamse overheid, 2013. Besluit van de Vlaamse Regering van 5 juli 2013 houdende vaststelling van een gewestelijke stedenbouwkundige verordening inzake hemelwaterputten, infiltratievoorzieningen, buffervoorzieningen en gescheiden lozing van afvalwater en hemelwater. Vlaamse overheid – Ruimte Vlaanderen, juli 2013; <http://www.ruimtelijkeordening.be/NL/Beleid/Vergunning/Vergunningnodig/hemelwater>.
- Weatherhead B, Tanskanen A, Stevermer A, 2004. Ozone and ultraviolet radiation. Cambridge University Press, Cambridge. <http://www.acia.uaf.edu/>.
- Weisse, R., Bellafiore, D., Menendez, M., Mendez, F., Nicholls, R., Umgieser, G. & Willems, P., 2014. Changing extreme sea levels along European coasts. *Coastal Engineering*: 87, 4-14.
- Willems, P., 2009. Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen. KU Leuven – Afdeling Hydraulica, Eindrapport voor VMM-Afdeling Operationeel Waterbeheer, september 2009, 79 p.
- Willems, P., 2012. Model uncertainty analysis by variance decomposition. *Physics and Chemistry of the Earth*, 42-44, 21-30.
- Willems, P., 2013a. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*: 496, 166–177.
- Willems, P., 2013b. Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. *Climatic Change*: 120(4), 931–944.
- Willems, P., 2013c. Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations. *Journal of Hydrology*: 490, 126-133.

- Willems, P., 2013d. Multidecadal climate oscillations and climate scenarios for impact analysis on hydrological extremes in Belgium. In: 'Transboundary water management in a changing climate', Eds. Benjamin Dewals & Maité Fournier, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 9-17; ISBN 978-1-138-00039-1 (Hbk); ISBN 978-0-203-74447-5 (eBook).
- Willems, P., 2014. Actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloed en aanstormende zeespiegel aan de Belgische kust. KU Leuven - Afdeling Hydraulica, Rapport voor de Vlaamse overheid - Waterbouwkundig Laboratorium, oktober 2014, 29 p.
- Willems, P. & Vrac, M. 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*: 402, 193–205.
- Willems, P., Deckers, P., De Maeyer, Ph., De Sutter, R., Vanneuville, W., Brouwers, J. & Peeters, B., 2009. Klimaatverandering en waterhuishouding, Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009 & NARA 2009, Vlaamse Milieumaatschappij en Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, www.milieurapport.be en www.nara.be.
- Willems, P., De Bruyn, L., Maes, D., Brouwers, J. & Peeters, B., 2009. NARA 2009: Natuurverkenning 2030, Natuurrapport Vlaanderen, Hoofdstuk 2 'Klimaat'. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, rapport INBO.M.2009.7, 55-66.
- Willems, P., Ntegeka, V., Baguis, P. & Roulin, E. 2010. Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems. Final report for Belgian Science Policy Office, KU Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, December 2010, 110 p. <http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR.htm>.
- Willems, P., Olsson, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H. & Nguyen, V-T-V. 2012. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage. IWA Publishing, 252p., Paperback Print ISBN 9781780401256; Ebook ISBN 9781780401263.
- Willems, P., Van den Zegel, B., Quan, T.Q., Akurut, M., Verhoest, N. & Vanhaute, W-J. 2014a. Onderzoek naar het gebruik van neerslaggeneratoren voor het aanmaken van overstromingsrisicokaarten - 2. Deelproces hydrologie. Eindrapport, KU Leuven & U.Gent, voor TWOL onderzoeksproject L 2011 T 0005 / Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer, juni 2014, 160 p.
- Willems, P., Mora, D., Vansteenkiste, Th., Taye, M.T. & Van Steenberghe, N., 2014b. Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes – Part 2: Intercomparison of models and calibration approaches. *Journal of Hydrology*, 510, 591–609.
- Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., 2006. Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33(13), L13504.
- Zhang, J., 2014. Modeling the Impact of Wind Intensification on Antarctic Sea Ice Volume. *Journal of Climate*, 27, 202–214.

9. Begrippen

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 zomeronweders 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 zomerperioden, is de werkelijk optredende evapotranspiratie lager dan de potentiële.

Hydraulisch: met betrekking tot de waterstroming (vb. 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.

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

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).

Klimaatssensitiviteit: verandering van het klimaat (ook klimaatveranderingssignaal 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.

Ontwerpbeurt: kunstmatige buien die gebruikt worden aan de basis van het ontwerp van bijvoorbeeld rioleringssystemen. Ze zijn opgesteld op basis van neerslagstatistieken. Wanneer een bui met een terugkeerperiode van 20 jaar wordt gesimuleerd in een rioleringsmodel, worden debieten bekomen die zich gemiddeld eens om de 20 jaar voordoen.

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

Percentiel: 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 (computeralgoritme) dat toelaat om een perturbatie uit te voeren op meteorologische tijdreeksen.

Piëzometrische stijghoogte: de stijghoogte van het wateroppervlak van het grondwater, gemeten vanaf een bepaald niveau (TAW in België). Het is de hoogte van het water in een peilbuis, of waar het grondwater zou staan als men een put zou slaan. De stijghoogte komt rechtstreeks overeen met de hydrostatische druk gemeten in bijvoorbeeld meter waterkolom. Stijghoogtes of waterdruk kunnen worden gemeten met een piëzometer. De stijghoogte wordt uitgedrukt in lengte-eenheden zoals de meter.

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.

Stormopzethoogte: kortstondige verhoging van de zeespiegel ten gevolge van zeestormen (windkrachten).

Terugkeerperiode: de gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende overschrijdingen.

Zoutbezwaar: probleem met hoge chlorideconcentraties langs een waterloop.

10. Afkortingen

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

BELG-HR: multi-model ensemble van 14 regionale en hoge-resolutie klimaatmodelsimulaties voor België

CCI-HYDR: acronym van het onderzoeksproject 'Climate change impact on hydrological extremes in Belgium' voor Federaal Wetenschapsbeleid (Belspo)

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

CIW: Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid

CLIMAR: acronym van het onderzoeksproject 'Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities' voor Federaal Wetenschapsbeleid (Belspo)

CLIMAQS: acronym van het onderzoeksproject 'Climate and Air Quality Modelling for Policy Support' voor Agentschap voor Innovatie door wetenschap en technologie

CMIP5: Coupled Model Intercomparison project nr. 5

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments

EMA: Europees Milieuagentschap

ETo: potentiële evapotranspiratie

EURO-CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiments voor Europa

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

IPCC: Intergovernmental Panel for Climate Change

KMI: Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

MACCBET: acronym van het onderzoeksproject 'Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory' voor Federaal Wetenschapsbeleid (Belspo)

MIKE-SHE: een ruimtelijk verdeeld hydrologisch model

MODFLOW: een grondwatermodel

ORBP: Overstromingsrisicobeheerplan

PDM: Probability Distributed Model

RCM: Regional Climate Model (regionaal klimaatmodel)

RCP: Representative Concentration Pathway

SRES: Special Report on Emission Scenarios van het IPCC

TE: tipping elements

UTC: Universal Time Coordinated of Universele Tijd Code

VHM: Veralgemeend/Vlaams Hydrologisch Model

VMM: Vlaamse Milieumaatschappij

VMM-AOW: Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij

Wetspa: een semi-ruimtelijk verdeeld hydrologisch model

WL: Waterbouwkundig Laboratorium, Departement Mobiliteit en Openbare Werken van de Vlaamse overheid