

MIRA 2009 & NARA 2009

Wetenschappelijk rapport

Klimaatverandering en waterhuishouding



Milieurapport Vlaanderen
Vlaamse MilieuMaatschappij
Van Benedenlaan 34
2800 Mechelen
tel. 015 45 14 61
fax 015 43 32 80
e-mail mira@vmm.be
website www.milieurapport.be



Rapport INBO.R.2009.49

Auteurs

Patrick Willems, Afdeling Hydraulica, Katholieke Universiteit Leuven

Pieter Deckers en Philippe De Maeyer, Vakgroep Geografie, UGent

Renaat De Sutter, Civiele Techniek, UGent

Wouter Vanneuville, Waterbouwkundig Laboratorium, Departement MOW

Johan Brouwers, Bob Peeters, MIRA-team, VMM

De ontwerptekst van dit rapport werd ter commentaar en ter afstemming voorgelegd aan INBO (NARA-team: Luc De Bruyn), Departement LNE (Afdeling Milieu-, Natuur- en Energiebeleid: Johan Bogaert en Kris Rongé) en de MINA-planningsgroep (Michel Boucneau).

Laatst bijgewerkt: december 2009

Inhoudsopgave

0	Context.....	9
0.1	Toekomstverkenning milieu en natuur.....	9
0.2	Scenario's	9
0.3	Scenarioberekeningen en onderlinge samenhang	9
0.4	Samenhang MIRA-NARA	11
1	Beschrijving thema klimaatverandering	13
1.1	Inleiding.....	13
1.2	Wat is klimaatverandering?	13
1.3	Onderzoek naar klimaatverandering	15
2	Methode	17
2.1	Project CCI-HYDR	17
2.2	INBO-project	17
2.3	WL-project.....	18
2.4	VMM onderzoeksproject actualisatie en extrapolatie Code van Goede Praktijk voor ontwerp van rioleringsstelsels.....	18
2.5	Project SUDEM-CLI	18
2.6	MIRA 2006 onderzoeksproject	19
2.6.1	<i>Inleiding</i>	<i>19</i>
2.6.2	<i>Oorspronkelijke methode.....</i>	<i>19</i>
2.6.3	<i>Aangepaste methode in het kader van MIRA 2009</i>	<i>21</i>
2.7	ADAPT-project.....	22
2.8	Project CLIMAR	22
2.9	Project Adaptatiemogelijkheden Vlaamse Landbouw	22
2.10	Project SAFECOAST	23
2.11	Project SeaMocs	23
3	Inhoud van de scenario's.....	25
3.1	Klimaatveranderingsscenario's.....	25
3.1.1	<i>Basis: IPCC-broeikasgasemissiescenario's.....</i>	<i>25</i>
3.1.2	<i>Projecten CCI-HYDR, INBO, WL, VMM, SUDEM-CLI, MIRA 2006, ADAPT en Adaptatie Landbouw.....</i>	<i>26</i>
3.1.3	<i>Project SeaMocs</i>	<i>32</i>
3.1.4	<i>Projecten CLIMAR en SAFECOAST.....</i>	<i>32</i>
3.1.5	<i>Vergelijking Vlaamse en Nederlandse klimaatscenario's.....</i>	<i>33</i>
3.2	Socio-economische scenario's	34
3.2.1	<i>Project Klimaatadaptatie Vlaamse landbouw.....</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Landgebruikscenario's.....</i>	<i>35</i>
4	Resultaten en bespreking	38
4.1	Klimaatscenario's voor Vlaanderen	38
4.1.1	<i>Scenario's voor temperatuur, verdamping en neerslag</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Scenario's voor wind</i>	<i>48</i>
4.1.3	<i>Scenario's voor de kust: stormopzethoogte, zeespiegel, temperatuur, golfklimaat, saliniteit en zuurtegraad</i>	<i>49</i>
4.2	Invloed van klimaatverandering op hoog- en laagwater langs rivieren in het Vlaamse binnenland.....	57
4.3	Invloed van klimaatverandering op het ontwerp van rioleringsstelsels	60
4.4	Impact van wijzigende waterhuishouding in het Vlaamse binnenland	66
4.4.1	<i>Overstroming vertaald naar economisch risico</i>	<i>66</i>
4.4.2	<i>Schade door watertekort</i>	<i>79</i>
4.4.3	<i>Impact op de Vlaamse landbouw</i>	<i>80</i>
4.4.4	<i>Impact op ecosystemen.....</i>	<i>81</i>
4.5	Impact van klimaatverandering op de kustzone	82
4.5.1	<i>Invloed op het overstromingsgevaar aan de kust</i>	<i>82</i>

4.5.2	<i>Invloed op het overstromingsgevaar langs de Schelde</i>	84
4.5.3	<i>Invloed op het marien biologisch leven</i>	84
4.6	Beleids- en beheeraanbevelingen (adaptatie).....	85
5	Samenvatting	88
5.1	Inleiding.....	88
5.2	Klimaatveranderingen & -scenario's	88
5.3	Invloed op hoog- en laagwater langs rivieren en in rioleringen	91
5.4	Impact op de kustzone.....	94
5.5	Beleids- & beheeraanbevelingen.....	95
	Referenties	96
	Begrippen	99
	Afkortingen	100

Lijst van figuren

<i>Stroomschema en samenhang van de scenarioberekeningen</i>	11
<i>Verband tussen MIRA 2009 en NARA 2009: socio-economische verkenning, drie scenario's inzake milieu en drie landgebruikscenario's</i>	12
Figuur 1: Jaargemiddelde van de temperatuur in Ukkel (rode lijn) en wereldgemiddelde (CRU/Hadley Centre- blauwe lijn en NASA/GISS roze lijn)	13
Figuur 2: Het broeikaseffect	14
Figuur 3: Schematisch overzicht van de componenten betrokken in het globale klimaatsysteem (in vet), hun processen en interacties (dunne pijlen) en enkele aspecten die aan verandering onderhevig zijn (dikke pijlen).....	15
Figuur 4: Schematische weergave van de risicomethodologie	20
Figuur 5: Historische en potentieel toekomstige variaties in de mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur.....	26
Figuur 6: Belgische gridlocaties van het DMI-klimaatmodel met gridresolutie 25 km.....	29
Figuur 7: Percentage neerslagtoename tijdens het winterseizoen voor uitzonderlijke neerslag	31
Figuur 8: Scenario's gehanteerd in CCI-HYDR versus KNMI'06-scenario's	34
Figuur 9: Toename in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100	39
Figuur 10: Toename in de 10 % percentielwaarde (10 % koudste dagen) van de maandgemiddelde temperatuur in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100.....	40
Figuur 11: Toename in de 90 % percentielwaarde (10 % warmste dagen) van de maandgemiddelde temperatuur in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100.....	40
Figuur 12: Perturbatiefactor voor de maandgemiddelde neerslag in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's	42
Figuur 13: Verband tussen % verandering in seizoensgemiddelde waarden van de temperatuur- en de neerslagtoename voor de 3 CCI-HYDR scenario's in Ukkel (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100) en de 4 KNMI'06 scenario's (2100 t.o.v. 1990) in de klimatologische winter (dec-jan-feb) en zomer (jun-jul-aug)	43
Figuur 14: Regionale verschillen in seizoensgemiddelde zomerneerslag bij verschillende klimaatscenario's: kuststreek heeft ± 10 % lagere neerslagafname in de scenarioperiode 2071-2100 t.o.v. de referentieperiode 1961-1990	44
Figuur 15: Regionale verschillen in seizoensgemiddelde winterneerslag bij verschillende klimaatscenario's: kuststreek heeft ± 10 % hogere neerslagtoename in scenarioperiode 2071-2100 t.o.v. referentieperiode 1961-1990.....	44
Figuur 16: Perturbatiefactor voor dagneerslag versus de terugkeerperiode voor de zomerperiode	45
Figuur 17: Multidecadale oscillaties in extreme zomerneerslag gedurende 10 minuten in Ukkel (gebaseerd op de periode 1898-2005)	46
Figuur 18: Multidecadale oscillaties en trends in extreme winterneerslag gedurende 10 minuten in Ukkel (gebaseerd op de periode 1898-2005)	47
Figuur 19: Recente trends en toekomstige evoluties in de extreme dagneerslag voor Ukkel: voorbeeld voor de winterperiode	48
Figuur 20: CCI-HYDR gebaseerde klimaatscenario's voor maandgemiddelde windsnelheid in Ukkel in de scenarioperiode 2071-2100	49
Figuur 21: Correlatie (op basis van een voortschijdend venster met een lengte van 60 maanden) tussen de maandelijkse 99 % percentielwaarde van de stormopzethoogte in Oostende en maandelijkse frequentie aan het weerspatroon "Atlantic Ridge" voor de periode 1925-2000	50
Figuur 22: Gemiddelde zeeniveaus (TAW) te Oostende tussen 1927 en 2006	51
Figuur 23: Lineaire regressie van de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende	51
Figuur 24: Getrapte lineaire regressie van de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende	52

Figuur 25: Derdegraadskromme doorheen de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende	52
Figuur 26: Extrapolatie van zeespiegelstijgingen op basis van verschillende relaties voor Oostende	53
Figuur 27: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemeten gemiddelde zeewatertemperatuur in de verschillende subgebieden van de Noordzee, berekend met de gegevens, verkregen van de World Ocean Data Base	54
Figuur 28: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemiddelde significante golfhoogte in Bol van Heist (bvh), Brouwershavensche Gat 2 (bhg2), Deurloo (delo) en Scheur West (schw)	55
Figuur 29: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemeten gemiddelde windsnelheid in Brouwershavensche Gat 2 (bhg2), Vlakte van de Raan (vlra) en Westhinder (whix) en van de maandelijks gemiddelde windsnelheden van de meteorologische voorspellingen van DNMI in Westhinder (whid).....	56
Figuur 30: Percentage verandering in laagwaterafvoeren naar rivieren (gemiddeld per hydrografisch deelbekken, volgens het CCI-HYDR middenscenario; referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100).....	59
Figuur 31: Percentage stijging in piekafvoeren naar rivieren (gemiddeld per hydrografisch deelbekken, volgens het hoog CCI-HYDR klimaatsscenario; referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100).....	59
Figuur 32: Lokaal overstromingsgebied met een gemiddelde herhalingstijd van 1 keer op de 100 jaar, voor en na het hoog CCI-HYDR klimaatsscenario (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)	60
Figuur 33: Opschuiving van de neerslagintensiteiten bij het hoog-, midden- en laag-klimaatsscenario voor verschillende aggregatieniveaus en vergelijking met de huidige IDF-verbanden voor verschillende terugkeerperioden	61
Figuur 34: Aanpassing composietbui bij het hoog- en midden-klimaatsscenario voor een terugkeerperiode van 2 jaar (Vlaanderen, scenarioperiode 2071-2100 vergeleken met de controleperiode 1961-1990)	62
Figuur 35: Schematische weergave van het simulatiemodel voor buffervoorzieningen als bronmaatregel bij rioleringsstelsels	62
Figuur 36: Voorbeeld van mogelijkheid tot creatie van bijkomende berging op straat via stoeprandverhoging en straatpeilverlaging.....	65
Figuur 37: Voorbeeld van mogelijkheid tot creatie van bijkomende waterberging in de openbare ruimte (groenvoorzieningen, speeltuinen ...)	65
Figuur 38: Overzicht van de verschillende bekkens in Vlaanderen	66
Figuur 39: Evolutie van het overstromingsrisico in het laag klimaatsscenario tegen 2100: ratio risico laag scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik).....	68
Figuur 40: Evolutie van het overstromingsrisico in het midden klimaatsscenario tegen 2100: ratio risico midden scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik)	68
Figuur 41: Evolutie van het overstromingsrisico in het hoog klimaatsscenario (tegen 2100): ratio risico hoog scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik).....	69
Figuur 42: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 onder het RR-landgebruiksscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het laag klimaatsscenario)	71
Figuur 43: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het RR-landgebruiksscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het midden klimaatsscenario)	72
Figuur 44: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het RR-landgebruiksscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het hoog klimaatsscenario)	72
Figuur 45: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruiksscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het laag klimaatsscenario)	74

Figuur 46: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruikscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het midden klimaatscenario)	74
Figuur 47: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruikscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het hoog klimaatscenario)	75
Figuur 48: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het laag klimaatscenario)	76
Figuur 49: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het midden klimaatscenario)	76
Figuur 50: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het hoog klimaatscenario)	77
Figuur 51: Vergelijking verloop verbruik leidingwater (Vlaams-Brabant) en dagelijkse maximumtemperatuur (Ukkel) (juni & juli 2006)	80
Figuur 52: Lopende initiatieven voor waterbeheer en natuurontwikkeling in het stroomgebied van de Grote Nete	82
Figuur 53: Locatie van bresvorming door erosie van strand en duinen voor een gemiddelde herhalingsstijd van 1 keer op de 17 000 jaar vergeleken bij het huidige zeeklimaat en bij een worst case scenario tegen 2100	83

Lijst van tabellen

Tabel 1: Conversietabel van landgebruiksklassen	21
Tabel 2: Overzicht van de controleruns (periode 1961-1990) met gekoppelde regionale- mondiale klimaatmodellen, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn	27
Tabel 3: Overzicht van de scenarioruns (periode 2071-2100) met gekoppelde regionale- mondiale klimaatmodellen, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn	28
Tabel 4: Overzicht van de runs met mondiale klimaatmodellen uit de IPCC AR4 Archive, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn	29
Tabel 5: Veranderingen in de periode 1990-2040 (tabel a) en in de periode 1990-2100 (tabel b) inzake luchttemperatuur, luchtcirculatie, neerslag in de winter, verandering in stormkarakter, neerslag in de zomer, zeetemperatuur en stijging van het zeeniveau zoals gehanteerd voor België in het CLIMAR-project.....	33
Tabel 6: Schematische voorstelling van de koppeling van de MIRA en NARA scenario's.....	36
Tabel 7: Ruimtegebruik in Vlaanderen 2005-2030. Index voor verschillende landgebruikscenario's RR en ER (basisjaar = 2005, richtjaar voor RR en ER = 2030, oppervlakte in 2005 is gelijkgesteld met 100) (aangepast naar Gobin et al., 2009a)	36
Tabel 8: Temperatuuroptename in de maandgemiddelde temperatuur en perturbatiefactoren voor de maandgemiddelde neerslag in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)	42
Tabel 9: Procentuele toename (t.o.v. de huidige code) in nodige buffervolumes (in m ³ /ha) in functie van het maximaal doorvoerdebit en de terugkeerperiode van de overlaat voor een lineaire doorvoerrelatie bij een concentratietijd van 10 minuten en het hoog-klimaatscenario.	63
Tabel 10: Grootteordes van buffervolumes in functie van het maximaal ledigingsdebit en terugkeerperiode van de noodoverlaat	63
Tabel 11: Overstromingsrisico in Vlaanderen in de verschillende bekkens volgens de huidige situatie en de drie klimaatscenario's tegen 2100	67
Tabel 12: Overstromingsrisico voor Vlaanderen in 2100 volgens het landgebruik van 2005 en volgens het landgebruik* onder het RR-scenario en de ratio van dat risico bij landgebruik onder het RR-scenario ten opzichte van het risico bij het landgebruik uit 2005 (en dit volgens de 3 klimaatscenario's).....	70
Tabel 13: Overstromingsrisico voor Vlaanderen in 2100 volgens het landgebruik van 2005 en het landgebruik* onder het ER-scenario en de ratio van dat risico bij landgebruik onder het ER-scenario ten opzichte van het risico bij het landgebruik uit 2005 (en dit volgens de 3 klimaatscenario's)	73
Tabel 14: Vergelijking van het overstromingsrisico tegen 2100 voor Vlaanderen tussen het RR-landgebruikscenario en het ER-landgebruikscenario (voor de verschillende klimaatscenario's)	75
Tabel 15: Overstromingsrisico in Vlaanderen bij een laag, midden en hoog klimaatscenario in 2100 vergeleken met het actuele overstromingsrisico, en dit bij verschillende invulling van het landgebruik* (landgebruik zoals in 2005, landgebruik RR-scenario, landgebruik ER-scenario)	78

0 Context

0.1 Toekomstverkenning milieu en natuur

Het Milieuraapport (MIRA) 2009 en het Natuurrapport (NARA) 2009 verkennen gezamenlijk de toekomst van het leefmilieu en de natuur in Vlaanderen. Het doel is beleidsmakers en het geïnteresseerde publiek inzicht te geven in te verwachten evoluties van het leefmilieu en van de natuur in Vlaanderen bij bepaalde beleidskeuzen en binnen een gegeven socio-economische context.

De toekomstverkenningen in beide rapporten baseren zich op dezelfde socio-economische prognose, milieubeleidsscenario's, klimaatscenario's en landgebruiksscenario's.

Onder deze titel wordt een overzicht gegeven van het studiewerk dat de publicatie Milieuverkenning 2030 onderbouwt. Daartoe zijn 15 afzonderlijke wetenschappelijke rapporten opgesteld.

Een wetenschappelijk rapport MIRA 2009 beschrijft uitgebreid de methoden, de scenario's en de resultaten van de toekomstverkenning. Het rapport onderbouwt het scenariorapport Milieuverkenning 2030 en is beschikbaar op www.milieuraapport.be.

0.2 Scenario's

MIRA 2009 maakt een toekomstverkenning van het milieu in Vlaanderen voor de periode 2006–2030 aan de hand van drie milieubeleidsscenario's:

- een referentiescenario, waarbij het beleid ongewijzigd wordt verdergezet;
- een Europa-scenario, waarbij bijkomende maatregelen worden genomen om Europese milieudoelstellingen voor de periode 2020-2030 te halen;
- een visionair scenario, waarbij verregaande maatregelen worden genomen om klimaatverandering sterk af te remmen en met het oog op een duurzame toekomst.

Elk scenario bestaat uit een pakket beleidsmaatregelen waarvan het gezamenlijk effect wordt berekend.

De milieuscenario's worden uitgetekend binnen éénzelfde socio-economische omgeving. De 'gebruikte' socio-economische omgeving is op zijn beurt het resultaat van een toekomstverkenning naar verwachte demografische, sociologische en economische ontwikkelingen, opgesteld door het Federaal Planbureau voor de Milieuverkenning 2030.

Daarnaast zijn ook klimaatscenario's tot 2100 ontwikkeld voor Vlaanderen, afgeleid uit internationale klimaatscenario's.

Het basisjaar voor de scenarioberekeningen is 2006. Het voornaamste zichtjaar is 2030. Voor de berekeningen van de invloed van klimaat wordt 2100 als zichtjaar gehanteerd. De berekeningen inzake oppervlaktewater focussen op 2015 en 2027, aansluitend op de Europese Kaderrichtlijn water.

De berekeningen gebeuren standaard gebiedsdekkend op niveau Vlaanderen, tenzij de beschikbare gegevens en/of modellen dit niet toelaten of anders vermeld.

0.3 Scenarioberekeningen en onderlinge samenhang

De milieuscenario's zijn uitgewerkt voor de grote economische sectoren en leiden tot uitkomsten op niveau van emissies en energiegebruik.

1. Couder J., Verbruggen A., Maene S. (2009) Huishoudens en Handel & diensten. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieuraapport.be.

2. Lodewijks P., Brouwers J., Van Hooste H., Meynaerts E. (2009) Energie- en klimaatscenario's voor de sectoren Energie en Industrie. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.
3. Overloop S., Gavilan J., Carels K., Van Gijseghe D., Hens M., Bossuyt M., Helming J. (2009) Landbouw. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009 & NARA 2009, VMM, INBO.R.2009.30, www.milieurapport.be, www.nara.be
4. Bergen D., Vander Vennet B. (2009) Deelsector glastuinbouw. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.
5. De Vlieger I., Pelkmans L., Schrooten L., Vankerom J., Vanderschaeghe M., Grispen R., Borremans D., Vanherle K., Delhay E., Breemersch T., De Geest C. (2009) Transport, referentie- en Europa-scenario. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.
6. Van Zeebroeck B., Delhay E., De Geest C. (2009) Transport, visionair scenario. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.

De resulterende emissies en energiegebruiken volgens drie milieuscenario's worden geaggregeerd in de kernset milieudata MIRA 2009, beschikbaar op www.milieurapport.be.

De milieukwaliteit resulterend uit deze emissies wordt voor twee milieuscenario's verder gemodelleerd in de verkenningen luchtkwaliteit.

7. Deutsch F., Fierens F., Veldeman N., Janssen S., Torfs R., Buekers J., Trimpeneers E., Bossuyt M. (2009) Zwevend stof. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be
8. Van Avermaet P., Celis D., Fierens F., Deutsch F., Janssen L., Veldeman N., Viaene P., Wuyts K., Staelens J., De Schrijver A., Verheyen K., Vancraeynest L., Overloop S. (2009) Verzuuring. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.
9. Deutsch F., Fierens F., Veldeman N., Janssen S., Torfs R., Buekers J., Trimpeneers E., Vancraeynest L. (2009) Fotochemische luchtverontreiniging. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be

Daarnaast zijn toekomstverkenningen opgemaakt voor de kwaliteit van het oppervlaktewater gebaseerd op de scenario's ontwikkeld in het stroomgebiedbeheerplan voor Schelde en Maas.

10. Peeters B., D'Heygere T., Huysmans T., Ronse Y., Dieltjens I. (2009) Kwaliteit oppervlaktewater. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.

Verkenningen voor het landgebruik voor 2 milieuscenario's x 3 landgebruik-scenario's zijn opgemaakt in:

11. Gobin A., Uljee I., Van Esch L., Engelen G., de Kok J., van der Kwast H., Hens M., Van Daele T., Peymen J., Van Reeth W., Overloop S., Maes F. (2009) Landgebruik in Vlaanderen. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, NARA 2009, VMM, INBO.R.2009.20, www.milieurapport.be, www.nara.be.

Verkenning voor geluidshinder door verkeer, op basis van de verkenningen voor de sector transport is opgesteld voor twee milieuscenario's in:

12. Botteldoorn D., Dekoninck L., Van Renterghem T., Geentjes G., Lauriks W. Bossuyt M., (2009) Lawaai. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be

Verkenning van klimaatverandering en waterhuishouding in Vlaanderen op basis van internationale studies en lopende nationale studies is opgesteld in:

13. 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, VMM, INBO, www.milieurapport.be, www.nara.be.

Overwegingen bij de complexiteit van toekomstverkenningen zijn opgesteld in:

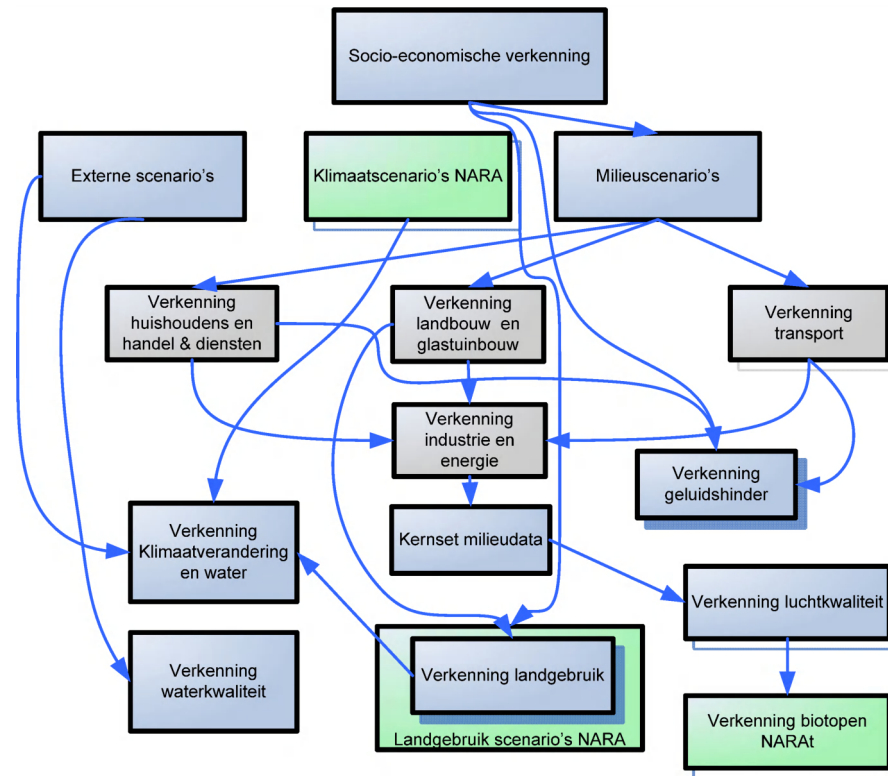
14. Keune H., Morrens B., Loots I. (2009) Hoe omgaan met de complexiteit van milieuvraagstukken? Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.

Tot slot behandelt één studie de transitie naar een duurzame samenleving:

15. De Jonge W., Paredis E., Lavrijsen J., Vander Putten E. (2009) Vlaanderen en de transitie naar een koolstofarme economie. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM, www.milieurapport.be.

De onderlinge samenhang van voornoemde rapporten wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.

Stroomschema en samenhang van de scenarioberekeningen



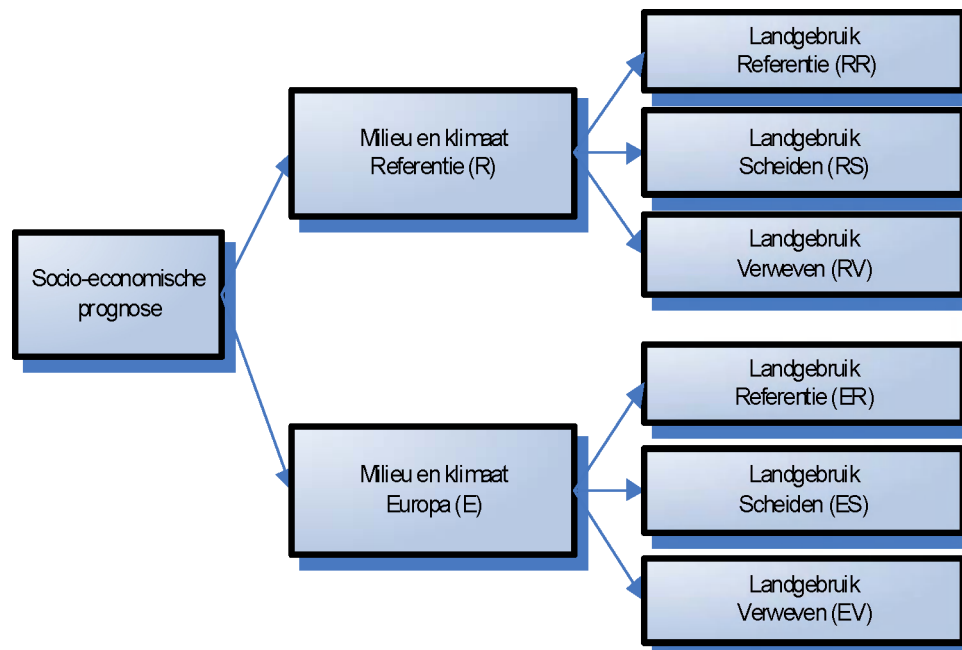
0.4 Samenhang MIRA-NARA

Op de twee milieubeleidsscenario's referentie en Europa uit MIRA 2009 worden drie landgebruikscenario's geënt in de natuurverkenning NARA 2009:

- een scenario referentie, waarbij het beleid uit de periode 2000-2007 ongewijzigd wordt verdergezet;
- een scenario scheiden, waarbij de open ruimte verdeeld wordt tussen de gebruiksvormen ervan;
- een scenario verweven, waarbij de zorg voor natuur integraal deel uitmaakt van alle landgebruikvormen.

De milieu- en de landgebruikscenario's worden uitgetekend binnen éénzelfde socio-economische omgeving. Voor de resulterende scenario's (onderstaand schema) worden de verwachte ontwikkelingen op emissies, brongebruik, milieutoestand en gevolgen voor gezondheid doorgerekend door middel van rekenkundige modellen.

Verband tussen MIRA 2009 en NARA 2009: socio-economische verkenning, drie scenario's inzake milieu en drie landgebruikscenario's



1 Beschrijving thema klimaatverandering

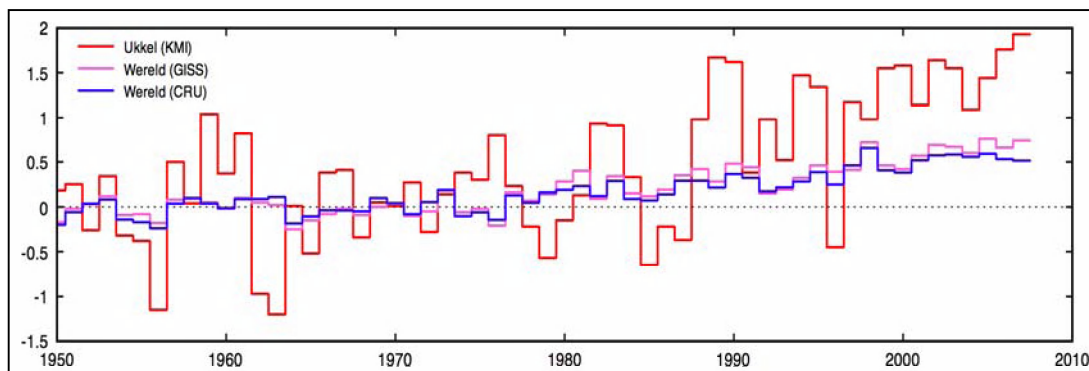
1.1 Inleiding

Klimaat stelt het gemiddeld gedrag voor van onze atmosfeer over lange tijdsperioden. Los van de jaarlijkse seizoensschommelingen in weerspatronen, is ons klimaat onderhevig aan veranderingen. Deze zijn het gevolg van twee typen oorzaken: de natuurlijke en de antropogene. Wanneer recente metingen van klimatologische variabelen worden vergeleken met metingen en ervaring uit vroegere periodes, wordt de invloed van de globale opwarming van de aarde steeds zichtbaarder (KMI, 2009). Deze opwarming kan beschouwd worden als één van de belangrijke omgevingsproblemen die wij momenteel kennen. Heel wat onderzoeksprojecten proberen daarom een beeld te vormen van de grootte van het probleem, van de toekomstig te verwachten klimaatevoluties en van de grootte van de impacts van deze evoluties op de waterhuishouding, natuur, landbouw, enz. De invloed op de waterhuishouding krijgt momenteel bijzondere aandacht, omwille van de sterke socio-economische implicaties van de gewijzigde en wijzigende kansen op bijvoorbeeld overstromingen, watertekorten en overschrijding van waterkwaliteitsnormen. Ook in Vlaanderen zijn recent heel wat studies in die richting opgestart. Voorliggend wetenschappelijk rapport geeft een overzicht en samenvatting van deze resultaten en van de huidige beschikbare kennis over het thema in Vlaanderen.

1.2 Wat is klimaatverandering?

De klimaatverandering die zich onder meer uit in een globale opwarming van de aarde, werd de laatste decennia duidelijk merkbaar, ook in waarnemingen van de temperatuur in ons land (figuur 1). Het KMI (2009) concludeert inderdaad dat er een onweerlegbare stijging is in de jaar- en seizoentemperaturen in Sint-Joost-ten-Node/Ukkel vanaf de 19^e eeuw.

Figuur 1: Jaargemiddelde van de temperatuur in Ukkel (rode lijn) en wereldgemiddelde (CRU/Hadley Centre- blauwe lijn en NASA/GISS roze lijn)



afwijking uitgedrukt t.o.v. de gemiddelde jaartemperatuur voor de periode 1951-1980

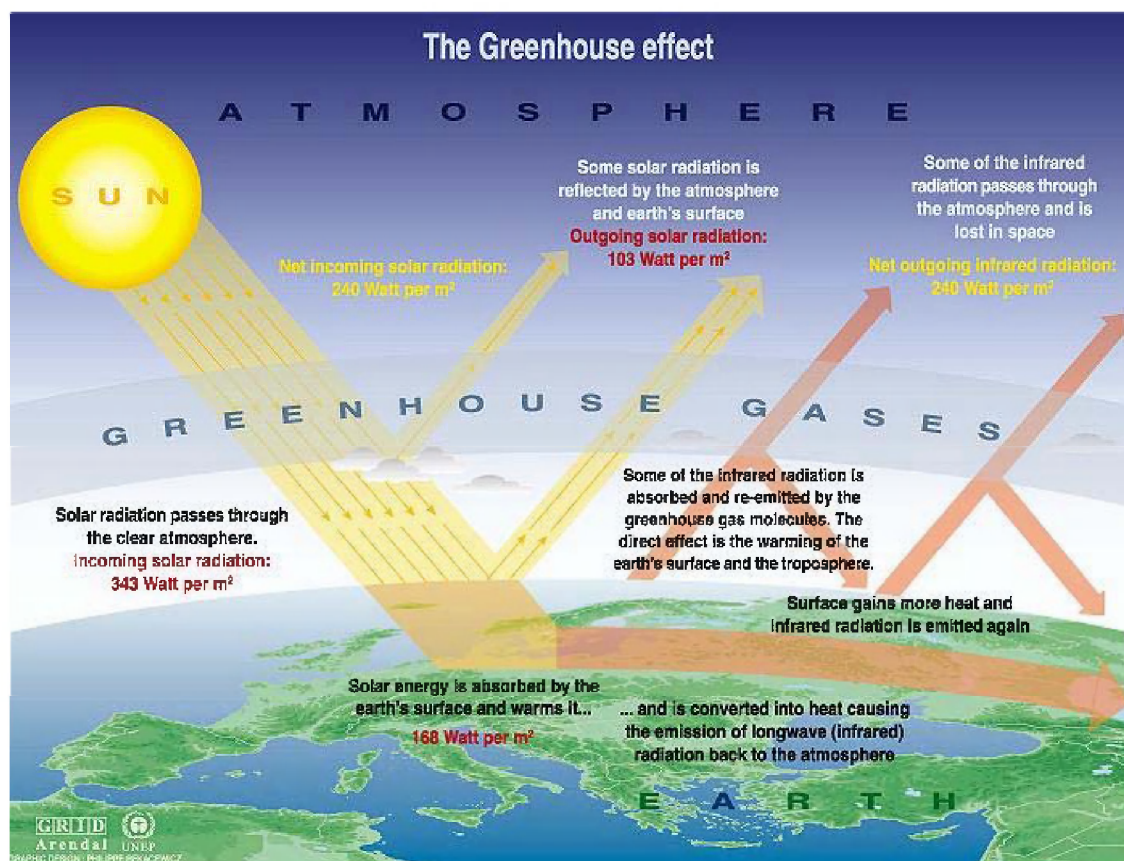
Bron: Demarée et al. (2009)

Het Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), een VN-organisatie die wetenschappelijke bevindingen van wetenschappers over de hele wereld over de klimaatverandering vergaart en die ongeveer om de zes jaar in een rapport publiceert, stelt in het meest recente rapport van 2007 dat de mens met hoge waarschijnlijkheid (meer dan 90 % zekerheid) bijdraagt tot de klimaatverandering (IPCC, 2007). Die bijdrage wordt toegeschreven aan de toegenomen uitstoot aan broeikasgassen door menselijke activiteiten in de atmosfeer (koolstofdioxide CO₂, methaan CH₄, stikstofoxide N₂O, ozon O₃, F-gassen en waterdamp H₂O¹). Er bestaat inderdaad een sterke correlatie tussen de concentratie van deze broeikasgassen in de atmosfeer en de temperatuurvariatie op aarde, wat wordt

¹ Waterdamp (H₂O) is het belangrijkste broeikasgas, maar de aanwezigheid ervan is vooral het gevolg van natuurlijke verschijnselen. Het heeft weinig belang bij het afwegen van de rol van de mens in de opwarming van de aarde.

toegeschreven aan de eigenschappen van broeikasgassen om infrarode straling te absorberen en terug uit te zenden (figuur 2). Naast de invloed van de mens zijn er ook nog andere potentiële invloedsfactoren (IPCC, 2007; KMI, 2009), zoals de variatie in de zonnestraling, de veranderende aanwezigheid van aerosolen (bv. als gevolg van vulkaanuitbarstingen) ... en natuurlijke fenomenen zoals el niño, la niña en NAO (schommelingen in atmosferische circulatiepatronen).

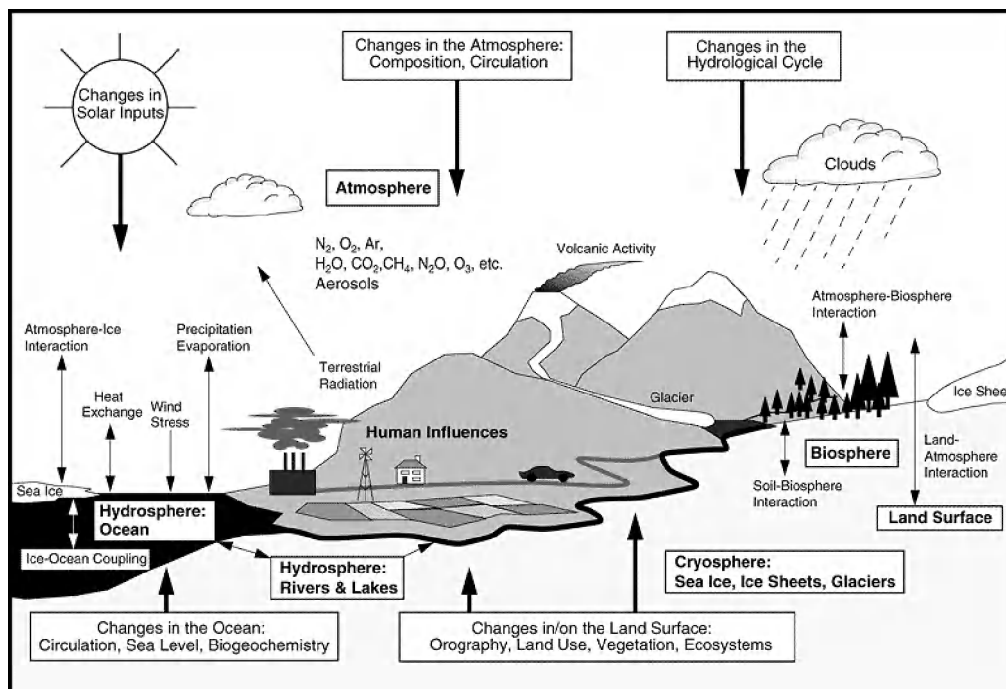
Figuur 2: Het broeikaseffect



Bron: IPCC, 2001

De huidige kennis van het globale klimaatstelsel en de verschillende interacties die er bestaan tussen de atmosfeer, de hydrosfeer (oceanen, zeeën, rivieren, meren), de biosfeer, de cryosfeer en de landoppervlakte (figuur 3) is immers nog zeer onvolmaakt. Zo heeft de hydrosfeer, welke meer dan 70 % van de aardoppervlakte beslaat, door de grote thermische inertie van water een regulerende invloed op de temperatuur van de atmosfeer. Bovendien treden er in de oceanen enorme warmtestromingen op, die worden onderhouden door windpatronen en door zoutconcentratie- en temperatuurgradiënten. De cryosfeer speelt een rol door de reflectie van zonnestraling op ijsoppervlakken, door het in stand houden van de zoutconcentratiegradiënten en dus de warmtestromingen in de oceanen en via het effect dat het afsmelten van ijskappen heeft op de zeespiegel. De landoppervlakte en de vegetatie absorberen zonnestraling, warmen erdoor op en zenden langegolf- of infraroodstraling terug de atmosfeer in (figuur 2). Ook beïnvloeden zij de thermische energiebalans via de evaporatie. De biosfeer tenslotte, kan broeikasgassen opnemen of uitstoten.

Figuur 3: Schematisch overzicht van de componenten betrokken in het globale klimaatsysteem (in vet), hun processen en interacties (dunne pijlen) en enkele aspecten die aan verandering onderhevig zijn (dikke pijlen)



Bron: IPCC, 2001

1.3 Onderzoek naar klimaatverandering

Klimaatmodellen beschrijven de belangrijkste processen van het globale klimaatsysteem op een vereenvoudigde manier. Ze vertrekken meestal van circulatiemodellen die de voornaamste stromingspatronen beschrijven in de atmosfeer en in de oceanen op basis van luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid. De warmtebalans wordt gemodelleerd rekening houdend met zowel de kortegolf-zonnestraling als de langegolfstraling, uitgezonden door het aardoppervlak. Verder houden zij (op zeer eenvoudige wijze) rekening met convectieprocessen, wolkenvorming, de invloed van zee-ijs, enz. De sterke vereenvoudigingen zijn nodig omwille van de zeer onvolledige kennis van de processen en hun interacties (zie hiervoor) en de enorme computer-rekenkracht die nodig is om de enorme complexiteit aan interacties in te rekenen, maar ook omwille van de grote ruimtelijke dimensies van het mondiale klimaatsysteem. In de mondiale klimaatmodellen wordt momenteel typisch gerekend met gridgroottes van 1 tot 3 breedte- en lengtegraden (of 100 tot 300 km). De vereenvoudigingen zorgen ervoor dat de resultaten erg onzeker zijn, zeker voor processen die zich op lokale schaal afspelen. Resultaten voor luchtdruk en temperatuur zijn een grootteorde nauwkeuriger dan deze voor neerslag en windsnelheid, vooral omdat ze ruimtelijk minder variabel zijn. Ook de gemiddelde waarden van (hydro-)klimatologische variabelen zijn heel wat nauwkeuriger dan deze van uitzonderlijke of extreme waarden.

Alhoewel de onzekerheden groot blijven, neemt de gedetailleerdheid van de klimaatmodellen continu toe. Er worden steeds meer processen en interacties in rekening gebracht (de meest recente zijn de interacties met de landoppervlakte, het zee-ijs, de koolstofcyclus, de aerosolen, de dynamische vegetatie, de chemische reacties in de atmosfeer ...). Ook wordt de gridgrootte steeds kleiner, momenteel tot 10 à 25 km voor gebieden met beperkte regionale uitgestrektheid, aan de grens gebruikmakend van grofschaligere (mondiale) modelresultaten.

De klimaatmodellen worden in de context van studies naar de invloed van klimaatverandering gebruikt om schattingen over de toekomstige veranderingen in de uitstoot aan

broeikasgassen (de zogenaamde broeikasgasemissiescenario's of kortweg emissiescenario's) door te rekenen naar hun invloed op het globale klimaatsysteem. Omwille van de grofschaligheid van de resultaten en de grote onzekerheden, kunnen simulatieresultaten met de klimaatmodellen echter niet rechtstreeks gebruikt worden voor hydrologische- en andere impactanalyse van klimaatverandering. Er dient een neerschaling te gebeuren, samen met een statistische correctie op basis van historische meetgegevens (Baguis et al., 2008). Verder heeft het geen zin om de impactanalyse door te voeren op basis van slechts 1 klimaatmodel of 1 broeikasgasemissiescenario. De onzekerheden in de resultaten van de klimaatmodellen en in de projecties van de toekomstige uitstoot aan broeikasgassen zijn immers zodanig groot dat deze onzekerheden best in rekening worden gebracht bij de impactanalyse. Daarom wordt bij voorkeur met een set aan scenario's gewerkt, die een representatief beeld geeft van de mogelijke variatie aan impactresultaten.

Bovendien zijn de impacts van klimaatverandering regionaal zeer variabel. Daarom moeten de resultaten van de klimaatmodellen specifiek voor elke streek geanalyseerd en neergeschaald worden. Voor Vlaanderen is dat recent gebeurd op basis van de meest recente runs met Europese regionale klimaatmodellen in onderzoeksprojecten voor Federaal Wetenschapsbeleid (CCI-HYDR, CLIMAR), het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) en het EU Research Training Network (SeaMocs). Deze resultaten worden gebruikt in meerdere lopende impactstudies, voor het begroten van de invloeden op waterhuishouding, natuur, landbouw ..., in het binnenland en langs de kust.

Dit rapport is hoofdzakelijk gebaseerd op resultaten afkomstig uit 11 recent afgeronde of nog lopende onderzoeksprojecten en aangevuld met nieuwe berekeningen voor de socio-economische schade ten gevolge van wijzigende waterhuishouding in het Vlaamse binnenland. We lijsten hier kort de 11 onderzoeken op die aan de basis van dit rapport liggen:

- onderzoeksproject CCI-HYDR over "Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems" voor Federaal Wetenschapsbeleid (onderzoeksprogramma Duurzame Ontwikkeling);
- onderzoeksproject voor het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) over "Berekening van klimaatscenario's voor Vlaanderen";
- onderzoeksproject over "Effect van klimaatwijzigingen op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituaties en op de globale waterbeschikbaarheid" voor het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) van de Vlaamse overheid;
- onderzoeksproject over "Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen" voor de Vlaamse Milieumaatschappij;
- onderzoeksproject SUDEM-CLI over "Impact of climate change on river hydrology and ecology: A case study for interdisciplinary policy oriented research" voor Federaal Wetenschapsbeleid (clusterproject onderzoeksprogramma Duurzame Ontwikkeling);
- MIRA onderzoeksproject "Impact op mens en economie t.g.v. overstromingen bekeken in het licht van wijzigende hydraulische condities, omgevingsfactoren en klimatologische omstandigheden, MIRA onderzoeksrapport 2006/02";
- onderzoeksproject ADAPT over adaptatie-maatregelen tegen overstromingen waarvan het risico wordt verhoogd door de klimaatverandering. Het project loopt parallel en in samenwerking met het project CCI-HYDR voor Federaal Wetenschapsbeleid (onderzoeksprogramma Duurzame Ontwikkeling);
- onderzoeksproject CLIMAR over "Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities" voor Federaal Wetenschapsbeleid (onderzoeksprogramma Duurzame Ontwikkeling);
- Onderzoeksproject "Adaptatiemogelijkheden van de Vlaamse landbouw aan klimaatverandering" voor de Afdeling Monitoring en Studie van het Departement Landbouw & Visserij van de Vlaamse overheid;
- Interreg III B North Sea project SAFECoast, rond de effecten van klimaatverandering op laaggelegen gebieden aan de Noordzee;

- SeaMocs EU Research Training Network over “Applied stochastic models for ocean engineering, climate and safe transportation”.

2 Methode

Alvorens in te gaan op de gehanteerde scenario's (hoofdstuk 3) en de eigenlijke onderzoeksresultaten (hoofdstuk 4) geven we eerst een korte beschrijving van de onderzoeksmethoden die in de verschillende hogervermelde onderzoeksprojecten werden/worden gevolgd.

2.1 Project CCI-HYDR

Het project CCI-HYDR rond “*Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems*” wordt uitgevoerd via een nauwe samenwerking tussen de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven (P.Willems) en de Afdeling Risico-analyse en Duurzaamheid van het KMI (E.Roulin, P.Baguis, G.Demarée) (zie webstek project op: <http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR.htm>). Het project loopt sinds januari 2006 tot december 2009, en bestudeert de impact van klimaatverandering op het risico van hydrologisch uitzonderlijke gebeurtenissen (overstromingen, laagwater ...) langs waterlopen en rioleringen in België. Voor waterlopen omvatten hydrologische extrema zowel perioden van hoge neerslagafstroming en dus overstromingsgevaar, als droge perioden met uitzonderlijk lage afvoer. Voor rioleringsystemen zijn enkel perioden met hoge afvoer relevant. Het onderzoek omvat volgende hoofdstappen:

1. Afleiding van klimaatveranderingsscenario's voor neerslag en potentiële evapotranspiratie (ET_o) voor België. Deze stap omvat een gedetailleerde statistische analyse van de simulatieresultaten met mondiale en regionale klimaatmodellen voor neerslag en ET_o. De simulatieresultaten die relevant zijn voor de hydrologie in België zijn geselecteerd, en fysisch en statistisch gefundeerd in ruimte en tijd geëxtrapoleerd naar de schaal waarop hydrologische extrema zich manifesteren (of geïnduceerd worden door het klimaat) (Baguis et al., 2008; Ntegeka et al., 2008b).
2. Studie van trends en cyclische patronen voor langetermijn historische meetreeksen van neerslag, ET_o en rivierdebieten. De resultaten van deze statistische tijdreeksanalyse zijn gebruikt om de scenario's van klimaatverandering, zoals geselecteerd en geschaald in vorige hoofdstap, te verifiëren voor het recente verleden (Willems et al., 2007b; Ntegeka & Willems, 2008a).
3. Studie van de hydrologische en hydrodynamische impact van klimaatverandering. In deze stap worden de klimaatveranderingsscenario's doorgerekend in gecombineerde hydrologische, hydraulische en statistische rivierbekkenmodellen om de impact op de kansen en herhalingsfrequenties van hoogwater/overstromingen, laagwater en andere hydrologische variabelen (zoals cumulatieve neerslagafstromingsdebieten, werkelijke evapotranspiratievolumes, grondwatervoeding, enz.) te kwantificeren. Ook wordt de invloed bepaald op overstromingskansen langs rioleringsystemen.

2.2 INBO-project

Voor het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) werd gedurende de periode van december 2007 tot december 2008 een onderzoeksproject uitgevoerd over de “*Berekening van klimaatscenario's voor Vlaanderen*”. Het projectteam bestond uit het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI o.l.v. G. Demarée), het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI o.l.v. A. Kattenberg), en de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven (o.l.v. P. Willems). In dit project zijn de klimaatveranderingsscenario's van het CCI-HYDR project verder uitgebreid naar scenario's voor temperatuur en windsnelheid (Baguis et al., 2009). Ook is een vergelijking gemaakt met de Nederlandse KNMI'06 scenario's (www.knmi.nl/klimaatscenarios; van den Hurk et al., 2006) (Demarée et al., 2009).

2.3 WL-project

De onderzoeksopdracht over *“Effect van klimaatwijzigingen op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituaties en op de globale waterbeschikbaarheid”* voor het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) van de Vlaamse overheid bestaat uit 2 afgeronde fases en een lopende vervolgfase. De eerste fase werd uitgevoerd gedurende de periode oktober 2005 – september 2006. In deze fase werd een methode ontwikkeld om de invloed van potentiële klimaatverandering in te rekenen in de methodologie van het WL voor het modelleren van bevaarbare waterlopen, het berekenen en karteren van overstromingsrisico's en het analyseren van laagwaterstrategieën. De methode is gebaseerd op de CCI-HYDR klimaatveranderingsscenario's voor neerslag en potentiële evapotranspiratie bij verschillende tijdschalen. Ze werd eerst getest voor drie deelbekkens in het Denderbekken via hydrologische impactanalyse op basis van conceptuele hydrologische modellen (NAM) per deelstroomgebied (per VHA-zone) (Willems et al., 2007a, 2007c).

In een tweede fase (periode april 2007 – maart 2008) werd de methode toegepast voor alle hydrografische deelbekkens van rivierbekkens van bevaarbare waterlopen in het Vlaams gedeelte van het Schelde-stroomgebied. Hierbij is opnieuw gebruik gemaakt van de hydrologische en hydrodynamische modellen van het WL voor het berekenen en karteren van overstromingsrisico's, en het analyseren van laagwaterstrategieën (Boukhris et al., 2008; Willems et al., 2008).

In het lopend vervolgproject worden deze hydrologische impactresultaten van klimaatverandering verder uitgebreid naar het Vlaams gedeelte van het Maas-stroomgebied en wordt de invloed op laagwater en bijhorende waterbeheersproblemen grondiger bestudeerd.

2.4 VMM onderzoeksproject actualisatie en extrapolatie Code van Goede Praktijk voor ontwerp van rioleringsstelsels

De studie “Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de ontwerp-Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen” werd uitgevoerd voor de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij. De studie had tot doel de neerslagstatistieken en afgeleide resultaten uit de Code, die in 2004 werden bekomen op basis van de neerslaggegevens in Ukkel voor de periode 1898-1997 (Vaes et al., 2004), te actualiseren overeenkomstig de huidige klimaatcondities. Ook werd op basis van de huidige beschikbare kennis over de toekomstige klimaattevoeltes een inschatting gemaakt van de verandering in neerslagstatistieken en bijhorende ontwerpwaarden uit de Code tot het jaar 2100. Hierbij werd rekening gehouden met de onzekerheden op de inschatting van de toekomstige evolutes van het klimaat. De veranderende klimaatcondities werden finaal ook vertaald naar aangepaste neerslagreeksen en gecombineerd met bijhorende aangepaste tijdreeksen voor potentiële evapotranspiratie (ET_o), om gebruikt te worden in hydrologische en hydrodynamische modelleringsstudies. De resultaten van deze studie, die liep tot september 2009, zijn gedocumenteerd in Willems (2009).

2.5 Project SUDEM-CLI

Het project SUDEM-CLI over *“Impact of climate change on river hydrology and ecology: A case study for interdisciplinary policy oriented research”* wordt uitgevoerd voor Federaal Wetenschapsbeleid. Het project heeft als doelstelling om een interfacing te realiseren tussen drie, vaak gescheiden onderzoekdisciplines: klimatologie, hydrologie/waterbeheer en ecologie. Hierbij worden enkele lopende projecten geclusterd zoals het ADAPT-project dat in synergie met het project CCI-HYDR de impact bestudeert van overstromingsscenario's (frequentie, duur, hoogte en seizoen) op de vegetaties van riviervalleien en het aquatische ecosysteem. Het project SUDEM-CLI loopt vanaf november 2008 voor een periode van 2 jaar. Het wordt uitgevoerd door de Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer van de UA (P. Meire), de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven (P. Willems) en de ASTR-onderzoeksgroep van de UCL (J-P. van Ypersele, Ph. Marbaix) als wetenschappelijke

partners en de Provincie Antwerpen en de Vlaamse Milieumaatschappij als niet gefinancierde projectpartners.

De doelstelling van het clusterproject is om “key experts” uit de klimatologische, hydrologische en ecologische onderzoeksgemeenschappen samen te brengen met waterbeheerders en beleidsmakers, om de besluitvorming rond de impact van klimaatverandering op de ecosystemen van rivieren en riviervalleien te verbeteren. Dit gebeurt via een serie workshops waar relevante onderzoekstopics zullen bediscussieerd worden in open multidisciplinaire teams bestaande uit klimatologen, hydrologen en waterbouwkundige ingenieurs, ecologen en beleidsverantwoordelijken. Sociologen en economen uit de onderzoeksprojecten ADAPT en CCI-HYDR zullen uitgenodigd worden om deel te nemen aan de workshops om hun expertise in te brengen in de algemene discussie rond klimaatveranderingen en duurzame oplossingsstrategieën. Om toe te laten dat alle relevante kwesties worden behandeld en er voldoende wordt gefocust, spitsen het onderzoek en de workshops zich toe op de case-studie van “Grote Nete en Grote Laak”. De resultaten van de CCI-HYDR en INBO-klimaatprojecties worden uitgebreid met klimaatmodellruns vanuit het ENSEMBLE-project en met de CLM-klimaatmodellruns van de UCL. Deze klimaatprojecties worden doorgerekend naar veranderingen in stroomregimes (project CCI-HYDR) en geassocieerd met waterkwaliteit (beperkte focus in het project CCI-HYDR) en ecologie/biodiversiteit (beperkte focus in het ADAPT-project). Ze worden binnen het SUDEM-CLI project verder uitgediept, samen gebracht en geïntegreerd met als doel betere projecties te maken van de impact op habitatkwaliteit en diversiteit. Daarom wordt speciale aandacht besteed aan de integratie van de technische wetenschappelijke resultaten in de deelbekkenbeheerplannen.

2.6 MIRA 2006 onderzoeksproject

2.6.1 Inleiding

Deze studie uit 2006, gepubliceerd in Vanneuville et al. (2006), geeft een overzicht van de methodologie voor het omgaan met de gevolgen van wateroverlast zoals op dat ogenblik beschikbaar en werd uitgewerkt met nieuwe basisdata voor 2006. Naast bepaling van schade a.d.h.v. schadefuncties die relaties tussen waterhoogte enerzijds en gevolgen in een bepaald gebied anderzijds weergeven, wordt ook een inschatting gemaakt van het aantal slachtoffers. Om de relevantie van de methodologie te bepalen worden de onderzoeksresultaten vergeleken met de belangrijkste overstromingen sinds 1993.

Voor de situatie 2006 wordt in deze studie een risicokaart van de ‘huidige situatie’ gemaakt. Belangrijke opmerkingen hierbij hebben betrekking op de keuze van het grid, het concept restrisico, kwaliteit van de data en schaal waarop de resultaten kunnen gebruikt worden.

Op basis van de situatie 2006 en de daarbij horende opmerkingen worden een aantal toekomstscenario's van naderbij bekeken. Vooraleer tot realistische scenario's te komen werd onderzocht wat de invloeden van klimaatverandering en menselijk ingrijpen kunnen zijn op de bestaande modellen. Naast deze eerder theoretische uitwerking, werden ook een zestal scenario's voor de Benedenschelde en haar tijgebonden zijrivieren volledig uitgewerkt. Deze omvatten voorspellingen voor 2010 tot 2030 voor verschillende stadia van zeespiegelstijging en waterbeheersingswerken.

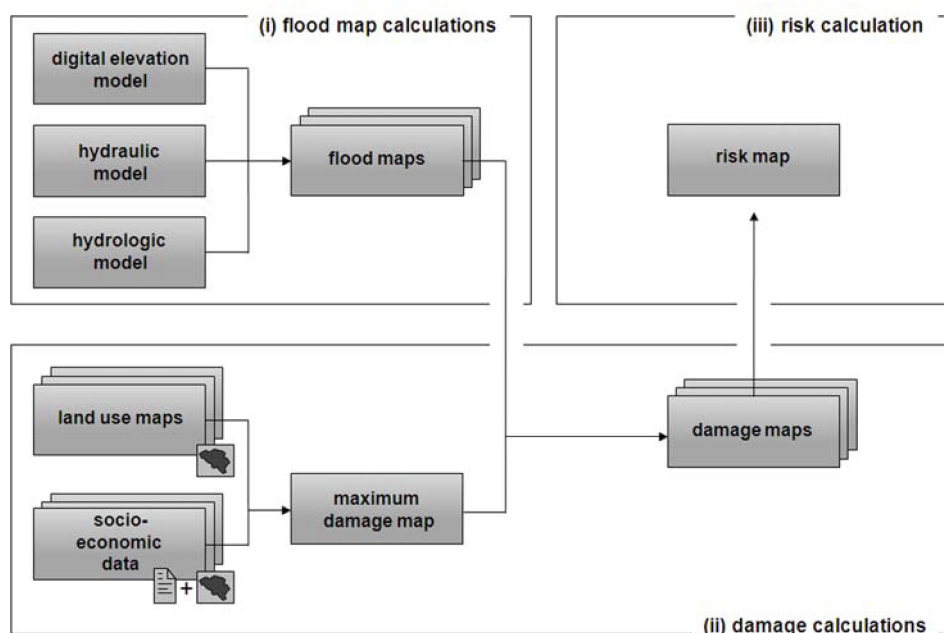
2.6.2 Oorspronkelijke methode

De methode die in Vanneuville et al. (2006) beschreven werd, wordt in dit rapport voor MIRA 2009 grotendeels hergebruikt om nieuwe risicoberekeningen uit te voeren. Hier worden slechts kort de hoofdlijnen van de methode overlopen.

In figuur 4 wordt een schematisch overzicht weergegeven van de methodologie om risicoberekeningen uit te voeren. In de eerste fase (die in feite los staat van de risicoberekeningen) wordt er een discrete set overstromingskaarten berekend. Deze overstromingskaarten werden in het kader van het project CCI-HYDR en het WL-project door

de K.U.Leuven en WL ontwikkeld. Voor verschillende bekkens (IJzer, Leie, Bovenschelde en afvoerende kanalen in Brugse Polders en Gentse kanalen, Dender, Demer, Zeeschelde, Nete en Dijle en Zenne) werden per klimaatscenario (laag, midden en hoog, zie paragraaf 3.1.2.) voor enkele terugkeerperiodes (1, 10, 50 en 100 jaar) overstromingskaarten berekend. Daarnaast werden voor dezelfde terugkeerperiodes ook overstromingskaarten berekend voor de huidige klimatologische situatie zodat een vergelijking tussen de toekomstscenario's en de huidige situatie mogelijk is.

Figuur 4: Schematische weergave van de risicomethodologie



In een tweede fase wordt op basis van landgebruikskaarten en socio-economische data een maximale schadekaart opgesteld. Deze fase start met het indelen van het studiegebied in verschillende landgebruiksklassen (bijvoorbeeld bebouwing, akkerland, industrie ...). Op basis van socio-economische data (woningprijzen, opbrengst van akkerland, prijs van landbouwproducten, prijzen van voertuigen ...) wordt aan elk van deze klassen een maximale schade (dit is de economische schade aan een object in het geval het volledig vernield wordt door een calamiteit, in casu een overstroming) toegekend. Deze maximale schade per landgebruiksklasse is niet constant voor gans Vlaanderen maar kan verschillen van regio tot regio. Dit komt omdat woningprijzen kunnen variëren van gemeente tot gemeente, landbouwopbrengsten kunnen verschillen in de verschillende landbouwstroken in Vlaanderen, enz. In de laatste stap van de tweede fase worden vervolgens de overstromingskaarten gecombineerd met de maximale schadekaart. Met behulp van schadefuncties kan men immers gaan bepalen wat de werkelijke schade zal zijn in functie van de waterdiepte en de maximale schade. Zo komt men uiteindelijk tot een discrete set schadekaarten (1 schadekaart voor elke terugkeerperiode waarvoor er een overstromingskaart is).

De volgende fase in het proces is het omzetten van de verschillende schadekaarten naar één risicokaart. *Risico* (€/m².jaar) wordt in deze methodologie uitgedrukt als *gemiddelde verwachte schade per oppervlakte per tijdseenheid*. Om te komen van de schadekaarten tot een risicokaart dient aan de verschillende schadekaarten (per terugkeerperiode) een gewicht toegekend te worden. De berekening van deze coëfficiënten is uitvoerig beschreven in Vanneuville et al. (2006). Voor de berekeningen die voor dit project werden gedaan (met terugkeerperiodes 1, 10, 50 en 100), was de formule de volgende:

$$R = 0,7857 \cdot S_1 + 0,175 \cdot S_{10} + 0,0255 \cdot S_{50} + 0,0138 \cdot S_{100}$$

2.6.3 Aangepaste methode in het kader van MIRA 2009

Voor de scenarioberekeningen in dit rapport wordt echter licht afgeweken van de hierboven beschreven methodologie. Meerbepaald de eerste stap van de tweede fase (het indelen van het studiegebied in landgebruiksklassen) wordt anders ingevuld. In de oorspronkelijke methodologie worden de landgebruiksklassen bepaald op basis van twee databronnen: Corine Land Cover en de Kleinschalige Bodemgebruikkaart van Vlaanderen en Brussel (Vanneuville et al., 2006). Dit geeft echter enkel de huidige toestand van het landgebruik weer, maar leert ons niets over toekomstig landgebruik. Aangezien landgebruik een determinerende factor in de risicoberekening is, is het voor toekomstscenario's ook noodzakelijk om een inschatting van de evolutie van het landgebruik te hebben. Daarom werd in deze studie gebruik gemaakt van de landgebruikscenario's die ontwikkeld werden in het kader van MIRA 2009 en NARA 2009: 'Landgebruik in Vlaanderen' (Gobin et al., 2009a). De inhoud van deze scenario's wordt besproken in § 3.2.2. Om deze landgebruikskarten te gebruiken in de risicomethodologie is een conversie gebeurd van de klassen gebruikt door VITO naar de landgebruiksklassen die als input dienen in de risicomethodologie (tabel 1).

Tabel 1: Conversietabel van landgebruiksklassen

Klasse Landgebruikscenario VITO	Klasse Risicomethodologie
Overige	Achtergrond
Niet beheerd grasland met biologische waarde	Natuur
Niet geregistreerde landbouwgrond	Akkerland
Moeras zonder beheer	Natuur
Heide zonder beheer	Natuur
Kustduin zonder beheer	Natuur
Residentiële/commerciële bebouwing	Bebouwing 1
Agrarische bebouwing	Bebouwing 3
Industrie	Industrie
Zeehaven	Infrastructuur
Luchthaven	Luchthaven1
Grasland biodiversiteit	Natuur
Grasland met natuur- en milieudoelen (met ook een landbouwfunctie)	Grasland
Grasland productie	Grasland
Akker met natuurdoelen (met ook een landbouwfunctie)	Akkerland
Akker met milieudoelen (met ook een landbouwfunctie)	Akkerland
Akker productie	Akkerland
Bos biodiversiteit	Bos
Bos multifunctioneel	Bos
Moeras	Natuur
Heide	Natuur
Kustduin	Natuur
Slikke en schorre	Natuur
Recreatie- en sportterreinen	Recreatie
Parken	Recreatie
Militaire voorzieningen	Infrastructuur
Infrastructuur	Infrastructuur
Water	Water
NoData	Achtergrond

Op deze manier kan toekomstig (gemodelleerd) landgebruik geïntegreerd worden in de risicomethodologie. Wel dient opgemerkt te worden dat de resolutie van de gebruikte landgebruikscenario's 150 m is, terwijl de data van de oorspronkelijke methodologie 5 m is. Daarom is het niet aan te raden om de resultaten van de risicoberekening van de

toekomstscenario's te vergelijken met de resultaten van de oorspronkelijke methodologie. Wel kan een toekomstscenario vergeleken worden met de huidige situatie (referentiejaar 2005) die ook met een resolutie van 150 m is opgemaakt door VITO.

2.7 ADAPT-project

Het project ADAPT of voluit "Towards an integrated decision tool for adaptation measures – case study floods" wordt uitgevoerd door Arcadis-Ecolas & UGent (aansturing en integratie), ULB-CEESE (economische aspecten), UA-ECOBIE (ecologische aspecten), KUL-HIVA (sociale aspecten) en ULg-HACH (hydraulische modellering gevalstudie Wallonië). Er is een intensieve samenwerking met het project CCI-HYDR (K.U.Leuven); enerzijds qua afstemming rond te gebruiken klimaatscenario's, anderzijds staat K.U.Leuven in voor de hydraulische modellering van de gevalstudie voor de Dender. ADAPT startte begin 2006 en loopt tot einde 2009. Informatie en tussentijdse rapporten zijn terug te vinden op de webstek, <http://dev.ulb.ac.be/ceese/ADAPT/home.php>.

Het project ADAPT heeft als hoofddoelstelling een geïntegreerde procedure en beslissingsmodel te ontwikkelen voor adaptatie-maatregelen tegen overstromingen waarvan het risico wordt verhoogd door de klimaatverandering. Een evaluatie van de effecten van klimaatverandering op het watersysteem is reeds beschikbaar (De Groof et al., 2006).

Aanvullend op de doorrekening van de waterkwantitatieve effecten van klimaatverandering voor de bevaarbare waterlopen in het WL-project en de economische schade in het MIRA 2006-project (zie vorige paragraaf), worden in het ADAPT-project bijkomend de effecten van wijzigende neerslag en zeeniveau op overstromingsrisico's in de vorm van economische, ecologische en sociale effecten bepaald, en dit langs zowel de onbevaarbare als de bevaarbare waterlopen in de Dender-gevalstudie. Ook wordt een aanzet gegeven tot het beschrijven van de duurzame meerwaarde van geïntegreerde maatregelen tegen overstroming (meerwaarde voor economie, mens en natuur).

2.8 Project CLIMAR

Het project CLIMAR bestudeert de effecten van klimaatverandering en adaptatie-maatregelen voor het Belgisch deel van de Noordzee en de Vlaamse kustzone (webstek www.arcadisbelgium.be/climar). Dit project wordt gefinancierd door Federaal Wetenschapsbeleid en wordt uitgevoerd door de Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee (MUMM), ArcadisEcolas-UGent, het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse overheid, het Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO) en het Maritiem Instituut van de UGent. CLIMAR startte begin 2007 en loopt tot einde 2010. Het heeft de volgende deeltaken (Van den Eynde et al., 2008b):

- een globaal overzicht van de effecten van klimaatverandering op de Vlaamse zee en kustzone: zeespiegelstijging, toename van de stormen, veranderingen in golfpatronen ...;
- hydrodynamische modelleringsresultaten van effecten van klimaatverandering voor de Noordzee;
- een integrale analyse van de effecten van klimaatverandering op maritieme sectoren;
- ontwikkelen van adaptatie-maatregelen en formuleren van een sectorale adaptatiestrategie;
- opzetten van een adaptatie-proces en een beoordelingskader voor adaptatiestrategieën, inclusief implicaties naar beleid en wetgeving.

Hierbij wordt gewerkt met 2 gedetailleerde gevalstudies: kustverdediging en visserij. Maar ook de andere sectoren (toerisme, havens ...) komen telkens aan bod.

2.9 Project Adaptatiemogelijkheden Vlaamse Landbouw

Aangezien landbouw één van de meest klimaatafhankelijke sectoren is, drong een analyse van de impact van mogelijke adaptatiemaatregelen zich op. De doelstelling van deze studie is

de adaptatiemogelijkheden van de Vlaamse land- en tuinbouw aan klimaatverandering te inventariseren en met cijfers te onderbouwen. Een belangrijk aspect hierbij is de scenariokeuze.

Binnen de Vlaamse Landmaatschappij (VLM) stelde de projectgroep 'plattelandsbeleid, een gezamenlijk innovatieproces' een set van vier mogelijke maar duidelijk verschillende ontwikkelingsscenario's op voor het Vlaamse platteland, die worden voorgesteld op de assen van handel (regionaal tot mondiaal) en energieprijzen (laag tot hoog). De VLM-scenario's en bijhorende verhaallijnen werden in de mate van het mogelijke gekoppeld aan de IPCC-emissiescenario's én gebruikt voor de invulling van kwalitatieve inschattingen van de impacten.

De landbouwsector levert een brede waaier aan diensten, met name productieve, ondersteunende, regulerende en culturele diensten. De impact van klimaatverandering op de Vlaamse landbouw werd gesimuleerd op perceelsniveau voor plantaardige productieve diensten en op bedrijfsniveau voor dierlijke productieve diensten aan de hand van fysisch gebaseerde productiemodellen, aangevuld met en getoetst aan bevindingen uit de literatuur. Om de impact van klimaatverandering op de ondersteunende, regulerende en culturele diensten in te schatten, werd gebruik gemaakt van een heuristische matrix waarin de mogelijke verwachtingen voor de ruimere agrarische omgeving werden beschouwd voor klimaatverandering in het algemeen en voor elk van de emissiescenario's en bijhorende verhaallijnen afzonderlijk, aan de hand van eenvoudig af te leiden vuistregels.

2.10 Project SAFECoast

SAFECoast was een Interreg IIB Noordzee project (2005-2008) om toekomstige effecten op het overstromingsrisico van de kustvlakte te bepalen. De ondertitel luidt: hoe kunnen we onze voeten droog houden in de laaggelegen gebieden langs de Noordzee. Betrokken landen waren: V.K., Duitsland, Nederland, Denemarken en België. Doel was om van elkaar te leren door de verschillende context en beheersmaatregelen voor overstromings- en erosierisico's te vergelijken. SAFECoast keek vooruit naar 2050. De resultaten geven een zicht op de (toekomstige) ontwikkelingen in het kust(risico)beheer.

Er werd gebruik gemaakt van scenarioanalyses voor klimaatverandering en toekomstig landgebruik om het risico op verschillende schalen in tijd en ruimte te bepalen voor verschillende kustgebieden. Er werd gekeken naar 'voorbeelden van goede praktijk' voor overstromings- en erosierisico's in kustgebieden. De nadruk ligt op samenwerking tussen landen en regio's en tussen wetenschappers, beheerders en beslissers.

De negatieve gevolgen van kustoverstromingen en erosie vragen een brede waaier aan oplossingen en strategieën om kustgebieden te beschermen of om de gevolgen te beperken of te compenseren.

De SAFECoast-conclusies geven aan dat de oorzaken en aanpak van de risico's in de landen rond de Noordzee in grote lijnen gelijkaardig zijn, maar dat de resultaten daarom nog niet rechtstreeks kunnen vergeleken worden. Door het huidige beheer voort te zetten en te intensifiëren kan het merendeel van de overstromingsgevoelige gebieden een aanvaardbaar risiconiveau houden tegen aanvaardbare kosten, rekening houdend met de trends in het klimaat. Een meer integrale benadering van kustrisicobeheer dringt zich evenwel op, waarbij zowel wordt nagegaan welke problemen voorkomen, wie de betrokkenen zijn en welke de mogelijke oplossingen zijn op deze schaal (in tijd en ruimte). Het project geeft dan ook afzonderlijke aanbevelingen voor verschillende doelgroepen: beleidsmakers & beheerders, onderzoekers en bewoners & bezoekers.

2.11 Project SeaMocs

Het Europese onderzoeks- en trainingsnetwerk "SeaMocs" handelt over het toepassen van stochastische modellen voor kuststroming, klimaat en veilig transport (www.maths.lth.se/seamocs). Het wordt gefinancierd door de Europese Commissie, met

partners van 9 Europese universiteiten, waaronder de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven. Doel van het project is onder meer om de invloed van klimaatverandering in te schatten op stormvloed en langs de kust. Dit gebeurt voor de Vlaamse kust via een samenwerking tussen K.U.Leuven en KNMI. Het project is gestart in 2005 en loopt nog tot eind 2009. Langetermijnmetingen van waterhoogten langs de kust (sinds 1925, opgedeeld in de astronomische tijcomponent en de stormopzethoogte) en van windsnelheden worden geanalyseerd en gerelateerd aan atmosferische circulatiepatronen. Deze relaties worden daarna gebruikt om toekomstige veranderingen in de circulatiepatronen, zoals voorspeld door klimaatmodellen, te vertalen naar veranderingen aan stormopzethoogten (= toename van de waterspiegel ten gevolge van windgolven) langs de kust.

3 Inhoud van de scenario's

3.1 Klimaatveranderingsscenario's

3.1.1 Basis: IPCC-broeikasgasemissiescenario's

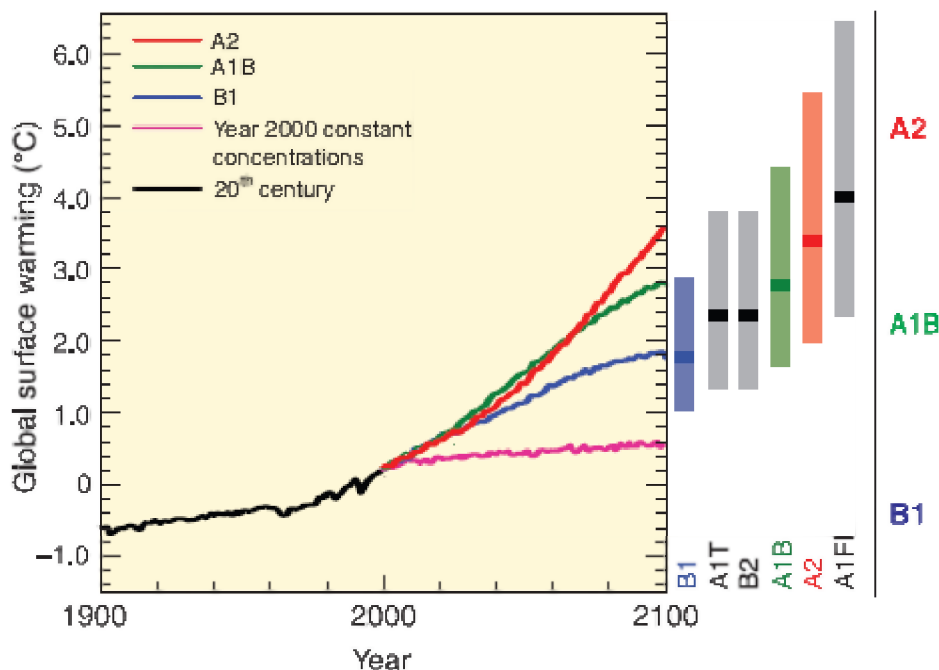
Broeikasgasemissies in Vlaanderen dragen bij aan de klimaatverandering. Maar klimaatverandering is – ook al uit zich dit met belangrijke regionale verschillen – bij uitstek een mondiaal gebeuren, door de snelheid waarmee de uitgestoten broeikasgassen zich in de atmosfeer vermengen en de lange verblijftijd van die gassen in de atmosfeer. Voor het aftasten van de mogelijke klimaatveranderingen die Vlaanderen komende decennia ondergaat dient men dan ook te vertrekken van mondiale scenario's inzake broeikasgasuitstoot, eerder dan van de scenarioresultaten inzake broeikasgasemissies van de verschillende sectoren in MIRA 2009.

De gebruikte toekomstprojecties inzake broeikasgassen zijn primair gebaseerd op deze van het IPCC (2001, 2007). Ze zijn gebaseerd op aannames omtrent verdere ontwikkeling van de maatschappij (de zogenaamde wereldbeelden). De IPCC-basisscenario's zijn:

- A1 (en specifieke versie A1B): mondiale markt
- A2: veilig scenario
- B1: mondiale solidariteit
- B2: zorgzaam scenario

De scenario's 1 (A1 en B1) gaan uit van een verdere mondialisering van de wereldbevolking en -economie, met een bevolkingsgroei die piekt in het midden van de 21^e eeuw en daarna daalt, samen met snelle economische veranderingen en een sterke evolutie naar een diensten- en informatie-economie. De scenario's 2 (A2 en B2) veronderstellen daarentegen een evolutie naar een meer lokaal georiënteerde wereldbevolking en -economie, met meer gefragmenteerde technologische evoluties. Het verschil tussen de scenario's 1 en 2 heeft dus in hoofdzaak te maken met het verschil tussen de evolutie naar een meer mondiale wereld of naar een meer regionaal georiënteerde wereld. Het verschil tussen de scenario's A en B heeft anderzijds te maken met de graad van milieuduurzaamheid in de verdere evolutie van de wereld. Bij de scenario's B gaat men uit van een evolutie die maximaal rekening houdt met de interacties tussen economie, sociale aspecten en de impact op het milieu, en die uitgaat van een algemene vermindering in het gebruik van materialen en de introductie van propere en duurzamere technologieën. De scenario's A gaan uit van een verdere economische groei met tragere technologische vernieuwingen. Als gevolg hiervan kunnen de concentraties van de broeikasgassen in de atmosfeer verder blijven toenemen tot het jaar 2100, met in het meest pessimistisch scenario een verdrievoudiging van de CO₂-uitstoot. Een ander scenario is dat deze eerst toenemen tot het midden van de 21^e eeuw en daarna opnieuw dalen. De meeste eerder uitgevoerde internationale impactstudies rond klimaatverandering gaan uit van het A2-scenario, wat eerder een bovengrens geeft van de mogelijke broeikasgasuitstoot en dus ook van de potentiële impact. Figuur 5 geeft een overzicht van de evolutie in de mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuurstijging bij de verschillende IPCC-scenario's. Zij zijn gebaseerd op de resultaten van mondiale klimaatmodellen en sluiten aan op de historische waarnemingen (IPCC, 2007). Voor elk emissiescenario is het gemiddeld simulatieresultaat van de toekomstige mondiale temperatuurevolutie tot 2100 geplot op basis van alle in IPCC (2007) beschouwde klimaatmodellen. Voor het resultaat in 2100 is tevens de onzekerheidsrange weergegeven (range van de resultaten van alle beschouwde klimaatmodellen).

Figuur 5: Historische en potentieel toekomstige variaties in de mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur



Bron: IPCC (2007)

3.1.2 Projecten CCI-HYDR, INBO, WL, VMM, SUDEM-CLI, MIRA 2006, ADAPT en Adaptatie Landbouw

De klimaatveranderingsscenario's ontwikkeld in de CCI-HYDR en INBO-projecten zijn gebruikt in verschillende andere projecten waarvan de (voorlopige) resultaten beschouwd worden in dit rapport. Die scenario's zijn gebaseerd op de effecten van de toekomstprojectie in de uitstoot aan broeikasgassen, zoals gesimuleerd in mondiale en regionale klimaatmodellen. Er wordt specifiek gekeken naar de effecten voor Vlaanderen.

In het project CCI-HYDR zijn meer dan 30 simulatieruns, uitgevoerd in het kader van het Europese PRUDENCE-project, statistisch verwerkt om de klimatologische effecten van de IPCC-broeikasgasemissiesscenario's voor Vlaanderen/België te begroten. Het gaat om simulaties uitgevoerd met 12 verschillende gekoppelde mondiale – regionale klimaatmodellen. Voor elk model is een klimaatsimulatie beschikbaar voor een historische referentieperiode van 30 jaar (1961-1990) (controle-run genoemd) en één of meerdere simulaties voor een toekomstige periode (2071-2100) met dezelfde lengte als de controle-run (30 jaar) en dit tot 2100. Tabellen 2 en 3 geven een overzicht van de beschouwde controle- en scenarioruns. De scenarioruns hebben vooral betrekking op het emissiescenario A2, alhoewel er ook enkele scenarioruns met emissiescenario B2 werden beschouwd. Voor de andere emissiescenario's (A1B en B1) zijn geen regionale klimaatmodelruns beschikbaar voor Vlaanderen en werd gebruik gemaakt van simulatieruns met mondiale klimaatmodellen, zoals ter beschikking gesteld door het IPCC (mondiale klimaatmodelruns die gebruikt werden als basis voor het 4^e Assessment Report van het IPCC). Tabel 4 geeft een overzicht van deze runs. In het project CCI-HYDR zijn voor al deze simulatieruns de resultaten voor neerslag en potentiële evapotranspiratie (ET_o) statistisch verwerkt voor de specifieke Belgische/Vlaamse regio. Figuur 6 toont een voorbeeld van de gridlocaties van het regionaal klimaatmodel van het Deens Meteorologisch Instituut (DMI) waarvoor simulatieresultaten beschikbaar zijn vanuit het PRUDENCE-project. De gridresolutie is in dit geval 25 km. Eerst werden de resultaten geanalyseerd voor de gridlocatie dichtst bij het hoofd-meteorologisch station van het KMI in Ukkel (figuur 6). Eén van de taken hier was het vergelijken van de consistentie van de simulatieresultaten van de klimaatmodellen voor het huidige en recente klimaat met de

historische metingen in Ukkel. Daarna zijn ook de andere gridlocaties voor België geanalyseerd en de regionale verschillen bestudeerd voor de klimaatveranderingsimpacts op neerslag en ETo. In het INBO-project zijn bijkomend voor temperatuur en windsnelheid de klimaatveranderingsimpacts afgeleid, maar enkel voor de gridlocatie dichtst bij Ukkel.

Tabel 2: Overzicht van de controleruns (periode 1961-1990) met gekoppelde regionale-mondiale klimaatmodellen, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn

PRUDENCE Partner		Naam run	Mondiaal klimaatmodel	Regionaal klimaatmodel
Météo France (France)	CNRM	DA9	Observed SST	ARPEGE
Danish Meteorological Institute (Denmark)	DMI	ECC	ECHAM5	HIRHAM
		ecctrl	ECHAM4/OPYC	HIRHAM
		HC1	HadAM3H	HIRHAM
		HC2	HadAM3H	HIRHAM
		HC3	HadAM3H	HIRHAM
Swiss Federal Institute of Technology (Switzerland)	ETH	F25	HadAM3H	HIRHAM
		HC_CTL	HadAM3H	CHRM
GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH (Deutschland)	GKSS	CTL	HadAM3H	CLM
		CTLsn	HadAM3H	CLM (improved)
Met. Office Hadley Centre (United Kingdom)	HC	adeha	HadAM3P	HadRM3P
		adehb	HadAM3P	HadRM3P
		adehc	HadAM3P	HadRM3P
The Abdus Salam Intl. Centre for Theoretical Physics (Italy)	ICTP	ref	HadAM3H	RegCM
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (The Netherlands)	KNMI	HC1	HadAM3H	RACMO
Norwegian Meteorological Institute (Norway)	METNO	HADCN	HadAM3H	HIRHAM
Max-Planck-Institut für Meteorologie (Deutschland)	MPI	3003	HadAM3H	REMO
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Sweden)	SMHI	HCCTL	HadAM3H	RCAO
		MPICTL	ECHAM4/OPYC	RCAO
		HCCTL_22	HadAM3H	RCAO (High res.)
Universidad Complutense de Madrid (Spain)	UCM	control	HadAM3H	PROMES

Bron: CCI-HYDR project

*Tabel 3: Overzicht van de scenarioruns (periode 2071-2100) met gekoppelde regionale-
mondiale klimaatmodellen, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn*

PRUDENCE Partner	Naam run	Modelresolutie (km)	Emissiescenario	Mondiaal klimaatmodel	Regionaal klimaatmodel
SMHI	SMHI-MPI-A2	49	A2	ECHAM4/OPYC	RCAO
	SMHI-MPI-B2	49	B2	ECHAM4/OPYC	
	SMHI-HC-22	24	A2	HadAM3H	
	SMHI-A2	49	A2	HadAM3H	
	SMHI-B2	49	B2	HadAM3H	
KNMI	KNMI	47	A2	HadAM3H	RACMO
METNO	METNO-A2	53	A2	HadAM3H	HIRHAM
	METNO-B2	53	B2	HadAM3H	
DMI	DMI-S25	25	A2	HadAM3H	HIRHAM
	DMI-ecsc-A2	50	A2	ECHAM4/OPYC	
	DMI-ecsc-B2	50	B2	ECHAM4/OPYC	
	DMI-HS1	50	A2	HadAM3H	
	DMI-HS2	50	A2	HadAM3H	
	DMI-HS3	50	A2	HadAM3H	
ETH	ETH	55	A2	HadAM3H	CHRM
HC	HC-adhfa	50	A2	HadAM3P	HadRM3P
	HC-adhfe	50	A2	HadAM3P	
	HC-adhff	50	A2	HadAM3P	
	HC-adhfd-B2	50	B2	HadAM3P	
MPI	MPI-3005	55	A2	HadAM3H	REMO
	MPI-3006	55	A2	HadAM3H	
CNRM	CNRM-DC9	59	A2	ARPEGE	ARPEGE
	CNRM-DE5	59	A2	ARPEGE	
	CNRM-DE6	59	A2	ARPEGE	
	CNRM-DE7	59	A2	ARPEGE	
GKSS	GKSS-SN	55	A2	HadAM3H	CLM
	GKSS	55	A2	HadAM3H	CLM
ICTP	ICTP-A2	52	A2	HadAM3H	RegCM
	ICTP-B2	52	B2	HadAM3H	RegCM
UCM	UCM-A2	52	A2	HadAM3H	PROMES
	UCM-A2	52	B2	HadAM3H	

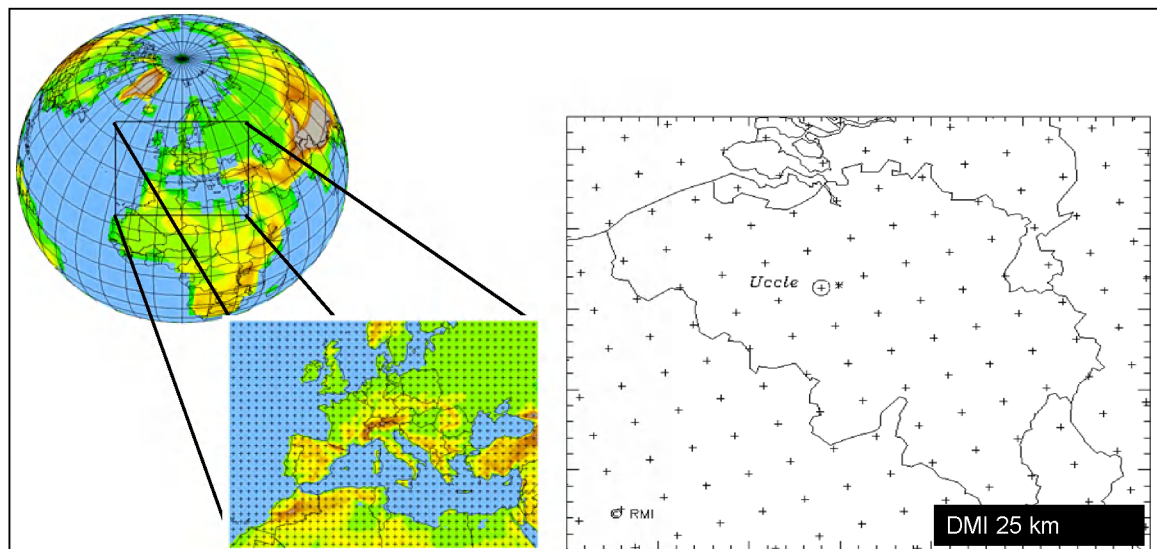
Bron: CCI-HYDR project

Tabel 4: Overzicht van de runs met mondiale klimaatmodellen uit de IPCC AR4 Archive, waarop de CCI-HYDR klimaatscenario's gebaseerd zijn

Instituut	Model	Controle-run	A2	A1B	B1
BCCR	BCM2.0	•			•
CCCma	CGCM3 (T47)	•		•	•
CNRM	CM3	•	•	•	•
CSIRO	Mk3.0	•	•	•	•
MIUB, METRI, M&D	ECHO-G	•	•	•	
LASG	FGOALS-g1.0			•	
GFDL	CM2.0		•	•	•
	CM2.1		•	•	•
GISS	AOM	•		•	•
	E-H	•		•	
	E-R	•	•		
INM	CM3.0	•		•	
IPSL	CM4	•	•	•	•
NIES	MIROC3.2 hires			•	•
	MIROC3.2 medres		•	•	•
MRI	CGCM2.3.2	•	•	•	•
NCAR	PCM		•	•	
	CCSM3		•	•	•
UKMO	HadCM3	•	•	•	•
	HadGEM1	•	•	•	

Bron: CCI-HYDR project

Figuur 6: Belgische gridlocaties van het DMI-klimaatmodel met gridresolutie 25 km



Bron: CCI-HYDR project

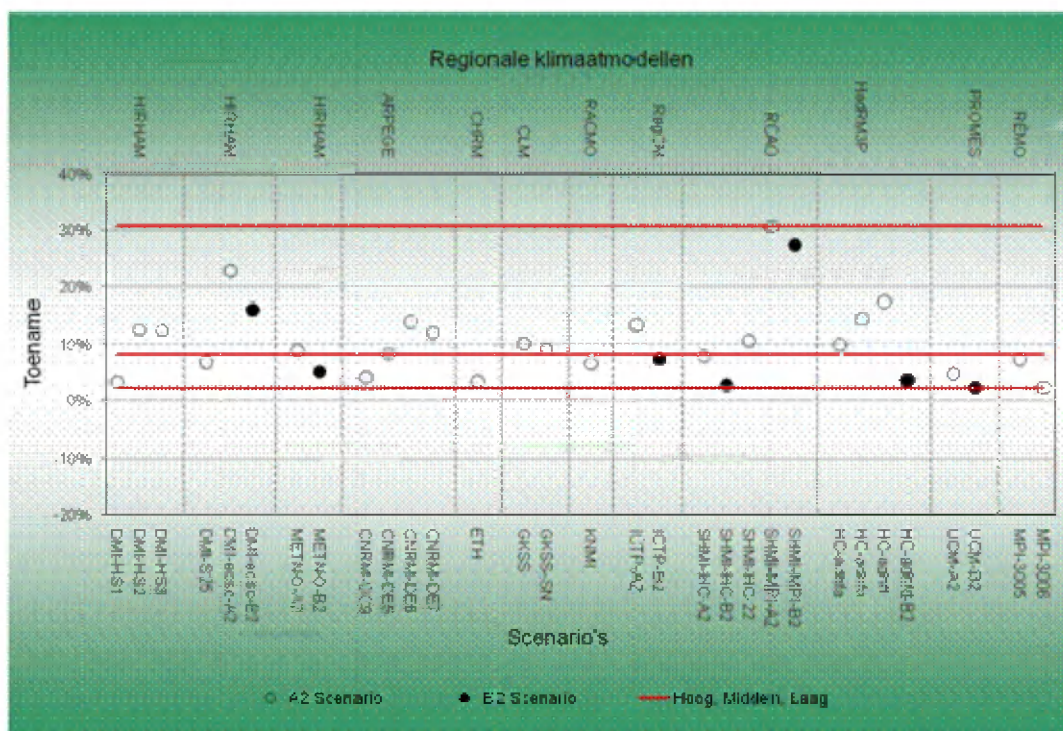
Via statistische analysetechnieken werden uit de resultaten van de mondiale en regionale klimaatmodelruns perturbatiefactoren afgeleid. Deze perturbatiefactoren stellen de factor

verandering voor in neerslag-, temperatuur-, windsnelheid- en ETo-kwantielen van de controleperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100. Een kwantiel is hierbij een waarde die met een bepaalde kans op voorkomen overeen komt. Een perturbatiefactor 1,2 voor een neerslagkwantiel met een jaarlijkse overstromingskans van 5 %, bijvoorbeeld, betekent dat de neerslagwaarde (vb. daggemiddelde neerslagintensiteit) die zich gemiddeld eens om de 20 jaar voordoet (5 % kans per jaar) met 20 % (factor 1,2) verhoogt. De perturbatiefactoren laten toe om historische tijdreeksen van neerslag, ETo, temperatuur ... (zoals typisch gebruikt in hydrologische modellen) aan te passen aan de klimaatscenario's. Naast de klimaatscenario's tot 2100, werden ook interpolaties doorgevoerd voor korterbij gelegen tijdshorizonten (2020, 2030 en 2050).

De brede waaier aan simulatieresultaten met de klimaatmodellen werd na statistische verwerking gecombineerd (voor de verschillende maanden en voor de variabelen neerslag, temperatuur en ETo) tot drie klimaatscenario's die een hoge, gemiddelde en lage hydrologische impact hebben. Op basis van een correlatieanalyse tussen de veranderingen in de zomer en de winter, en tussen neerslag en ETo, zijn bvb. voor het hoog CCI-HYDR scenario een hoge neerslagtoename in de winter gecombineerd met een hoge neerslagtoename in de zomer, en met een hoge ETo-toename in de winter en een lage ETo-toename in de zomer. Het hoog-klimaatscenario leidt tot de meest pessimistische impact op neerslagafstromingsdebieten, hoogwater langs rivieren, overstromingen, bodemvocht- en grondwaterstanden in de winter (maar tot een minst pessimistische impact op laagwater in de zomer). Het laag-klimaatscenario leidt tot de meest pessimistische impact op laagwater en grondwaterstanden tijdens droge zomerperioden (maar tot een minst pessimistische impact op hoogwater). Het midden-klimaatscenario leidt tot gematigde resultaten, voor zowel hoog- als laagwater (voor zowel de natte als de droge perioden).

Figuur 7 toont een voorbeeld van de perturbatiefactoren afgeleid van 31 combinaties van controleruns en scenarioruns van regionale klimaatmodelruns voor Ukkel, samen met de afgeleide CCI-HYDR hoog-, midden- en laag-klimaatveranderingsscenario's, voor de extreme dagneerslag in de winter. "Extreme" neerslag wordt hierbij gedefinieerd als neerslag die zich minder frequent voordoet dan 10 keer per jaar.

Figuur 7: Percentage neerslagtoename tijdens het winterseizoen voor uitzonderlijke neerslag



Figuur geeft de toename aan in de dagneerslagwaarde die zich minder frequent voordoet dan 10 keer per jaar in Ukkel, volgens de 31 simulaties met 12 regionale klimaatmodellen (klimaat in verwacht in 2071-2100 vergeleken met klimaat in referentieperiode 1961-1990).

Bron: CCI-HYDR project

De CCI-HYDR klimaatveranderingsscenario's werden afgeleid voor elke maand afzonderlijk, en voor zowel de gemiddelde seizoencondities als voor de uitzonderlijke gebeurtenissen (de extremen). Ook werd de afhankelijkheid met de tijdschaal onderzocht (dag-, week-, maand- en seizoensschaal) en geëxtrapoleerd naar de uurlijkse tijdschaal. Bij de statistische analyse is verder rekening gehouden met de natuurlijke tijdsvariabiliteit (het toeval waarmee extreme weerfenomenen zich kunnen voordoen in de tijd), een aspect dat van belang is bij het analyseren van extremen en de impact op uitzonderlijke toestanden voor hydrologie, waterbeheer, natuur (zie ook deel 4 van dit rapport).

Om voor dergelijke (hydrologische) impactanalyses de invoertijdreeksen van neerslag, ETo en temperatuur eenvoudig te kunnen aanpassen aan de klimaatscenario's werd in het project CCI-HYDR een zogenaamde Perturbation Tool ontwikkeld (Ntegeka & Willems, 2008). Deze is gebruikt in de projecten voor het WL, het INBO en de VMM.

In het project "Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de ontwerp-Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen" voor VMM werden de CCI-HYDR klimaatscenario's recent nog verfijnd, gebruik makende van nieuwe resultaten van klimaatmodellen, inclusief resultaten van neerslagintensiteiten bij convectieve zomerseizoenen en rekening houdend met toekomstige evoluties in de atmosferische circulatiepatronen. Omdat de resultaten van klimaatmodellen met extreme convectieve neerslag in de zomer erg onbetrouwbaar zijn, werd de CCI-HYDR methode op basis van perturbatiefactoren aangevuld met een tweede techniek op basis van "Weather Typing". Deze techniek maakt primair gebruik van de meer nauwkeurige luchtdrukresultaten van de klimaatmodellen en relateert die op basis van historische reeksen aan de kleinschalige extreme neerslag. Dit laatste is gedaan om de resultaten bruikbaar te maken voor impactstudies bij rioleringsstelsels en hydrologische toepassingen langs kleinschalige rivierbekkens.

3.1.3 Project SeaMocs

De Belgische en Nederlandse partners in het SeaMocs project (K.U.Leuven en KNMI) bestuderen de invloed van klimaatverandering op stormopzet langs onze kust. Zij maken hierbij ook gebruik van de resultaten van klimaatmodellen (runs met het Duits ECHAM5-klimaatmodel, uitgevoerd door het KNMI). Via historische stormopzetmetingen voor de periode 1925-2000 worden vooreerst trends en natuurlijke schommelingen geanalyseerd. Deze worden in verband gebracht met atmosferische circulatiepatronen, waarna via klimaatmodelresultaten de toekomstig te verwachten veranderingen in beeld worden gebracht.

3.1.4 Projecten CLIMAR en SAFECoast

In het CLIMAR-project werden vooreerst scenario's afgeleid uit de Nederlandse KNMI'06 scenario's (van den Hurk et al., 2006) gebruikt, omdat begin 2007 nog geen specifieke klimaatscenario's voor Vlaanderen beschikbaar waren en de Nederlandse scenario's de bandbreedte omvatten van de in Vlaanderen verwachte evolutie (Van den Eynde et al., 2007). Een vijfde "Extreem" scenario met een lage probabilliteit werd hieraan toegevoegd omdat recentere informatie uit o.m. Duitsland duidt op potentieel extremere gevolgen zoals zeespiegelstijgingen tot 2 m. In CLIMAR worden deze scenario's als invoer gebruikt voor de hydrodynamische modellen die de fysische verandering van de mariene parameters in kaart brengen (zie hoofdstuk 4).

De Nederlandse KNMI'06-scenario's zijn anderzijds gebaseerd op een aantal van de PRUDENCE- en IPCC-AR4-simulatie-runs met mondiale en regionale klimaatmodellen, deze die voor het recente klimaat de beste overeenkomsten opleverden met de historische metingen van Nederlandse grondstations. Vier scenario's zijn samengesteld, in functie van meer of minder stijging in de wereldwijde temperatuur en meer of minder verandering in de stromingspatronen van de lucht in onze omgeving (West-Europa) en de daarmee samenhangende veranderingen in de wind(richting). Een bijdrage van smeltend landijs wordt meegenomen op basis van de in de literatuur best beschikbare informatie. Het betreft volgende scenario's (zie ook figuur 8):

- M (Gematigd):
 - 1 °C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990
 - geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
- M+ (Gematigd +):
 - 1 °C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990
 - winters zachter en natter door meer westenwind
 - zomers warmer en droger door meer oostenwind
- W (Warm):
 - 2 °C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990
 - geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
- W+ (Warm +):
 - 2 °C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990
 - winters zachter en natter door meer westenwind
 - zomers warmer en droger door meer oostenwind

Het vijfde scenario "Extreem" is vergelijkbaar met het W+ scenario, maar veronderstelt een maximale zeespiegelstijging van 2 m. Ook in Duitsland hanteert men dergelijke maximale aannames voor de zeespiegelstijging bij wetenschappelijk onderzoek.

Onderstaande tabel 5 geeft voor de 5 vernoemde scenario's waarden of procentuele veranderingen weer voor respectievelijk luchttemperatuur, luchtcirculatie, neerslag in de

winter, verandering in stormkarakter, neerslag in de zomer, zeetemperatuur en stijging van het zeeniveau. Zowel voor 2040 (relevanter als socio-economische tijdshorizon) als 2100 (klassieke tijdshorizon voor onderzoek naar klimaatverandering) worden deze waarden weergegeven, onderling gerelateerd door lineaire interpolatie.

Tabel 5: Veranderingen in de periode 1990-2040 (tabel a) en in de periode 1990-2100 (tabel b) inzake luchttemperatuur, luchtcirculatie, neerslag in de winter, verandering in stormkarakter, neerslag in de zomer, zeetemperatuur en stijging van het zeeniveau zoals gehanteerd voor België in het CLIMAR-project

Tabel a) Scenario's voor 2040

	M	M+	W	W+	Extreem
luchttemperatuur	+ 1 °C	+ 1 °C	+ 2 °C	+ 2 °C	+ 2 °C
Luchtcirculatie	Neen	Ja	Neen	Ja	Ja
Winterneerslag	+ 4 %	+ 7 %	+ 8 %	+ 14 %	+ 14 %
Stormen	+ 0 %	+ 2 %	-1 %	+ 4 %	+ 4 %
Zomerneerslag	+ 3 %	-10 %	+ 6 %	-20 %	-20 %
Zeewatertemperatuur	+ 1,2 °C	+ 1,2 °C	+ 1,7 °C	+ 1,7 °C	+ 1,7 °C
Gemiddeld zeeniveau	30 cm	30 cm	40 cm	40 cm	50 cm

Tabel b) Scenario's voor 2100

	M	M+	W	W+	Extreem
luchttemperatuur	+ 2 °C	+ 2 °C	+ 4 °C	+ 4 °C	+ 4 °C
Luchtcirculatie	Neen	Ja	Neen	Ja	Ja
Winterneerslag	+ 8 %	+ 14 %	+ 16 %	+ 28 %	+ 28 %
Stormen	+ 0 %	+ 4 %	- 2 %	+ 8 %	+ 8 %
Zomerneerslag	+ 6 %	-20 %	+ 12 %	-40 %	-40 %
Zeewatertemperatuur	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	+ 3,5 °C	+ 3,5 °C	+ 3,5 °C
Gemiddeld zeeniveau	60 cm	60 cm	90 cm	90 cm	200 cm

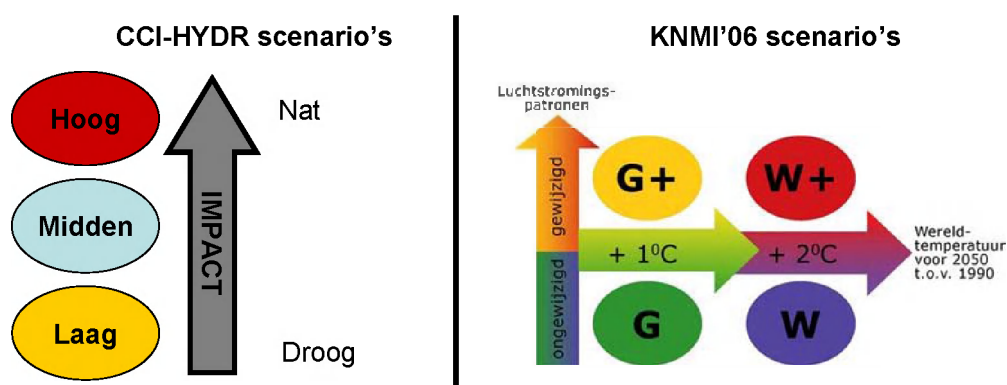
Bron: CLIMAR-project.

Voor SAFECOast werd een quick scan rapport gemaakt rond de verschillende toekomstscenario's in de landen rondom de Noordzee voor wat betreft klimaattevolutie (Alkyon, 2007). Op basis van de plannen en officiële documenten gebruikt in het huidige beheer worden voor alle relevant geachte parameters de trends opgelijst. Voor de meeste parameters gaat het om één 'gemiddelde' verwachting, maar waar beschikbaar worden ook de boven- en ondergrens weergegeven. De prognoses inzake toename van het zeeniveau in deze quick scan voor België bedragen 25 cm voor het gemiddeld waterpeil en 30 cm voor de hoogwaters over de periode 2005-2055.

3.1.5 Vergelijking Vlaamse en Nederlandse klimaatscenario's

De conceptuele verschillen tussen de CCI-HYDR en de KNMI'06 scenario's zijn schematisch weergegeven in figuur 8. Het grootste verschilpunt is dat de KNMI'06 scenario's overeenkomen met veranderingen in de temperatuur en de stromingspatronen van de lucht en de daarmee samenhangende veranderingen in de overheersende wind(richting). De CCI-HYDR scenario's zijn eerder opgemaakt met het oog op het analyseren van de hydrologische impacts.

Figuur 8: Scenario's gehanteerd in CCI-HYDR versus KNMI'06-scenario's



Bron: INBO en CCI-HYDR projecten; KNMI'06 plot op basis van van den Hurk et al., 2006

Aangezien elke hydrologische impact het gevolg is van welbepaalde veronderstelde klimatologische veranderingen, zijn er raakpunten te vinden tussen de twee typen scenario's. Dit wordt ook duidelijk in figuur 13 waarin voor elk van de 3 CCI-HYDR scenario's en de 4 KNMI'06 scenario's het % verandering in de gemiddelde seizoenswaarden van temperatuur en neerslag is weergegeven voor zowel de zomer als de winter (klimaat tot 2100). Een hogere hydrologische impact in de winter (nattere winter; hoog CCI-HYDR scenario) komt overeen met meer neerslagtoename in de winter (ten gevolge van een sterker veronderstelde temperatuurstijging en een sterkere verandering in de atmosferische circulatie) en dus met het KNMI'06 scenario W+. De meer gematigde KNMI'06 scenario's G, G+ en W zijn anderzijds voor de winter dicht bij het CCI-HYDR middenscenario gesitueerd. Voor de zomerperiode komt het KNMI'06 scenario W+ overeen met een sterke neerslagdaling (drogere zomer) en dus met een meer pessimistische impact op laagwater, terwijl de KNMI'06 scenario's G en G+ weerom een meer gematigde invloed geven.

Ook zijn er nog andere gelijkenissen tussen de CCI-HYDR en KNMI'06 klimaatscenario's. Beide soorten scenario's zijn grotendeels gebaseerd op dezelfde klimaatmodelsimulaties: simulaties met de IPCC AR4 mondiale klimaatmodellen en de PRUDENCE regionale klimaatmodellen. Ook zijn in beide gevallen deze simulatieresultaten statistisch verwerkt en vertaald naar relatieve verandering in klimatologische variabelen (temperatuur, ETo, neerslag en windsnelheid). Deze veranderingen zijn niet enkel voor de gemiddelde condities bekeken, maar ook voor extreme condities. De CCI-HYDR scenario's omvatten relatieve verschillen voor alle kwantielwaarden, d.w.z. voor de hoogste neerslagintensiteit, de 2^e hoogste, de 3^e hoogste, enz. in een klimatologische tijdreeksperiode van 30 jaar. De KNMI'06 scenario's daarentegen zijn afgeleid voor de gemiddelde neerslag en het 99 % neerslagpercentiel; tussenin wordt geïnterpoleerd. Het project CCI-HYDR heeft trouwens zijn hoofdfocus op extreme neerslag (en de bijhorende hydrologische extremen). Ze verklaren echter niet de verschillen in de seizoensgemiddelde neerslag, zoals weergegeven in figuur 13. Deze verschillen hebben twee voornaamste oorzaken: de noord-zuidvariatie (minder neerslagtoename in België in vergelijking met Nederland) en de verschillen in de variatie aan klimaatmodelresultaten en broeikasgasemissiescenario's die zijn meegenomen door de KNMI en CCI-HYDR teams. In de KNMI'06 scenario's is in vergelijking met de CCI-HYDR scenario's een kleiner deel van de totale variatie meegenomen. Een aspect dat hierin een rol heeft gespeeld is dat de KNMI'06 scenario's voornamelijk het klimaatveranderingssignaal representeren, terwijl in de CCI-HYDR scenario's een gedeelte van de veranderingen door natuurlijke variabiliteit (het toeval waarmee extreme weerfenomenen zich kunnen voordoen in de tijd) komt. Dit speelt vooral bij extreme gebeurtenissen.

3.2 Socio-economische scenario's

Naast de socio-economische omgeving die aan de basis ligt van de mondiale IPCC-emissiescenario's (zie § 3.1.1), werd in enkele onderzoeksprojecten nog met bijkomende socio-economische parameters gewerkt. We halen ze hieronder kort aan.

3.2.1 Project Klimaatadaptatie Vlaamse landbouw

De scenario's waarvan vetrokken wordt om de adaptatiemogelijkheden van de Vlaamse landbouw in kaart te brengen, zijn gebaseerd op EU-Ruralis (www.eururalis.eu). In deze scenario's wordt gekeken naar de mogelijke evolutie van het platteland, met aandacht voor de socio-culturele, economische en ecologische waarden en mogelijkheden. Daarbij wordt gezocht naar een antwoord op de vraag: op welke manier kunnen Europese plattelandsgebieden blijven bestaan? De uitkomst is een schets van hoe het Europese platteland gebaseerd is op condities die verschillen per regio en verschillen in de tijd. De geïntegreerde impact op mens en planeet, alsook op ruimtegebruik, is gevat in 4 mogelijke toekomstscenario's. Een eerste versie was beschikbaar in 2004 en momenteel werken wetenschappers aan versie 3.0 waarbij de scenario's verder verfijnd worden door meer wetenschappelijke disciplines te integreren. In EU-Ruralis worden scenario's uitgewerkt tot 2030.

3.2.2 Landgebruikscenario's

De landgebruikscenario's die gebruikt worden voor de risicoberekeningen in dit rapport werden ontwikkeld in het kader van MIRA 2009 en NARA 2009 (Wetenschappelijk Rapport Landgebruik: Gobin et al., 2009a). Voor een gedetailleerde beschrijving verwijzen we naar dat Wetenschappelijk Rapport, hier beperken we ons tot een korte beschrijving van de scenario's gebruikt voor de risicoberekeningen.

Toekomstverkenningen van het ruimtegebruik in Vlaanderen werden berekend voor zes scenario's op basis van een combinatie van het milieuraapport MIRA 2009 en het natuuraapport NARA 2009.

MIRA 2009 maakt een toekomstverkenning van het milieu in Vlaanderen. De bedoeling is inzicht te geven in de manier waarop het milieu kan evolueren en de invloed die het beleid hierop heeft. MIRA 2009 bevat drie scenario's die worden onderscheiden op basis van hun effect op de milieudruk:

- een **referentiescenario** dat een voortzetting is van het huidige beleid en een uitvoering van alle voorliggende maatregelen inhoudt;
- een **Europa-scenario** dat uitgaat van bijkomende maatregelen en instrumenten nodig om de Europese milieudoelstellingen te halen tegen 2020-2030 en een toepassing van alle technisch haalbare maatregelen inhoudt; en,
- een **visionair scenario** waarin verkend wordt welke ingrijpende maatregelen nodig zijn om langetermijndoelstellingen op vlak van duurzaamheid te realiseren, in bijzonder de halvering van de broeikasgasemissies en een koolstofarme economie.

NARA-2009 verkent de ruimte voor natuur in Vlaanderen in de toekomst, waarbij wordt uitgegaan van drie natuurbedeidsscenario's:

- een **referentiescenario** waarin het huidige natuurbedeid aangehouden wordt;
- een scenario met klemtoon op **functiescheiding**, waarin de open ruimte verdeeld wordt tussen de gebruiksvormen ervan; en,
- een scenario met klemtoon op **functieverweving**, waarin de zorg voor natuur en biodiversiteit integraal deel uitmaakt van alle landgebruiksvormen.

De scenario's voor het beleid inzake natuur en bos in het Natuuraapport worden rechtstreeks geënt op de referentie- en Europa-scenario's inzake milieubeleid uit MIRA 2009 (tabel 6). De externe omgeving, weergegeven door de socio-economische evolutie en de klimaatverandering, zijn in alle MIRA- en NARA-scenario's gebaseerd op dezelfde prognoses gesteld door het Federaal Planbureau voor het socio-economische luik en door het K.U.Leuven & KMI voor het klimaat.

Tabel 6: Schematische voorstelling van de koppeling van de MIRA en NARA scenario's

MIRA-NARA Scenario	MIRA beleidsscenario	NARA beleidsscenario
RR	REFERENTIE	REFERENTIE
RS	REFERENTIE	SCHEIDING
RV	REFERENTIE	VERWEVING
ER	EUROPA	REFERENTIE
ES	EUROPA	SCHEIDING
EV	EUROPA	VERWEVING

Van deze 6 gecombineerde scenario's worden er slechts 2 weerhouden in de context van toekomstig landgebruik: RR (het Referentie-MIRA scenario gecombineerd met het Referentie-NARA scenario) en ER (het Europa-MIRA scenario en het Referentie-NARA scenario).

Het referentiejaar voor de scenarioberekeningen is 2005. De relevante zichtjaren voor de scenario-oefeningen zijn 2010, 2015 (eindjaar MINA-plan 4), 2020 en 2030. Voor berekeningen van de invloed van klimaat op natuur en biodiversiteit in Vlaanderen worden 2030, 2050 en 2100 als zichtjaren gehanteerd.

Het ruimtegebruik in Vlaanderen wordt becijferd voor de periode 2005 tot 2030 waarbij een index wordt berekend (kolom 3 en 4 in tabel 7) voor de verschillende ruimtegebruiksklassen met als basisjaar 2005. In de tabel werden de verschillende klassen uit de methodologie van het VITO ook gelinkt met hun overeenkomende klassen uit de risicomethodologie (zie § 2.6.3) en ook voor die klassen werd een index op dezelfde manier berekend (kolom 6 en 7 in tabel 7) voor elk scenario.

Opvallend zijn de verschillen tussen het ER- en RR-scenario met betrekking tot het ruimtegebruik voor de bebouwing en landbouw. De bebouwing neemt toe in beide scenario's maar is het sterkst in het referentiescenario (RR). In het Europa-scenario (ER) worden de bijkomende kavels kleiner verondersteld en treedt er een relatieve verdichting op van de bevolkingsdichtheid per bebouwde cel, wat leidt tot een kleinere toename t.o.v. RR. Deze toename is in hoofdzaak te wijten aan de uitbreiding van het woongebied. Voor bedrijventerreinen komt er tijdens de simulatieperiode ruim 500 ha bij in het RR scenario en 870 ha in het ER scenario (Gobin et al., 2009a).

De verstedelijking gaat voornamelijk ten koste van de landbouwgronden. Zowel de klassen akkerland als grasland boeten in beide scenario's in 2030 aan oppervlakte in. De oppervlakte natuur en bos gaat dan weer in beide scenario's vooruit.

De watertoets is een beleidsinstrument dat moet toelaten het risico op schade door overstromingen te beperken. Het effect van dit instrument is enkel indirect in rekening gebracht bij de scenariodoorrekeningen inzake landgebruik. Voor de verstedelijkte landgebruiken wordt de geschiktheidskaart per type landgebruik berekend met een algoritme gebaseerd op lineaire weging (per klasse én per kaart) en vervolgens vermenigvuldigd voor alle kaarten. De resultaten zijn te vinden in bijlage C van het Wetenschappelijk Rapport Landgebruik (Gobin et al., 2009a): geschiktheidskaarten voor agrarische bebouwing en residentiële/commerciële bebouwing. De beleidskaarten zijn terug te vinden in bijlage D van dat Wetenschappelijk Rapport. Geschiktheid en beleid krijgen een andere weging al naargelang het doorgerekende scenario:

- REF: beleid=0,6, geschiktheid=0,4;
- EUR: beleid=0,8, geschiktheid=0,2.

Met betrekking tot overstromingsgebieden zijn er beperkingen omwille van geschiktheid, maar niet omwille van beleid verrekend, tenzij er toch beperkingen opgelegd worden vanuit de RUP's. Aangezien beleid een hogere weging krijgt dan geschiktheid krijgen we in deze overstromingsgebieden geen bebouwing maar wel bijvoorbeeld natuurontwikkeling omdat daar voorrang aan gegeven wordt. Over het algemeen komt er in Vlaanderen bebouwing bij

in de overstromingsgebieden. In REF meer dan in EUR, voornamelijk omdat er ook in 't algemeen meer bebouwing bijkomt in REF tov EUR (zie verder).

Tabel 7: Ruimtegebruik in Vlaanderen 2005-2030. Index voor verschillende landgebruikscenario's RR en ER (basisjaar = 2005, richtjaar voor RR en ER = 2030, oppervlakte in 2005 is gelijkgesteld met 100) (aangepast naar Gobin et al., 2009a)

Klasse landgebruikscenario VITO	Oppervlakte in 2005 (ha)	RR	ER	Klasse risicomethodologie	RR	ER
Residentiële & commerciële bebouwing	246 087	123,0	117,8	Bebouwing 1	123,0	117,8
Agrarische bebouwing	29 743	119,6	117,2	Bebouwing 3	119,6	117,2
Industrie	20 702	102,5	104,2	Industrie	102,5	104,2
Zeehaven	9 232	100,0	100,0	Infrastructuur	99,8	99,8
Militaire voorziening	5 299	100,0	100,0			
Infrastructuur	68 904	99,8	99,8			
Luchthaven	1 247	100,0	100,0	Luchthaven1	100	100
Recreatie- en sportterrein	16 094	100,0	100,0	Recreatie	100	100
Park	9 833	100,0	100,0			
Niet geregistreerde landbouwgrond	92 088	50,1	47,7	Akkerland	84,7	90,8
Akker met natuurdoelen	41	2 450,0	2 450,0			
Akker met milieudoelen	12 742	119,2	923,6			
Akker	397 854	91,4	73,9			
Productiegrasland met natuur- en milieudoelen	8 771	102,6	491,5	Grasland	96,5	87,9
Productiegrasland	213 721	96,2	71,3			
Niet geregistreerd grasland met natuurwaarde	24 392	99,0	108,6	Natuur	117,8	121,3
Moeras zonder natuurbeheer	11 023	25,4	24,7			
Heide zonder natuurbeheer	2 711	46,8	45,0			
Kustduin zonder natuurbeheer	1 069	12,6	5,9			
Grasland met natuurbeheer	7 952	209,2	209,2			
Moeras met natuurbeheer	4 901	255,8	255,8			
Heide met natuurbeheer	5 983	133,6	133,6			
Kustduin met natuurbeheer	1 186	182,0	182,0			
Slik en schorre	1 771	234,1	234,1			
Bos met natuurbeheer	14 794	141,7	141,7	Bos	109,1	109,1
Bos met bosbeheer	119 936	105,1	105,1			
Overige	3 656	65,5	61,9	Achtergrond	65,5	61,9
Water	25 630	99,2	99,2	Water	99,2	99,2

4 Resultaten en bespreking

4.1 Klimaatscenario's voor Vlaanderen

Doorheen dit wetenschappelijk rapport wordt voor Vlaanderen gewerkt met een hoog, een midden en een laag klimaatscenario. Uit dit wetenschappelijk rapport is voor de Milieuverkenning 2030 een tekst afgeleid, waar wordt gesproken over een nat, een gematigd en een droog klimaatscenario. Dit betreft gewoon andere namen voor dezelfde scenario's:

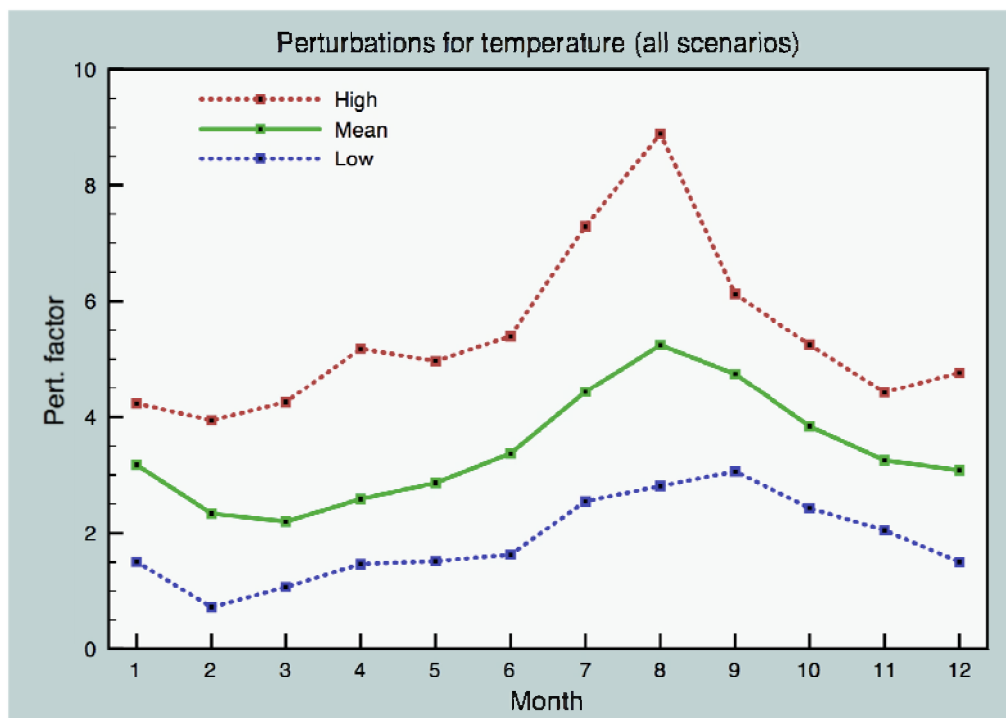
- Het nat klimaatscenario = het hoog klimaatscenario. Dit scenario leidt tot de grootste toename van neerslagdebiet dat oppervlakkig afstroomt, hoogwater langs rivieren, overstromingen, bodemvocht- en grondwaterstanden in de winter.
- Het gematigd klimaatscenario = het midden klimaatscenario. Dit scenario leidt tot gematigde resultaten, voor zowel hoog- als laagwater en zowel natte als droge periodes.
- Het droog klimaatscenario = het laag klimaatscenario. Dit scenario leidt tot de grootste problemen met laagwater en lage grondwaterstanden tijdens droge zomerperiodes. In de lente kunnen wel nog iets hogere grondwaterstanden voorkomen.

4.1.1 Scenario's voor temperatuur, verdamping en neerslag

Algemeen kan men stellen dat door klimaatverandering de *temperatuur* toeneemt (zie ook figuur 1) in zowel de winter als de zomer. De veranderingen in maandgemiddelde temperatuur zijn voor Ukkel terug te vinden in figuur 9. Ze zijn gebaseerd op alle beschouwde simulaties met regionale klimaatmodellen (zoals opgelijst in tabellen 2 en 3). Deze bouwen voort op de A2 en B2 IPCC-broeikasgasemissiescenario's (figuur 5). De veranderingen in temperatuur zijn in de figuren geplot overeenkomstig de CCI-HYDR hoog-, midden, en laag-klimaatscenario's (tot 2100), en dit voor elke maand van het jaar.

Er wordt in de plots een sterke toename in de temperatuur tegen het einde van deze eeuw waargenomen. De toename treedt op voor elk seizoen, maar is sterker tijdens de zomermaanden. Zelfs voor het B2 emissiescenario (dat overeen komt met een meest gematigde verandering) blijkt de temperatuur duidelijk toe te nemen (tussen de 0,7 en de 3 °C tot 2100). In het hoog-klimaatscenario wordt voor augustus meer dan 8 °C temperatuurstijging voorspeld. Uiteraard moet er wel rekening worden gehouden met de grote onzekerheden (zie de grote verschillen tussen het hoog- en het laag-klimaatscenario) en met de sterke verschillen van maand tot maand. In januari, bijvoorbeeld, bedragen de temperatuurstoename tussen de 1,5 en de 4,2 °C. Dat komt overeen met een "onzekerheidsband" van 2,7 °C. In augustus is deze onzekerheidsband nog breder: de temperatuurstijging varieert er van 2,8 tot 8,9 °C (bandbreedte van 6,1 °C). Ondanks deze onzekerheden, die de verdere impactanalyse hebben bemoeilijkt, is het klimaatveranderingssignaal voor temperatuur zeer duidelijk: een zeer significante toename in de temperatuur en dat voor elke maand van het jaar. Voor de seizoengemiddelden levert dit voor de winter (december, januari, februari) een toename van 1,5 à 4,4°C op, en voor de zomer (juni, juli, augustus) zelfs een toename van 2,4 à 7,2°C.

Figuur 9: Toename in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100

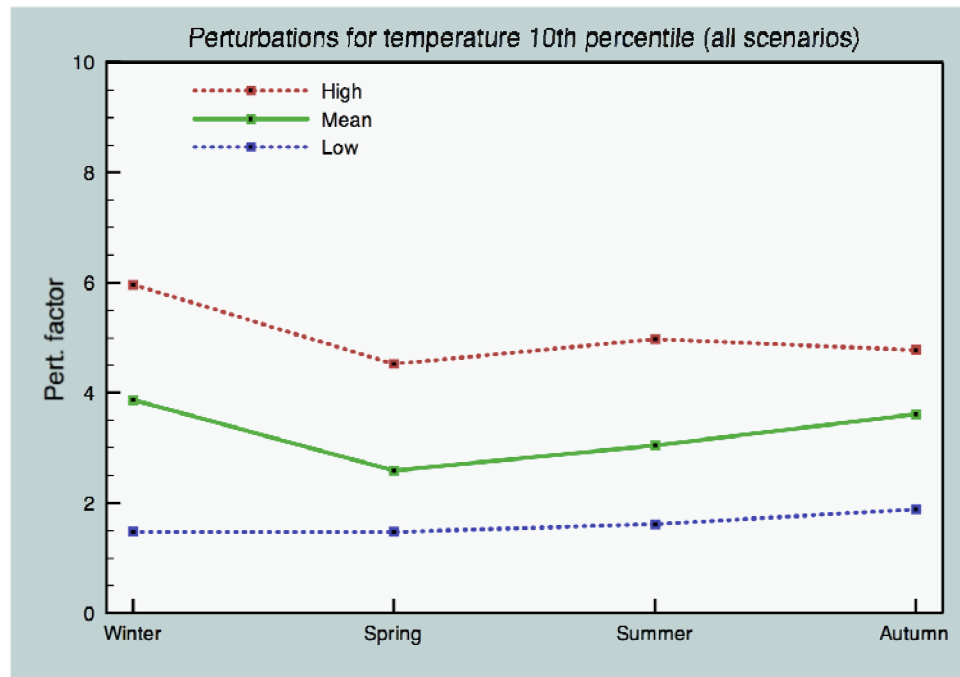


Temperatuurstoename uitgedrukt in °C ten opzichte van de gemiddelden in de referentieperiode 1961-1990.

Bron: CCI-HYDR en INBO projecten

Een ander interessant aspect van de invloed van de klimaatverandering op de temperatuur is de verandering van de extremen (de meest warme of meest koude dagen). Daarom werden de temperatuurstoename ook geanalyseerd voor de 10 % en 90 %-percentielwaarden. Dit zijn waarden die overeen komen met de 10 % koudste dag en de 10 % warmste dag. Ze zijn in figuur 10 geploteerd voor de 10 %-percentielwaarde van de maandgemiddelde temperatuur en in figuur 11 voor de 90 %-percentielwaarde van de maandgemiddelde temperatuur. Zoals voor de maandgemiddelde temperatuur wordt ook een duidelijke stijging in de extremere temperaturen waargenomen. Voor de 10 %-percentielwaarde (10 % koudste dagen) wordt de sterkste stijging waargenomen voor de winter en de herfst. Het gevolg van deze stijging is een drastische daling in het aantal vorstdagen. Ook voor de 90 %-percentielwaarde (10 % warmste dagen) wordt de sterkste stijging voor de zomer gevonden. Dit laatste betekent dat in de zomer heel wat meer erg warme dagen zouden voorkomen tegen het eind van de 21^e eeuw dan in de periode 1961-1990.

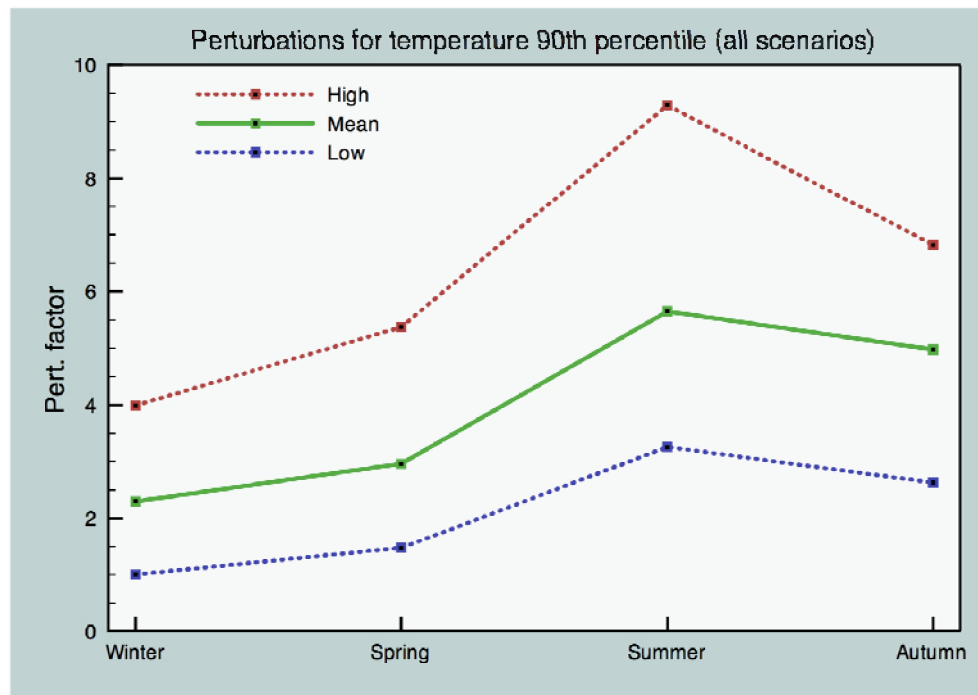
Figuur 10: Toename in de 10 % percentielwaarde (10 % koudste dagen) van de maandgemiddelde temperatuur in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100



Temperatuurstoename uitgedrukt in °C ten opzichte van de gemiddelden in de referentieperiode 1961-1990.

Bron: CCI-HYDR en INBO projecten

Figuur 11: Toename in de 90 % percentielwaarde (10 % warmste dagen) van de maandgemiddelde temperatuur in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's voor de scenarioperiode 2071-2100



Temperatuurstoename uitgedrukt in °C ten opzichte van de gemiddelden in de referentieperiode 1961-1990.

Bron: CCI-HYDR en INBO projecten

Door de temperatuuroptename neemt de hoeveelheid *verdamping* toe, zowel in de winter als in de zomer. In februari bijvoorbeeld bedraagt de toename van de potentiële evapotranspiratie – een maat voor de verdamping – afhankelijk van het scenario en de berekeningsmethode tussen -3 % en +37 %. In augustus kan deze evapotranspiratie toenemen met 73 %. In de lente zijn er zowel scenario's die een toename als een afname van de verdamping geven.

Ook de *neerslag* neemt toe in de winter (Ntegeka et al., 2008a,b). De neerslagverandering in de zomer is complexer:

- De totale neerslaghoeveelheden worden waarschijnlijk kleiner.
- Er zouden minder regenbuien optreden.
- De hevige zomeronweders kunnen extremer zijn en zullen zich vaker voordoen (alhoewel niet alle klimaatmodellen het over dit laatste eens zijn)

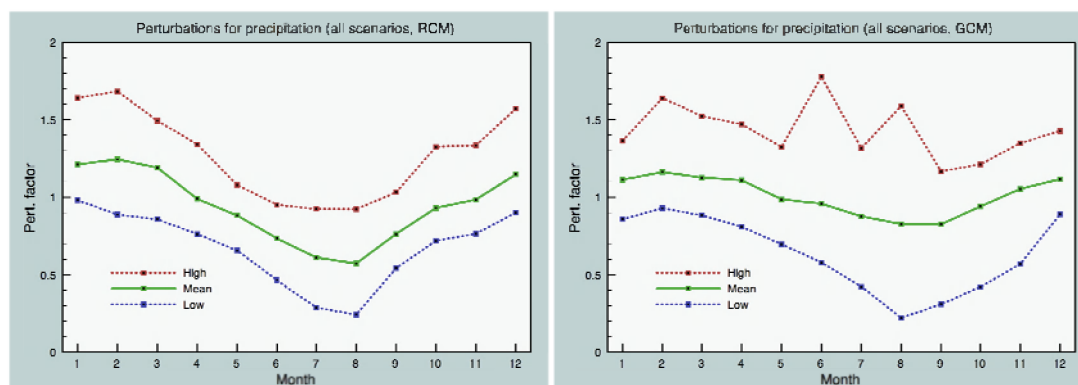
Figuur 12 geeft een overzicht van de veranderingen in maandgemiddelde neerslag te Ukkel, voor zowel de A2 en B2 IPCC-emissiescenario's (gebaseerd op simulaties met regionale klimaatmodellen; zie overzicht tabellen 2 en 3) als de meer uitgebreide set van emissiescenario's, maar gebaseerd op mondiale klimaatmodellen (zie overzicht van beschouwde simulaties in tabel 4).

Uit de vergelijking van de simulatieresultaten met de regionale en de mondiale klimaatmodellen blijkt dat de mondiale klimaatmodellen een grotere spreiding aan neerslagveranderingen (perturbatiefactoren) vertonen. Dit heeft te maken met de grotere set aan emissiescenario's die hierbij werd ingerekend. De regionale klimaatmodelruns zijn anderzijds nauwkeuriger dan deze op basis van de mondiale klimaatmodellen, maar zijn slechts voor emissiescenario's A2 en B2 beschikbaar. In het project CCI-HYDR werden beiden daarom via een statistische procedure gecombineerd. In deze procedure werd de spreiding aan neerslagveranderingen gebaseerd op de regionale klimaatmodelruns, maar de vertekening t.o.v. de grotere set aan emissiescenario's (gesimuleerd in de mondiale klimaatmodellen) weggewerkt via correctiefactoren.

In figuur 12 wordt voor zowel de regionale als de mondiale klimaatmodelruns vastgesteld dat de neerslagpatronen opschuiven richting drogere zomers. Voor de zomer verschillen de resultaten echter beduidend tussen de regionale en de mondiale klimaatmodelruns. De regionale runs (met emissiescenario's A2 en B2) geven voor bijna alle runs een neerslagdaling in de zomer, terwijl bij de mondiale klimaatmodelruns een deel van de runs een kleine neerslagtoename in de zomer voorspelt. Het in rekening brengen van bijkomende mondiale klimaatmodellen en emissiescenario's kan het beeld van de toekomstige klimaatverandering dus beïnvloeden.

De sterkste daling in zomerneerslag wordt gevonden voor het laag klimaatscenario en de maand augustus. De maandgemiddelde neerslag zou er met 76 tot 78 % afnemen ten opzichte van de huidige situatie. Rekening houdend met de grote onzekerheden kan die reductie ook 17 à 43 % bedragen (midden klimaatscenario), nauwelijks 8 % (hoog klimaatscenario met regionale modellen) of zelfs omslaan in een toename (hoog klimaatscenario berekend met mondiale klimaatmodellen). Voor de maand januari wordt de sterkste neerslagtoename verwacht (van nauwelijks verandering bij het laag klimaatscenario tot een toename met 64 % bij het hoog klimaatscenario op basis van de regionale klimaatmodelruns).

Figuur 12: Perturbatiefactor voor de maandgemiddelde neerslag in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's



links: voor de A2 en B2 emissiescenario's en op basis van regionale klimaatmodellen
rechts: voor alle emissiescenario's op basis van mondiale klimaatmodellen

Perturbatiefactoren berekend door de waarden voor de scenarioperiode 2071-2100 te vergelijken met de waarden in de referentieperiode 1961-1990.

Bron: CCI-HYDR project

Tabel 8 vat de temperatuur- en neerslagveranderingen samen voor de maandgemiddelde veranderingen (tot 2100) volgens de CCI-HYDR hoog-, midden- en laag-klimaatscenario's.

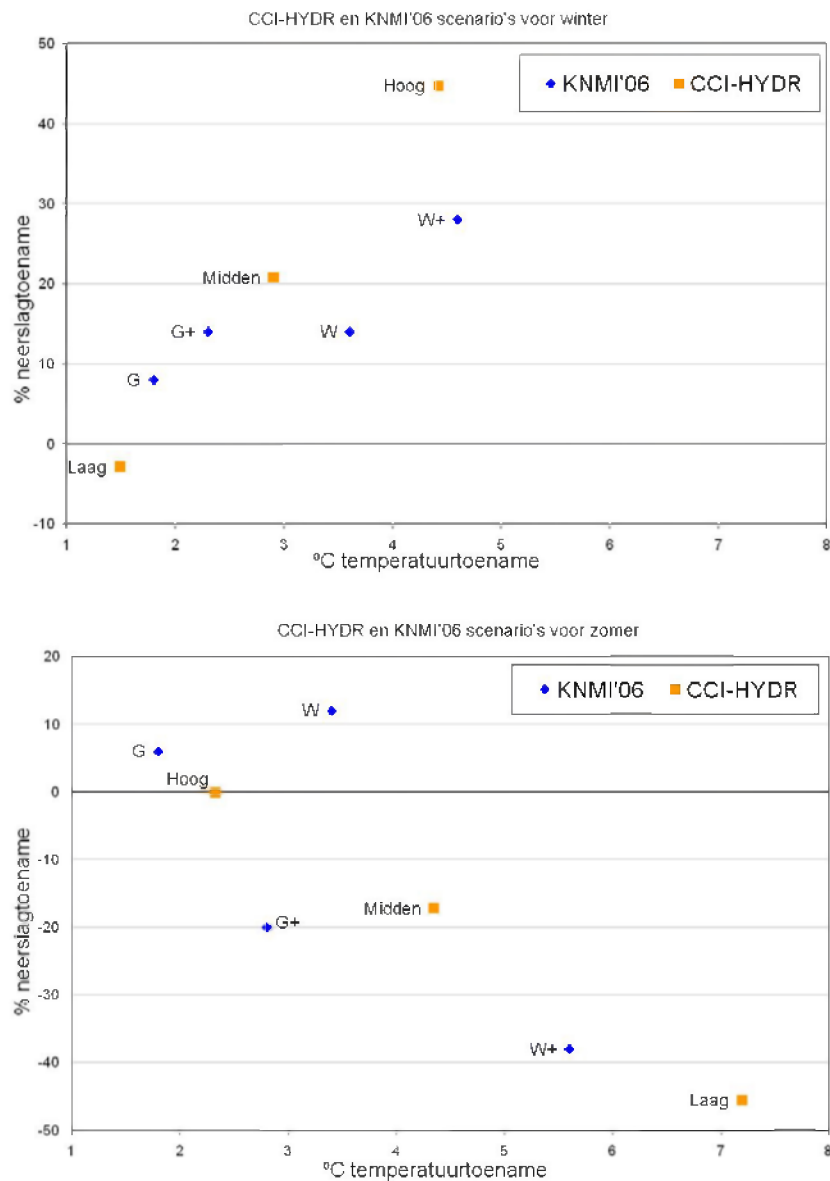
Tabel 8: Temperatuuroename in de maandgemiddelde temperatuur en perturbatiefactoren voor de maandgemiddelde neerslag in Ukkel volgens de 3 CCI-HYDR klimaatscenario's (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)

maand	temperatuuroename (°C)			Perturbatiefactoren maandgemiddelde neerslag (regionale klimaatmodelruns)			Perturbatiefactoren maandgemiddelde neerslag (mondiale klimaatmodelruns)		
	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog
1	1,51	3,18	4,23	0,98	1,21	1,64	0,86	1,11	1,36
2	0,73	2,34	3,94	0,89	1,25	1,68	0,93	1,16	1,64
3	1,07	2,20	4,26	0,86	1,19	1,49	0,88	1,13	1,52
4	1,47	2,59	5,18	0,76	0,99	1,34	0,81	1,11	1,47
5	1,52	2,86	4,97	0,66	0,88	1,08	0,70	0,99	1,33
6	1,63	3,37	5,40	0,47	0,74	0,95	0,58	0,96	1,78
7	2,55	4,44	7,29	0,29	0,61	0,92	0,42	0,88	1,32
8	2,81	5,25	8,89	0,24	0,57	0,92	0,22	0,83	1,59
9	3,06	4,75	6,12	0,54	0,76	1,03	0,31	0,83	1,17
10	2,43	3,84	5,25	0,72	0,93	1,33	0,42	0,94	1,21
11	2,05	3,25	4,43	0,76	0,99	1,34	0,57	1,05	1,35
12	1,50	3,08	4,77	0,90	1,15	1,57	0,89	1,12	1,43

Bron: CCI-HYDR project

Figuur 13 geeft een beeld van de percentages neerslag- en temperatuurverandering voor seizoensgemiddelde veranderingen in winter en zomer, en dit voor de verschillende CCI-HYDR en KNMI'06 klimaatscenario's. In § 3.1.5 werd uitgelegd dat de CCI-HYDR klimaatscenario's een groter bereik aan neerslag- en temperatuurveranderingen omvatten, omdat ze een groter deel van de totale variatie aan potentiële resultaten van klimaatmodellen meenemen. Dit verklaart waarom in figuur 13 voor de winter het hoog-klimaatscenario hoger ligt dan het hoogste KNMI'06 scenario, en waarom het laag-klimaatscenario lager ligt dan het laagste KNMI'06 scenario. Verder is er (vooral voor de zomer) een noord-zuidvariatie (sterkere evolutie naar verdroging in België in vergelijking met Nederland) waardoor in figuur 9 voor de zomer het bereik aan CCI-HYDR klimaatscenario's t.o.v. de KNMI'06 scenario's (rekening houdend met het verschil in totale variatie) verschoven is naar grotere percentages neerslagafname en hogere percentages temperatuuroename.

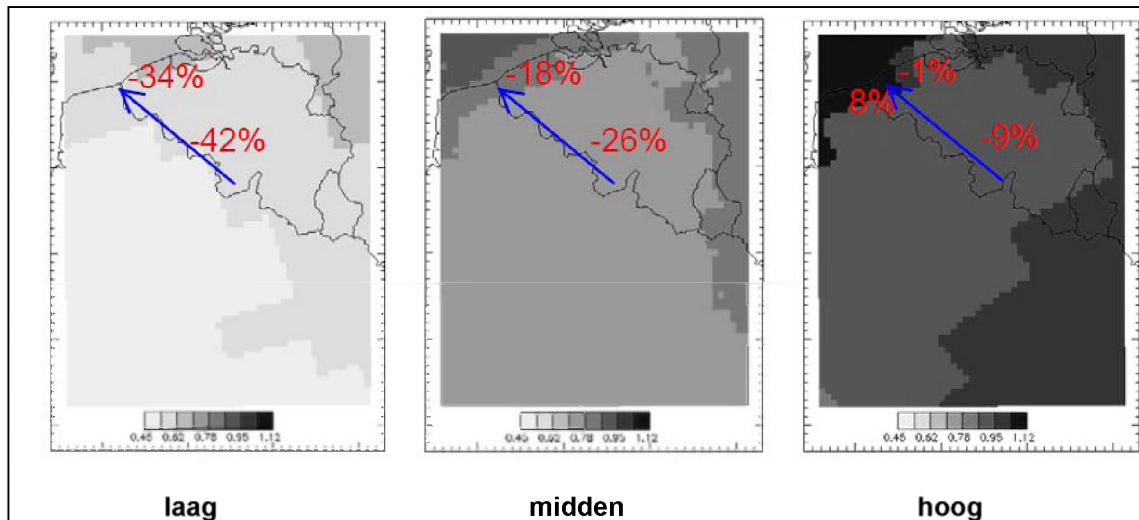
Figuur 13: Verband tussen % verandering in seizoensgemiddelde waarden van de temperatuur- en de neerslagtoename voor de 3 CCI-HYDR scenario's in Ukkel (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100) en de 4 KNMI'06 scenario's (2100 t.o.v. 1990) in de klimatologische winter (dec-jan-feb) en zomer (jun-jul-aug)



Bron: INBO en CCI-HYDR projecten

Naast de verschillen tussen België en Nederland zijn er ook kleine regionale verschillen binnen België: zie figuur 14 en figuur 15. Samengevat blijkt dat de neerslagverandering in de kuststrook 10 % hoger ligt dan in het binnenland, en dit voor zowel de zomerperiode als de winterperiode. Voor de zomerperiode betekent dit dat de neerslagdaling er minder sterk is (toekomstig klimaat ligt dichterbij het huidige klimaat). In de winterperiode zorgt een bijkomende neerslagtoename met 10 % voor een sterkere vernatting van de kuststrook.

Figuur 14: Regionale verschillen in seizoensgemiddelde zomerneerslag bij verschillende klimaatscenario's: kuststreek heeft ± 10 % lagere neerslagafname in de scenarioperiode 2071-2100 t.o.v. de referentieperiode 1961-1990

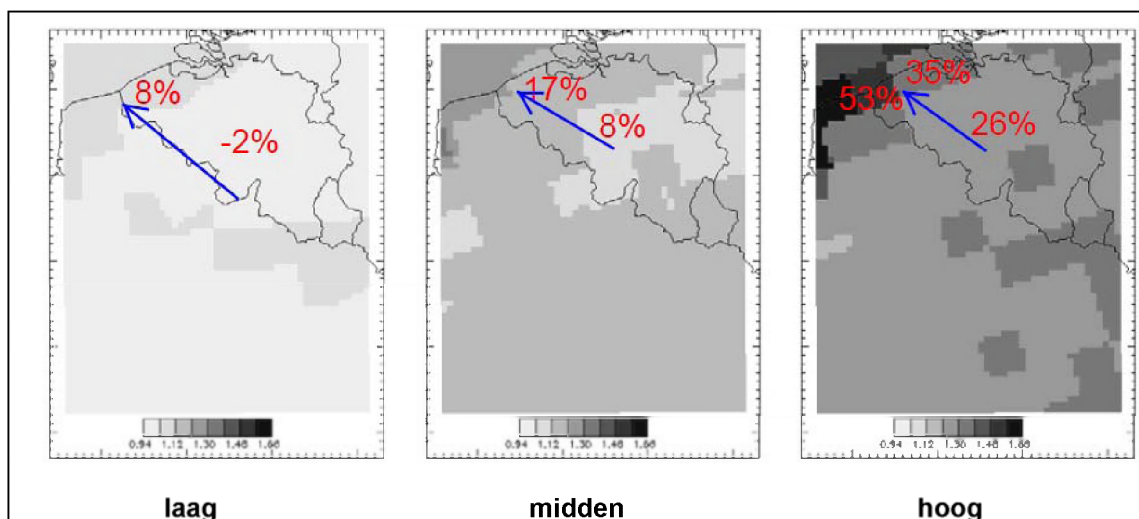


hydrologische zomer = april tot en met september

Resultaten uitgedrukt als perturbatiefactoren: factor = 1 duidt op geen verandering; factor = 1,2 duidt op 20 % toename; factor = 0,8 duidt op 20 % afname.

Bron: CCI-HYDR project

Figuur 15: Regionale verschillen in seizoensgemiddelde winterneerslag bij verschillende klimaatscenario's: kuststreek heeft ± 10 % hogere neerslagtoename in scenarioperiode 2071-2100 t.o.v. referentieperiode 1961-1990



hydrologische winter = oktober tot maart

Resultaten uitgedrukt als perturbatiefactoren: factor = 1 duidt op geen verandering; factor = 1,2 duidt op 20 % toename; factor = 0,8 duidt op 20 % afname.

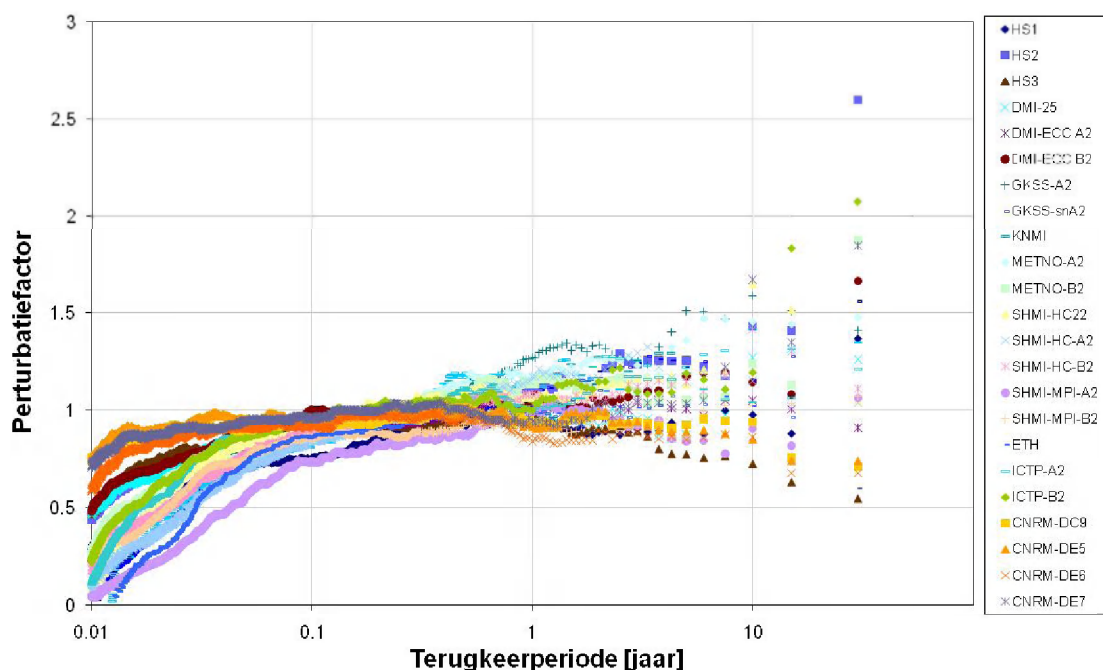
Bron: CCI-HYDR project

Figuren 9 tot 15 hebben betrekking op de gemiddelde seizoens- of maandgemiddelde resultaten. In het project CCI-HYDR werden echter ook resultaten bekomen voor de kleinere tijdschalen (1 week, 1 dag, en neerscaling tot 1 uur of lager). Ook werden de perturbatiefactoren geanalyseerd in functie van de voorkomingskans, alsook specifiek bestudeerd voor de meest extreme gebeurtenissen. Meer uitzonderlijke gebeurtenissen kunnen hierbij aan sterkere klimaatveranderingspercentages onderhevig zijn dan de gemiddelden (Ntegeka et al., 2008a). Figuur 16 toont een voorbeeld van de

perturbatiefactoren voor dagneerslag, zoals afgeleid op basis van de verschillende regionale klimaatmodelsimulaties, in functie van de terugkeerperiode van de dagneerslagwaarde (de gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende overschrijdingen van deze neerslagwaarde) voor de zomerperiode. Terwijl de perturbatiefactoren voor de maandgemiddelde neerslag voor de zomerperiode nauwelijks boven een waarde 1 uitstijgen (zie tabel 8), kan de dagneerslag voor terugkeerperioden groter dan 10 jaar perturbatiefactoren tot 2,5 vertonen. Dit betekent dat de kortstondige uitzonderlijke neerslagintensiteiten tot 250 % kunnen toenemen. De onzekerheid in de klimaatmodelresultaten neemt voor dergelijke grote terugkeerperioden echter ook toe: de perturbatiefactor varieert voor een terugkeerperiode van 30 jaar tussen 0,5 en 2,5.

Het project “Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de ontwerp-Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen” voor VMM focust zich specifiek op de extreme kortstondige neerslaggebeurtenissen. Er worden specifieke statistische neerschalingmethoden toegepast die toelaten om klimaatimpactresultaten te bekomen voor neerslagwaarden bij kleine tijdschalen tot 10 minuten (van belang voor riolerings- en kleinschalige hydrologische toepassingen) (Willems, 2009).

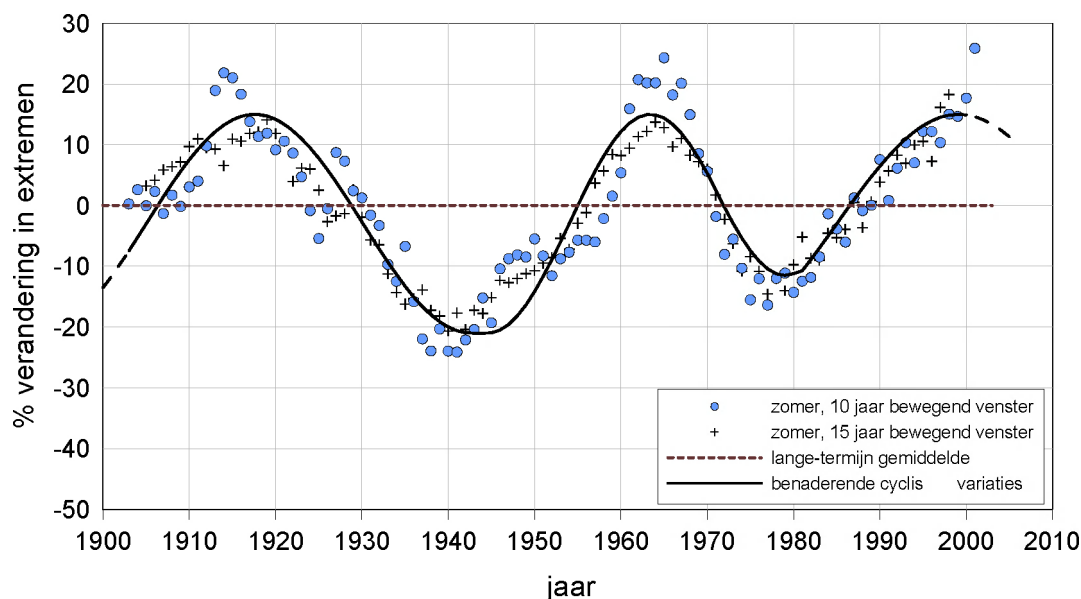
Figuur 16: Perturbatiefactor voor dagneerslag versus de terugkeerperiode voor de zomerperiode



Bron: CCI-HYDR project

Dat de temperatuurtrends nu reeds zichtbaar zijn, daar is nog weinig twijfel over (KMI, 2009 en figuur 1). Maar velen vragen zich af of ook de neerslagtrends door klimaatverandering momenteel reeds waarneembaar zijn. Als men naar de waarnemingen van het KMI van de laatste 100 jaar in Ukkel kijkt, dan is de toename in de winterneerslag en de toename in de verdamping effectief reeds waarneembaar: figuur 18 voor de winterneerslag (Willems et al., 2007b; Ntegeka & Willems, 2008a,b). De toename in het aantal en de grootte van het aantal zomeronweders is nog niet waarneembaar: figuur 17. Wel zijn er de laatste 15 jaar zeer veel hevige zomeronweders geweest, maar hier speelt nog een andere factor een rol: de natuurlijke klimaatoscillaties. Door natuurlijke schommelingen in het klimaat zijn er de laatste 15 jaar toevallig zeer veel zomeronweders voorgekomen, maar niet meer dan bijvoorbeeld in de jaren 1910-1920 en de jaren 1960 (figuur 17).

Figuur 17: Multidecadale oscillaties in extreme zomerneerslag gedurende 10 minuten in Ukkel (gebaseerd op de periode 1898-2005)



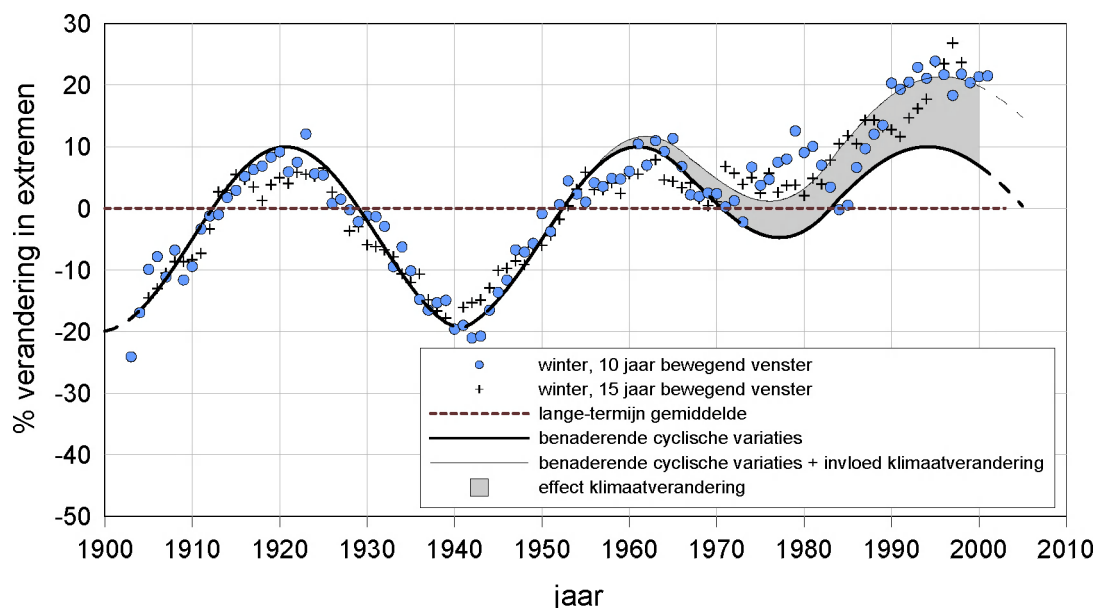
Er werd een voortschrijdend venster gebruikt met een vensterbreedte van 10 en 15 jaar. Binnen elk venster werden alle extreme neerslagkwantielen (die zich minder vaak voordoen dan 10 keer per jaar) vergeleken met de overeenkomstige neerslagkwantielen van de ganse meetperiode 1898-2005, en het gemiddeld percentage verschil berekend voor al deze kwantielextremen. 10 % toename in de figuur voor een bepaald jaartal betekent dat de neerslagextremen met eenzelfde voorkomingskans in een periode van 10 of 15 jaar rond dat jaartal gemiddeld 10 % hoger liggen in vergelijking met het langjarig gemiddelde (1898-2005). De resultaten zijn voorgesteld bij zowel een vensterbreedte van 10 als 15 jaar om aan te tonen dat de resultaten weinig gevoelig zijn voor de keuze van de vensterbreedte.

Bron: Uitbreiding van Willems et al. (2007b)

Het aantal rioleringsoverstromingen is de laatste 15 jaar wel sterk toegenomen (Van Boeckel & Vandenbroucke, 2008; Maesen, 2009) maar dat vindt zijn verklaring in het gewijzigd landgebruik (toename in de verharding, aanleg van rioleringen en waterzuiveringsinfrastructuur).

In de winterperiode is het aantal en de grootte van extreme winterbuien (die potentieel tot rivieroverstromingen leiden) de laatste 15 jaar wel beduidend hoger dan in de jaren 1910-1920 en 1960 (figuur 18). Door uit te gaan van een ruwe hypothese dat zonder klimaatverandering de laatste oscillatiepiek (bij benadering) even hoog zou zijn als de oscillatiepieken in de jaren 1910-1920 en 1960, werd in figuren 17 en 18 de recente toename in neerslagextremen opgedeeld in een deel "natuurlijke klimaatoscillaties" en een deel "klimaatverandering". In grootteorde wordt dan gevonden dat de laatste 15 jaar de neerslagextremen 20 % hoger lagen in vergelijking met het langjarig gemiddelde voor 1898-2005. Ongeveer 10 % daarvan (de helft) wordt (onder de hypothese zoals hoger geschetst) toegeschreven aan een natuurlijke oscillatiepiek (dus toeval) en de andere helft aan de invloed van de klimaatverandering.

Figuur 18: Multidecadale oscillaties en trends in extreme winterneerslag gedurende 10 minuten in Ukkel (gebaseerd op de periode 1898-2005)

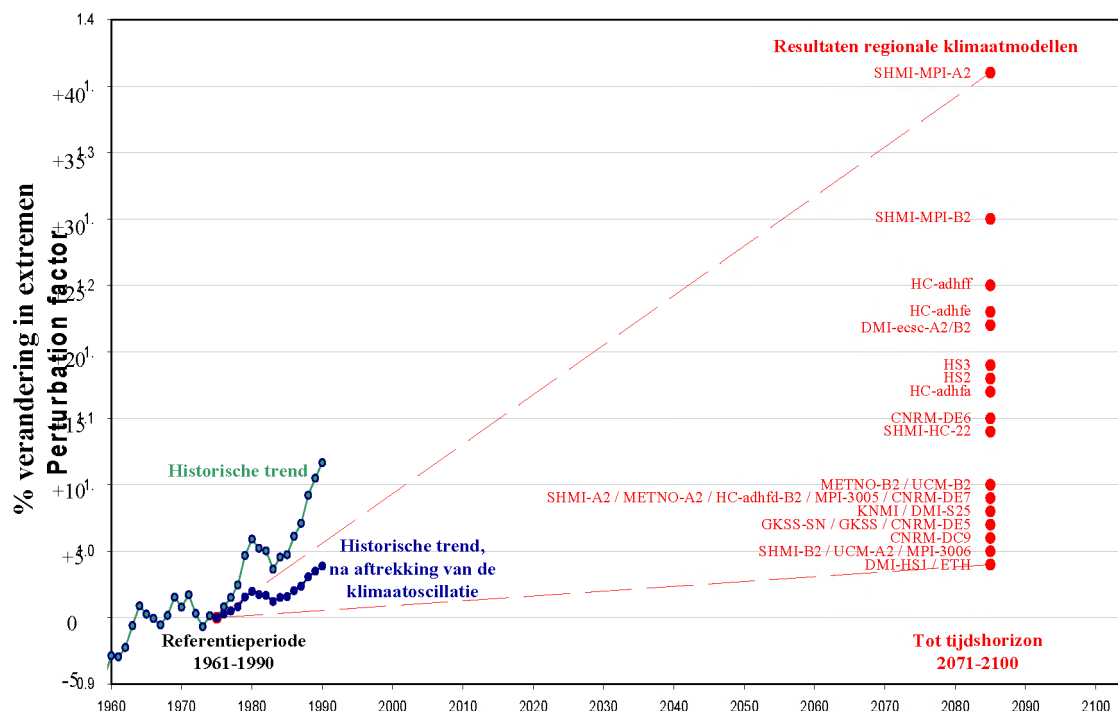


uitleg figuur: zie onder figuur 17

Bron: Uitbreiding van Willems et al. (2007b).

In figuur 19 is inderzocht of het deel "klimaatverandering" consistent is met de resultaten van klimaatmodellen. Analoge resultaten als bij figuur 18, maar voor een voortschrijdend gemiddelde van 30 jaar (de simulatieperiode van de beschouwde klimaatmodellen), werden voor de periode na 1960 overgenomen in figuur 19. De resultaten werden echter herschaald zodat het gemiddelde voor de periode 1961-1990 (de referentieperiode van de klimaatmodellen; zie hoofdstuk 2 en § 3.1) bij 0 % ligt (groene punten). Bovendien is het deel "natuurlijke klimaatoscillaties" uit figuur 18 afgetrokken van de totale historische trend (blauwe punten). Let wel dat elk groen of blauw punt gebaseerd is op alle neerslagextremen in een periode van 30 jaar (15 jaar voor het punt en 15 jaar na het punt). In rood zijn in figuur 19 de voorspellingen met de klimaatmodellen weergegeven (de toename in winterneerslag van de referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100 op basis van de PRUDENCE regionale klimaatmodelruns; zie § 3.1.2). De onzekerheden zijn zeer groot, maar de range aan voorspellingen zijn consistent met de recente historische waarnemingen: enkele % toename in extreme dagneerslag in de winter per decade.

Figuur 19: Recente trends en toekomstige evoluties in de extreme dagneerslag voor Ukkel: voorbeeld voor de winterperiode



Groen: de totale trend zoals bekomen op basis van de historische trendanalyse voorgesteld in figuur 18 (maar nu op basis van een voortschrijdend venster van 30 jaar en voor dagneerslag, om resultaten te bekomen die consistent zijn met de 30 jaar referentieperiode van de klimaatmodelruns).

Blauw: idem als de groene trendcurve, maar waarvan het geschatte deel door natuurlijke klimaatoscillaties (zie figuur 18) werd afgetrokken. Elk groen en blauw punt stelt dus de neerslagverandering voor gedurende een periode van 30 jaar rond elk punt.

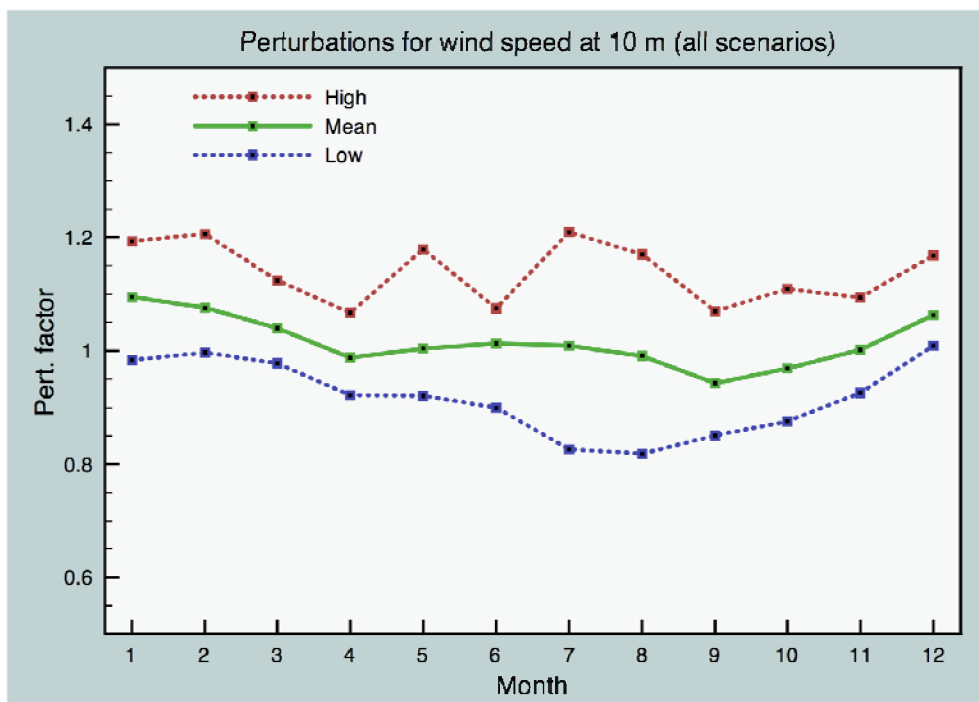
Rood: toename in neerslagextremen ten gevolge van klimaatverandering zoals voospeld op basis van 31 simulaties met 12 verschillende regionale klimaatmodellen (zie tabel 1 en tabel 2), die enkel de antropogene invloeden inrekenen via de IPCC-emissiescenario's.

Bron: Uitbreiding van Willems et al. (2007b)

4.1.2 Scenario's voor wind

Klimaatscenario's voor windsnelheid werden afgeleid in het INBO-project (Baguis et al., 2009). Figuur 20 toont de hoog-, midden- en laag-klimaatscenario's (volgens de methode CCI-HYDR en voor de maandgemiddelde resultaten) op basis van de resultaten van regionale klimaatmodellen voor gridlocaties dichtst bij Ukkel. In de wintermaanden blijkt de windsnelheid systematisch toe te nemen (met 10 à 20 %). De resultaten voor de zomermaanden leveren geen eenduidig beeld op (mogelijks toenemend, mogelijks afnemend).

Figuur 20: CCI-HYDR gebaseerde klimaatscenario's voor maandgemiddelde windsnelheid in Ukkel in de scenarioperiode 2071-2100



Perturbatiefactoren berekend door de waarden voor de scenarioperiode 2071-2100 te vergelijken met de waarden in de referentieperiode 1961-1990.

Bron: INBO project

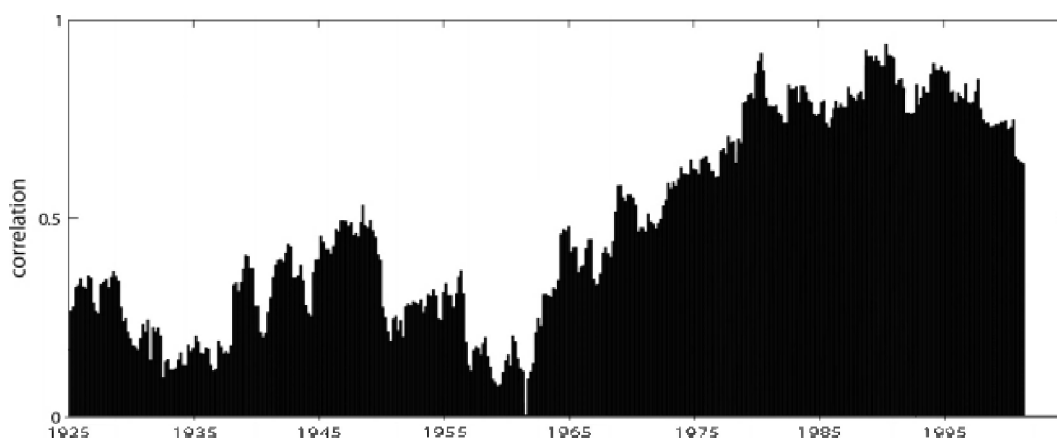
4.1.3 Scenario's voor de kust: stormopzethoogte, zeespiegel, temperatuur, golfklimaat, saliniteit en zuurtegraad

4.1.3.1 Stijging van de stormopzethoogte

Door het veranderend windklimaat wijzigt de frequentie en de grootte van de stormopzet (de stijging van de zeespiegel ten gevolge van wind) op de Noordzee, en dus ook de kans op overstromingen langs kust en Schelde (samen met de invloed van de zeespiegelstijging; zie volgende paragraaf).

Op basis van een historische analyse van de correlatie tussen de stormopzethoogte in Oostende en verschillende weerspatronen (atmosferische circulatiepatronen boven de Noord-Atlantische Oceaan) voor de periode 1925-2000, blijkt dat 70 % van alle stormopzethoogten groter dan 65 cm het gevolg zijn van 1 welbepaald weerspatroon, het zogenaamde patroon "Atlantic Ridge (AR)". Er is een correlatie gevonden tussen de frequentie van voorkomen van het AR-weerstype in de winter en het voorkomen van een hoge (99 % percentielwaarde) stormopzethoogte. Figuur 21 geeft aan dat deze correlatie sterk is toegenomen sinds 1965: de correlatie is gestegen van 21 % in de periode 1925-1950 tot 74 % in de periode 1975-2000. Het blijkt geassocieerd te zijn met een bijhorende luchtdrukstijging boven de Noord-Atlantische Ocean (Ullmann & Monbaliu, 2009).

Figuur 21: Correlatie (op basis van een voortschijdend venster met een lengte van 60 maanden) tussen de maandelijkse 99 % percentielwaarde van de stormopzethoogte in Oostende en maandelijkse frequentie aan het weerspatroon "Atlantic Ridge" voor de periode 1925-2000



Bron: Project SeaMocs (Ullmann & Monbaliu, 2009)

Het gewijzigd verband tussen stormopzet en weerspatronen is een element dat wordt meegenomen in het vervolgonderzoek naar de toekomstige evoluties in de stormopzet langs de Vlaamse kust (op basis van klimaatmodelruns): QUEST4D project: Van Lancker et al., (2008). Van dit laatste worden tegen einde 2010 resultaten verwacht.

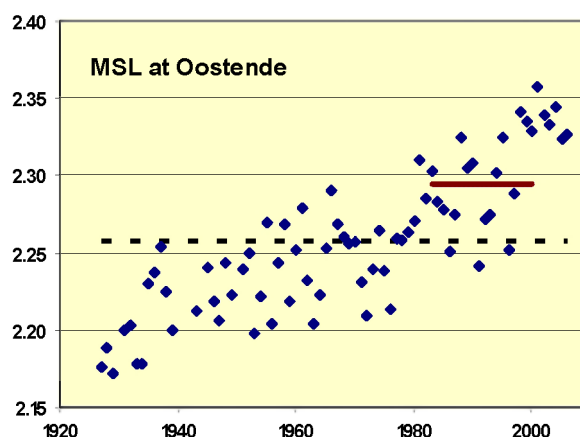
4.1.3.2 Stijging van de zeespiegel

Er is intussen consensus dat de zeespiegel continu aan het stijgen is. In Europa worden toenames van het zeeniveau gemeten tussen 0,8 en 3 mm per jaar (European Commission, 2006). Dit is deels het gevolg van thermische uitzetting (volumetoename bij oplopende temperatuur) en deels het gevolg van uitwisseling van afsmeltend ijs op land met de zee. In Brouwers et al. (2008) is meer informatie te vinden omtrent de oorzaken, de gerapporteerde veranderingen op mondiaal vlak, de evoluties van zeespiegelniveaus op Europese schaal ...

In het CLIMAR-project werd een statistische analyse uitgevoerd van de data over de zeespiegel van de voorbije decennia (tot 2006). Dit levert een actueel inzicht op zowel in de gemiddelde toename als een antwoord op de vraag of de klimaatverandering reeds zorgt voor een versnelling van de stijging van de zeespiegel.

De tijdreeksen van de jaarlijks gemiddelde zeespiegelwaarden zijn voorgesteld op figuur 22. De gegevens variëren tussen 2,172 m boven TAW (in 1929) en 2,357m (waargenomen in 2001). Zelfs al is de variabiliteit van jaar tot jaar hoog, is het heel duidelijk dat het gemiddeld zeeniveau (mean sea level/MSL) is gestegen in deze periode. Dit wordt verder bevestigd door het feit dat de gemiddelde waarde in de periode 1927-2001, gelijk aan 2,257 m, beduidend lager ligt dan de nieuwste gemiddelde waarde, gelijk aan 2,294 m, berekend door het Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust (MDK) voor de periode 1982-2000.

Figuur 22: Gemiddelde zeeniveaus (TAW) te Oostende tussen 1927 en 2006

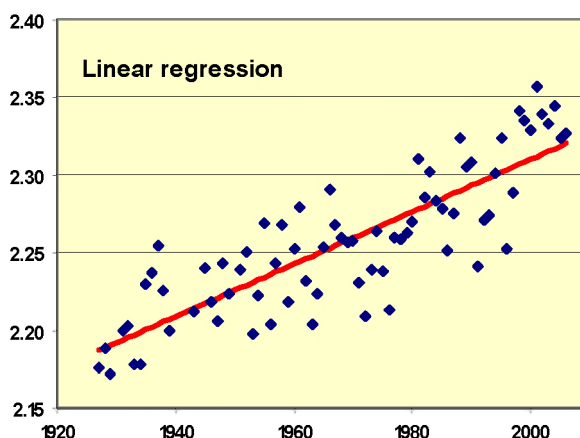


Zwarte stippellijn = gemiddelde over de periode 1927-2001. Bruine volle lijn = gemiddelde periode 1982-2000.

Bron: Ozer et al (2008)

Indien men een lineaire regressie toepast op deze data zonder natuurlijke oscillaties in rekening te brengen, wordt de helling van de regressielijn gelijk aan 1,69 mm per jaar (figuur 23). Deze waarde is verrassend dicht bij de waarde (1,7 mm per jaar) bepaald door de IPCC (Bindoff et al., 2007) voor de mondiale gemiddelde stijging van de zeespiegel in de 20^e eeuw.

Figuur 23. Lineaire regressie van de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende

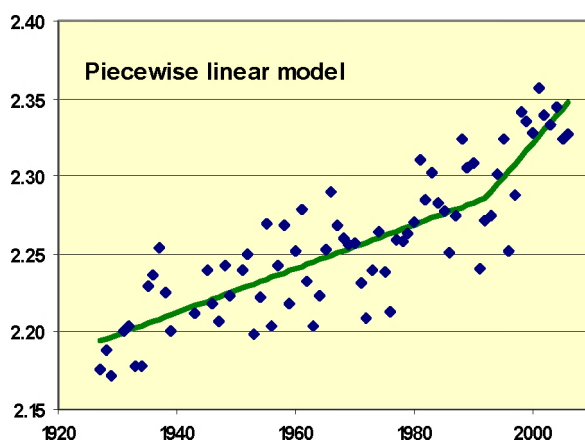


Bron: Ozer et al (2008)

Deze stijging van 1,69 mm per jaar is groter dan de lineaire stijgingen die in het verleden werden bepaald. Deze bevinding alsook het feit dat data voor andere locaties (zie ook Brouwers et al., 2008) met later opgestarte meetreeksen nog hogere waarden worden teruggevonden, suggereert sterk dat er de laatste decennia een versnelling optreedt van de zeespiegelstijging.

Om dit verder uit te klaren, werden binnen het CLIMAR-project naast lineaire regressie ook andere regressie-relaties onderzocht. Een "getrapt" lineair profiel bijvoorbeeld levert een "knik" op in 1992 (figuur 24). De helling is gelijk aan 1,41 mm per jaar tussen 1927 en 1992. De stijging is echter toegenomen tot 4,41 mm per jaar tussen 1992 en 2006.

Figuur 24. Getrapte lineaire regressie van de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende



Bron: Ozer et al (2008)

Modellen waarbij de gemiddelde stijging van de zeespiegel kan variëren in tijd fitten de gegevens in het algemeen beter dan het enkelvoudige lineaire regressiemodel. De winst is echter nooit meer dan 10 %. De "beste" fit is verkregen met een 3^e orde polynoom, een functie die evenwel om fysische redenen minder voor de hand ligt (figuur 25). Dit model leert ons dat de stijging van de zeespiegel in feite groter is sinds 1981 ten opzichte van de gemiddelde stijging over de hele periode.

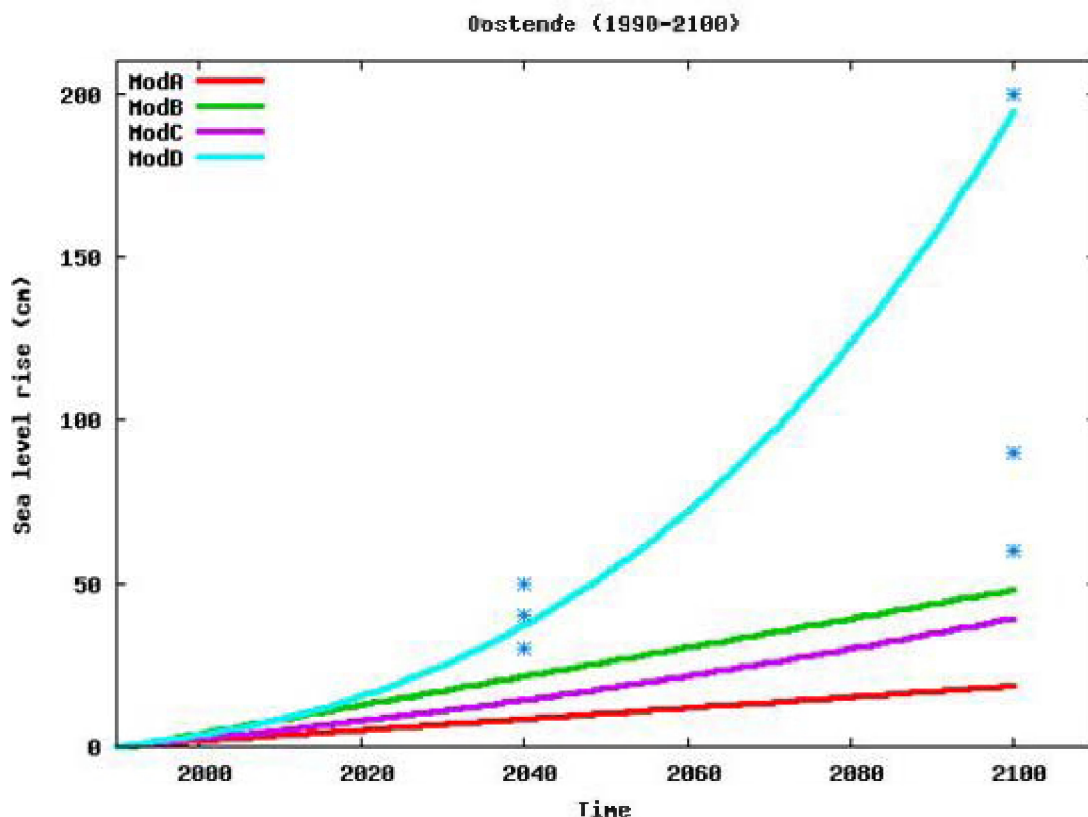
Figuur 25: Derdegraadskromme doorheen de gemeten zeespiegelniveaus in Oostende



Bron: Ozer et al (2008)

Als men de diverse relaties (ModelA lineair, ModelB stapsgewijs lineair, ModelC tweedegraadskromme tot ModelD derdegraadskromme) hanteert voor een extrapolatie van de zeespiegelniveaus tot het jaar 2100, vindt men – afhankelijk van de relatie – waarden tussen 20 cm en 210 cm stijging in 2100 (figuur 26). Deze extrapolaties bevestigen de mogelijke bandbreedte van zeespiegelstijgingen verondersteld in de scenario's van het CLIMAR-project (zie § 3.1.4).

Figuur 26: Extrapolatie van zeespiegelstijgingen op basis van verschillende relaties voor Oostende



Bron: BMM (2009, nog niet gepubliceerd)

4.1.3.3 Stijging van de temperatuur van het zeewater

De temperatuur van het zeewater is een cruciale parameter. De temperatuur beïnvloedt de dichtheid van het water en daardoor de stromingen en het zeespiegelniveau. De temperatuur beïnvloedt de oplosbaarheid van koolstofdioxide in het zeewater. Een verandering van de temperatuur heeft verder een invloed op de samenstelling van de atmosfeer, de evapotranspiratie en diverse andere fysische, chemische en ecologische processen. De oceanen hebben een enorme capaciteit om warmte op te slaan. De temperatuur van het zeewater is op zich een gevolg van klimatologische, meteorologische en topografische parameters. Voor een gedetailleerde literatuurstudie wordt verwezen naar (Van den Eynde, 2007).

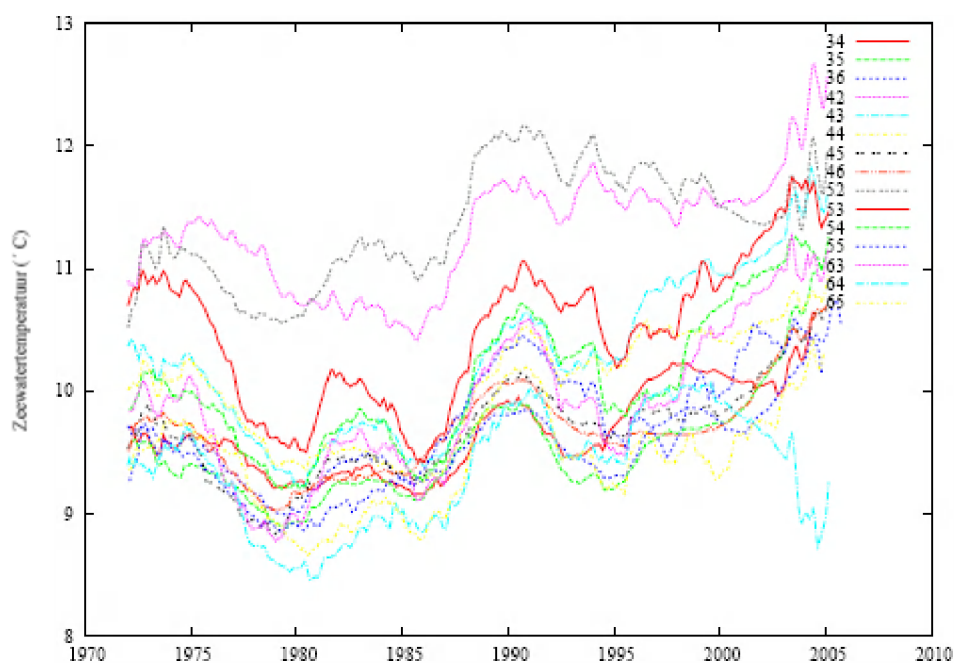
In het rapport "Marine and coastal dimension of climate change in Europe" (European Commission, 2006) worden enerzijds stijgingen van de zeewatertemperatuur met 1 °C gerapporteerd voor de laatste 20 jaar t.h.v. Schotland en anderzijds stijgingen tot 3,5 °C tegen 2080 voor de Zuid-Oost-kust van het Verenigd Koninkrijk. Een meer uitvoerige beschrijving van de beschikbare gegevens voor Europa vindt men in Brouwers et al. (2008).

In het CLIMAR-project werd een statistische analyse uitgevoerd van de in België beschikbare data van zeewatertemperatuur van de voorbije decennia (tot 2006). Dit resulteert in een zeer recente inschatting van de huidige zeewatertemperatuur en stijgingen in de voorbije decennia. Voor een uitvoeriger beschrijving wordt verwezen naar Van den Eynde et al. (2008a). Voor deze analyse werd gewerkt op Noordzee-niveau om over voldoende data te beschikken. Data werden opgevraagd aan alle relevante diensten van de ons omringende Noordzeelanden. Deze data werden gebundeld tot maandelijkse gemiddelden van zeewatertemperatuur in "geografische" blokken, opnieuw om voldoende en consistente

meetreeksen te verkrijgen. Dit betekent dat er geen voldoende lange tijdreeksen zijn om statistisch betrouwbaar een uitspraak te doen over de evolutie van de zeewatertemperatuur ter hoogte van de Vlaamse kust of in het Kanaal.

Uit de analyse blijkt dat in alle deelgebieden van de Noordzee een duidelijk stijgende lijn is waar te nemen in de zeewatertemperatuur (figuur 27). Er lijkt bovendien een natuurlijke variabiliteit op te treden met een periode van ongeveer 7 à 8 jaar, die overeen kan komen met de variabiliteit in de North Atlantic Oscillation Index ². In de gebieden waar de gegevens van de World Ocean Data Base konden gebruikt worden, ligt de stijging van de zeewatertemperatuur tussen 0,023 °C/jaar (in het Skagerak en de noordelijke Noordzee) en 0,053 °C/jaar (in de centrale Noordzee en de Zuidelijke Noordzee). In het gebied dichtst bij onze kust bedraagt de toename ongeveer 0,034 °C per jaar of 3,4 °C per eeuw op basis van een lineaire regressie zonder de natuurlijke variabiliteit er uit te filteren.

Figuur 27: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemeten gemiddelde zeewatertemperatuur in de verschillende subgebieden van de Noordzee, berekend met de gegevens, verkregen van de World Ocean Data Base



Bron: Van den Eynde et al. (2008a)

In de scenario-berekeningen voor CLIMAR wordt een maximale stijging van 3,5 °C tegen 2100 verondersteld voor de temperatuur van het zeewater aan onze Vlaamse kust.

4.1.3.4 Stormen en golfklimaat

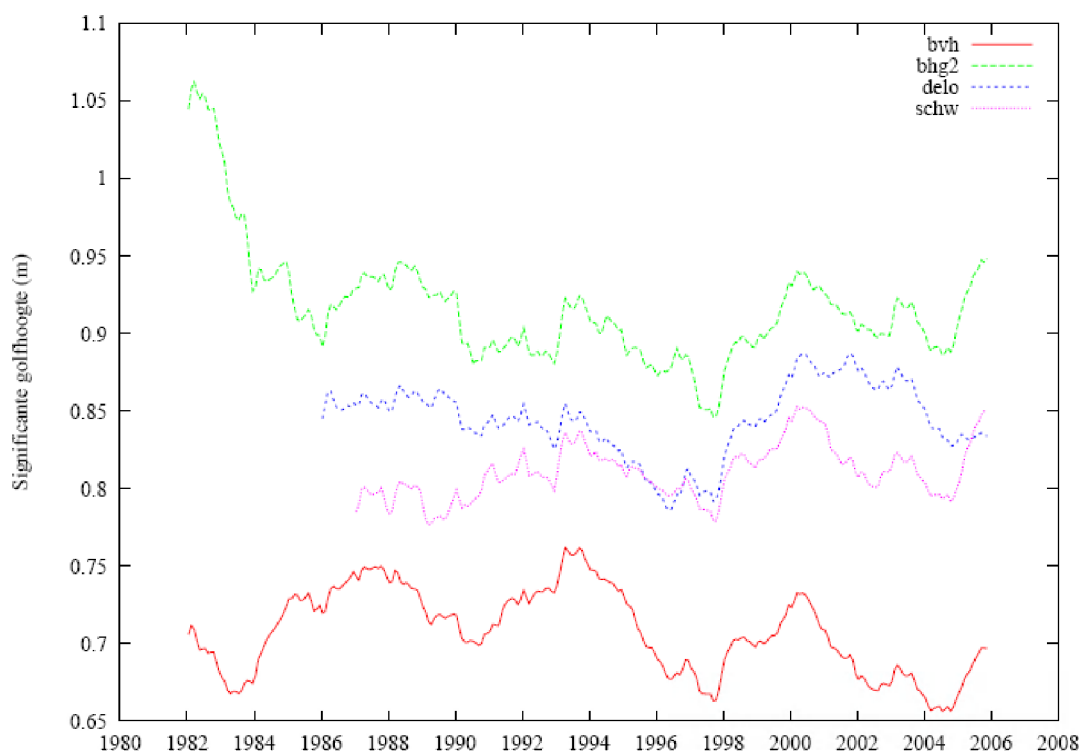
In het CLIMAR-project werd een statistische analyse uitgevoerd van de data die beschikbaar zijn voor windmetingen en golfhoogten in (de buurt van) het Belgisch Deel van de Noordzee voor een periode vanaf de eerste beschikbare tot de meest recente metingen (Van den Eynde et al., 2008a).

Op basis van golfmetingen uitgevoerd door de Vlaamse Gemeenschap, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust (MDK) ter hoogte van de Bol van Heist en metingen

² De North Atlantic Oscillation Index wordt gedefinieerd als het verschil tussen de atmosferische drukanomalieën op zeeniveau te Ponta Delgada (Azoren) en Akureyri (IJsland), genormaliseerd met de gemiddelde atmosferische druk in de periode 1961-1990.

uitgevoerd door Hydro Meteo Centrum Zeeland ter hoogte van 3 locaties (Brouwershavensche Gat 2, Deurlo en Scheur West), werd een statistische opdeling toegepast van de metingen in een langetermijntrend, een seizoenale cyclus en een residu. Men vindt opnieuw een variabiliteit met een periode van ongeveer 7 jaar, verbonden met de NAOI.

Figuur 28: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemiddelde significante golfhoogte in Bol van Heist (bvh), Brouwershavensche Gat 2 (bhg2), Deurloo (delo) en Scheur West (schw)



metingen van Bol van Heist van MDK; metingen Brouwershavensche Gat 2, Deurloo en Scheur West van Hydro Meteo Centrum Zeeland

Bron: Van den Eynde et al. (2008a)

Na eliminatie van de langetermijntrend, kan de seizoenale cyclus worden berekend. Deze seizoenale cyclus wordt niet sterk beïnvloed door de periode waarvoor het lopende gemiddelde werd berekend. Er zijn gemiddeld hogere golven in de winter (hoogste golven in december en januari) en lagere golven in de zomermaanden (laagste golven in augustus).

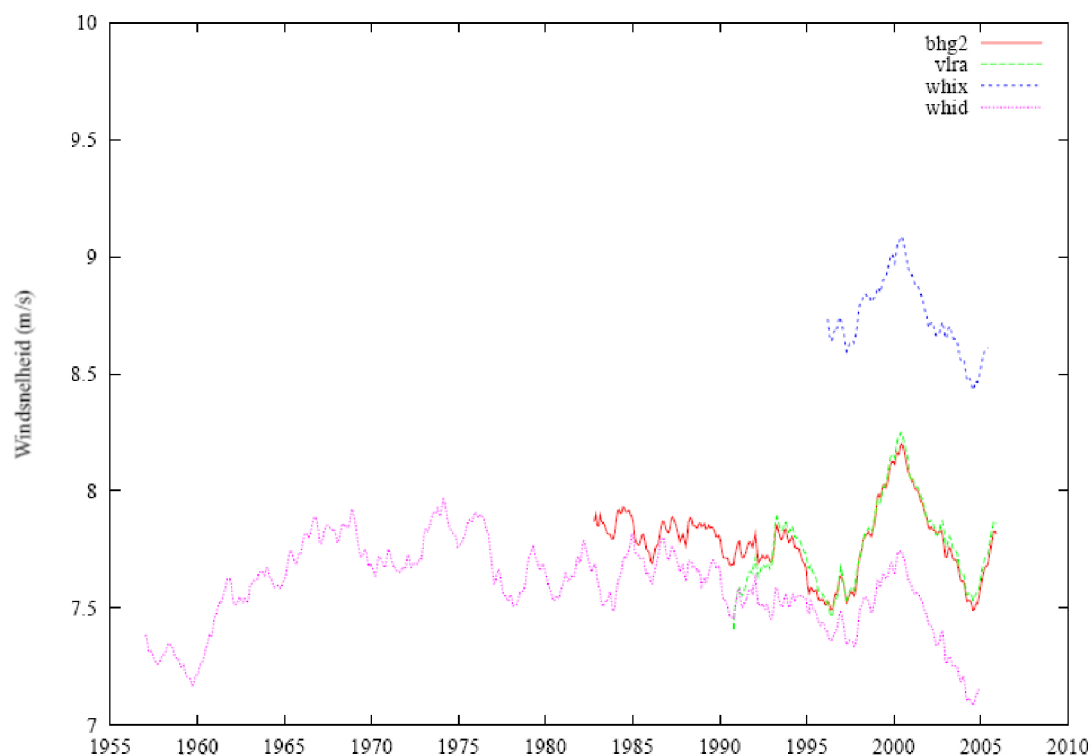
Een andere methode om de langetermijntrend in golfhoogten te kwantificeren, is de toepassing van een lineaire regressie op de verschillende tijdreeksen. De resultaten blijken niet eenduidig en er zijn geen duidelijke conclusies uit te trekken. In station Bol van Heist en station Brouwershavensche Gat 2 is een daling van de maandelijks gemiddelde significante golfhoogte waar te nemen van $-0,0013$ m/jaar en $-0,0027$ m/jaar respectievelijk. Dit komt voor het station Bol van Heist erop neer dat de gemiddelde significante golfhoogte daalde van $0,7254$ m in 1980 tot $0,6905$ m medio 2007. Anderzijds zijn in station Deurloo geen veranderingen waar te nemen, en is in station Scheur West zelfs een verhoging van de maandelijks gemiddelde significante golfhoogte waar te nemen van $0,0024$ m/jaar.

Er werd ook gekeken naar het voorkomen van hoge golven. In de stations Bol van Heist en Brouwershavense Gat 2 lijkt er een afname op te treden van de golven hoger dan 2 m of 3 m. Ook voor het voorkomen van hoge golven is het beeld in het algemeen onduidelijk.

Voor winddata werd in CLIMAR teruggevallen op data beschikbaar gesteld door de Vlaamse Gemeenschap, het Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust (MDK) ter hoogte van Westhinder en op metingen uitgevoerd door Hydro Meteo Centrum Zeeland ter hoogte van 2 locaties (Brouwershavense Gat 2, Vlakte van de Raan). Er werd ook gebruik gemaakt van data voor atmosferische druk en windvectoren vanuit het Norwegian Meteorological Institute.

In de maandelijkse gemiddelden van de windsnelheid blijkt geen belangrijke trend zichtbaar (figuur 29). Het lijkt erop dat er tussen 1955 en 1968 een stijgende trend waar te nemen is, waarna de maandelijks gemiddelde windsnelheid langzaam terug afneemt. Deze dalende trend lijkt zich sinds de periode 1990-1995 nog te versterken. De verlaging van de maandelijkse gemiddelde windsnelheid sinds 1980 wordt ook weergevonden in een lichte verlaging van de golven over dezelfde periode. De langetermijntrend voor de periode 1990 tot 2005 is gelijkaardig in de vier stations, met een piek in de windsnelheid rond 2000.

Figuur 29: Langetermijntrend over 48 maanden van de maandelijks gemeten gemiddelde windsnelheid in Brouwershavense Gat 2 (bhg2), Vlakte van de Raan (vlra) en Westhinder (whix) en van de maandelijks gemiddelde windsnelheden van de meteorologische voorspellingen van DNMI in Westhinder (whid)



metingen van Westhinder van MDK; metingen Brouwershavense Gat 2 en Vlakte van de Raan van Hydro Meteo Centrum Zeeland

Bron: Van den Eynde et al. (2008a)

De uitgevoerde lineaire regressie geeft een onduidelijk beeld. Er lijkt een verandering in trend te zijn opgetreden rond 1968 (stijging van de maandelijks gemiddelde windsnelheid voor dit jaartal en daling erna), maar de tijdreeks voor 1968 is te beperkt zodat dit met de nodige voorzichtigheid moet worden geïnterpreteerd.

Ook voor de maximale windsnelheden is er geen duidelijke trend: voor de langste tijdreeks (Deense voorspelling t.h.v. de Westhinder) is er zeer weinig evolutie, zowel voor de maximale windsnelheden als het percentage windsnelheden boven 6 Beaufort of 8 Beaufort.

Een duidelijke klimaatrend kon in de historische meetreeksen van golfhoogten en windsnelheden dus nog niet worden aangetoond. Maar door de verwachtingen voor een veranderend windklimaat in de 21^e eeuw (zie § 4.1.2), zouden de frequentie en de grootte van de windgolven op de Noordzee wijzigen – en dus ook de kans op hoogwater langs de Vlaamse kust en in de Schelde. Die windgolven kunnen zo voor een bijkomende stijging van de zeespiegel zorgen.

4.1.3.5 Andere fysische en chemische parameters (o.a. saliniteit, zuurtegraad)

In Brouwers et al. (2008) wordt de te verwachten evolutie van de zuurtegraad op wereldschaal aangegeven. Terwijl de concentratie van CO₂ in de atmosfeer toeneemt door de verbranding van fossiele brandstoffen en andere menselijke activiteiten, wordt een deel van dit gas opgenomen door de oceanen. Daarbij verschuiven de chemische evenwichten in het zeewater, met een weerslag op de mariene fauna en flora tot gevolg. Het gros van de geabsorbeerde CO₂ reageert met watermoleculen om koolzuur te vormen, hetgeen dan dissocieert tot ionen van waterstof (H⁺), bicarbonaat (HCO₃⁻) en in mindere mate ook carbonaat (CO₃²⁻). De toename aan vrije waterstofionen zorgt voor een daling van de zeewater-pH: het zeewater wordt minder alkalisch of zuurder. Een overschot aan vrije waterstofionen draagt bovendien bij tot de omzetting van carbonaat in bicarbonaat. En dat hindert dan weer heel wat mariene organismen in de aanmaak van calciumcarbonaat (CaCO₃) voor hun schelp of skelet. Dit effect wordt nog versterkt door de andere verzurende stoffen die door toedoen van de mens in het mariene milieu terechtkomen: afvalwaterlozingen, emissie verzurende stoffen in de lucht, enz. (European Commission, 2006).

De afgelopen 200 jaar hebben de oceanen ongeveer de helft van de door de mens uitgestoten CO₂ opgenomen. Het gevolg daarvan is een verlaging van pH in oppervlakkige waterlagen met 0,1 eenheden, wat overeenstemt met een toename van 30 % aan vrije waterstofionen (European Commission, 2006). Metingen gedurende de afgelopen 20 jaar geven een daling van pH met 0,02 eenheden per decade aan (IPCC, 2007). Als de CO₂-uitstoot mondiaal blijft toenemen, kan de gemiddelde zuurtegraad van de oceanen verder verlagen met 0,14 tot 0,35 eenheden tegen 2100. Aangezien verzuring van de oceanen de capaciteit om bijkomende CO₂ uit de atmosfeer te capteren beperkt, valt te verwachten dat toekomstige emissies van CO₂ een groter opwarmend effect zullen hebben dan emissies uit het verleden (European Science Foundation, 2007). En ook al zijn onzekerheden en veronderstellingen bij zulke scenariodoorrekeningen erg groot, toch kan men stellen dat de grootteorde van verandering in pH groter is dan de wijzigingen in de afgelopen 300 miljoen jaar. En misschien nog belangrijker dan de grootteorde is dat de snelheid waarbij de wijzigingen zouden optreden veel hoger (een factor 100) ligt dan in het verleden, hetgeen de pH-gevoeligheid van mariene organismen nog vergroot (European Commission, 2006).

Veranderingen in saliniteit zijn potentiële indicatoren voor grootschalige veranderingen in neerslag, evapotranspiratie, ijssmelten en/of rivierdebieten naar de zee. Grootschalige, coherente trends in saliniteit worden gekarakteriseerd door een globale verzoeting ter hoogte van subpolaire breedten en een verzilting van ondiepere delen van de tropische en subtropische oceanen. De observaties laten echter niet toe om een betrouwbare inschatting te maken van de globale algemene verandering in de saliniteit van onze oceanen (IPCC, 2007). De langetermijntrends in de Noord-Atlantische Oceaan zijn consistent met bovenstaande bevindingen. Consistente metingen van temperatuur en saliniteit zijn echter van te korte datum om iets meer te kunnen zeggen over de trends in uitwisseling van volume, warmte en zout tussen de Atlantische Oceaan en de Arctische gebieden (European Commission, 2006). Specifiekere data of prognoses voor de Noordzee werden niet teruggevonden in een recente literatuurstudie uitgevoerd binnen CLIMAR (Van den Eynde et al., 2007).

4.2 Invloed van klimaatverandering op hoog- en laagwater langs rivieren in het Vlaamse binnenland

In het WL-project werden de CCI-HYDR klimaatveranderingsscenario's voor neerslag en ETo (versie mei 2007 van deze scenario's) doorgerekend in hydrologische en hydrodynamische

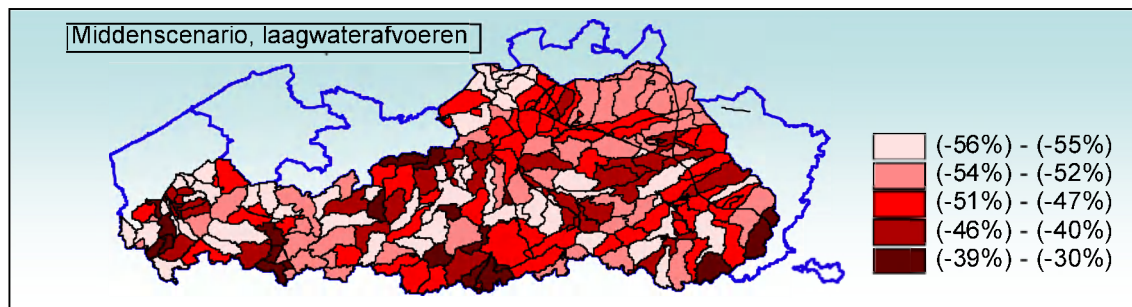
riviermodellen om de concrete invloed te bestuderen op hoog- en laagwaterdebieten (neerslagafstromingsdebieten) naar rivieren in het stroomgebied van de Schelde (Boukhris et al., 2008). De hoog-, midden- en laag-klimaatscenario's voor neerslag en ETo in de verschillende maanden en van neerslag en ETo onderling werden gecombineerd tot 3 globale scenario's voor hydrologische impactanalyse (zie ook figuur 8): het hoog-scenario leidt tot de meest extreme impacts voor hoogwater/overstromingen, het laag-scenario tot de meest extreme impacts voor laagwater/droogte. Het CCI-HYDR hoog-scenario kan dus ook aanzien worden als een "nat" scenario, het CCI-HYDR laag-scenario als een "droog" scenario. Het midden-scenario is ten slotte een "gematigd scenario" (gematigd in de betekenis van hydrologische impact).

De hydrologische impactanalyse gebeurde in het WL-project voor 67 deelbekkens in het Vlaamse binnenland, waarvoor hydrologische en hydrodynamische modellen beschikbaar zijn bij het WL. Figuren 30 en 31 geven aan over welke rivieren het gaat: de rivieren waar de gekleurde gebieden naar afwateren. Finaal heeft het WL interesse in de bevaarbare (dus grote en meer afwaartse waterlopen), maar aangezien deze gevoed worden vanuit opwaartse onbevaarbare waterlopen en deelbekkens, werd ook voor deze deelbekkens een impactanalyse bekomen. Specifiek werd gekeken naar "nagenoeg onafhankelijke" uurlijkse hoogwaterpieken en laagwaterminima voor de stroomgebiedsgemiddelde neerslagafstromingsdebieten per hydrografisch deelbekken (VHA-zone: zone in de Vlaamse Hydrografische Atlas). Belangrijk om te vermelden is dat er werd gerekend met het huidig landgebruik; enkel de invloed van de potentieel toekomstige klimaatverandering werd nagegaan. De conclusies gaan voor alle rivieren in dezelfde lijn (Boukhris et al., 2008):

- voor het laagwater in de zomer: Door de sterke daling in de zomereerslag en de toename in de verdamping, daalt het debiet aanzienlijk. Tijdens droge zomers kunnen de laagste rivierdebieten met meer dan 50 % dalen (gemiddeld 20 % in het minst pessimistische scenario, gemiddeld 70 % in het meest pessimistische scenario). Figuur 30 toont de resultaten voor het middenscenario. Het is duidelijk dat deze verwachte daling in laagwaterafvoeren de kans op watertekorten aanzienlijk kan doen toenemen, wat nadelige gevolgen kan hebben voor het industrieel en huishoudelijk watergebruik, voor de diepgang van de scheepvaart, voor de waterkwaliteit, de natuur, de landbouw ... Hoe deze daling zich vertaalt naar hoe vaak er watertekorten, vissterftes ... zullen zijn in de toekomst, wordt nog bestudeerd.
- voor het hoogwater in de winter: De sterke stijging in de verdamping (tijdens zowel de winter als de zomer) compenseert voor een groot deel de toename in de winterneerslag. Daardoor is de toename in het aantal en de grootte van de overstromingen (in de winter vooral langs rivieren) relatief beperkt. Piekaafvoeren in de rivieren nemen in het meest ongunstige scenario met maximaal 35 % toe (figuur 31). Zo'n toename kan plaatselijk wel leiden tot frequenter en meer uitgestrekte overstromingen (bv. figuur 32).
- voor het hoogwater in de zomer: Extreme zomeronweders kunnen voor overstromingen van rioleringen en kleinere waterlopen zorgen (zoals meermaals tijdens recente zomers in Vlaanderen opgemerkt). De meeste klimaatmodellen (alhoewel niet allemaal) voorspellen een toename in het aantal (de frequentie) en de grootte van zulke hevige zomeronweders, zodat ook een toename van het aantal rioleringsoverstromingen wordt verwacht. Voor de grootste bui die zich momenteel in een periode van 10 jaar voordoet, blijkt het daggemiddeld neerslagvolume in het meest ongunstige scenario met ongeveer 30 % toe te nemen.

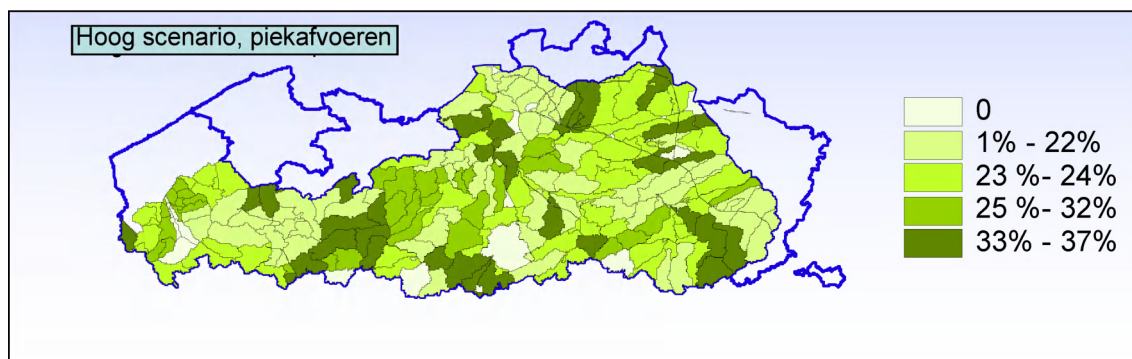
Merk op dat het telkens gaat om schattingen tot 2100.

Figuur 30: Percentage verandering in laagwaterafvoeren naar rivieren (gemiddeld per hydrografisch deelbekken, volgens het CCI-HYDR middenscenario; referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)



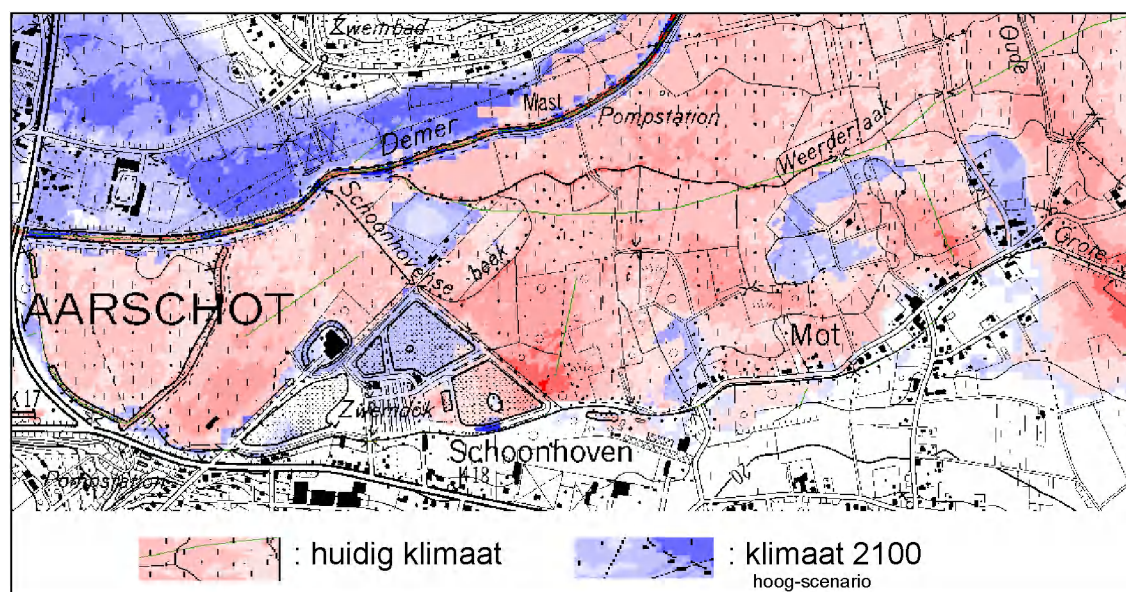
Bron: Boukhris et al., 2008 (WL-project)

Figuur 31: Percentage stijging in piekafvoeren naar rivieren (gemiddeld per hydrografisch deelbekken, volgens het hoog CCI-HYDR klimaatscenario; referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)



Bron: Boukhris et al., 2008, (WL-project)

Figuur 32: Lokaal overstroomingsgebied met een gemiddelde herhalingsjijd van 1 keer op de 100 jaar, voor en na het hoog CCI-HYDR klimaatscenario (referentieperiode 1961-1990 tot de scenarioperiode 2071-2100)



achtergrond: topografische kaart 1:10000, Nationaal Geografisch Instituut

Bron: Boukhris et al., 2008, (VL-project)

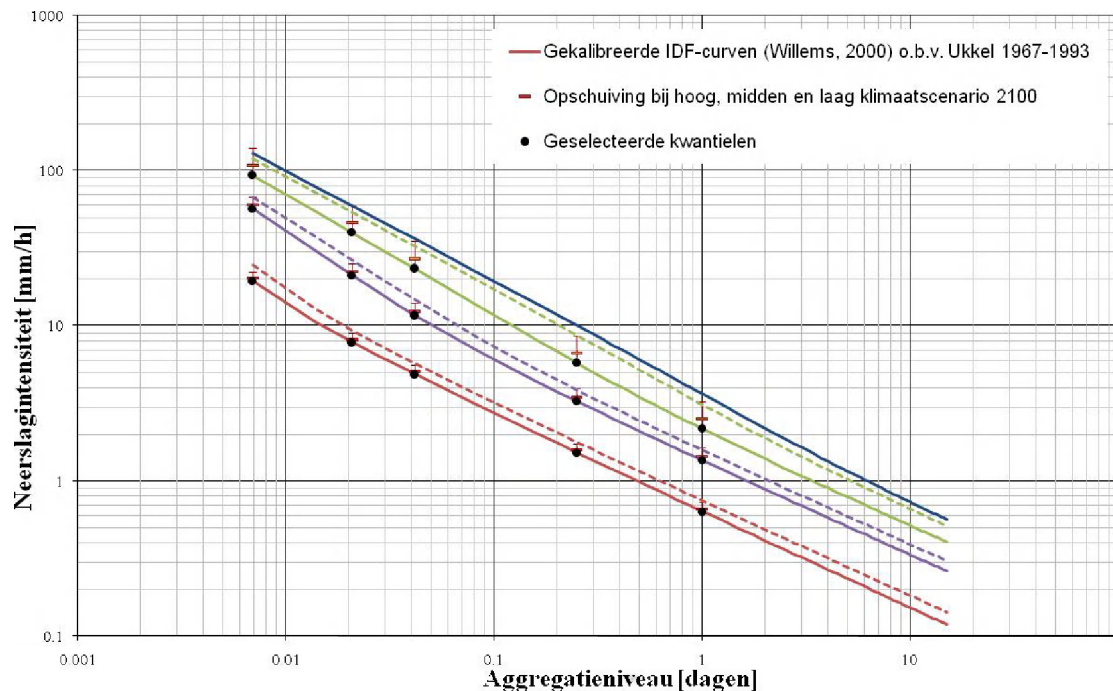
De invloed van klimaatverandering is niet enkel sterk seizoensafhankelijk maar ook regionaal zeer variabel. Klimaatmodellen tonen een noord-zuidvariatie in de neerslag- en temperatuurverandering (Baguis *et al.*, 2009). In de zuidelijke buurregio van Vlaanderen (bv. Somme en Seine rivierbekkens in Noord-Frankrijk) blijkt dat door klimaatverandering de evolutie naar verdroging verder versterkt zal worden, met een daling van zowel de zomer- als de winterafvoeren (Ducharne, 2008). Waar in Vlaanderen de evolutie naar meer overstromingen nog onduidelijk is, verwacht men voor Noord-Frankrijk een daling van het aantal overstromingen (Ducharne, 2008). Meer noordelijk, in Nederland, wordt de verwachte toename in het aantal overstromingen dan weer duidelijker (Deltacommissie, 2008).

4.3 Invloed van klimaatverandering op het ontwerp van rioleringsstelsels

Door de klimaatverandering stijgen ook de piekafvoeren langs rioleringsstelsels en kleinschalige neerslagafvoersystemen, zoals beken en grachten. Dit vraagt een aangepaste ontwerpneerslag bij het dimensioneren van deze systemen; zie o.a. in figuur 33 de opschuiving van de intensiteit-duur-frequentie-verbanden (IDF-verbanden) die gebruikt worden als basis van de ontwerpneerslag. IDF-verbanden vatten de statistische informatie verrat in neerslagtijdsreeksen samen. Ze geven aan hoe de neerslagintensiteit uitgemiddeld over een bepaalde tijdsduur ('aggregatieniveau' genoemd) toeneemt met toenemende terugkeerperiode (gemiddelde tijd tussen 2 opeenvolgende overschrijdingen van de neerslagintensiteit). De IDF-verbanden worden typisch gebruikt bij bv. het ontwerp van rioleringsystemen. Het aggregatieniveau bij dewelke de neerslagintensiteit wordt gebruikt bij zulk ontwerp, wordt bepaald door de responstijd van het systeem (de tijd die de neerslag nodig heeft om van het verst verwijderde punt van het systeem de ontwerplocatie te bereiken, ook concentratietijd genoemd). Voor Vlaamse rioleringsystemen is deze concentratietijd typisch tussen 10 en 60 minuten gesitueerd. Voor beken kan deze concentratietijd oplopen tot enkele uren. In figuur 33 zijn de IDF-verbanden weergegeven voor een aantal terugkeerperiodes tussen 1 maand en 100 jaar. Via de onderbroken curven zijn de huidige IDF-verbanden weergegeven, die bij een hoog-klimaatscenario zullen overeenkomen met de toekomstige IDF-verbanden bij 1 maand, 1 jaar en 10 jaar. Een huidige neerslagintensiteit bij een terugkeerperiode van 1,5 maand komt na het hoog-klimaatscenario overeen met een terugkeerperiode van 1 maand. Een huidige neerslagintensiteit bij een terugkeerperiode van 2 jaar komt na het hoog-klimaatscenario overeen met een terugkeerperiode van 1 jaar. Voor grotere terugkeerperiodes is de verandering wat onzekerder en minder eenduidig: voor de

kleine aggregatieniveaus (1 uur of minder) daalt een terugkeerperiode van 100 jaar tot 10 jaar, terwijl voor de grotere aggregatieniveaus een terugkeerperiode van 50 jaar tot 10 jaar daalt.

Figuur 33: Opschuiving van de neerslagintensiteiten bij het hoog-, midden- en laag-klimaatscenario voor verschillende aggregatieniveaus en vergelijking met de huidige IDF-verbanden voor verschillende terugkeerperioden



Figuur opgemaakt op basis van de 31 regionale klimaatmodelruns uit het CCI-HYDRproject, via vergelijking scenarioperiode 2071-2100 met de controleperiode 1961-1990.

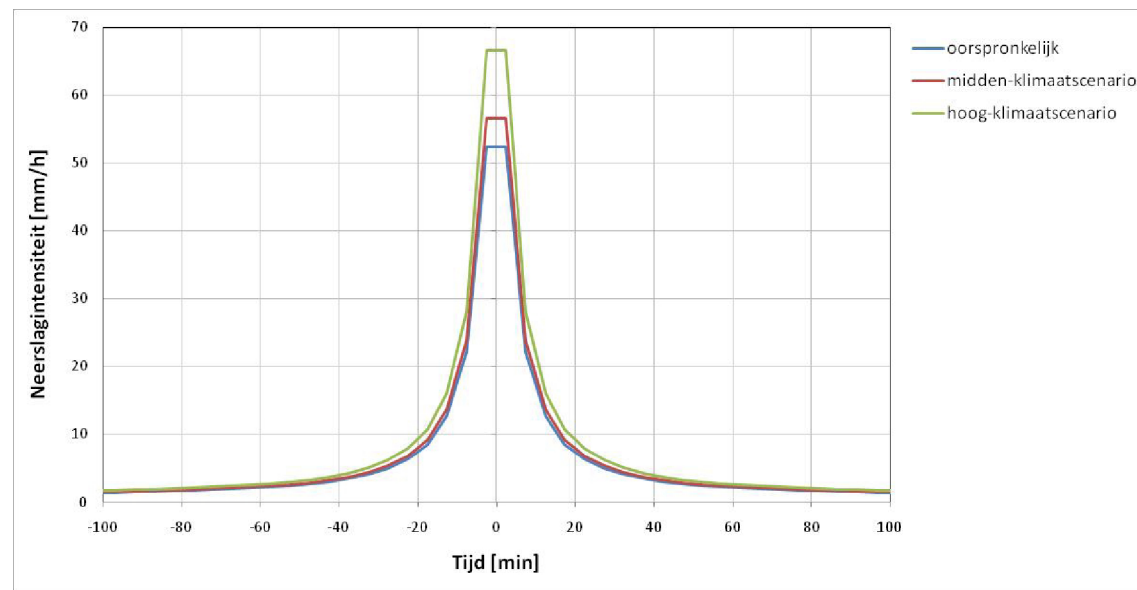
Volle en onderbroken lijnen zijn de huidige IDF-verbanden, gecalibreerd aan de historische gegevens van Ukkel voor verschillende terugkeerperioden: 1 maand (volle rode curve), 1,5 maand (onderbroken rode curve), 1 jaar (volle paarse curve), 2 jaar (onderbroken paarse curve), 10 jaar (volle groene curve), 50 jaar (onderbroken groene curve) en 100 jaar (volle blauwe curve)

Boxplots geven de resultaten van de klimaatscenario's voor de toekomstige IDF-verbanden voor de terugkeerperiodes 1 maand, 1 jaar en 10 jaar, dat voor de aggregatieniveaus 10 minuten, 30 minuten, 1 uur, 12 uur en 1 dag en dat voor de geselecteerde kwantielen (zwarte bollen). Daarbij geeft de box de resultaten voor het midden-klimaatscenario en de bovenste whisker (rode verticale lijntjes) de resultaten voor het hoog-klimaatscenario.

Bron: Willems (2009)

Uit de IDF-verbanden kunnen maatgevende hyetogrammen afgeleid worden (zogenaamde composietbuien), die representatief zijn voor bepaalde terugkeerperioden. Rioleringsystemen worden momenteel in Vlaanderen ontworpen voor terugkeerperioden tussen 2 en 20 jaar. Figuur 34 geeft bij wijze van voorbeeld aan hoe de composietbui bij een terugkeerperiode van 2 jaar toeneemt bij een midden- en hoog-klimaatscenario.

Figuur 34: Aanpassing composietbui bij het hoog- en midden-klimaatscenario voor een terugkeerperiode van 2 jaar (Vlaanderen, scenarioperiode 2071-2100 vergeleken met de controleperiode 1961-1990)

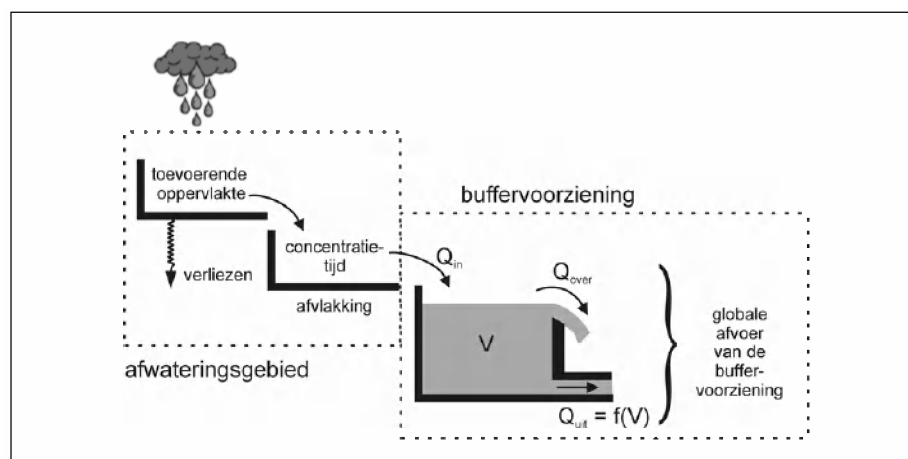


Figuur opgemaakt op basis van de 31 regionale klimaatruns uit het CCI-HYDRproject, via vergelijking scenarioperiode 2071-2100 met de controleperiode 1961-1990.

Bron: Willems (2009)

In de studie “Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de ontwerp-Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen” voor VMM, wordt ook de invloed nagegaan van de potentieel toekomstige klimaatverandering op de ontwerpwaarden voor het dimensioneren van buffervoorzieningen als bronmaatregelen bij rioleringsstelsels (figuur 35).

Figuur 35: Schematische weergave van het simulatiemodel voor buffervoorzieningen als bronmaatregel bij rioleringsstelsels



Bron: Vaes et al. (2004)

Naast de eerder vermelde ontwerpwaarden voor rioleringsystemen, wijzigen ook de ontwerpwaarden bij het dimensioneren van bronmaatregelen (lokale buffervoorzieningen, zoals regenwatertanken, infiltratiebekkens ...). Tabel 9 geeft aan dat de benodigde buffervolumes door klimaatverandering beduidend stijgen in het hoog-klimaatscenario. Door de klimaatverandering zullen buffervoorzieningen dus groter gedimensioneerd moeten

worden of zijn er bijkomende voorzieningen nodig die hemelwater opslaan en/of laten infiltreren in de ondergrond. Onder het hoog-klimaatsscenario zou voor de (in de huidige praktijk) meest gangbare doorvoerdebieten (d.i. 2, 5 en 10 l/(s.ha)) het nodige buffervolume met ongeveer 15 tot 35 % moeten toenemen ten opzichte van de huidige praktijk. Er moet vooral gedacht worden aan voorzieningen die zowel het risico op wateroverlast beperken tijdens hevige regenbuien (waterberging op plaatsen waar het weinig hinder veroorzaakt), als de toekomstige verwachte toename aan watertekorten opvangen (wateropslag, of infiltratievoorzieningen die het grondwater aanvullen). Een andere optie is de bestaande berging beter te benutten via verkorte reactietijden in het controlemechanisme.

Tabel 9: Procentuele toename (t.o.v. de huidige code) in nodige buffervolumes (in m³/ha) in functie van het maximaal doorvoerdebiet en de terugkeerperiode van de overlaat voor een lineaire doorvoerrelatie bij een concentratietijd van 10 minuten en het hoog-klimaatsscenario.

constant doorvoer debiet [l/(s.ha)]	terugkeerperiode van overloop [jaar]:					
	0,5	1	2	5	10	20
50	+51 %	+37 %	+28 %	+34 %	+44 %	+43 %
40	+38 %	+35 %	+23 %	+31 %	+38 %	+39 %
30	+25 %	+28 %	+23 %	+33 %	+36 %	+34 %
25	+24 %	+27 %	+23 %	+31 %	+40 %	+31 %
20	+22 %	+25 %	+26 %	+29 %	+39 %	+29 %
15	+24 %	+26 %	+24 %	+23 %	+28 %	+20 %
10	+20 %	+26 %	+26 %	+29 %	+25 %	+22 %
5	+16 %	+17 %	+21 %	+24 %	+27 %	+24 %
2	+21 %	+25 %	+28 %	+27 %	+33 %	+18 %
1	+22 %	+30 %	+39 %			

Tabel 10 geeft aan dat voor ontwerpwaarden die volgens de huidige “Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid” (daterend van 1996) of de ontwerp-“Code van Goede Praktijk voor het ontwerp van rioleringsystemen” (Vaes et al., 2004) een terugkeerperiode van overloop van de buffervoorziening hebben van grootteorde 2 jaar, na het hoog-klimaatsscenario een verminderde terugkeerperiode hebben van grootteorde 0,5 jaar. De ontwerpwaarden die volgens de huidige krachtlijnen een terugkeerperiode van overloop hebben van grootteorde 5 jaar, kennen na het hoog-klimaatsscenario een verminderde terugkeerperiode tussen de 1 en de 1,5 jaar. Let wel dat deze getallen gelden voor een tijdshorizon 2071-2100, uitgaande van de huidige kennis m.b.t. de klimaattevoeltes en een – op basis van deze kennis – meest pessimistisch scenario (hoog-klimaatsscenario).

Tabel 10: Grootteordes van buffervolumes in functie van het maximaal ledigingsdebiet en terugkeerperiode van de noodoverlaat

terugkeerperiode ‘Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid’ van 1996	2 jaar	5 jaar
terugkeerperiode langetermijnsimulaties bij constante doorvoer, hoog klimaat-scenario	±0,5 jaar	±1 tot 1,5 jaar

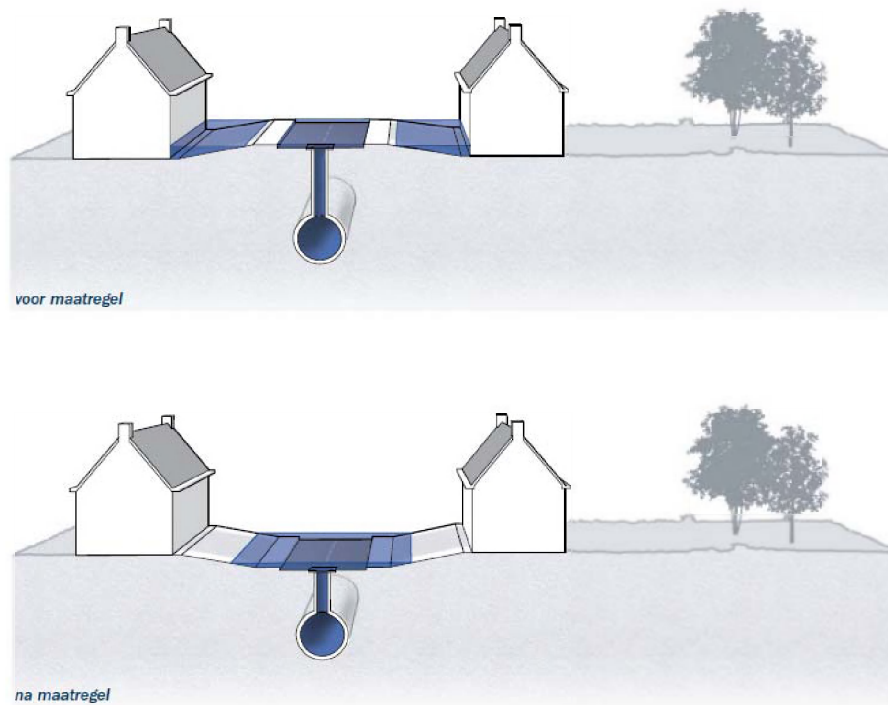
Aangezien de onzekerheden in de toekomstige klimaatverandering nog zeer groot zijn (het hoog (nat) klimaatsscenario verschilt zeer sterk van het laag (droog) klimaatsscenario; en werkelijke onzekerheden kunnen nog groter zijn) wordt in de studie van Willems (2009) niet aanbevolen om toekomstige afvoer- en bergingssystemen en waterbeheersmaatregelen te ontwerpen volgens de toekomstige neerslagcondities. Wel wordt aanbevolen om bij nieuwe ontwerpen rekening te houden met de potentiële toekomstige klimaatverandering. Met “rekening houden” wordt bedoeld dat “no regret” en “climate proof” maatregelen worden genomen, en dat – in het licht van de grote onzekerheden – ontwerpen en maatregelen adaptief worden gemaakt. Adaptief maken betekent dat men de mogelijkheid voorziet om later – indien zou blijken dat het klimaat in de richting van het nat klimaatsscenario opschuift –

bijkomende berging, bijkomende pompcapaciteit, ... te bouwen (liefst met zo beperkt mogelijke kost). Er moet worden voorkomen dat maatregelen worden genomen die dergelijke aanpassingen in de toekomst onmogelijk of zeer duur zouden maken. Uiteraard dient men in de toekomst de klimaatevoluties continu op te volgen en bij significant veranderende trends de klimaatprojecties bij te stellen (hopelijk gepaard gaande met verkleinde onzekerheden).

Rekening houden met de klimaatscenario's houdt ook in dat de wijzigende klimaatcondities en invloed op rioleringsystemen in het groter geheel van de klimaatproblematiek en de bijhorende impact op de waterhuishouding worden gezien. Naast de invloed op de korte-duur hemelwaterpieken werd in voorgaande paragraaf gemeld dat klimaatverandering hoogstwaarschijnlijk in de toekomst gepaard zal gaan met een belangrijke toename in de laagwaterproblematiek. De tijdsvariatie in optredend en beschikbaar hemelwater kan in de toekomst dus aanzienlijk toenemen. Een belangrijke uitdaging zal er in bestaan om het waterbeheer aan deze wijzigende omstandigheden aan te passen. Bij een toenemende tijdsvariatie in de neerslag (meer neerslag op korte tijd, lagere totale neerslagvolumes in de zomer) wordt best naar aanpassingen gezocht die de invloed van deze toenemende tijdsvariatie op de waterhuishouding tegengaan.

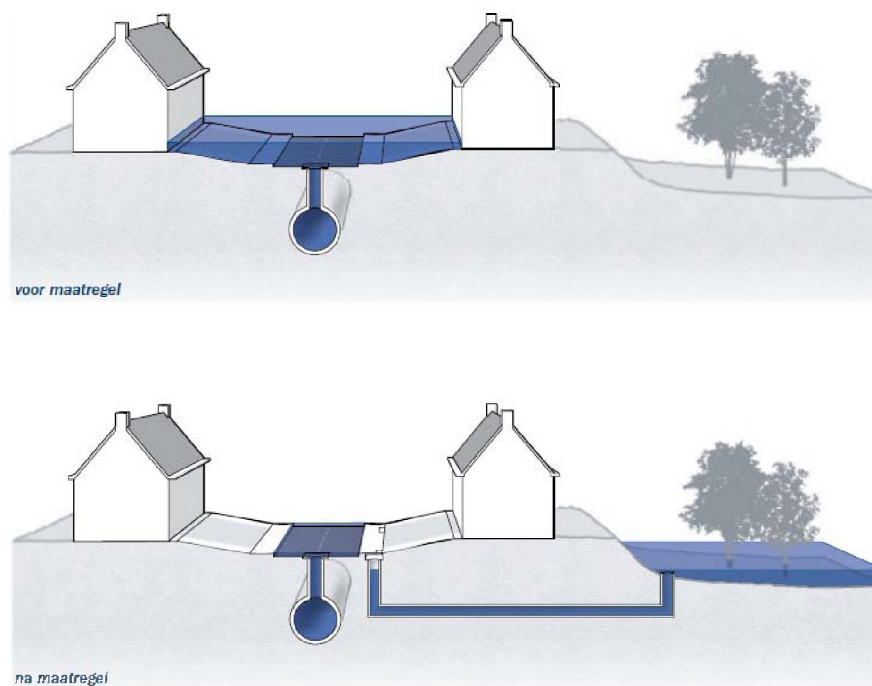
De hogervermelde toename in de laagwaterproblematiek, gecombineerd met de te verwachten graduele toename in de korte-duur regenwaterpieken vraagt dat waterbeheerders de komende decennia meer belang hechten aan de planning van de regenwaterafvoer. Het voorzien van bijkomende bergings- en infiltratievoorzieningen laat toe om de twee hogervermelde typen waterbeheersproblemen gecombineerd aan te pakken. Via zulke voorzieningen wordt zowel het risico op wateroverlast tijdens hevige regenbuien beperkt (door waterberging op plaatsen waar het weinig hinder veroorzaakt), als de toekomstig verwachte toename aan watertekorten verminderd (via waterstockage, of via infiltratievoorzieningen die het grondwater aanvullen). Dit kan via de aanleg van regenwatervoorzieningen, maar ook via kortdurende berging op straat of in de openbare ruimte. Figuur 36 geeft een voorbeeld van hoe via de aanleg van verhoogde stoepranden en verdieping van de straat, bijkomende berging op straat kan gerealiseerd worden. Het is een voorbeeld van een effectief en goedkoop middel om tijdens extreme regenbuien tijdelijk en gecontroleerd relatief grote hoeveelheden water op te slaan. Dergelijke waterberging tussen de stoepen veroorzaakt hinder (de toegankelijkheid en begaanbaarheid vermindert tijdelijk), maar veroorzaakt geen materiële schade. Ook via het doordacht aanleggen van lokale depressies in het openbaar terrein (in parken of andere groengebieden, in speeltuinen, enz), kan tijdelijk heel wat water geborgen worden (bv. figuur 37). Die laatste maatregel heeft bovendien het voordeel dat het geborgen water na de regenperiode infiltreert in de ondergrond, en alzo rechtstreeks bijdraagt tot het tegengaan van de verdroging. Het vereist echter een betere afstemming tussen ruimtelijke planning en waterbeheer (dergelijke afstemming wordt reeds geruime tijd als ondermaats bestempeld; zie o.a. conclusies van het internationaal congres over "Water & Urban Development Paradigms" aan de K.U.Leuven op 15-17 september 2008). Het vereist, onder meer, dat er een betere afstemming komt tussen de code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsystemen, de watertoets, de gewestelijke stedenbouwkundige verordening en andere stedenbouwkundige voorschriften. Bovendien vereist het infiltreren van stedelijk regenwater in de ondergrond dat men naast het waterkwantiteitsaspect ook rekening houdt met de waterkwaliteit (cfr. VLAREM-bepalingen). Andere aspecten die moeten bekeken worden zijn de invloed op de verkeersveiligheid, de verantwoordelijkheid van de wegbeheerder, maar ook de specifieke verantwoordelijkheden van de water- en rioolbeheerders, andere openbare domeinbeheerders, de individuele burgers (privé-terreinen), de landbouw ...

Figuur 36: Voorbeeld van mogelijkheid tot creatie van bijkomende berging op straat via stoeprandverhoging en straatpeilverlaging



Bron: RIONED (2009)

Figuur 37: Voorbeeld van mogelijkheid tot creatie van bijkomende waterberging in de openbare ruimte (groenvoorzieningen, speeltuinen ...)



Bron: RIONED (2009)

Vorige beschouwingen maken duidelijk dat een herziening van de huidige officiële code (Krachtlijnen voor een geïntegreerd rioleringsbeleid uit 1996) zich opdringt, niet enkel wat de ontwerpneerslagstatistieken betreft, maar ook m.b.t. de beleidskeuzes inzake afvoer van hemelwater van het openbaar wegdomein, de scheiding van regenwater en afvalwater, de problematiek van de kwaliteit van het afstromend hemelwater, de voorschriften van septische putten ... De hoger geschetste wijzigende omstandigheden vragen inderdaad een herziening van deze beleidskeuzes en bijhorende verantwoordelijkheden en wetgeving. Dit zal de volgende maanden reeds gebeuren via een afzonderlijke recent opgerichte werkgroep in de schoot van de CIW met betrokkenheid van alle actoren.

4.4 Impact van wijzigende waterhuishouding in het Vlaamse binnenland

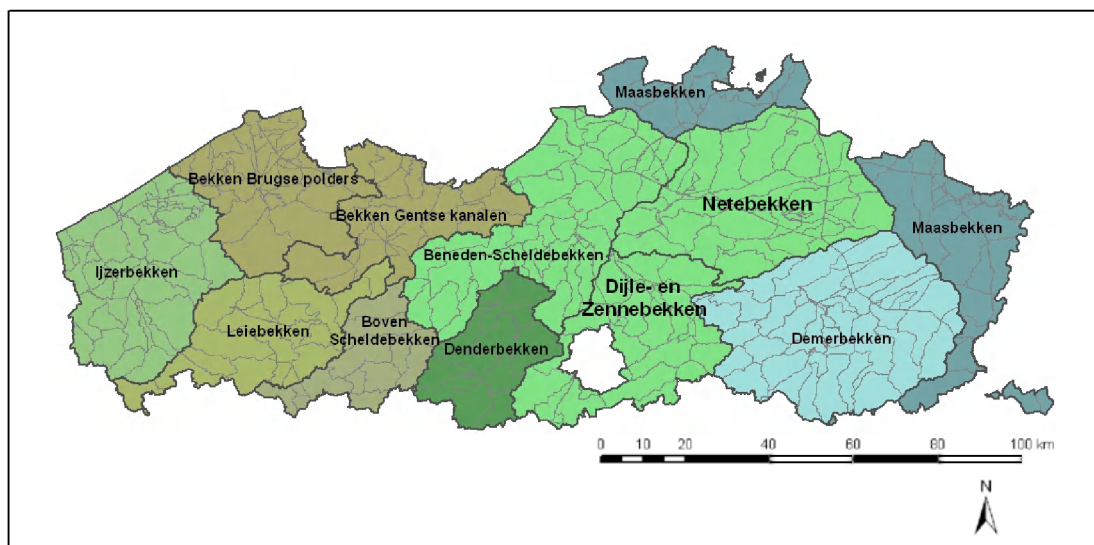
4.4.1 Overstroming vertaald naar economisch risico

Voor Vlaanderen zal de kans op overstromingen en dus ook de kans op schade langs de bevaarbare waterlopen variëren al naargelang het scenario. Toch moet opgemerkt worden dat ongeacht het klimaatscenario de gevolgen in zeer belangrijke mate afhankelijk zijn van de ontwikkelingen op gebied van ruimtelijke ordening en de individuele adaptatie, zowel voor woningen, industrie en infrastructuur als voor de landbouw.

In deze studie werden risicoberekeningen aan de hand van verschillende scenario's gemaakt. Langs de inputzijde van het model worden overstromingskaarten gebruikt uit verschillende klimaatscenario's. Deze scenario's zijn het laag, midden en hoog scenario die besproken werden in §§ 4.1 en 4.2. Dit wil zeggen dat er voor de overstromingskaarten geen rekening wordt gehouden met een eventuele zeespiegelstijging, enkel met wijzigende neerslag- en verdampingspatronen tot 2100. Ook worden landgebruikskaarten uit verschillende landgebruikscenario's als input gebruikt (de landgebruikskaart van het richtjaar 2030 uit zowel het ER als het RR scenario, zie verder). Daarnaast werden als referentie ook berekeningen uitgevoerd met overstromingskaarten van de huidige situatie (dus zonder verdere klimaatverandering) en de landgebruikskaart van de huidige situatie (referentiejaar 2005).

De risicoberekeningen werden gedaan voor verschillende bekken in Vlaanderen en de resultaten zijn onderverdeeld in volgende 6 gebieden (bekken): IJzer, Leie, Boven-Schelde, Dender, Beneden-Schelde en bevaarbare zijrivieren en Demer. De Vlaamse bekken zijn in figuur 38 voorgesteld. Daarnaast geeft de figuur op de achtergrond ook de verdere indeling in VHA-zones weer die in de volgende figuren gebruikt wordt.

Figuur 38: Overzicht van de verschillende bekken in Vlaanderen



De risicoberekeningen zijn niet gebiedsdekkend voor gans Vlaanderen. Dit kan bijvoorbeeld gezien worden op figuur 39 waar de VHA-zones waarvoor er geen risicoberekeningen gedaan zijn, niet zijn ingekleurd. Voor de meeste zones (de bovenlopen van de rivieren) komt dit doordat er in het Waterbouwkundig Laboratorium geen hydraulische modellen beschikbaar zijn aangezien het WL daarvoor niet bevoegd is. Hierdoor kunnen er geen overstromingskaarten gemaakt worden. Voor het bevaarbare deel van de Maas is er wel een hydraulisch model maar daarvan zijn er momenteel nog geen hydrologische modellen van de klimaatscenario's, waardoor er daarvoor ook nog geen overstromingskaarten beschikbaar zijn. Deze zullen later in het najaar van 2009 aangemaakt worden. Voor de bekkens van de Brugse polders en van de Gentse kanalen zijn geen hydrologische modellen beschikbaar omdat het systeem er volledig gestuurd is en zulke modellen er weinig zinvol zouden zijn.

Aangezien er voor alle simulaties gewerkt wordt met sterk veralgemeende modellen (hydrologische, hydraulische, klimaat- en landgebruiksmodellen) is het belangrijk te vermelden dat de cijfers en kaarten geïnterpreteerd moeten worden op Vlaams niveau of op bekkenniveau. Het heeft geen zin om te vermelden dat het overstromingsrisico in straat X of Y of gemeente A of B stijgt of daalt door de klimaatswijzigingen. Op hoger niveau kan men echter wel conclusies trekken uit het cijfermateriaal.

4.4.1.1 Invloed van de klimaatscenario's op het overstromingsrisico

Om de invloed van de klimaatscenario's (tegen 2100) op het overstromingsrisico te achterhalen is het noodzakelijk om het risico onder de verschillende klimaatscenario's met het risico van de huidige situatie te vergelijken. Voor deze oefening wordt telkens het huidige landgebruik gebruikt. Tabel 11 geeft een samenvatting van deze berekeningen weer. Voor elk bekken is telkens het totale risico weergegeven per scenario. Het risico wordt uitgedrukt in €/jaar. Dit is de gemiddelde economische schade per jaar (cfr. § 2.6.2) in een gebied, dewelke is veroorzaakt door overstromingen vanuit de bevaarbare waterlopen (als ook overstromingen vanuit de onbevaarbare waterlopen zouden meegerekend worden, zou het risico uiteraard hoger liggen). Daarnaast is er ook voor elk scenario een ratio (risico klimaatscenario gedeeld door risico huidige toestand) berekend. Een ratio lager dan 100 weerspiegelt dus een daling van het risico, een ratio hoger dan 100 een stijging van het risico. In de kaartjes geven de groene tinten een daling en de rode tinten een stijging van het risico weer.

Tabel 11: Overstromingsrisico in Vlaanderen in de verschillende bekkens volgens de huidige situatie en de drie klimaatscenario's tegen 2100

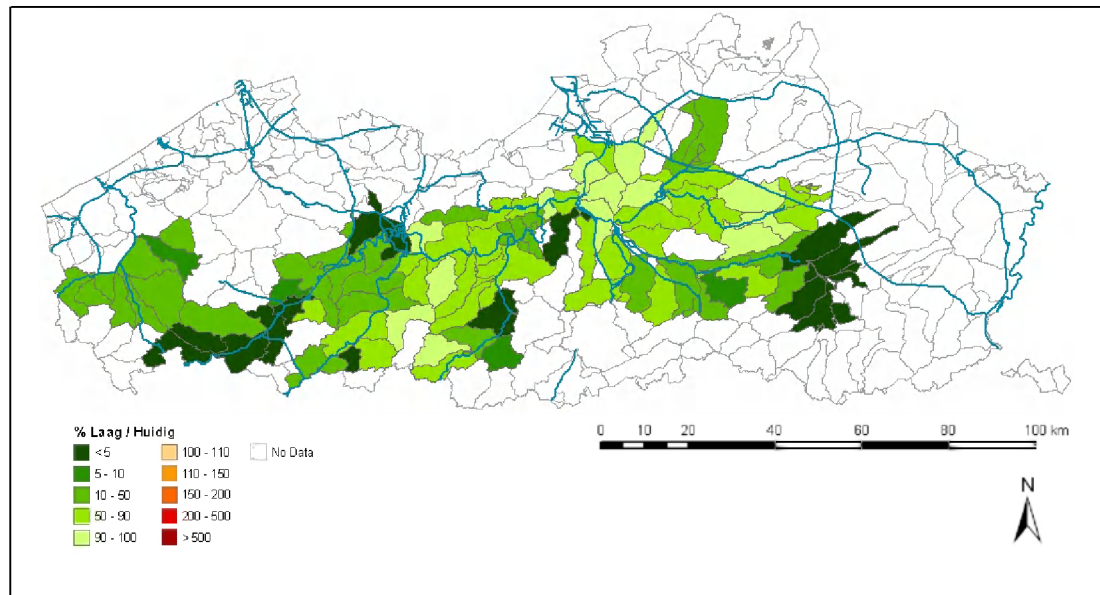
	huidige situatie	laag scenario 2100		midden scenario 2100		hoog scenario 2100	
	risico (10 ³ €/jaar)	risico (10 ³ €/jaar)	ratio laag/ huidig (%)	risico (10 ³ €/jaar)	ratio Midden/ Huidig (%)	risico (10 ³ €/jaar)	ratio hoog/ huidig (%)
Demer	2 552	418	16	1 549	61	5 423	213
Dender	11 424	7 017	61	9 784	86	14 001	123
Boven-Schelde	4 739	2 364	50	6 370	134	12 625	266
Beneden-Schelde en zijrivieren	43 275	17 478	40	40 274	93	44 945	104
IJzer	1 565	445	28	994	64	2 102	134
Leie	3 675	1 624	44	2 892	79	10 397	283
<i>totaal</i>	<i>67 231</i>	<i>29 345</i>	<i>44</i>	<i>61 864</i>	<i>92</i>	<i>89 493</i>	<i>133</i>

alle scenario's maken gebruik van het huidige landgebruik

In het laag klimaatscenario daalt het risico fors in alle bekkens in Vlaanderen. Het totale risico voor gans Vlaanderen is dan ook fors gedaald (nog slechts 44 % van het risico in de huidige situatie). Vooral in het Demer- (16 %) en het IJzerbekken (28 %) is de daling erg uitgesproken. Uiteraard is deze daling niet overal in een bekken hetzelfde (figuur 39). Deze figuur geeft de ratio risico laag scenario gedeeld door risico huidige situatie weer per VHA-zone. De daling van het risico is een rechtstreeks gevolg van het feit dat in het lage scenario

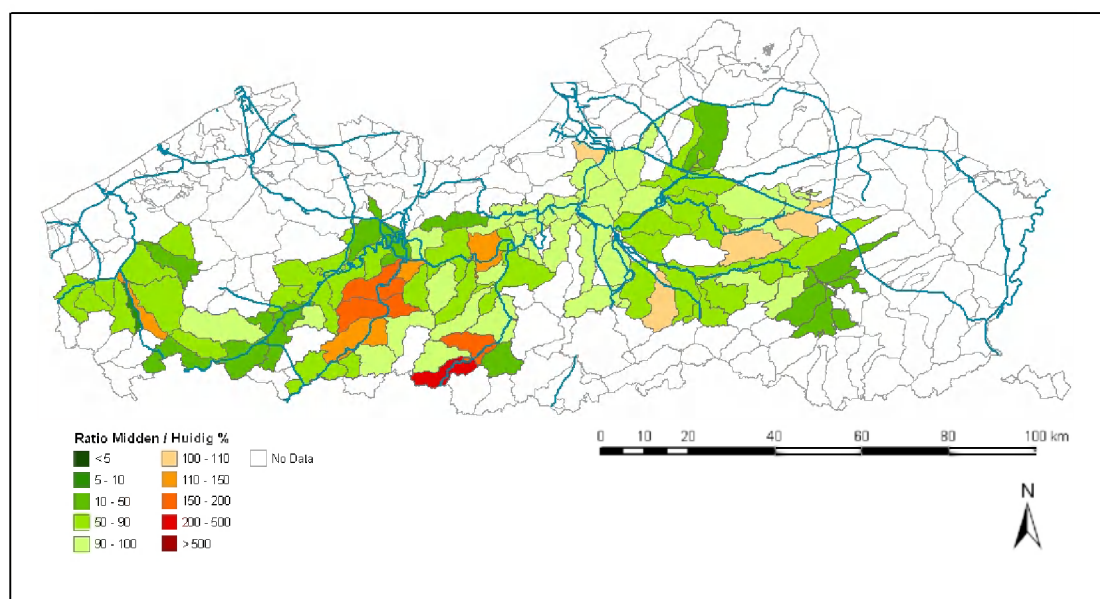
(het 'droge' scenario, cfr. § 4.2) de piekafvoeren en dus ook de overstromingsgebieden van de verschillende terugkeerperiodes veel kleiner zijn dan in de huidige situatie.

Figuur 39: Evolutie van het overstromingsrisico in het laag klimaatscenario tegen 2100: ratio risico laag scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik)



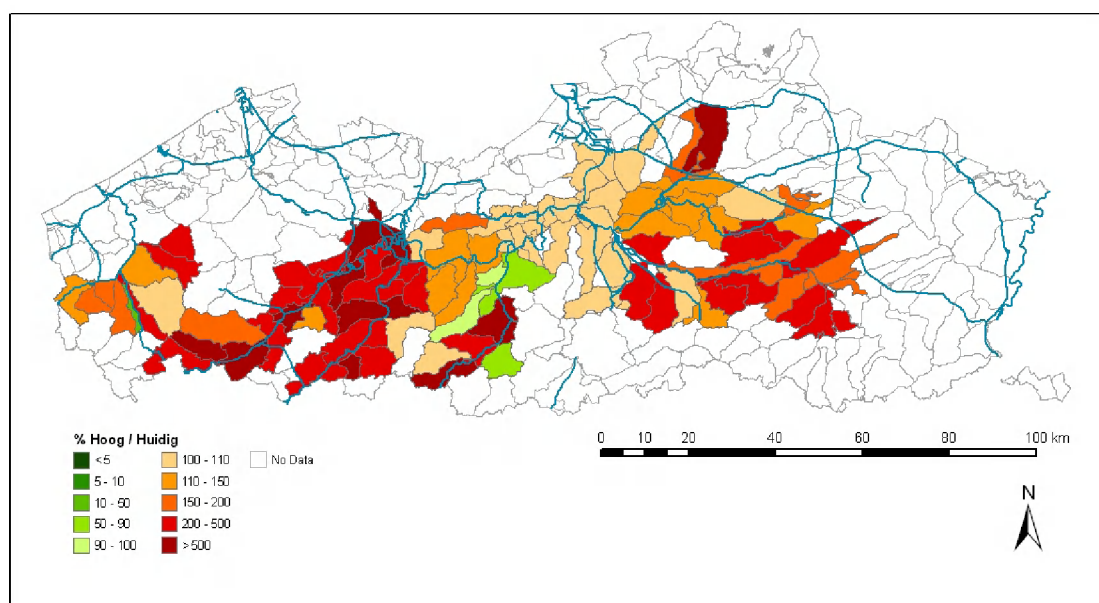
In het midden scenario is er op Vlaams niveau ook nog steeds een daling (zij het van een andere grootteorde dan bij het lage scenario) in vergelijking met de huidige situatie. In het Boven-Scheldebekken is er echter een stijging van het risico en ook in de andere bekkens zijn er individuele VHA-zones waar er een stijging van het risico is (figuur 40).

Figuur 40: Evolutie van het overstromingsrisico in het midden klimaatscenario tegen 2100: ratio risico midden scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik)



In het hoog klimaatscenario is er voor elk bekken een stijging van het risico. Op Vlaams niveau is de stijging van het risico ongeveer 30 %. De stijging is te verklaren door het feit dat het hoog scenario een 'nat scenario' (cfr. § 4.1) is en dat bijgevolg de overstromingsgebieden in het hoog scenario een grotere uitgestrektheid hebben dan in de huidige situatie (zie ook figuur 32). Vooral het Leie-, Boven-Schelde- en Demerbekken hebben een zeer sterke stijging van het risico (2 tot 3 maal zo veel). Voor de Beneden-Schelde en zijrivieren is de stijging minimaal. Op figuur 41 is te zien dat die minimale stijging wordt veroorzaakt door een stijging langs de Nete en de Dijle, terwijl het risico langs de Beneden-Schelde, de Rupel en de Zenne status quo blijft. Hierbij dient opgemerkt dat net voor deze waterlopen, onderhevig aan getij, het effect van zeespiegelstijging op het risico niet te verwaarlozen is.

Figuur 41: Evolutie van het overstromingsrisico in het hoog klimaatscenario (tegen 2100): ratio risico hoog scenario / risico huidige situatie (beide scenario's volgens het huidige landgebruik)



4.4.1.2 Invloed van de landgebruikscenario's op het overstromingsrisico

Om de invloed van het landgebruik op het risico te bepalen, werd het risico in de verschillende klimaatscenario's berekend met als basis het landgebruik van de verschillende scenario's. Zo werd het risico tegen 2100 voor elk van de 3 klimaatscenario's berekend op basis van het huidige landgebruik (richtjaar 2005), op basis van het landgebruik volgens het RR-scenario (het referentiescenario volgens het MIRA- en het NARA-beleidsscenario tot 2030) en op basis van het landgebruik volgens het ER-scenario (het Europees scenario volgens het MIRA-beleidsscenario en het referentiescenario volgens het NARA-beleidsscenario tot 2030). Omdat de landgebruikscenario's RR en ER maar beschikbaar zijn tot 2030, is voor de risicoberekeningen uitgegaan van een gelijkblijvend landgebruik na 2030 tot 2100.

Een belangrijke opmerking hierbij is dat het veranderde landgebruik enkel wordt gebruikt voor het doorrekenen van het risico. Voor de opmaak van de hydrologische modellen en de overstromingskaarten wordt het veranderde landgebruik niet opgenomen, hoewel dat wel invloed zou kunnen hebben op de hydrologie (minder braakland of meer begroeiing leidt bijvoorbeeld tot minder runoff, meer verstedelijking en meer verharding leidt tot meer runoff). Als een veranderend landgebruik globaal tot minder runoff zou leiden, dan is er ook minder water in de rivier en wordt een overstroming ook geringer in omvang, en bijgevolg dus ook het risico kleiner. De hydrologische modellen en de overstromingskaarten die verder gebruikt worden zijn dus gebaseerd op de huidige landgebruikssituatie.

In tabel 12 is het overstromingsrisico weergegeven van de 3 klimaatscenario's, enerzijds volgens het landgebruik in 2005 en anderzijds volgens het landgebruik in het RR-scenario. Daarnaast is ook de ratio 'risico volgens het landgebruik RR-scenario' gedeeld door 'het risico volgens het landgebruik in 2005' weergegeven volgens de 3 klimaatscenario's. Een ratio van meer dan 100 % wil zeggen dat het risico in het RR gestegen is ten opzichte van het huidige ruimtegebruik, een ratio van minder dan 100 % wil zeggen dat het risico gedaald is. In de drie klimaatscenario's kan er op Vlaams niveau een stijging van het risico van ongeveer 5 % opgemerkt worden. Dit is een rechtstreeks gevolg van het feit dat er onder het RR-scenario in Vlaanderen een groter areaal bebouwde oppervlakte (zowel bewoning als bedrijventerreinen) zal zijn (tabel 7). Aangezien het risico in bebouwde zones veel groter is dan het risico in bijvoorbeeld landbouwzones (een landgebruiksklasse die in 2030 minder oppervlakte zal behelzen), stijgt het totale risico voor Vlaanderen.

Daarnaast zijn er op bekkenniveau nog grotere verschillen op te merken. In het Demerbekken is er een daling van het risico in het laag scenario en een bescheiden stijging in het midden scenario. De daling in het lage scenario is te wijten aan de afname van het akkerland in het overstromingsgebied. Dit aandeel akkerland wordt grotendeels ingenomen door natuur, wat geen economische schade oplevert. Ook in het midden scenario gaat een groot stuk van het akkerland in het Demerbekken over in natuur, maar er is ook een deel dat transformeert naar bebouwing. Aangezien bebouwing sterker doorweegt in het totale risico dan akkerland, wordt het risico in dit scenario zelfs groter onder het RR-scenario dan bij het landgebruik van 2005. In het hoge scenario is er in het Demerbekken de sterkste stijging. Dit komt doordat er in het overstromingsgebied van het hoge scenario nog meer landbouwgrond in bebouwing overgaat.

Tabel 12: Overstromingsrisico voor Vlaanderen in 2100 volgens het landgebruik van 2005 en volgens het landgebruik onder het RR-scenario en de ratio van dat risico bij landgebruik onder het RR-scenario ten opzichte van het risico bij het landgebruik uit 2005 (en dit volgens de 3 klimaatscenario's)*

	actueel risico (bij huidige klimaat en huidig landgebruik) (10 ³ €/jaar)	risico in 2100 bij landgebruik gelijk aan 2005			risico in 2100 bij landgebruik volgens RR-scenario			risicoratio landgebruik RR / landgebruik 2005		
		Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag (%)	Midden (%)	Hoog (%)
Demer	2 552	418	1 549	5 423	361	1 618	5 969	86	104	110
Dender	11 424	7 017	9 784	14 001	6 990	9 797	14 639	100	100	105
Boven-Schelde	4 739	2 364	6 370	12 625	2 386	6 530	13 233	101	103	105
Beneden-schelde en zijrivieren	43 275	17 478	40 274	44 945	17 566	40 172	44 865	101	100	100
IJzer	1 565	445	994	2 102	530	1 265	3 466	119	127	165
Leie	3 675	1 624	2 892	10 397	3 232	5 254	13 848	199	182	133
Totaal	67 231	29 345	61 864	89 493	31 065	64 635	96 020	106	104	107

* Het effect van het wijzigende landgebruik is enkel in rekening gebracht bij de bepaling van het mogelijke economisch risico. Het effect van het wijzigende landgebruik op infiltratie en afvloeit van hemelwater kon niet verrekend worden.

In het IJzerbekken is er in alle 3 de scenario's een sterke stijging van het risico waar te nemen. Dit wordt verklaard door een toename van bebouwing en industriegebied ten nadele van weiland in het overstromingsgebied, wat uiteraard een hoger risico met zich mee brengt. Opvallend is ook de sterke stijging van het aandeel natuur in het overstromingsgebied (ook ten nadele van weiland), maar aangezien ook de oppervlakte bebouwing stijgt heeft dat geen daling van het risico tot gevolg.

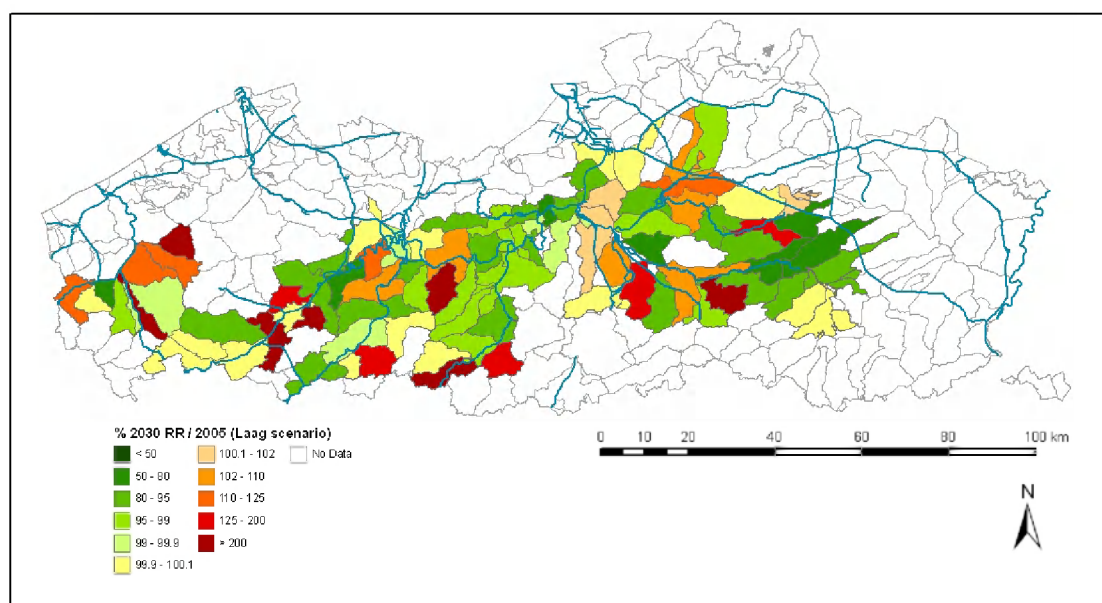
Ook het Leiebekken heeft in de 3 klimaatscenario's een sterke toename van het risico naar 2100 toe. Dit wordt in alle scenario's veroorzaakt door een zeer sterke stijging van het aandeel bebouwing ten nadele van het aandeel akkerland en weiland.

In de andere bekkens is er in de 3 scenario's telkens een status quo of een lichte stijging van het risico. Daar blijkt over het algemeen dat er wel een lichte toename is van de bebouwde

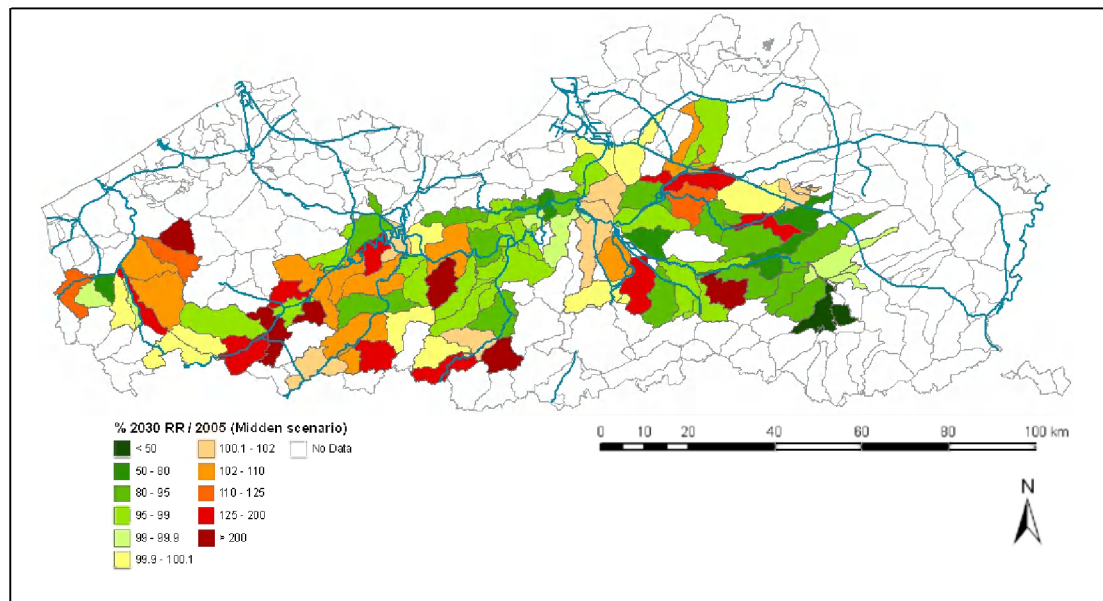
oppervlakte in de overstromingsgebieden (ten nadele van de oppervlakte landbouwgrond), maar dat dit minder is dan in de hierboven besproken bekkens. Bovendien wordt deze stijging ook gedeeltelijk geneutraliseerd doordat er ook een aandeel landbouwgrond overgaat in natuur (wat geen economisch risico oplevert).

Wanneer men de ratio's uit tabel 12 gaat opsplitsen en nog lokaler gaat bekijken per VHA-zone (figuren 42, 43 en 44) dan blijkt dat sommige VHA-zones een stijging van het risico hebben en andere een daling, maar op bekkenniveau compenseert zich dat dan telkens tot een lichte stijging. Het is ook zo dat zich op het niveau van de VHA-zones niet noodzakelijk dezelfde trend voordoet in elk klimaatscenario in een bepaalde VHA-zone. Dit kan bijvoorbeeld verklaard worden door een woonzone die zich in het midden klimaatscenario net niet en in het hoog klimaatscenario net wel in het overstromingsgebied bevindt.

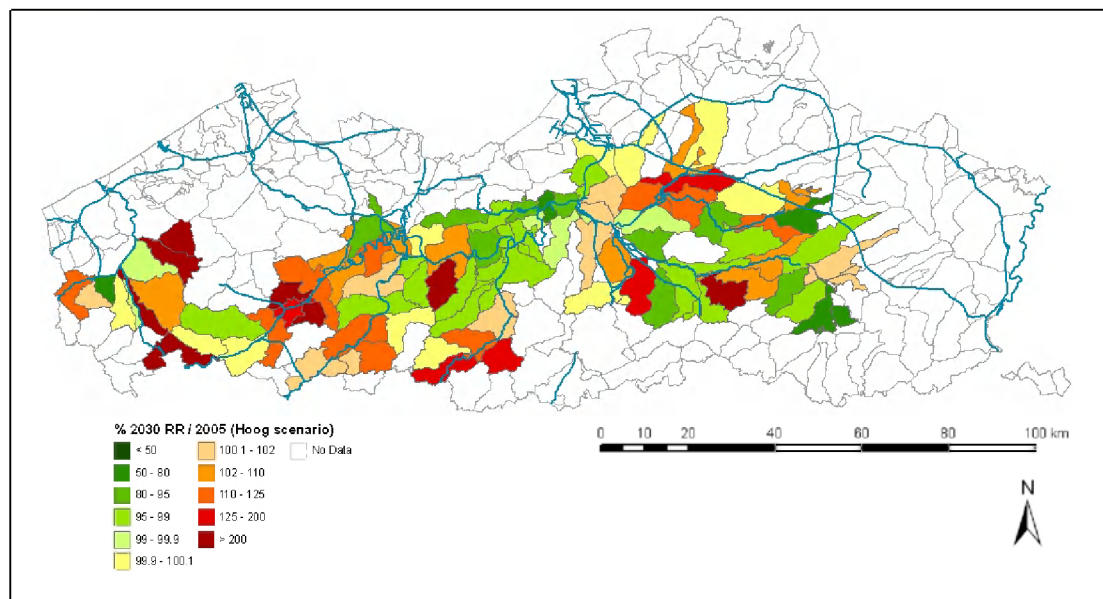
Figuur 42: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 onder het RR-landgebruikscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het laag klimaatscenario)



Figuur 43: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het RR-landgebruikscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het midden klimaatscenario)



Figuur 44: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het RR-landgebruikscenario (ratio 'risico RR / risico 2005' in het hoog klimaatscenario)



In tabel 13 is het overstromingsrisico weergegeven van de 3 klimaatscenario's, enerzijds volgens het landgebruik in 2005 en anderzijds volgens het landgebruik onder het ER-scenario (dit in tegenstelling tot tabel 12 waar het RR-scenario werd gebruikt). Hier is er in het lage en het midden scenario op het Vlaamse niveau quasi geen wijziging in het risico en in het hoge scenario is de stijging minimaal. Dit kan verklaard worden door het feit dat gemiddeld in Vlaanderen de toename van bebouwde zones in de overstromingsgebieden (van de bevaarbare waterlopen) in dit ruimtescenario beperkt blijft. En als er een kleine toename is, dan wordt dit in de overstromingsgebieden ook gecompenseerd door een toename van natuur (ten koste van landbouwgrond), wat dan weer een vermindering van het risico genereert.

Regionale uitschieters zijn hier opnieuw het IJzer- en Demer- en Leiebekken. In het Demerbekken is er zowel in het laag als het midden scenario een sterke daling van het risico waar te nemen naar 2100 toe. Dit is te verklaren door een daling van het akkerland en een daling van de bebouwing in de overstromingsgebieden. Net zoals in het RR-scenario wordt ook hier de verloren oppervlakte ingenomen door natuur. In het hoge scenario is de daling niet zo groot.

In het IJzerbekken is er in alle scenario's een stijging van het risico waar te nemen maar die is een stuk kleiner dan in het RR-scenario. Waar in het RR-scenario veel weiland overging in bebouwing en industrie is dit nu niet het geval. Het aandeel industrie blijft constant tussen 2005 en 2030 en het aandeel bebouwing daalt zelfs licht. Wel gaat er een groot stuk weiland over in akkerland (waar de overstromingsschade groter is), waardoor er dus een lichte toename van het risico blijft.

In het Leiebekken is er ook in alle scenario's een toename van het risico waar te nemen, maar deze stijging is kleiner dan in het RR scenario. Ook hier is de stijging te wijten aan een overgang van landbouwgrond naar bebouwing.

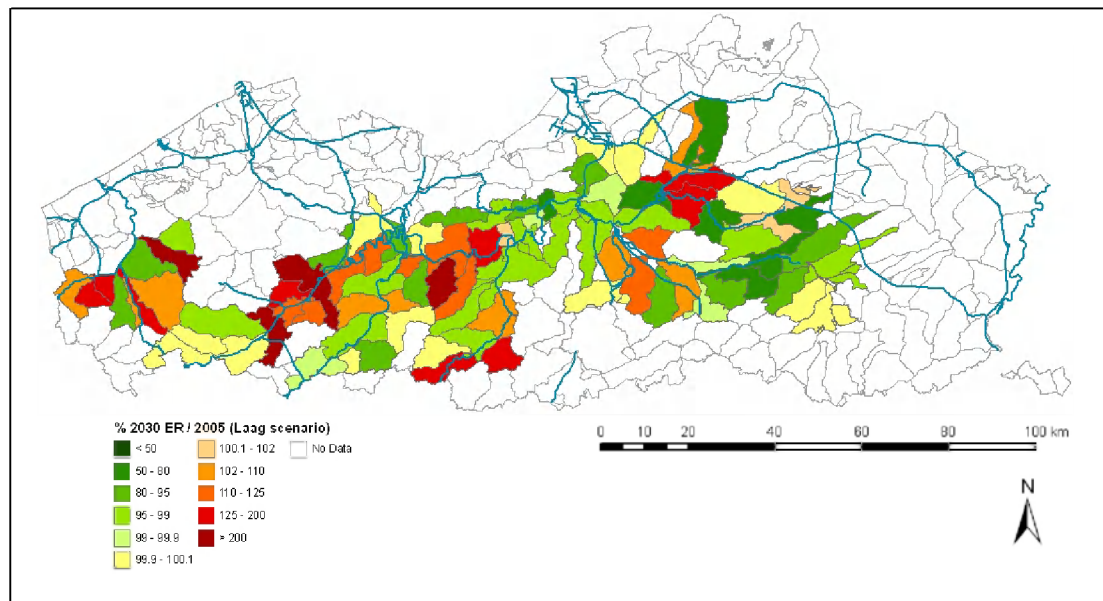
Tabel 13: Overstromingsrisico voor Vlaanderen in 2100 volgens het landgebruik van 2005 en het landgebruik onder het ER-scenario en de ratio van dat risico bij landgebruik onder het ER-scenario ten opzichte van het risico bij het landgebruik uit 2005 (en dit volgens de 3 klimaatscenario's)*

	actueel risico bij huidig klimaat en huidig landgebruik (10 ³ €/jaar)	risico in 2100 bij landgebruik gelijk aan 2005			risico in 2100 bij landgebruik volgens ER-scenario			risicoratio landgebruik ER / landgebruik 2005		
		Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag (%)	Midden (%)	Hoog (%)
Demer	2 552	418	1 549	5 423	307	1 346	5 201	73	87	96
Dender	11 424	7 017	9 784	14 001	6 893	9 689	14 686	98	99	105
Boven-Schelde	4 739	2 364	6 370	12 625	2 378	6 444	13 000	101	101	103
Beneden-Schelde en zijrivieren	43 275	17 478	40 274	44 945	17 440	39 913	44 716	100	99	99
IJzer	1 565	445	994	2 102	471	1 047	2 190	106	105	104
Leie	3 675	1 624	2 892	10 397	1 901	3 482	11 820	117	120	114
Totaal	67 231	29 345	61 864	89 493	29 390	61 921	91 615	100	100	102

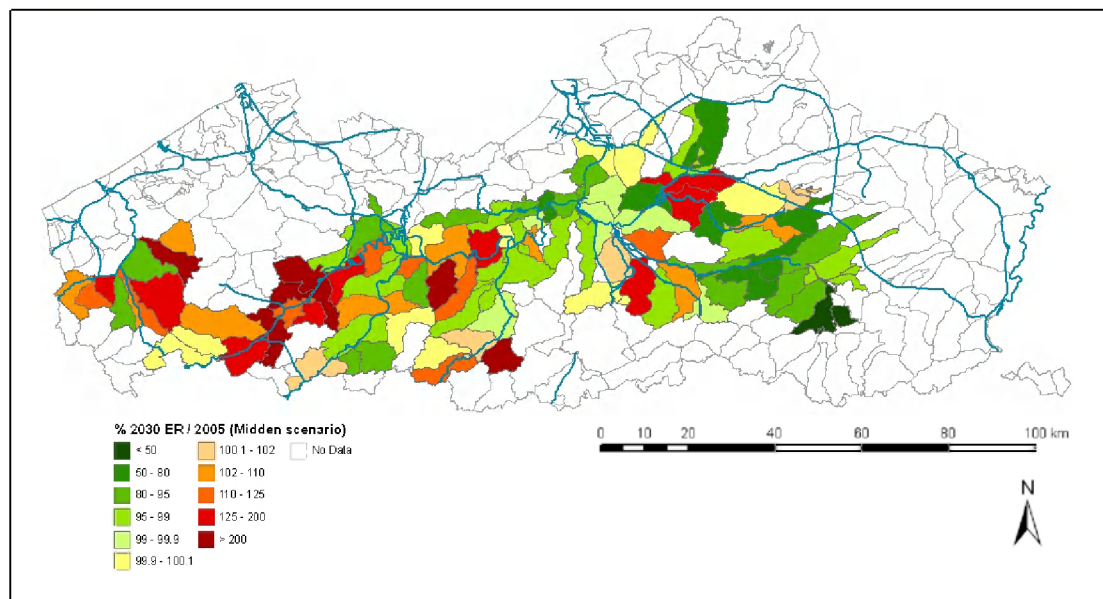
* Het effect van het wijzigende landgebruik is enkel in rekening gebracht bij de bepaling van het mogelijke economisch risico. Het effect van het wijzigende landgebruik op infiltratie en afvloeit van hemelwater kon niet verrekend worden.

In de andere bekkens schommelt de evolutie van het risico in alle scenario's tussen lichte stijging en een lichte daling, wat telkens te verklaren is door een lichte toe- of afname van de bebouwing. Wel zijn er ook hier op lokaal niveau grotere verschillen te vinden (figuren 45, 46 en 47) maar op bekkenniveau wordt dit telkens uitgemiddeld.

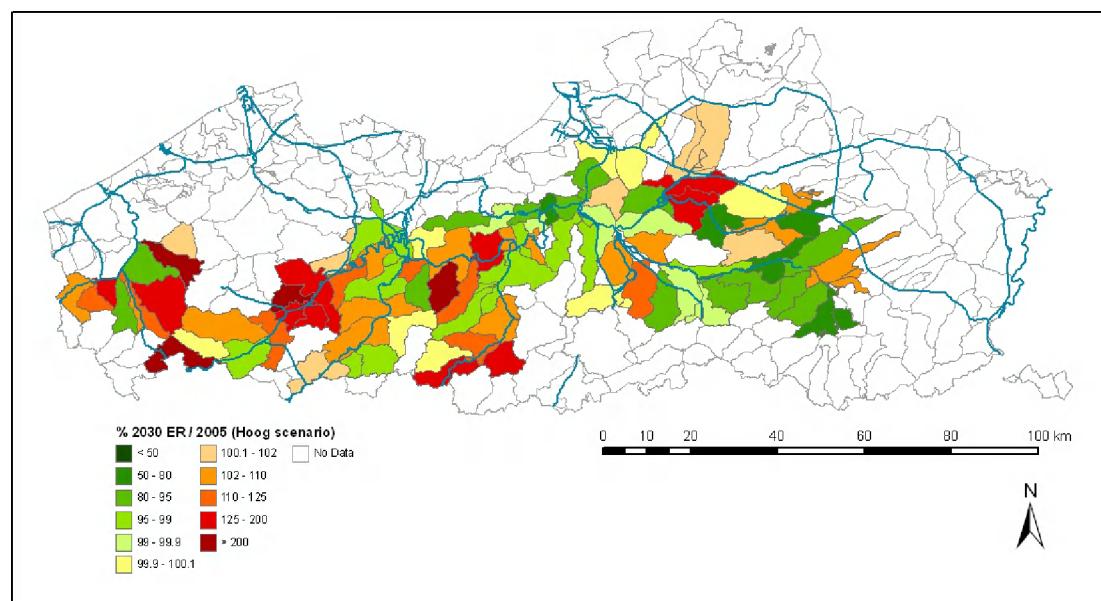
Figuur 45: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruikscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het laag klimaatscenario)



Figuur 46: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruikscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het midden klimaatscenario)



Figuur 47: Evolutie van het overstromingsrisico tegen 2100 in het ER-landgebruikscenario (ratio 'risico ER / risico 2005' in het hoog klimaatscenario)



In tabel 14 is het overstromingsrisico in 2100 per bekken opgelijst volgens de 2 landgebruikscenario's. Vervolgens is een ratio gemaakt tussen het RR-scenario en het ER-scenario. Daaruit blijkt dat er op Vlaams niveau voor alle klimaatscenario's meer overstromingsrisico is in het RR-scenario dan het ER-scenario. Dit is te wijten aan het feit dat er zich gemiddeld in Vlaanderen volgens het RR-scenario meer bebouwde zones in de overstromingsgebieden bevinden dan in het ER-scenario (Gobin et al., 2009a).

Tabel 14: Vergelijking van het overstromingsrisico tegen 2100 voor Vlaanderen tussen het RR-landgebruikscenario en het ER-landgebruikscenario (voor de verschillende klimaatscenario's)

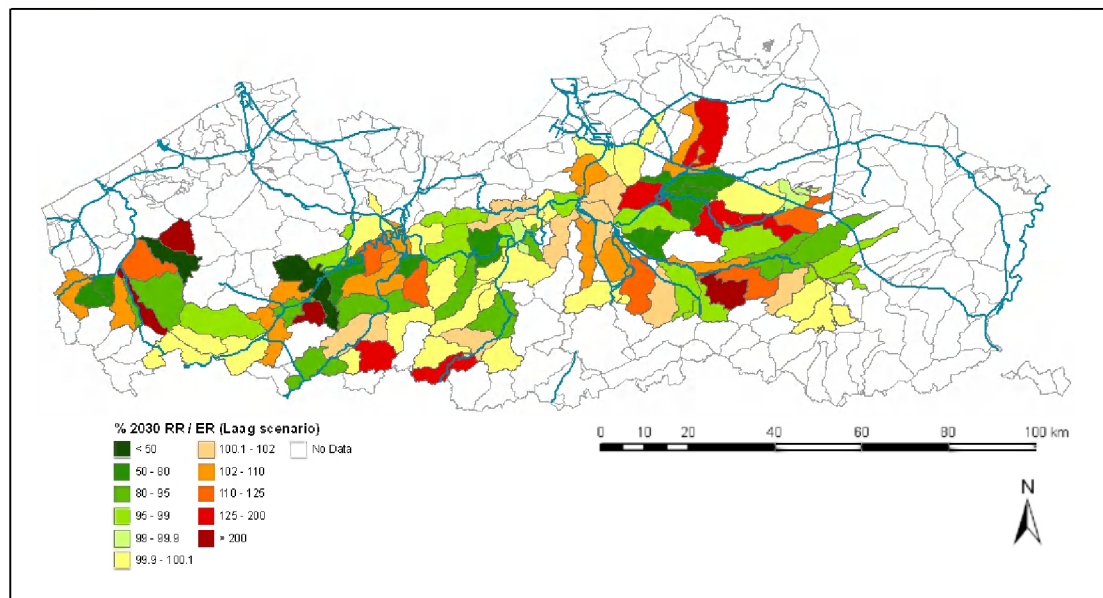
	risico 2100 (landgebruik volgens RR-scenario)			risico 2100 (landgebruik volgens ER-scenario)			Ratio RR/ER (%)		
	Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag (10 ³ €/jaar)	Midden (10 ³ €/jaar)	Hoog (10 ³ €/jaar)	Laag	Midden	Hoog
Demer	361	1 618	5 969	307	1 346	5 201	118	120	115
Dender	6 990	9 797	14 639	6 893	9 689	14 686	101	101	100
Boven-Schelde	2 386	6 530	13 233	2 378	6 444	13 000	100	101	102
Beneden-Schelde en zijrivieren	17 566	40 172	44 865	17 440	39 913	44 716	101	101	100
IJzer	530	1 265	3 466	471	1 047	2 190	112	121	158
Leie	3 232	5 254	13 848	1901	3 482	11 820	170	151	117
Totaal	31 065	64 635	96 020	29 390	61 921	91 615	106	104	105

Het effect van het wijzigende landgebruik is enkel in rekening gebracht bij de bepaling van het mogelijke economisch risico. Het effect van het wijzigende landgebruik op infiltratie en afvloeit van hemelwater kon niet verrekend worden.

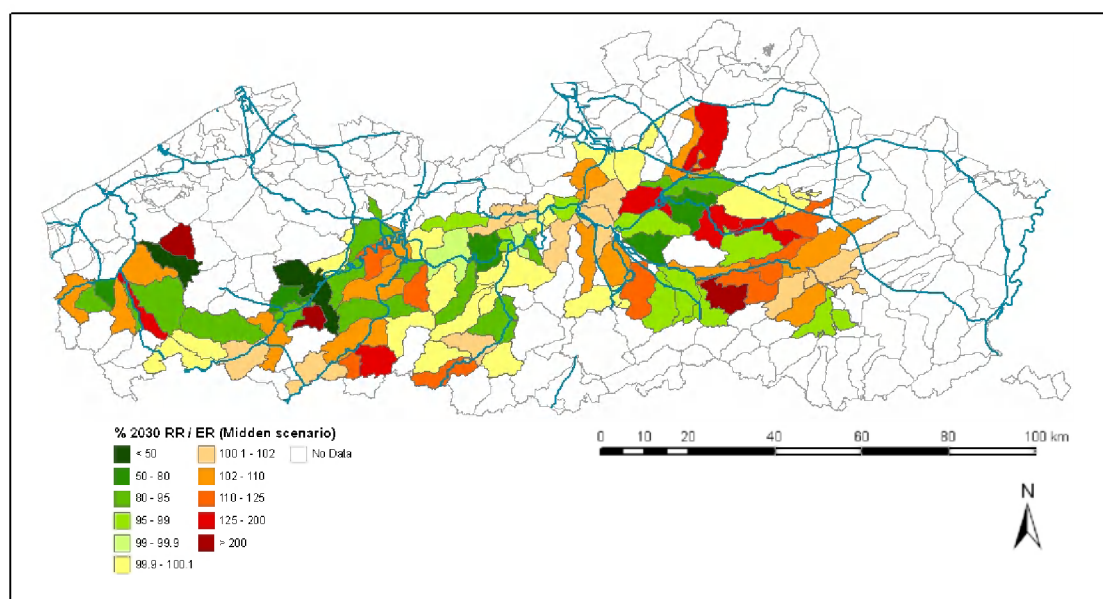
Op bekkenniveau vallen logischerwijze vooral het Demer- en IJzer- en Leiebekken opnieuw als uitschieters op. In alle klimaatscenario's hebben deze bekkens een veel groter risico in het RR-scenario. Dit wordt verklaard door het feit dat in het RR-scenario het aandeel bebouwing of industrie een stuk groter is in de overstromingsgebieden dan in het ER-scenario. De bijkomende maatregelen met betrekking tot de ruimtelijke ordening in het ER-scenario hebben in deze bekkens dus een lager risico tot gevolg. Voor het Leiebekken komen deze cijfers ook terug in Gobin et al. (2009a). Daar worden de arrondissementen Tielt en Gent namelijk geïdentificeerd als diegene met de sterkste aangroei versteende ruimte in het RR-scenario in vergelijking met het ER-scenario.

In de andere bekkens is het verschil tussen het RR- en het ER-scenario zeer klein. De grote veranderingen in landgebruik tussen het ER- en het RR-scenario zullen zich daar dan vooral buiten de overstromingsgebieden van de bevaarbare waterlopen voordoen. Op lokaal niveau zijn er wel verschillen te zien (figuren 48, 49 en 50). De ene VHA-zone heeft in het ene landgebruikscenario een klein beetje meer risico, de andere in het andere landgebruikscenario. Maar over een volledig bekken worden die waarden dan uitgemiddeld.

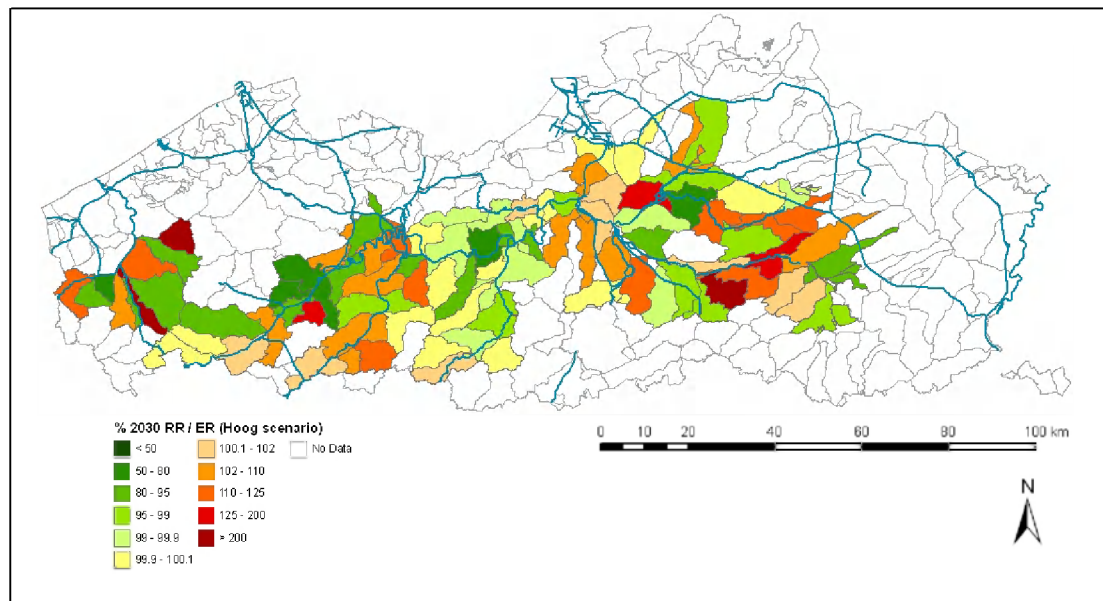
Figuur 48: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het laag klimaatscenario)



Figuur 49: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het midden klimaatscenario)



Figuur 50: Ratio 'risico in 2100 volgens het RR-landgebruikscenario gedeeld door risico in 2100 volgens het ER-landgebruikscenario' (in het hoog klimaatscenario)



Tabel 15 zet de gegevens uit tabellen 10, 12 en 13 samen om te achterhalen of de combinatie van zowel veranderingen in landgebruik als klimaat voor een verslechtering (rode achtergrond) dan wel een verbetering (groene achtergrond) zorgen ten opzichte van het huidige overstromingsrisico in Vlaanderen. Uit deze tabel blijkt duidelijk dat:

- in het midden en vooral het laag klimaatscenario het overstromingsrisico naar 2100 afneemt, en dit zowel bij het huidige landgebruik als het landgebruik³ onder het RR-scenario en het ER-scenario.
- er over Vlaanderen beschouwd nauwelijks verschil is inzake overstromingsrisico tussen ER en het huidige landgebruik.
- het RR-landgebruiksscenario in combinatie met het hoge klimaatscenario de meest ongunstige combinatie vormt naar overstromingsrisico toe.

³ De landgebruikscenario's RR en ER hebben slechts wijzigingen in landgebruik tot 2030 doorgerekend. Tussen 2030 en 2100 is het landgebruik constant verondersteld.

Tabel 15: Overstromingsrisico in Vlaanderen bij een laag, midden en hoog klimaatscenario in 2100 vergeleken met het actuele overstromingsrisico, en dit bij verschillende invulling van het landgebruik (landgebruik zoals in 2005, landgebruik RR-scenario, landgebruik ER-scenario)*

(risico in 10 ³ €/jaar)	actueel risico bij huidig klimaat en huidig landgebruik huidig klimaat	risico in 2100 bij landgebruik gelijk aan 2005			risico in 2100 bij landgebruik volgens RR-scenario			risico in 2100 bij landgebruik volgens ER-scenario		
		laag	midden	hoog	laag	midden	hoog	laag	midden	hoog
Demer	2 552	418	1 549	5 423	361	1 618	5 969	307	1 346	5 201
Dender	11 424	7 017	9 784	14 001	6 990	9 797	14 639	6 893	9 689	14 686
Boven-Schelde	4 739	2 364	6 370	12 625	2 386	6 530	13 233	2 378	6 444	13 000
Beneden-Schelde en zijrivieren IJzer	43 275	17 478	40 274	44 945	17 566	40 172	44 865	17 440	39 913	44 716
Leie	1 565	445	994	2 102	530	1 265	3 466	471	1 047	2 190
Totaal	3 675	1 624	2 892	10 397	3 232	5 254	13 848	1901	3 482	11 820
	67 231	29 345	61 864	89 493	31 065	64 635	96 020	29 390	61 921	91 615
(ratio in %)		ratio t.o.v. actuele situatie in 2005			ratio t.o.v. actuele situatie in 2005			ratio t.o.v. actuele situatie in 2005		
Demer	100	16	61	213	14	63	234	12	53	204
Dender	100	61	86	123	61	86	128	60	85	129
Bovenschede	100	50	134	266	50	138	279	50	136	274
Benedenschede en zijrivieren IJzer	100	40	93	104	41	93	104	40	92	103
Leie	100	28	64	134	34	81	221	30	67	140
Totaal	100	44	79	283	88	143	377	52	95	322
		44	92	133	46	96	143	44	92	136

Het effect van het wijzigende landgebruik is enkel in rekening gebracht bij de bepaling van het mogelijke economisch risico. Het effect van het wijzigende landgebruik op infiltratie en afvloe van hemelwater kon niet verrekend worden.

Bij het RR-landgebruiksscenario stijgt onder de drie klimaatscenario's op het Vlaamse niveau het risico licht ten opzichte van scenario's met het huidige landgebruik: van 44 naar 46 bij het laag (droog) klimaatscenario, van 92 naar 96 bij het midden scenario en van 133 naar 143 bij het hoog (nat) scenario. Dit is een rechtstreeks gevolg van het feit dat er onder het REF-landgebruiksscenario een groter areaal bebouwde oppervlakte (zowel bewoning als bedrijventerreinen) zal zijn in de overstromingsgebieden. Vooral in het IJzer- en Leiebekken is er bij alle klimaatscenario's tegen 2100 een sterke stijging van het risico. Oorzaak daarvan is een toename van bebouwing en industrie in overstromingsgebied, ten nadele van landbouwgebied (akker- en weiland). In het Demerbekken is onder het droog klimaatscenario nog sprake van een daling van het risico. Dit is te wijten aan de afname van het akkerland in het overstromingsgebied ten voordele van natuurgebied. Bij het gematigd en vooral het nat klimaatscenario neemt het overstromingsrisico hier wel toe bij wijzigend landgebruik, door de omzetting van akkerland in bebouwing. In de andere bekkens is er in de drie scenario's telkens een status quo of een lichte stijging van het risico. De toename van de bebouwde oppervlakte in de overstromingsgebieden ten nadele van landbouwgrond is daar minder nadrukkelijk dan in de eerder aangehaalde bekkens. Bovendien gaat er ook een deel landbouwgrond over in natuur, waardoor het economische risico daalt.

Wanneer het landgebruik evolueert volgens het ER-scenario, blijkt het overstromingsrisico bij de drie klimaatscenario's ten opzichte van het huidige landgebruik nauwelijks te wijzigen. De toename van bebouwde zones in de overstromingsgebieden blijft in dit landgebruiksscenario immers beperkt. En waar er toch een kleine toename in bebouwing is, wordt dit gecompenseerd door een toename van natuur ten koste van landbouwgrond in de overstromingsgebieden. Regionale uitschieters zijn hier opnieuw het Demer-, IJzer- en

Leiebekken. In het Demerbekken is er zowel in het droog als in het gematigde scenario een sterke daling van het risico te bemerken tegen 2100. Reden daarvoor is een afname van het akkerland en van de bebouwing in de overstromingsgebieden ten voordele van natuur. In het IJzerbekken is er opnieuw in alle klimaatscenario's een stijging van het risico ten opzichte van het risico bij het huidige landgebruik, maar de stijging is er een stuk kleiner dan in het RR-scenario. Waar in het RR-scenario veel weiland overging in bebouwing en industrie, is dit nu niet het geval. Het aandeel industrie blijft constant en het aandeel bebouwing daalt zelfs licht. Wel gaat er heel wat weiland over in akkerland, waardoor er dus een lichte toename van het risico blijft bestaan. Ook in het Leiebekken neemt in alle scenario's het risico toe door de omzetting van landbouwgrond in bebouwing.

Nieuw: overstromingsrisicobeheerplannen

De Europese Overstromingsrichtlijn van 2007 verplicht de lidstaten onder meer om tegen eind 2015 overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP) op te stellen. Die ORBP's bevatten maatregelen om potentiële negatieve gevolgen van overstromingen voor de gezondheid van de mens, het milieu, het culturele erfgoed en de economische activiteiten te verminderen.

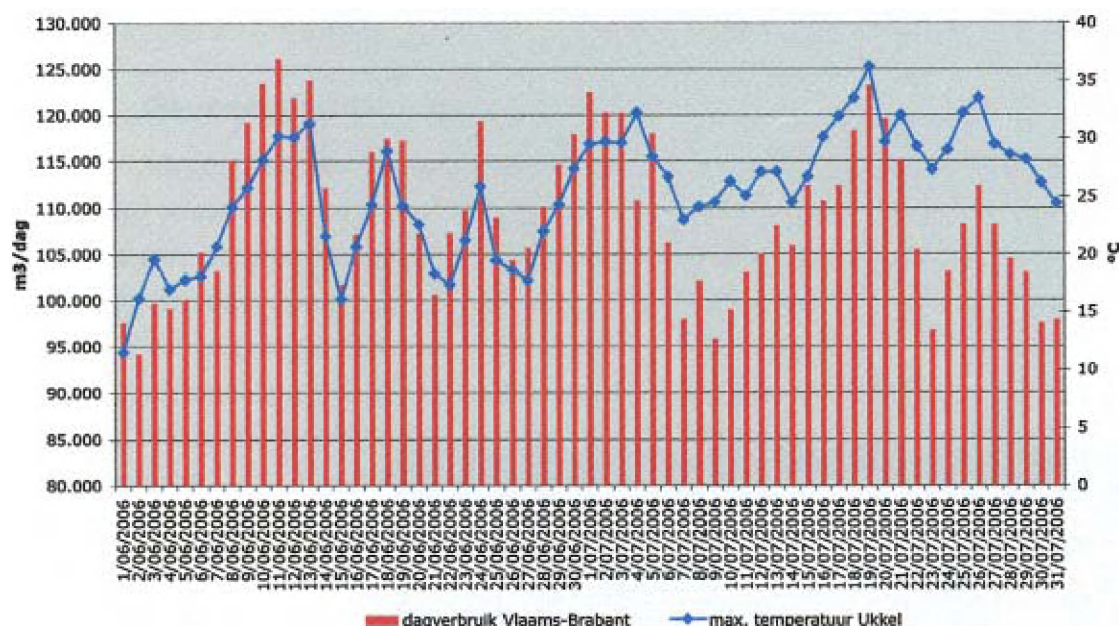
De ORBP's bevatten heel wat nieuwe elementen ten opzichte van de klassieke aanpak van overstromingsrisico's. Zo zal er bepaald worden welke overstromingsrisico's de waterbeheerder nog moet beschermen. Op plaatsen waar te vaak overstromingen plaatsvinden, zullen de risico's beheerd moeten worden met instrumenten uit de ruimtelijke ordening (bijvoorbeeld door gebouwen te verplaatsen). Bij te extreme overstromingen moeten het private verzekeringsstelsel en het Rampenfonds het risico dragen. In de ORBP's zal de analyse van de overstromingskansen voortaan enkel nog gebaseerd zijn op klimaat- en landgebruiksscenario's voor de komende decennia, en dus niet meer op de neerslagstatistiek van de voorbije decennia.

De elf Vlaamse bekkens krijgen elk een ORBP. Dit planproces is gestart in het voorjaar van 2009 en zal vier jaar lopen. Tegen september 2011 zullen alle risicoanalyses afgerond zijn en wordt een brede waaier aan mogelijke maatregelensets gepresenteerd. Daaruit zullen de optimale sets geselecteerd worden via een breed maatschappelijk overleg, dat samen zal lopen met het overleg over de opmaak van de nieuwe bekkenbeheerplannen. Die selectie zal gebeuren op basis van een analyse van de kosten en de baten. Ook de spreiding van de kosten en de baten over de betrokken actoren (waterbeheerders, ruimtelijke ordening en verzekeringen) zal meespelen.

4.4.2 Schade door watertekort

Naast de schade door wateroverlast is het belangrijk oog te hebben voor de schade door watertekort. In elk klimaatscenario voor Vlaanderen stijgt de kans op droge periodes en worden deze periodes extremer. Vooral de evolutie naar drogere en warmere zomers zal, samen met veranderingen in de neerslagintensiteit, een negatieve invloed hebben op de kwaliteit en de beschikbaarheid van grond- en oppervlaktewater, en dus ook op de leveringszekerheid van drinkwater. De klimaatverandering heeft niet alleen invloed op het aanbod, maar ook op de vraag naar drinkwater: in periodes van grote droogte zullen de piekverbruiken toenemen. Uit analyse in Vlaanderen blijkt immers dat pieken in de gemeten maximumtemperatuur samenvallen met pieken in het dagverbruik aan drinkwater (figuur 51; Peeters & Tops, 2009).

Figuur 51: Vergelijking verloop verbruik leidingwater (Vlaams-Brabant) en dagelijkse maximumtemperatuur (Ukkel) (juni & juli 2006)



Bron: Peeters & Tops (2009)

De schade in droge periodes zal – net als voor overstromingen – afhangen van het aanpassingsvermogen van individuele bedrijven en landbouwers. Ook is van belang welke prioriteit het gemeenschappelijke belang geeft aan de watercaptatie door de verschillende betrokkenen (scheepvaart, landbouw, natuur, energievoorziening, drinkwater ...). In tegenstelling tot wateroverlast is de ruimtelijke afbakening van de schade door droogte veel moeilijker en is de duur van het tekort sterk bepalend. Bovendien worden in Vlaanderen nog niet systematisch cijfers bijgehouden over onderbrekingen in de watervoorziening.

4.4.3 Impact op de Vlaamse landbouw

Voor plantaardige productie leiden temperatuurstijgingen vanaf 2 °C met het actuele grondgebruik tot een daling van de mogelijke opbrengst en leiden neerslagtekorten tot gereduceerde gewasgroei, terwijl verhoogde CO₂-concentraties een positieve invloed hebben tot op een zekere hoogte. De mate waarin die effecten elkaar opheffen varieert naargelang de gewassen. Scenariore resultaten voor Vlaanderen tonen dat de klimaatverandering voor het merendeel van de gewassen leidt tot oogstverliezen, waarbij de impact groter is naarmate het scenario sterker is. In alle drie de scenario's treden oogstverliezen op in vergelijking met de berekeningen voor de historische klimaatgegevens, met uitzondering van winter- en voorjaarteelten (Gobin et al., 2009b).

Voor dierlijke productie leiden overschrijdingen van de kritische gevoelstemperatuur tot hittestress en als gevolg daarvan een afname in voederopname waardoor een vermindering van de productie optreedt. De impact van de klimaatverandering op de dierlijke productie werd gekwantificeerd aan de hand van een threshold-model op basis van dagelijkse gemiddelde en maximale temperatuur. Productieverliezen bij kippen, runderen, schapen en varkens werden berekend voor de gemiddelde en maximale temperaturen voor het scenario met de hoogst verwachte temperatuurstijging, waarbij als hoge kritische droge luchttemperatuur 30°C werd genomen. Scenariodoorrekeningen geven productieverliezen tot 9 % voor schapen, 8 % voor runderen, 6 % voor varkens en 3 % voor pluimvee aan (Gobin et al., 2009b).

Op basis van de berekende productieresultaten en aangevuld met bevindingen uit de literatuur werden 22 adaptatiemaatregelen naar voor geschoven. Voor elke maatregel werd

een informatiefiche met een korte omschrijving, de betrokken subsector en actoren, de termijn van implementatie, mate van toepassing en de milieueffecten samengesteld. De impact van klimaatverandering zoals die berekend werd voor het microniveau, werd geaggregeerd en opgeschaald tot het niveau Vlaanderen. De resultaten van de opschalingsmethode geven aan dat de technische productiviteit van vooral de zomergewassen negatief beïnvloed wordt door de klimaatveranderingen, in het bijzonder voor het hoge klimaatscenario. De resultaten geven weer wat de adaptatiemaatregelen mogen kosten om tot een acceptabele efficiëntie te komen. Voor Vlaanderen dienen zich opportuniteiten aan met betrekking tot adaptatie van de landbouw aan klimaatverandering, bv. nieuwe teeltwisselingen (Gobin et al., 2009b).

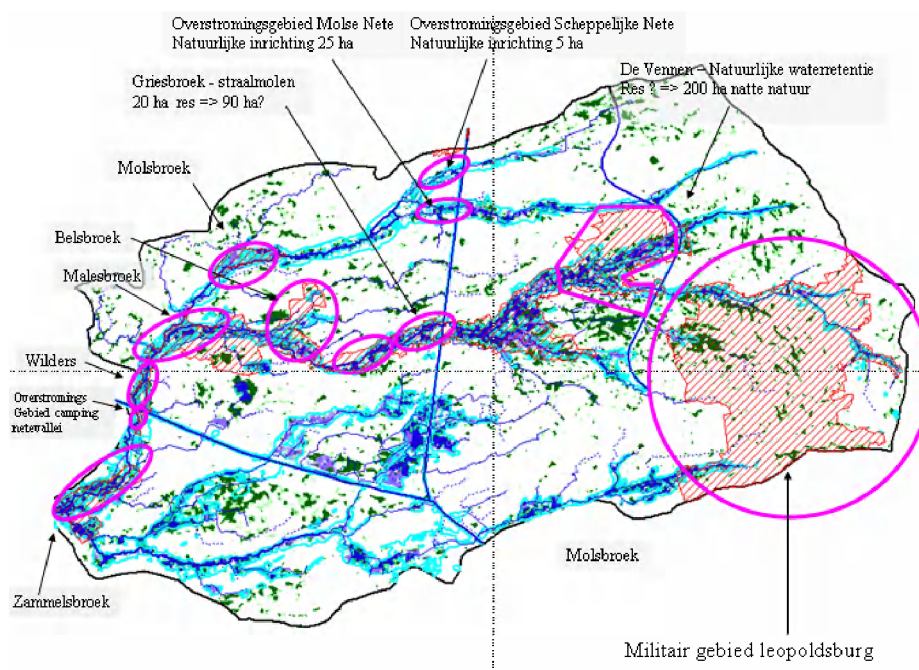
4.4.4 Impact op ecosystemen

In de projecten ADAPT en SUDEM-CLI worden de gevolgen van de klimaatverandering op ecosystemen onderzocht, en dan vooral de effecten van wijzigende overstromings- en waterkwaliteitscondities. Er werd een methode ontwikkeld door de ECOBE-onderzoeksgroep van de Universiteit van Antwerpen, maar concrete resultaten zijn bij het schrijven van dit document nog niet beschikbaar.

Bedoeling is om na te gaan welke invloed de wijzigende overstromings- en waterkwaliteitscondities hebben op habitats langs rivieren en in overstromingsgebieden. De ecologische kwetsbaarheid wordt geanalyseerd via het verband met de overstromingsfrequentie, de overstromingsdiepte, de overstromingsduur, het seizoen waarin de overstroming zich voordoet, en de kwaliteit van het overstromende water. Op basis van wijzigingen aan deze hydrodynamische en fysico-chemische waterkwaliteitsvariabelen worden wijzigingen aan de ecologische kwetsbaarheid berekend, en in een tweede stap vertaald naar veranderingen aan de biologische waarderingskaart. De ecologische impact zal worden geanalyseerd voor het opwaartse gedeelte van het Denderbekken (project ADAPT) en het stroomgebied van Grote Nete en Grote Laak (project SUDEM-CLI) (Staes et al., 2009).

Naast de invloed van klimaatverandering zal voor deze gevalstudies ook de invloed van waterbeheersmaatregelen worden onderzocht. Het kan hier gaan om adaptieve maatregelen tegen klimaatverandering, maar in eerste instantie wordt de invloed nagegaan van huidig geplande maatregelen (voorbeeld voor Grote Nete in figuur 52).

Figuur 52: Lopende initiatieven voor waterbeheer en natuurontwikkeling in het stroomgebied van de Grote Nete



Bron: Staes et al. (2009), project SUDEM-CLI

4.5 Impact van klimaatverandering op de kustzone

4.5.1 Invloed op het overstromingsgevaar aan de kust

Langs de kust worden de overstromingsrisico's beïnvloed door de zeespiegelstijging en de verandering in wind met bijhorend golfklimaat (zie § 4.1.3).

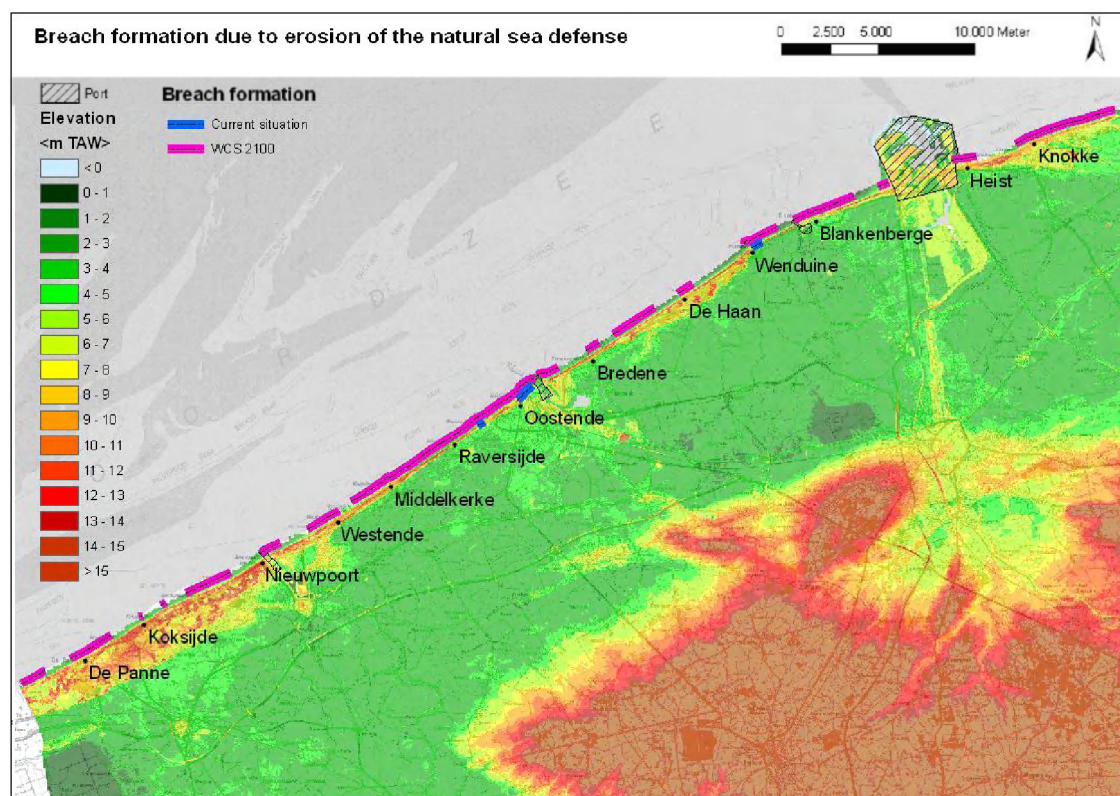
Het meest pessimistische scenario voor 2100 in het CLIMAR-project gaat uit van 2 m zeespiegelstijging en 8 % toename in de windsnelheid. Deze waarden zijn vergelijkbaar met wat de Deltacommissie in Nederland vooropstelt als bovengrensscenario: 2 tot 4 m zeespiegelstijging tot 2200 (Deltacommissie, 2008), al gaan zij er van uit dat de windsnelheid nagenoeg niet zal wijzigen. De golfbelasting op kust en zeewering neemt in eender welk scenario beduidend toe (door toenemende waterdiepte ten gevolge van de zeespiegelstijging). De extreme golven op diep water veranderen wellicht weinig, maar verder wetenschappelijk onderzoek hierover wordt uitgevoerd. Doordat hoogwaters sneller en laagwaters trager stijgen dan de gemiddelde zeespiegel neemt verder de getijslag toe. De toegenomen golfbelasting en getijslag zorgen voor een toename van de erosie van strand en duinen, en van de bijhorende frequentie op bresvorming (dijk- of duindoorkraak). Figuur 53 geeft aan dat, bij een storm die zich gemiddeld 1 keer op de 17 000 jaar voordoet, voor het huidige klimaat enkel bresvorming te verwachten is in Wenduine, Oostende en Mariakerke. Bij deze berekening zijn de kusthavens, die ook gevoelig zijn voor overstroming, niet in rekening gebracht. Bij het toekomstig klimaat tegen 2100 en het meest pessimistische scenario doet de bresvorming zich op een zeer groot aantal kuststroken voor. Bij deze berekeningen wordt voor een storm die zich eens om de 17 000 jaar voordoet in Oostende een actuele waterstand van 8 m TAW verondersteld (ter vergelijking: deze van de extreme storm van 1953 was 6,66 m TAW). Onder invloed van klimaatwijzigingen (meest pessimistische scenario) stijgt de waterstand bij een storm die zich eens om de 17 000 jaar zou voordoen er dan naar 10,5 m TAW⁴ tegen 2100.

⁴ De 10,5m wordt als volgt verklaard: 8m TAW (de waterhoogte van de meest extreme maar toch nog realistische superstorm, wat overeen komt met een terugkeerperiode van 17 000 jaar) + 2 m zeespiegelstijging (tegen 2100 in het worst case scenario klimaatwijziging) + 0,4 meter extra stormopzethoogte (bij een superstorm in

In het huidige kustbeheer wordt gewerkt met een toetsing waarbij de zeewering bestand moet zijn om bij een 1 000-jarige storm geen noemenswaardige schade te veroorzaken en wordt de kans op bresvorming verder beperkt. De terugkeerperioden gebruikt voor een overstroming langsheen de kust zijn meestal vele malen groter dan deze gebruikt voor niet-tijgebonden waterlopen; de gevolgen als het fout gaat zijn dan ook vele malen groter.

Momenteel is een masterplan voor de gehele Vlaamse kust in opmaak (Mertens et al., 2008). De eerste fase hiervan moet afgerond zijn tegen eind 2010, waarna de opmaak van de project MER's van start kan gaan. Aan de hand van een veiligheidstoetsing wordt voor de actuele situatie en voor 2050 (zeespiegelstijging) bepaald welke delen van de kust voldoen. Anderzijds wordt ook een risicoberekening uitgevoerd als beste schatting voor verschillende waterstanden en stormen met hun terugkeerperiode nu en in 2050. Uit deze twee benaderingen komen dan alle zwakke zones naar voor waarvoor maatregelen worden uitgewerkt. Niet enkel worden de economische kosten en baten van de maatregelen begroot en afgewogen, maar in een MER worden ook de andere effecten en wenselijkheid van de verschillende maatregelen begroot, o.a. rekening houdend met de perceptie van de stakeholders. Het geheel van potentiële maatregelen moet leiden tot een masterplan om onze kust op een aanvaardbare manier te beschermen tot 2050. Hierbij wordt gekozen voor maatregelen die in ieder potentieel klimaatscenario nuttig zijn en die kunnen meegroeien om ook na 2050 een aanvaardbaar veiligheidsniveau te kunnen handhaven.

Figuur 53: Locatie van bresvorming door erosie van strand en duinen voor een gemiddelde herhalingstijd van 1 keer op de 17 000 jaar vergeleken bij het huidige zeeklimaat en bij een worst case scenario tegen 2100



blauwe stroken : bresvorming bij het huidige zeeklimaat

roze stroken: bresvorming bij een worst case scenario van 2 m zeespiegelstijging en 8 % toename van de windsnelheid

Bron: Van den Eynde et al. (2008b)

het worst case scenario klimaatwijziging) = 10,4 meter TAW (afgerond 10,5 meter TAW). Meer info zie Van der Biest et al. (2009).

4.5.2 Invloed op het overstromingsgevaar langs de Schelde

Hogere waterstanden langs de kust vertalen zich ook naar hogere overstromingskansen langs de Schelde. In het huidige klimaat doen overstromingen zich tussen Vlissingen en Gent gemiddeld eens om de 70 jaar voor, wat overeen komt met een maatgevende hoogwaterstand in Antwerpen van +7,83 m TAW. Na realisatie van het gecontroleerd overstromingsgebied van Kruibeke-Bazel-Rupelmonde daalt deze kans tot 1 keer op de 350 jaar, wat overeen komt met een maatgevende hoogwaterstand in Antwerpen van +8,24 m TAW. Bij een middenscenario⁵ van 60 cm zeespiegelstijging tegen 2100 en geen verdere maatregelen zou de overstromingskans opnieuw stijgen tot de huidige kans van 1 keer op de 70 jaar tegen 2050 en zelfs 1 keer op de 25 jaar tegen 2100 (Meyvis et al., 2003). Verder is er nog de gecombineerde invloed van de zeespiegelstijging en de verhoogde opwaartse bovendebieten, die in het Zeescheldebied tussen Gent en Antwerpen een belangrijke rol kunnen spelen. Deze gecombineerde invloeden zijn nog niet in detail met modellen gesimuleerd. Het WL voerde eerder wel een studie uit, waaruit blijkt dat de correlatie tussen het voorkomen van hoge wasdebieten op Leie en Bovenschelde enerzijds en stormtij anderzijds zeer zwak is.

Dit alles onderstreept het belang van het realiseren van het volledig geactualiseerde Sigmaphan. Dit geactualiseerde Sigmaphan werd op 22 juli 2005 door de Vlaamse Regering goedgekeurd, ter beheersing van overstromingsrisico's en het behalen van de natuurdoelstellingen in het Zeescheldebekken. Het is momenteel in uitvoering, en bestaat uit gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's) aangelegd voor veiligheid en diverse types natuurgebieden (1 650 ha in 2030), in combinatie met dijkverhogingen in steden en industriegebieden.

4.5.3 Invloed op het marien biologisch leven

Klimaatverandering zal directe en indirecte invloed hebben op mariene planten en dieren en de volledige voedselketen beïnvloeden. Zo zal bijvoorbeeld een wijziging in gemiddelde en extreme temperatuur een invloed hebben op processen zoals respiratie, fotosynthese, metabolismesnelheden, groei, voortplanting ... maar ook op de distributie van soorten. Klimaatverandering zal leiden tot een verschuiving in soorten en een toename van invasieve en exotische soorten in de Noordzee. Om de complexe invloed van klimaatverandering op het marien biologisch leven te begrijpen, is een inzicht in de complexe structuur van de voedselketen vereist. Op dit moment is de invloed op het marien biologisch leven een nog lopende onderzoeksuitdaging, maar kan wel al aangegeven worden dat er duidelijke aanwijzingen zijn van ingrijpende veranderingen in de mariene voedselketen.

Het wijzigende klimaat grijpt in op de fytoplanktonproductie. Zo zullen de wijzigende CO₂-concentraties leiden tot een versnelling van de fotosynthese van de primaire productie. Warmere oppervlakkige waterlagen daarentegen kunnen dan weer leiden tot een afname in beschikbare nutriënten en tot een daling van de dynamiek van het fytoplankton (Schubert et al., 2006). Omdat de primaire productie uiteindelijk voedsel is voor de volledige voedselketen, is er via de primaire productie een duidelijk effect op hogere trofische niveaus die een verandering in biomassa zullen kennen en een veranderende samenstelling van het gehele ecosysteem (Ponsar et al., 2008). Zo toonde recent onderzoek voor de Noordzee aan dat de verandering van het fytoplankton een direct effect had op zandspieringpopulaties met een indirect gevolg op de broedkans voor vele zeevogels (Frederiksen et al., 2008).

Onderzoek naar de invloed van een temperatuurstijging op het voorkomen van schadelijke algenbloei, heeft aangetoond dat een stijging van 4°C tegen 2100 zal leiden tot een verdubbeling van potentieel schadelijke algenbloei (Peperzak, 2003). Deze vermeerdering van giftige stoffen kan leiden tot massale sterfte van mariene organismen maar kan ook een effect hebben op de menselijke gezondheid.

⁵ Voor zover bekend heeft geen van de bestaande onderzoeksprojecten extremere scenario's voor onze kust doorgerekend.

Benthische soorten en gemeenschappen zijn gevoelig voor afwijkende oceanografische omstandigheden. Klimaatgerelateerde veranderingen van deze omstandigheden, bv. stijgende temperatuur, veranderende hydrodynamica, wijzigende neerslagpatronen en toenemende verzuring, kunnen bijgevolg de soortensamenstelling en trofische structuur van benthische gemeenschappen rechtstreeks of onrechtstreeks beïnvloeden. Verschillende rapporten geven aan dat benthische soorten onder invloed van klimaatverandering hun verspreidingsgebied uitbreiden naar meer noordelijke gebieden of verder van de kust (Tasker, 2008).

De impact van klimaatverandering op mariene vissoorten en schelpdieren kent veel facetten en heeft een direct en indirect karakter (Vanderperren, 2008). Behalve klimaatverandering zijn er veel andere menselijke invloedsfactoren (bv. (over)bevissing) die interageren en daardoor het onderzoek naar de specifieke impact van klimaatverandering op vis bemoeilijken (Vanderperren, 2008). Er zijn sterke indicaties dat klimaatverandering reeds een invloed heeft op de commerciële visstocks (Phillippart et al., 2007). De ruimtelijke verdeling en/of voortplanting van soorten van belang voor de Belgische visserij zoals tong (Rijnsdorp, 2008), schol (Perry et al, 2005; Van Keeken et al., 2007) en kabeljauw (ICES, 2002) werden reeds getroffen door de klimaatverandering. Meer zuiderse commerciële soorten, zoals mul en John Doryzonnevis, die momenteel niet van belang zijn voor de Belgische visserij maar een grote economische waarde hebben en nog steeds quotavrije soorten zijn, zullen waarschijnlijk hun noordelijke aanwezigheid verhogen in reactie op de klimatologische opwarming (Engelhard et al., 2008). Niet-inheemse soorten (bijvoorbeeld de Pacific oester) zullen betere levenscondities krijgen en toenemen in aantal. Voor een gedetailleerde beschrijving van de impact op de Belgische commerciële vissoorten en visserij wordt verwezen naar de resultaten van het lopende CLIMAR-project.

De impact van klimaatverandering op zeevogels verloopt doorgaans via trofische effecten. De meeste wetenschappelijk analyses refereren naar variatie van de factoren die de conditie bepalen, zoals broedsucces en jaarlijkse overleving. Zeevogels zijn bijzonder kwetsbaar voor ruimtelijke en tijdelijke wanverhoudingen in prooibeschikbaarheid. Er wordt verwacht dat deze factoren gereflecteerd worden in de populatiedynamiek van verschillende zeevogels, doch door het gebrek aan kwantitatieve langetermijndata kan dit niet onderbouwd worden (Tasker, 2008).

De vaststelling van de invloed van klimaatverandering op mariene zoogdieren wordt bemoeilijkt door de sterke invloed van humane activiteiten (bv. bijvangst bij visserij) op de aanwezigheid van deze soorten in onze contreien. Hun lage jaarlijkse reproductiesnelheid maakt hen nochtans kwetsbaarder voor omgevingsveranderingen (Ponsar et al., 2008). Ook al zijn er indicaties dat het aantal mariene zoogdieren zou toenemen in het Belgisch deel van de Noordzee, zijn er waarnemingen over langere tijd noodzakelijk om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen over de invloed van klimaatverandering op mariene zoogdieren.

4.6 Beleids- en beheeraanbevelingen (adaptatie)

4.6.1 Algemeen

Studiewerk geeft inzichten in klimaatverandering en scenario's geven een inschatting van de mogelijke impact daarvan. Toch blijven er nog verschillende onzekerheden. De onzekerheid op de evolutie van bijvoorbeeld temperatuur- en neerslagontwikkelingen maken dat de impact van klimaatverandering op het watersysteem niet ondubbelzinnig vast te stellen is. Welke complexe invloed de verschillende oorzaken hebben op directe en indirecte gevolgen zal ook de komende jaren, misschien wel decennia, onderwerp van studies blijven. Maar dat is geen reden om adaptatiemaatregelen uit te stellen: dat zijn initiatieven waarmee Vlaanderen zich kan aanpassen aan de klimaatverandering. Beleid en beheer gaan steeds op zoek naar robuuste antwoorden: antwoorden die rekening houden met de leemten in onze kennis, maar waarbij we met een grote waarschijnlijkheid kunnen stellen dat de parameters met de grootste invloed opgenomen zijn. Weten dat er onzekerheden zijn, is daarvoor een eerste vereiste voor beheer en beleid, net zoals het voor wetenschappers noodzakelijk is zich rekenschap te geven van het feit dat er onzekerheden zijn waarvan men niet weet dat ze zich voordoen en die daardoor ook niet in de meest complexe modellen vervat zitten.

Weinig maatregelen worden enkel en alleen genomen in functie van de gevolgen van klimaatverandering. Het is echter duidelijk dat maatregelen die genomen worden onder verschillende plausibele toekomstige omstandigheden zinvol moeten zijn, ongeacht de primaire reden waarom ze uitgevoerd worden, en dat klimaatadaptatiemaatregelen compatibel moeten zijn met het verwezenlijken van de andere maatschappelijke doelstellingen. De belangrijkste principes van klimaatadaptatieve maatregelen zijn stilaan algemeen bekend en zeker ook van toepassing in het waterbeheer.

Belangrijkste is te kiezen voor “no regret”-maatregelen of, omwille van grote onzekerheden in de scenario's, voor “low regret”-maatregelen. Dit betekent dat een voorgestelde actie niet enkel zinvol moet zijn onder de huidige omstandigheden, maar ook onder uiteenlopende mogelijke toekomstige randvoorwaarden. De effecten van klimaatverandering op wateroverlast kunnen voor onze regio in Europa nog verschillende kanten uit: ook wanneer de toekomst zich eerder in de buurt van het laag scenario bevindt, moeten maatregelen zinvol en verantwoord zijn, bijvoorbeeld in een maatschappelijke kostenbatenanalyse. Anderzijds, wanneer het klimaat in de toekomst eerder evolueert zoals vooropgesteld in het hoog scenario, moet het aanpassen, bijsturen, versnellen en intensifiëren van maatregelen mogelijk zijn.

Met het witboek van de Europese Commissie omtrent klimaatadaptatie⁶ en het bijhorende *Commission staff working document*⁷ over water, kust en mariene aangelegenheden is klimaatadaptatie hoog op de agenda gezet. Klimaatadaptatie (aanpassen aan klimaatverandering) en klimaatmitigatie (tegengaan van klimaatverandering) zijn echter geen of/of-verhaal, maar een en/en-noodzaak. Win/win-maatregelen die adaptief zijn en daarenboven de uitstoot van broeikasgassen reduceren moeten dit tweeledig voordeel vertaald zien in een maatschappelijke kosten-batenafweging.

De omgang met de gevolgen van klimaatverandering zal ook diversifiëren. Zo zal het beleid in plaats van overstromingen zoveel mogelijk te voorkomen zich meer en meer moeten richten op het beperken van het overstromingsrisico. Gebieden waar de potentiële schade groot is (woonzones, industriegebieden), worden daarbij gevrijwaard ten nadele van gebieden waar de potentiële schade klein of onbestaande is (weilanden, natuurgebieden) of waar men zelfs tot een win-winsituatie kan komen voor functies als natuurbehoud en recreatie. Bijkomende efficiënte maatregelen zijn denkbaar, zoals een waarschuwingssysteem dat bewoners bij een nakende overstroming duidelijk maakt hoe ze zichzelf en waardevolle goederen tijdig in veiligheid kunnen brengen. Daarnaast is een beleid nodig dat nieuwe woningen en infrastructuur in overstromingsgebieden tegengaat, of aangepast maakt aan wateroverlast. De watertoets is hiervoor een nuttig instrument.

Verschillende spelers hebben een rol te vervullen in de adaptatie aan de gevolgen van klimaatverandering:

- de overheid in de rol van waterbeheerder en civiele bescherming;
- de overheid als planner en vergunningverlener in de ruimtelijke ordening;
- de vertegenwoordigers van diverse economische sectoren: drinkwatermaatschappijen, energieproducenten, landbouw, toerisme ...;
- de verzekeraars en herverzekeraars;
- de individuele burger.

4.6.2 Adaptatie in het binnenland

Momenteel komen adaptatiemaatregelen voor het waterbeheer meestal neer op een beperking van de overstromingskansen door middel van structurele ingrepen. Daarnaast ontwikkelt de Vlaamse overheid ook overstromingsvoorspellers om tijdig te kunnen anticiperen op dreigende wateroverlast. Gezien de uiteenlopende effecten van de verschillende klimaatscenario's voor Vlaanderen, zijn voor de toekomst vooral maatregelen

⁶ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0147:FIN:NL:PDF>

⁷ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SEC:2009:0386:FIN:EN:PDF>

van tel die een antwoord kunnen bieden zowel op wateroverlast als op watertekorten. Of een maatregel onder verschillende omstandigheden aanpasbaar en nuttig is, zal maken of die maatregel een substantiële bijdrage levert in de adaptatie aan klimaatverandering. Een voorbeeld van zo'n maatregel is het creëren van gecontroleerde overstromingsgebieden langs rivieren. Zulke gebieden kunnen het overstromingsrisico stroomopwaarts of -afwaarts verminderen en kunnen eventueel toelaten om tijdelijk water op te slaan om te gebruiken in de landbouw bij droogte. Ruimte geven aan een rivier, het hermeanderen en verbreden in plaats van verdiepen, is eveneens een voorbeeld van een mogelijke adaptieve maatregel. Andere voorbeelden zijn voorzieningen voor opslag en infiltratie van hemelwater in stedelijke gebieden. Die beperken de hemelwatertoevoer naar riolen en vullen tegelijkertijd het grondwater aan. Ook het stimuleren van het hergebruik van gezuiverd afvalwater is een mogelijke maatregel.

4.6.3 Adaptie langsheen de kust

Langs de kust zijn de belangrijkste vooruitziende adaptieve maatregelen strandophoging en -verbreding door het aanvoeren van zand of het verstevigen van duinvoeten door beplantingen. Deze maatregelen kunnen bij elke vijfjaarlijkse onderhoudsbeurt bijgestuurd worden in functie van de verwachte zeespiegelstijging. Andere mogelijke maatregelen zijn bijvoorbeeld constructies die erosie tegengaan (zoals strandhoofden) of de golven temperen.

4.6.4 Aanbevelingen

De overheid heeft een belangrijke rol te spelen in de bewustmaking van de bevolking en in de adequate aanpassing van de infrastructuur die zij beheert om de gevolgen van klimaatverandering op te vangen, ongeacht het toekomstscenario dat uiteindelijk het dichtst bij de werkelijkheid zal blijken te liggen. De communicatie over ingrepen die de kans op schade door klimaatverandering kunnen beperken en het betrekken van alle relevante stakeholders bij de opmaak van plannen zijn daarbij nodig. Ook als regisseur van de ruimtelijke ordening kan de overheid sturend optreden om de gevolgen bij wateroverlast en -tekort te verminderen. De ontwikkeling van een langetermijnvisie en een vergunningenbeleid (zoals bouw- en milieuvergunningen) dat de gewenste toekomstige situatie niet verder hypothekeert, zijn hiervoor noodzakelijk. Een van de ondersteunende instrumenten hiervoor is de opmaak van een klimaatadaptatieplan tegen 2012. De Europese Kaderrichtlijn Water en de richtlijn over het beheer van overstromingsrisico's verplichten de lidstaten om beheerplannen op te stellen, waaruit moet blijken dat rekening gehouden wordt met de mogelijke gevolgen van klimaatverandering.

Ook andere groepen hebben een belangrijke rol in de aanpassing aan klimaatverandering: (her)verzekeraars (bijvoorbeeld door gerichte financiële prikkels), drinkwatermaatschappijen (bijvoorbeeld door het aanzetten tot een rationeel watergebruik en het verzekeren van de beschikbaarheid van drinkwater), energieproducenten (bijvoorbeeld door het vrijwaren van de stroomproductie) ... Daarbij moet niet enkel benadrukt worden dat beperkte adaptieve maatregelen nu, excessieve kosten in de toekomst kunnen vermijden. Ook moet duidelijk aangegeven worden welke maatregelen in concrete gevallen relevant zijn. Daarbij horen zowel acties op korte termijn (bijvoorbeeld weten waar actuele informatie over wateroverlast of -tekort in een bepaalde regio te vinden is) als acties op langere termijn (bijvoorbeeld bij verbouwingen).

De impactstudies voor Vlaanderen tonen duidelijk aan dat er naast het beheersen van overstromingen, ook voldoende aandacht moet zijn voor de dreiging van watertekorten. Deze tekorten zijn momenteel nog onderbelicht, onder meer omdat ze geleidelijker optreden en daardoor minder zichtbaar en indirecter zijn. Laagwaterproblemen zouden nog deze eeuw belangrijker kunnen worden dan de overstromingsproblematiek. Ook in het beperken van de gevolgen van verdroging kan de overheid sturen. Voorbeelden zijn het uitwerken van regelgeving rond watercaptatie, normering en economische instrumenten zoals een waterprijsbeleid in functie van rationeel watergebruik.

5 Samenvatting

5.1 Inleiding

Het klimaat is voortdurend aan veranderingen onderhevig, ten gevolge van zowel natuurlijke als antropogene oorzaken. Eén van de antropogene oorzaken, de toegenomen uitstoot aan broeikasgassen, houdt onderzoekers en beleidsmakers momenteel wereldwijd zeer sterk bezig. De toename van deze uitstoot, vooral van CO₂, zorgt immers voor een globale opwarming van de aarde. De temperatuurstijging wordt steeds duidelijker zichtbaar in meetreeksen en kan negatieve gevolgen hebben voor de waterhuishouding, de natuur, de landbouw ... Het probleem, dat momenteel vaak onder de algemene noemer "klimaatverandering" wordt geplaatst, wordt door vele beleidsmakers en wetenschappers beschouwd als één van de belangrijkste omgevingsproblemen die wij momenteel kennen.

Heel wat onderzoeksprojecten proberen daarom een beeld te vormen van de grootte van het probleem, van de toekomstig te verwachten klimaatevoluties en van de grootte van de impacts van deze evoluties op de maatschappij. De invloed op de waterhuishouding krijgt momenteel bijzondere aandacht, omwille van de sterke socio-economische implicaties van de gewijzigde en wijzigende kansen op bijvoorbeeld overstromingen, watertekorten, overschrijding van waterkwaliteitsnormen, de ecologische toestand van riviervalleien ... Ook in Vlaanderen zijn recent heel wat studies in die richting opgestart. Het Wetenschappelijk Rapport Klimaatverandering en waterhuishouding bij MIRA 2009 geeft een overzicht van deze studies en de voorlopig beschikbare resultaten en inzichten.

Meer specifiek zijn de conclusies gebaseerd op 11 lopende of recent afgeronde onderzoeksprojecten (CCI-HYDR, INBO, WL, VMM, SUDEM-CLI, MIRA 2006, ADAPT, CLIMAR, Adaptatie Landbouw, SAFECOast, SeaMocs). Er werd een actueel beeld bekomen van de inschatting van de invloed van klimaatverandering op de waterhuishouding in Vlaanderen, en dit op basis van een voor Vlaanderen eerste versie van klimaatveranderingsscenario's voor temperatuur, neerslag, evapotranspiratie, windklimaat, zeespiegelstijging ...

5.2 Klimaatveranderingen & -scenario's

De huidige klimaatverandering, zoals die zich onder meer manifesteert in een globale opwarming van de aarde, wordt door het IPCC met hoge waarschijnlijkheid (meer dan 90 % zekerheid) voor een deel aan de invloed van menselijke activiteiten toegeschreven (IPCC, 2007), meer bepaald aan de toegenomen uitstoot aan broeikasgassen (waaronder koolstofdioxide en methaan). Er bestaat inderdaad een sterke correlatie tussen de concentratie aan broeikasgassen en de temperatuurvariatie van de atmosfeer, wat wordt toegeschreven aan de eigenschappen van broeikasgassen om infrarode straling te absorberen en terug uit te zenden. Hoe groot die invloed precies is, is echter nog zeer onzeker. De huidige kennis van het globale klimaatstelsel en de verschillende interacties die er bestaan tussen de atmosfeer, de oceanen, het land ..., is immers nog zeer onvolmaakt.

Het IPCC (het Intergovernmental Panel for Climate Change) maakt schattingen over de toekomstige evolutie aan broeikasgassen (meest recente rapport: IPCC, 2007). Deze zijn gebaseerd op aannames over de verdere ontwikkeling van de maatschappij. De evolutie van de economie en het gebruik van materialen kan meer of minder duurzaam verlopen, de maatschappij kan evolueren naar een meer mondiaal of meer regionaal georiënteerde wereldbevolking en -economie, enz. Als gevolg hiervan kunnen de concentraties van de broeikasgassen in de atmosfeer verder blijven toenemen tot het jaar 2100 met in het meest pessimistisch scenario een verdrievoudiging van de CO₂-uitstoot. Een ander scenario is dat deze eerst toenemen tot het midden van de 21^e eeuw en daarna opnieuw dalen. Welke invloed deze ingeschatte toename in broeikasgassen precies heeft op het klimaat kan worden doorgerekend met klimaatmodellen.

De klimaatmodellen beschrijven de belangrijkste processen van het globale klimaatsysteem, waaronder de stromingspatronen in de atmosfeer en in de oceanen op basis van luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid. Ook de warmtebalans wordt gemodelleerd rekening houdend met zowel de kortegolf-zonnestraling als de langegolfstraling uitgezonden door het aardoppervlak. Verder houden zij (op zeer eenvoudige wijze) rekening met convectieprocessen, wolkenvorming, de invloed van zee-ijs ... De sterke vereenvoudigingen zijn nodig omwille van de zeer onvolledige kennis van de processen en hun interacties en de enorme computer-rekenkracht die nodig is om de enorme complexiteit aan interacties in te rekenen, maar ook omwille van de grote ruimtelijke dimensies van het mondiale klimaatsysteem. Deze vereenvoudigingen, samen met de inschatting van de toekomstige uitstoot aan broeikasgassen, zorgen ervoor dat de resultaten van de klimaatmodellen een belangrijke onzekerheid vertonen, waarmee rekening moet gehouden worden.

Zo heeft het omwille van de onzekerheden geen zin om de impactanalyses door te voeren op basis van slechts 1 klimaatmodel of 1 broeikasgasemissiescenario. Er wordt bij voorkeur met een set aan scenario's gewerkt, die een representatief beeld geeft van de mogelijke variatie aan impactresultaten. Bovendien zijn de impacts van klimaatverandering regionaal zeer variabel en moeten de resultaten van de klimaatmodellen specifiek voor elke streek geanalyseerd worden. Voor Vlaanderen is dat recent gebeurd op basis van de meest recente runs met Europese regionale klimaatmodellen in onderzoeksprojecten voor Federaal Wetenschapsbeleid (CCI-HYDR, CLIMAR), het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) en het Europese project SeaMocs.

In het project CCI-HYDR werden door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven en het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) specifiek voor hydrologische impactanalyse in België klimaatscenario's afgeleid voor neerslag en potentiële evapotranspiratie (ET_o). Ze zijn gebaseerd op een groot aantal simulatieresultaten met mondiale en regionale klimaatmodellen. In het totaal werden meer dan 50 simulatieruns voor het huidig en recente klimaat vergeleken met de bijhorende runs voor het toekomstige klimaat tot 2100, en dit volgens verschillende broeikasgasemissiescenario's. Er werd zowel gebruik gemaakt van meer dan 31 scenarioruns met regionale klimaatmodellen voor Europa (bekomen in het kader van het Europese PRUDENCE-project) en meer dan 20 scenarioruns met mondiale klimaatmodellen, zoals beschikbaar gesteld door het IPCC (runs die in het kader van het 4^e Assessment Report van het IPCC zijn gebruikt). Telkens zijn de specifieke modelresultaten voor België geanalyseerd. Via statistische neerschalingstechnieken werden de resultaten (die slechts voor ruwe tijd- en ruimteschalen beschikbaar zijn) vertaald naar bijhorende veranderingen op de kleine tijd- en ruimteschalen, zoals noodzakelijk is voor de hydrologische impactanalyse. Er werd nagegaan welk percentage neerslag- en ET_o-verandering er optreedt en dit bij verschillende tijdschalen en in functie van de maand en het seizoen. Ook werd specifiek ingegaan op de meest extreme neerslaggebeurtenissen en werd nagegaan of de neerslagverandering door klimaatverandering functie is van de frequentie waarmee neerslaggebeurtenissen zich voordoen (verandert de meer uitzonderlijke en kortstondige neerslagintensiteit meer dan de maandgemiddeld neerslag of niet?). In opdracht van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) werd deze analyse voor neerslag en ET_o uitgebreid met een gelijkaardige analyse voor temperatuur en windsterkte. Hierdoor werden de Belgische CCI-HYDR klimaatscenario's voor hydrologische impactanalyse, ook bruikbaar voor allerlei ecologische impactstudies. In opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij werden de klimaatscenario's nog verder verfijnd, zodat ze ook bruikbaar zijn voor impactanalyses langs rioleringsstelsels en lokale buffervoorzieningen. Bij deze toepassingen is vooral de nauwkeurigheid van de neerschaling van de kortstondige extreme regenbuien in de zomer (de convectieve zomeropweddens) belangrijk.

De resultaten van de statistische analyses werden voor elke variabele (temperatuur, neerslag, ET_o, windsterkte) en voor elke tijdschaal tussen 10 minuten en de seizoensgemiddelde waarde, alsook in functie van de voorkomingskans, samengevat in een hoog-, midden- en laag-klimaatveranderingsscenario (telkens overeenkomend met een bepaald % verandering). Deze drie klimaatscenario's laten toe om hydrologische, ecologische en andere impactanalyses uit te voeren, waaronder studies rond de invloed van klimaatverandering op overstromingskansen en -risico's en laagwaterextremen.

Samengevat geven de klimaatscenario's aan dat Vlaanderen duidelijk warmer zal worden. De maandgemiddelde luchttemperatuur aan de oppervlakte zal tegen het einde van deze eeuw sterk toenemen. De toename treedt op voor elk seizoen, maar is sterker tijdens de zomermaanden. Zelfs voor het B2 emissiescenario van het IPCC (dat overeen komt met een meest gematigde verandering) blijkt de temperatuur duidelijk toe te nemen (tussen de 0,7 en de 3 °C tegen 2100). In het hoog-klimaatscenario wordt voor augustus meer dan 8 °C temperatuurstijging voorspeld. Zoals hoger aangehaald zijn de onzekerheden op de precieze temperatuurstijging wel groot; er zijn inderdaad grote verschillen tussen het hoog- en het laag-klimaatscenario. Ook verschillen de resultaten sterk van maand tot maand. In januari, bijvoorbeeld, zijn de temperatuurveranderingen gesitueerd tussen de 1,5 en de 4,2 °C toename. Dat komt overeen met een "onzekerheidsband" van 2,7 °C. In augustus is deze onzekerheidsband nog breder: de temperatuurstijging varieert er van 2,8 tot 8,9 °C (bandbreedte van 6,1 °C). Ondanks deze onzekerheden, die de impactanalyse hebben bemoeilijkt, is het klimaatveranderingssignaal voor temperatuur zeer duidelijk: een zeer significante toename in de temperatuur en dat voor elke maand van het jaar. Voor de seizoengemiddelden levert dit voor de winter (december, januari, februari) een toename van 1,5 à 4,4 °C op, en voor de zomer (juni, juli, augustus) zelfs een toename van 2,4 à 7,2 °C.

Wanneer de meest koude en warme dagen afzonderlijk geanalyseerd worden, worden gelijkaardige trends gevonden. Het betekent dat Vlaanderen evolueert naar warmere winters met minder vorstdagen en hetere zomers.

Door de temperatuuroptename neemt de hoeveelheid verdamping toe in zowel de winter als de zomer. Ook de neerslag neemt hierdoor toe in de winter. Voor de wintermaanden december, januari en februari neemt de maandgemiddelde neerslag toe tot ongeveer 60 % in het hoog-klimaatscenario, terwijl in het laag-klimaatscenario de neerslag ongewijzigd blijft. Gemiddeld voor gans de winterperiode bedraagt de neerslagtoename in het hoog-klimaatscenario 45 %.

De neerslagverandering in de zomer is complexer: de meeste klimaatmodelsimulaties voorspellen drogere zomers (lagere cumulatieve neerslagvolumes), maar bepaalde klimaatmodelsimulaties geven een beperkte stijging van de neerslagvolumes. Onafhankelijk van de totale neerslaghoeveelheid in de zomer, kunnen kortstondige hevige regenbuien zich vaker voordoen (althoewel ook over dit laatste niet alle klimaatmodellen het eens zijn). In het laag-klimaatscenario wordt voor de meest droge zomermaand augustus de huidige maandgemiddelde neerslag met 78 % gereduceerd voor het klimaat tot 2100. Rekening houdend met de grote onzekerheden kan die reductie ook 43 % of 17 % bedragen (midden-klimaatscenario), kan er geen verandering optreden of kan er zelfs sprake zijn van een lichte neerslagtoename (hoog-klimaatscenario en op basis van de meest ruime set aan mondiale klimaatmodelsimulaties). Kortdurige en extreme neerslagintensiteiten vertonen deze daling in neerslaghoeveelheid niet (of veel minder); de meest extreme dagneerslagwaarden, bijvoorbeeld, kunnen verhogingen vertonen tot +150 % (voor het meest pessimistische klimaatmodelresultaat en voor dagneerslagwaarden die zich minder vaak voordoen dan eens om de 10 jaar).

Wat windsnelheid betreft, die blijkt in de wintermaanden systematisch toe te nemen in de drie klimaatscenario's naar 2100 toe: +10 à +20 %. Voor de zomermaanden duidt de modeloutput eerder op een ongewijzigde windsnelheid (mogelijks toenemend, mogelijks afnemend).

Door het veranderend windklimaat wijzigt de frequentie en de grootte van de windgolven op de Noordzee. Dit beïnvloedt het stormopzet langs de kust (de stijging van de zeespiegel ten gevolge van golven). Daarnaast is inmiddels ook duidelijk geworden dat het zeeniveau aan het stijgen is ten gevolge van thermische uitzetting (volumetoename bij oplopende temperatuur) en van uitwisseling van afsmeltend ijs op land met de zee.

Statistische analyse van het zeeniveau in Oostende maakt erg duidelijk dat er – ondanks de vrij grote variabiliteit van jaar tot jaar – een stijging plaatsvindt van gemiddeld 1,69 mm/jaar (gemiddelde over de hele meetreeks sinds 1927), hetgeen dicht aansluit bij het mondiale gemiddelde dat IPCC afleidde voor de 20^e eeuw. Later opgestarte meetreeksen aan onze kust laten nog hogere waarden optekenen, hetgeen duidt op een versnelling van de

zeespiegelstijging. Dit laatste wordt bevestigd door regressie-analyse op de Oostendse meetreeks: een "getrapt" lineair profiel levert bijvoorbeeld een knik op in 1992. De stijging bedroeg gemiddeld 1,41 mm/jaar tussen 1927 en 1992, maar al 4,41 mm/jaar tussen 1992 en 2006.

Extrapolatie van deze historische trend levert voor de Vlaamse kust, afhankelijk van de toegepaste relaties, een verdere zeespiegelstijging met 20 cm tot 200 cm op voor de periode 1990-2100.

Naast het zeeniveau is ook de zeewatertemperatuur een cruciale parameter. De temperatuur beïnvloedt de densiteit van het water en daardoor de stromingen en het zeespiegelniveau. De temperatuur beïnvloedt ook de oplosbaarheid van koolstofdioxide in het zeewater, en heeft zo een link met de samenstelling van de atmosfeer, de evapotranspiratie en diverse andere fysische, chemische en ecologische processen. In alle deelgebieden van de Noordzee (niet enkel het Belgische deel ervan) blijkt een duidelijke stijging van de zeewatertemperatuur aan de gang. Er lijkt bovendien een natuurlijke variabiliteit op te treden met een periode van ongeveer 7 à 8 jaar, die overeen kan komen met de variabiliteit in de North Atlantic Oscillation Index (NAOI). Die stijging ligt tussen 0,023 °C/jaar (in het Skagerak en de noordelijke Noordzee) en 0,053 °C/jaar (in de centrale Noordzee en de Zuidelijke Noordzee). In het gebied dichtst bij onze kust bedraagt de toename ongeveer 0,034 °C per jaar of 3,4 °C per eeuw. Statistische analyse van de data voor windsnelheid en golfhoogten in/nabij het Belgische deel van de Noordzee geeft voor de golfhoogte enkel een natuurlijke variabiliteit met een periode van ongeveer 7 jaar, verbonden met de NAOI. Er is ook een seizoenale cyclus: er zijn gemiddeld hogere golven in de winter (hoogste golven in december en januari) en lagere golven in de zomermaanden (laagste golven in augustus). Een duidelijke klimaatrend kon in de historische meetreeksen voor golfhoogtes evenwel niet aangetoond worden. Ook de windsnelheid vertoont nog geen belangrijke trends, zowel wat maandgemiddelde snelheid betreft als de maximale windsnelheden (boven 6 of 8 Beaufort).

5.3 Invloed op hoog- en laagwater langs rivieren en in rioleringen

De CCI-HYDR klimaatscenario's werden in een project voor het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) toegepast om de invloed te bestuderen op de waterhuishouding, vooral de hoog- en laagwaterdebieten langs de grotere rivieren in het binnenland. In het totaal werd de impactanalyse uitgevoerd voor 67 stroomgebieden in het Vlaamse binnenland, waarvoor hydrologische en hydrodynamische modellen beschikbaar zijn bij het WL. Voor elk van deze stroomgebieden werden de stroomgebiedsgemiddelde neerslagafstromingsdebieten geanalyseerd voor zowel de uurlijkse hoogwaterpieken als de laagwaterdebieten. Hierbij werd met het huidig landgebruik gerekend; enkel de invloed van de potentieel toekomstige klimaatverandering tegen 2100 werd nagegaan. De conclusies gaan voor alle rivieren in dezelfde lijn:

- *Laagwater in de zomer:* Door de sterke daling in de zomerneerslag en de toename in de verdamping, daalt het debiet aanzienlijk. Tijdens droge zomers kunnen de laagste rivierdebieten met meer dan 50 % dalen (gemiddeld 20 % in het minst ongunstige scenario, gemiddeld 70 % in het meest ongunstige scenario). Hierdoor kan de kans op watertekorten aanzienlijk toenemen, met mogelijk nadelige gevolgen voor het industriële en huishoudelijke watergebruik, de scheepvaart, de waterkwaliteit, de natuur, de landbouw ... Ook het grondwater zal dalen, met gelijkaardige problemen tot gevolg. Hoe deze daling zich vertaalt naar hoe vaak er watertekorten, vissterftes ... zullen zijn in de toekomst, wordt nog bestudeerd.
- *Hoogwater in de winter:* de sterke toename van de verdamping (zowel tijdens de winter als tijdens de zomer) compenseert voor een groot deel de toename in de winterneerslag. Daardoor is de toename in het aantal en de omvang van de overstromingen (in de winter vooral langs rivieren) relatief beperkt. Piekaftoeren in de rivieren nemen in het meest ongunstige scenario met maximaal 35 % toe. Zo'n toename kan plaatselijk wel leiden tot frequenter en meer uitgestrekte overstromingen.
- *Hoogwater in de zomer:* extreme zomeropwekningen kunnen overstromingen van riolen en kleinere waterlopen veroorzaken. De meeste klimaatmodellen voorspellen een toename

in het aantal (de frequentie) en de omvang van deze hevige zomeronweders, zodat ook een toename van het aantal dergelijke overstromingen te verwachten valt. Voor de grootste bui die zich momenteel in een periode van 10 jaar voordoet, blijkt het daggemiddeld neerslagvolume in het meest ongunstige scenario met ongeveer 30 % toe te nemen.

De invloed van klimaatverandering is niet enkel sterk seizoenafhankelijk, maar ook regionaal zeer variabel. Klimaatmodellen tonen een noord-zuidvariatie in de neerslag- en temperatuurverandering (Baguis et al., 2009). In Noord-Frankrijk zal de klimaatverandering de evolutie naar verdroging verder versterken, met een daling van zowel de zomer- als de winterafvoeren, en dus ook een daling van het aantal overstromingen tot gevolg. Ook in Vlaanderen stijgt de kans op watertekort. De evolutie naar meer overstromingen is nog onduidelijk. Voor Nederland wordt dan weer een toename van het aantal overstromingen verwacht.

In een andere studie voor de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij werd de invloed nagegaan van de potentieel toekomstige klimaatverandering op de ontwerpwaarden voor het dimensioneren van buffervoorzieningen als bronmaatregelen bij rioleringsstelsels. Hierbij werd gebruik gemaakt van aangepaste klimaatscenario's die rekening houden met de specifieke invloed van klimaatverandering op extreme kortstondige regenbuien (de convectieve zomeronweders). Onder het hoog-klimaatscenario zou voor de (in de huidige praktijk) meest gangbare doorvoerdebieten (d.i. 2, 5 en 10 l/(s.ha)) het nodige buffervolume met ongeveer 15 tot 35 % moeten toenemen ten opzichte van de huidige praktijk. Voor de meest gangbare doorvoerdebieten en maximale bergingswaarden zou bij hetzelfde klimaatscenario (en indien de dimensionering niet bijgestuurd wordt) de buffervoorziening 2 maal zo vaak overlopen.

De overstromingskaarten die in het kader van CCI-HYDR voor de 3 klimaatscenario's werden ontwikkeld, werden vervolgens gebruikt om de evolutie van het economische risico te berekenen in de verschillende klimaatscenario's voor 2100. De berekeningen werden gedaan voor zes bekkens in Vlaanderen: het IJzerbekken, het Leiebekken, het Boven-Scheldebekken, het Denderbekken, het bekken van de Beneden-Schelde en zijrivieren en het Demerbekken. Voor de andere bekkens bestaan op dit moment geen hydrologische modellen voor de klimaatscenario's. Een belangrijk gegeven is dat enkel het overstromingsrisico vanuit de bevaarbare waterlopen werd meegenomen. Voor de onbevaarbare waterlopen zijn er immers geen hydraulische modellen (en dus geen overstromingskaarten) beschikbaar in het Waterbouwkundig Laboratorium.

In het lage ('droog') klimaatscenario daalt het risico fors in alle bekkens in Vlaanderen. Het totale risico voor het gemodelleerde deel van Vlaanderen is dan ook fors gedaald (56 % lager dan het risico in de huidige situatie). Vooral in het Demer- (-84 %) en het IJzerbekken (-72 %) is de daling erg uitgesproken. Dit is een rechtstreeks gevolg van het feit dat in het droog klimaatscenario de piekafvoeren in de waterlopen en dus ook de overstromingsgebieden veel kleiner zijn dan in de huidige situatie. Uiteraard is deze daling niet overal binnen een bekken hetzelfde.

Voor het midden klimaatscenario (het 'gematigde' scenario) wordt gemiddeld een lichte daling van het overstromingsrisico (-8 %) waargenomen in Vlaanderen in vergelijking met de huidige hydrologische situatie. Er zijn wel enkele VHA-zones waar het risico toeneemt en in het Boven-Scheldebekken stijgt het risico in z'n geheel (+34 % in vergelijking met de huidige situatie) maar de overige bekkens tonen gemiddeld nog een daling van het risico.

Het hoge klimaatscenario (het 'natte' scenario) toont een sterke stijging van het overstromingsrisico ten gevolge van de uitbreiding van de overstromingsgebieden in dit scenario. Het risico stijgt in dit scenario met 33 % in vergelijking met de huidige situatie. Vooral in het Leie- (+277 %), Boven-Schelde- (+179 %) en Demerbekken (+134 %) is de stijging van het risico bijzonder sterk. Voor de Beneden-Schelde en zijrivieren is de stijging minimaal (+4 %): enkel langs de Nete en de Dijle zou het risico sterk toenemen.

Naast de invloed van de verschillende klimaatscenario's werd ook de invloed van een wijzigend landgebruik⁸ op het overstromingsrisico doorgerekend. Hiervoor werd gebruik gemaakt van enkele landgebruiksscenario's die werden ontwikkeld in het kader van 'MIRA 2009 Landgebruik in Vlaanderen' (Gobin et al., 2009a). Hierin werden prognoses gemaakt voor de evolutie van het landgebruik in Vlaanderen tot 2030 volgens een RR-scenario en een ER-scenario. De bebouwde oppervlakte neemt toe in beide scenario's, maar is het sterkst in het RR-scenario. In ER-scenario worden de bijkomende kavels kleiner verondersteld en neemt de bevolkingsdichtheid per bebouwde oppervlakte toe. De verstedelijking gaat voornamelijk ten koste van akker- en grasland, dat een lagere overstromingsschade per eenheid oppervlakte kent. De oppervlakte natuur en bos, waarvoor de economische schade bij overstromingen te verwaarlozen is, gaat dan weer vooruit in beide scenario's. In de landgebruiksscenario's werden alleen wijzigingen in landgebruik tot 2030 doorgerekend. Tussen 2030 en 2100 is het landgebruik onveranderlijk verondersteld voor de berekening van de overstromingsrisico's.

Als het risico in 2100 gebaseerd op het huidige bodemgebruik vergeleken wordt met het risico gebaseerd op het bodemgebruik volgens het RR-scenario, dan valt in alle klimaatscenario's een lichte stijging van $\pm 5\%$ op van het risico in Vlaanderen. Dit is een rechtstreeks gevolg van het feit dat er onder het RR-landgebruiksscenario een groter areaal bebouwde oppervlakte (zowel bewoning als bedrijventerreinen) zal zijn in de overstromingsgebieden. Opvallend hierbij is de zeer sterke stijging (stijging met 20 % tot 100 % in alle klimaatscenario's) van het risico in het Leiebekken en het IJzerbekken. Oorzaak daarvan is een toename van bebouwing en industrie in overstromingsgebied, ten nadele van landbouwgebied (akker- en weiland).

Wanneer echter het risico in 2100 gebaseerd op het bodemgebruik volgens het ER-scenario wordt vergeleken met het risico van het bodemgebruik volgens de huidige situatie, dan valt het op dat er op Vlaams niveau in het lage en het midden klimaatscenario geen bijkomende stijging – louter te wijten aan veranderend bodemgebruik – van het risico meer is en slechts een geringe verdere toename in het hoge klimaatscenario. Hier blijkt dat de stijging van de bebouwde oppervlakte in overstromingsgebieden kleiner is dan in het RR-scenario, waardoor de stijging van het risico beperkt blijft. Het risico in het Demerbekken is volgens dit scenario zelfs gedaald t.o.v. de scenario's met enkel klimaatverandering door een toename van de oppervlakte natuur (wat geen economische schade ondervindt van een overstroming).

Uit de vergelijking van het risico gebaseerd op het landgebruik in 2030 volgens het ER-scenario met het risico gebaseerd op het landgebruik in 2030 volgens het RR-scenario, blijkt dat het overstromingsrisico in Vlaanderen licht hoger is met het RR-scenario. In alle klimaatscenario's is er $\pm 5\%$ meer risico in het RR-scenario. In het IJzer-, Leie- en Demerbekken is er een zeer duidelijk verschil (veel meer risico in het RR-scenario) waar te nemen tussen de 2 landgebruiksscenario's. In de andere bekkens is het risico ongeveer gelijk. De grote verschillen in de eerste 3 bekkens zijn te verklaren door het feit dat er in het ER-scenario minder bebouwde oppervlakte is in de overstromingsgebieden in vergelijking met het RR-scenario.

Naast de schade door wateroverlast is het belangrijk oog te hebben voor de schade door watertekort. In elk klimaatscenario voor Vlaanderen stijgt de kans op droge periodes en worden deze periodes extremer. Vooral de evolutie naar drogere en warmere zomers zal, samen met veranderingen in de neerslagintensiteit, een negatieve invloed hebben op de kwaliteit en de beschikbaarheid van grond- en oppervlaktewater, en dus ook op de leveringszekerheid van drinkwater. De klimaatverandering heeft niet alleen invloed op het aanbod, maar ook op de vraag naar drinkwater: in periodes van grote droogte zullen de

⁸ Veranderde landgebruik werd enkel gebruikt voor het doorrekenen van het risico. Voor de opmaak van de hydrologische modellen en de overstromingskaarten van de klimaatscenario's was het in het kader van dit rapport niet mogelijk uit te gaan van het veranderde landgebruik. Niettemin dient vermeld dat wijzigend landgebruik ook een invloed zou kunnen hebben op de hydrologie (minder braakland of meer begroeiing leidt bijvoorbeeld tot minder runoff, meer verstedelijking en meer verharding leidt tot meer runoff). Als een veranderend landgebruik globaal tot minder runoff zou leiden, dan is er ook minder water in de rivier en wordt een overstroming ook geringer in omvang, en bijgevolg dus ook het risico kleiner.

piekverbruiken toenemen. In tegenstelling tot wateroverlast is de ruimtelijke afbakening van de schade door droogte veel moeilijker en is de duur van het tekort sterk bepalend.

5.4 Impact op de kustzone

Langs de kust worden de overstromingsrisico's beïnvloed door de zeespiegelstijging en de verandering in wind met bijhorend golfklimaat. Het meest pessimistische scenario voor 2100 gaat uit van 2 m zeespiegelstijging en 8 % toename in de windsnelheid. Die zeespiegelstijging is vergelijkbaar met wat de Deltacommissie in Nederland vooropstelt als bovengrensscenario: 2 tot 4 m zeespiegelstijging tot 2200.

De golfbelasting op kust en zeewering neemt in eender welk scenario beduidend toe. Dat heeft te maken met de toenemende waterdiepte ten gevolge van de zeespiegelstijging. Doordat hoogwaters sneller en laagwaters trager stijgen dan de gemiddelde zeespiegel, neemt ook de getijdenslag (het verschil tussen hoog en laag tij) toe. De stijging van de golfbelasting en de getijdenslag veroorzaken een sterkere erosie van strand en duinen, en van de bijhorende frequentie op bresvorming (doorbraak van een dijk of een natuurlijke duinengordel). Bij een superstorm die gemiddeld een keer per 17 000⁹ jaar voorkomt, is bij het huidige klimaat enkel bresvorming te verwachten in Wenduine, Oostende en Mariakerke (de kusthavens buiten beschouwing gelaten). Bij het toekomstige klimaat is bij het meest ongunstige scenario en zonder maatregelen tegen 2100 bresvorming mogelijk ter hoogte van bijna de volledige kustlijn.

Het huidige kustbeheer ontwerpt de zeewering zo, dat een storm die maar eens om de 1 000 jaar voorkomt, geen noemenswaardige schade veroorzaakt en dat de kans op bresvorming minimaal is. De terugkeerperiodes, gebruikt voor een overstroming langs de kust, zijn meestal vele malen groter dan deze voor waterlopen die niet aan de getijden gebonden zijn. De kustverdediging moet dus bestand zijn tegen meer extreme omstandigheden. Als het fout gaat, zijn de gevolgen er immers veel groter dan wanneer een rivier buiten zijn oevers treedt. Momenteel werkt het Agentschap Maritieme Dienstverlening & Kust van de Vlaamse overheid een masterplan uit voor de kustzone: het Geïntegreerd Kustveiligheidsplan 2010. Op basis van risicoberekeningen bij verschillende waterstanden en stormen worden maatregelen uitgewerkt met daarbij ook een economische afweging van kosten en baten. Dit plan heeft als doel de kustzone op een aanvaardbare manier te beschermen tot 2050. Daarbij zal gekozen worden voor maatregelen die in elk potentieel klimaatscenario nuttig zijn, en die kunnen meegroeien om ook na 2050 een aanvaardbaar veiligheidsniveau te handhaven.

Hogere waterstanden langs de kust vertalen zich ook naar hogere overstromingskansen langs het getijdengevoelige deel van de Schelde. In het huidige klimaat doen overstromingen tussen Vlissingen en Gent zich gemiddeld eens om de zeventig jaar voor, wat overeenkomt met een hoogwaterstand te Antwerpen van 7,83 m TAW. Na realisatie van het gecontroleerde overstromingsgebied van Kruibeke-Bazel-Rupelmonde¹⁰ daalt deze kans tot een keer op de 350 jaar, wat overeenkomt met een maatgevende hoogwaterstand te Antwerpen van 8,24 m TAW. Bij een middenscenario van 60 cm zeespiegelstijging tegen 2100 en geen verdere maatregelen zou de overstromingskans opnieuw stijgen tot de huidige kans van een keer op de 70 jaar tegen 2050 en zelfs een keer om de 25 jaar tegen 2100. Verder is er nog de gecombineerde invloed van de zeespiegelstijging en de verhoogde debieten stroomopwaarts onder invloed van de wijzigende neerslag, die in het Zeescheldebied tussen Gent en Antwerpen een belangrijke rol kunnen spelen. Dit benadrukt het belang van het realiseren van het volledige geactualiseerde Sigmaplan om de overstromingsrisico's te beheersen en de natuurdoelstellingen in het Zeescheldebekken te behalen. Dat plan omvat naast de inrichting van gecontroleerde overstromingsgebieden ook bijvoorbeeld dijkverhogingen in steden en industriegebieden.

⁹ Bij deze berekeningen is voor een storm die zich eens om de 17 000 jaar voordoet in Oostende een actuele waterstand van 8m TAW verondersteld (ter vergelijking: deze van de extreme storm van 1953 was 6,66m TAW). Onder invloed van klimaatwijzigingen (meest pessimistische scenario) stijgt de waterstand bij een storm die zich eens om de 17 000 jaar zou voordoen er naar dan naar 10,5 m TAW⁹ tegen 2100: 8m + 2m zeespiegelstijging in 21^e eeuw + 0,5m extra stormopzethoogte.

¹⁰ Voorzichtige prognoses stellen dat het gebied in 2011 klaar is om in werking te treden (www.gogkbr.be).

Klimaatverandering zal directe en indirecte invloed hebben op mariene planten en dieren en de volledige voedselketen beïnvloeden: klimaatverandering zal leiden tot een verschuiving in soorten en een toename van invasieve en exotische soorten in de Noordzee. Alhoewel er nu al duidelijke aanwijzingen zijn van ingrijpende veranderingen in de mariene voedselketen, is de kwantificering van de complexe invloed van klimaatverandering op de mariene biologie in het Belgische deel van de Noordzee een nog lopende onderzoeksuitdaging. Bovendien zijn er behalve klimaatverandering nog veel andere menselijke invloedsfactoren (bv. (over)bevissing) die interageren en daardoor het onderzoek naar de specifieke impact van klimaatverandering bemoeilijken.

5.5 Beleids- & beheeraanbevelingen

De klimaatscenario's en impactberekeningen tonen aan dat klimaatverandering belangrijke negatieve gevolgen kan hebben voor de waterhuishouding, de natuur, de landbouw ... Wel blijkt uit de klimaatscenario's dat de toekomstige klimaatrevoluties nog zeer onzeker zijn. De Vlaamse hoog-, midden-, en laag-klimaatscenario's voor neerslag en de bijhorende hydrodynamische impactresultaten tonen inderdaad grote verschillen. Daarom moeten de revoluties van het klimaat de volgende jaren verder nauwgezet opgevolgd worden. Maar dat is geen reden om adaptatiemaatregelen uit te stellen: dat zijn initiatieven waarmee Vlaanderen zich kan aanpassen aan de klimaatverandering.

Gezien de uiteenlopende effecten van de verschillende klimaatscenario's voor Vlaanderen, zijn voor de toekomst vooral maatregelen van tel die een antwoord kunnen bieden zowel op wateroverlast als op watertekorten. Voorbeelden zijn gecontroleerde overstromingsgebieden waar ook water kan opgeslagen worden bij droogte, opslag en infiltratie van hemelwater in stedelijke gebieden en hergebruik van gezuiverd afvalwater.

In plaats van overstromingen zoveel mogelijk te voorkomen zal het beleid zich meer en meer moeten richten op het beperken van het overstromingsrisico. De Europese Kaderrichtlijn Water en de richtlijn over het beheer van overstromingsrisico's verplichten de lidstaten om beheerplannen op te stellen, waaruit moet blijken dat rekening gehouden wordt met de mogelijke gevolgen van klimaatverandering. Bijkomende efficiënte maatregelen zijn overstromingsvoorspellers en een systeem dat bewoners waarschuwt bij een nakende overstroming. Daarnaast is een beleid nodig dat nieuwe woningen en infrastructuur in overstromingsgebieden tegengaat, of aangepast maakt aan wateroverlast. Ook de ontwerpregels voor rioleringen zullen bijgesteld moeten worden in het licht van het veranderende klimaat.

Maar er moet dus ook voldoende aandacht zijn voor de dreiging van watertekorten. Laagwaterproblemen zouden nog deze eeuw belangrijker kunnen worden dan de overstromingsproblematiek. Mogelijke maatregelen zijn het uitwerken van regelgeving rond watercaptatie, normering en economische instrumenten zoals een waterprijsbeleid in functie van rationeel watergebruik.

Voor de beveiliging van de kustzone zijn de belangrijkste vooruitziende adaptieve maatregelen strandophoging en -verbreding. Andere mogelijke maatregelen zijn constructies die erosie tegengaan (zoals strandhoofden) of de golven temperen.

De overheid heeft een belangrijke rol te spelen in de bewustmaking van de bevolking en in de adequate aanpassing van de infrastructuur die zij beheert om de gevolgen van klimaatverandering op te vangen. Communicatie en participatie zijn daarbij nodig. Ook als regisseur van de ruimtelijke ordening kan de overheid sturend optreden om de gevolgen bij wateroverlast en -tekort te verminderen. De ontwikkeling van een langetermijnvisie en een vergunningenbeleid dat de gewenste toekomstige situatie niet verder hypothekeert, zijn hiervoor noodzakelijk. Een van de ondersteunende instrumenten hiervoor is de opmaak van een klimaatadaptatieplan tegen 2012. Maar ook andere groepen, zoals (her)verzekeraars, drinkwatermaatschappijen en energieproducenten, hebben een belangrijke rol te spelen in de aanpassing aan klimaatverandering.

Referenties

- Alkyon (2007) Inventory of climate scenarios applied in the North Sea countries, Desk study for Rijkswaterstaat-RIKZ for the project SAFECoast, update of the 2005 report, http://www.safecoast.org/editor/databank/File/CCscenarios_update.pdf.
- Baguis P., Boukhris O., Ntegeka V., Roulin E., Willems P., Demarée G. (2008) Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems. I. Literature review, K.U.Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, April 2008.
- Baguis P., Ntegeka V., Willems P., Roulin E. (2009) Extension of CCI-HYDR climate change scenarios for INBO. K.U.Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, January 2009.
- Bindoff N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitu, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Boukhris O.F., Willems P., Vanneuville W., Van Eerdenbrugh K. (2008) Climate change impact on hydrological extremes in Flanders: Regional differences, Eindrapport voor de Vlaamse Overheid - Departement Mobiliteit en Openbare Werken - Waterbouwkundig Laboratorium, April 2008, 91 p.
- Brouwers J., De Nocker L., Schoeters K., Moorkens I., Jespers K., Aernouts K., Beheydt D., Vanneuville W. (2008) Milieuraapport Vlaanderen, Achtergronddocument klimaatverandering 2007. MIRA, Vlaamse Milieumaatschappij, april 2008. Downloadbaar op www.milieuraapport.be.
- Coninx I., El Kahloun M. et al. (2007) ADAPT - Case study of the Dender basin: Focus on Geraardsbergen and Ninove.
- De Groof A., Hecq W., Coninx I., Bachus K., Dewals B., Piroton M., El Kahloun M., Meire P., De Smet L., De Sutter R. (2006) Adapt - General study and evaluation of potential impacts of climate change in Belgium.
- Deltacommissie (2008) Samen werken met water – Bevindingen van de Deltacommissie 2008, Deltacommissie Nederland, september 2008.
- Demarée G., Baguis P., Deckmyn A., Debontridder L., Pinnock S., Roulin E., Willems P., Ntegeka V., Kattenberg A., Bakker A., Lenderink G., Bessembinder J., (2009) Klimaatscenario's voor Vlaanderen. Rapport voor het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO), Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) & K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica, januari 2009.
- Ducharne, A. (2008) Projet REXHySS: Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Rapport intermédiaire projet N° 0000454 programme Gestion et Impact du Changement Climatique, France, Septembre 2008, 20 p.
- Engelhard G.H., Pinnegar J.K. and Ellis J.R. (2008) Resolving climate impacts on fish stocks, Chapter 23 - Climate change and John Dory'.
- European Commission, Directorate General, Joint Research Centre (2006) Marine and coastal dimension of climate change in Europe. A report to the European Water Directors, Institute for Environment and Sustainability.
- European Science Foundation (2007) Impacts of Climate Change on the European Marine and Coastal Environment. Marine Board. Position Paper 9, march 2007.
- Frederiksen M., Edwards M., Richardson A.J., Halliday N.C., Wanless S. (2006) From plankton to top predators : bottom-up control of a marine food web across four trophic levels. Journal of Animal Ecology, 75, 1259-1268.
- Gobin A., Uljee I., Van Esch L., Engelen G., de Kok J., van der Kwast H., Hens M., Van Daele T., Peymen J., Van Reeth W., Overloop S., Maes F. (2009a) Landgebruik in Vlaanderen. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, NARA 2009, VMM, INBO.R.2009.20
- Gobin A., Van De Vreken P., Van Orshoven J., Keulemans W., Geers R., Diels J., Gulinck H., Hermij M., Raes D., Boon W., Muys B., Mathijs E. (2009b) Adaptatiemogelijkheden van de Vlaamse landbouw aan de klimaatverandering. Studie in opdracht van de afdeling Monitoring en Studie, departement Landbouw en visserij.
- ICES (2002) Report of the ICES/GLOBEC workshop on the Dynamics of Growth in cod. ICES Cooperative Research Report N°252, 97.

- IPCC (2001) Third Assessment Report 2001, Intergovernmental Panel for Climate Change.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis report, Intergovernmental Panel for Climate Change.
- KMI (2009) Oog voor het klimaat, Koninklijk Meteorologisch Instituut van België.
- Maesen L. (2009) Berekening overstromingsrisico's volgens meerdere faalmodi, Master thesis Burgerlijk Ingenieur Bouwkunde, Optie Civiele Techniek, K.U.Leuven, promotoren: P.Willems, J.Berlamont.
- Mertens T., Trouw K., Bluekens K., De Nocker L., Couderé K., Sauwer C., De Smedt P., Lewis C., Verwaest T., (2008) SAFECOast: Integrated master plan for Flanders future coastal safety. Coastal Division of the Flemish Community, Belgium.
- Meyvis L., Graré W., Dauwe W. (2003) Actualisatie van het SIGMAPLAN. Tijdschrift Water, september 2003, 11 p.
- Ntegeka V., Baguis P., Boukhris O., Willems P., Roulin E., (2008b) Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems. II. Study of rainfall and ETo climate change scenarios, Technisch rapport bij het CCI-HYDR project door K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica en KMI voor Federaal Wetenschapsbeleid, mei 2008, 104 p.
- Ntegeka V., Willems P. (2008a) Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems. III. Statistical analysis of historical rainfall, ETo and river flow series trends and cycles, Technisch rapport bij het CCI-HYDR project door K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica en KMI voor Federaal Wetenschapsbeleid, mei 2008, 36 p.
- Ntegeka V., Willems P. (2008b) 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, doi:10.1029/2007WR006471.
- Ntegeka V., Willems P. (2009) CCI-HYDR Perturbation Tool: a climate change tool for generating perturbed time series for the Belgian climate, handleiding versie januari 2009, K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica en KMI, januari 2009.
- Ntegeka V., Willems P., Baguis P., Roulin E. (2008a) Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems – Phase 1. Development of climate change scenarios for rainfall and ETo, Samenvattend rapport bij de Fase 1 van het CCI-HYDR project door K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica en KMI voor Federaal Wetenschapsbeleid, april 2008, 56 p.
- 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), 14 p.
- Peeters W. & Tops B. (2009) Water uit de kraan, evident toch. Het Ingenieursblad, JG 78, 3/2009, p. 24-30.
- Peperzak L. (2003) Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. Acta Oecologica, 24, s139-s144.
- Perry A.L., Low P.J., Ellis J.R. and Reynolds J.D. (2005) Climate shift and distribution shifts in Marine fishes. Science, 308.
- Philippart K., Anadon R., Danovaro R., Dippner J.W., Drinkwater K.F., Hawkins S.J., O'Sullivan G., Oguz T. and Reid P.C. (2007) Impacts of climate change on the European Marine and coastal Environment. In: Connolly N. (ed). Marine Board Position Paper: Marine Board, 83.
- Ponsar S., J. Ozer and D. Van den Eynde (2008) Impacts of climate change on the ecological parameters of the North Sea (literature study). Report prepared in the framework of the CLIMAR project for the Belgian Science Policy, Contract SD/NS/01A, Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Brussels, 37 pp.
- RIONED, 2009. Klimaatverandering, hevige buien en riolering, Visietekst Stichting RIONED, Ede, Nederland.
- Rijnsdorp A. (2008) Resolving climate impacts on fish stocks, Chapter 23 - Climate change and sole'.
- Schubert R., Schellnhuber H.-J., Buchman N., Epiney A., Griesshammer R., Kulessa M., Messner D., Rahmstorf S., Schmid J. (2006) The future oceans – warming up, rising high, turning sour. German Advisory Council on Global Change (WBGU).
- Staes J., Meire P., Willems P., Marbaix Ph., van Ypersele J-P (2009) SUDEM-CLI - Impact of climate change on river hydrology and ecology: A case study for interdisciplinary policy oriented research, Annual scientific report, April 2009.
- Tasker M.L.E. (2008) The effect of climate change on the distribution and abundance of marine species in the OSPAR Maritime Area. ICES Cooperative Research Report N°293, 45.

- Ullmann A., Monbaliu J. (2009) Changes in atmospheric circulation over the North Atlantic and sea-surge variations along the Belgian coast during the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 29.
- Vaes G., Bouteligier R., Luyckx G., Willems P., Berlamont J. (2004) Toelichting bij de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringssystemen. Rapport van de studie in opdracht van AMINAL/VMM Afdeling Water, april 2004.
- Van Boeckel D., Vandenbroucke P. (2008) Historische trends in de overstromingskansen in Vlaanderen, Master thesis Burgerlijk Ingenieur Bouwkunde, Optie Civiele Techniek, K.U.Leuven, promotoren: P.Willems, J.Berlamont.
- Van den Eynde D. (2007) Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities: CLIMAR, Impacts of climate change on the physical and chemical parameters of the North Sea, december 2007, 70 p.
- Van den Eynde D., De Sutter R., Maes F., Verwaest T., van Bockstaele E. (2008b) Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities: CLIMAR, Samenvattend rapport bij de Fase 1 van het CLIMAR project voor Federaal Wetenschapsbeleid, juli 2008, 33 p.
- Van den Eynde D., Francken F., Ponsar S. en Ozer J. (2008a) 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 zeewatertemperatuur.
- van den Hurk, B. et al. (2006) KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI, Scientific Report, WR 2006-01, 82 p.
- Van der Biest K., Verwaest T., Reyns J. en Mostaert F. (2009) CLIMAR: Deelrapport 2 - Kwantificatie van de secundaire gevolgen van de klimaatsverandering in de Belgische kustvlakte.
- Van Keeken O.A., van Hoppe M., Grift R.E. and Rijnsdorp A.D. (2007) Changes in the spatial distribution of North Sea plaice (*Pleuronectes platessa*) and implications for fisheries management. *Journal of Sea Research*, 57 (2-3):187-197.
- Van Lancker V., Du Four I., Fettweis M., Van den Eynde D., Devolder M., Francken F., Monbaliu J., Verwaest T., Janssens J., Degraer S., Houziaux J.-S., Vandenberghe H. and Goffin A. (2008) QUantification of Erosion/Sedimentation patterns to Trace the natural versus anthropogenic sediment dynamics (QUEST4D). Mid-term Report Year 1 & 2. Science for Sustainable Development. Brussels: Belgian Science Policy, 27pp.
- Vanderperren E. (2008) Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities. Case study – Fisheries Sector, Work document, 18/7/2008. Report prepared in the framework of the CLIMAR project for the Belgian Science Policy, Contract SD/NS/01A, ILVO – Institute for Agricultural and Fisheries Research, Animal Sciences – Fisheries, Oostende, 41 pp.
- Vanneuville W., Maddens R., Collard Ch., Bogaert P., De Maeyer Ph., Antrop M. (2006) Impact op mens en economie t.g.v. overstromingen bekeken in het licht van wijzigende hydraulische condities, omgevingsfactoren en klimatologische omstandigheden, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2006/02, UGent.
- Willems P. (2009) Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen, Eindrapport bij de studie voor de Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer, september 2009.
- Willems P., Boukhris O., Berlamont J., Blanckaert J., Van Eerdenbrugh K., Viaene P. (2007c) Impact van klimaatverandering op hydrologische extremen langs Vlaamse rivieren - testcase Dender, WATER, nr. 25, 55-60.
- Willems P., Boukhris O., Berlamont J., Van Eerdenbrugh K., Viaene P., Blanckaert J. (2007a) Impact van klimaatverandering op Vlaamse rivieren. *Het Ingenieursblad*, nr. 29, januari 2007, 28-33.
- Willems P., Ntegeka V., Berlamont J. (2007b) Analyse van trends en meerjarige schommelingen in de neerslagextremen op basis van de meer dan 100 jaar 10 minuten neerslag te Ukkel. *Rioleringswetenschap*, jaargang 7, nr. 26, juni 2007, 45-53.
- Willems P., Verwaest T., Vanneuville W., Berlamont J., Monbaliu J. (2008) Invloed van klimaatverandering in Vlaanderen. *Het Ingenieursblad*, nr.11-12 (dec.2008), 28-33.

Begrippen

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

Benthisch: refereert naar alles wat zich op of in de zeebodem bevindt.

Bresvorming: doorbraak van een dijk of een natuurlijke duinengordel.

Composietbui: Om een oplossing te bieden aan het gebrek aan passende ontwerpbuizen voor rioleringsberekeningen in Vlaanderen, werden in 1996 op basis van de nieuwe IDF-relaties ontwerpstormen ontwikkeld. Deze buizen werden zodanig opgesteld dat slechts één buis nodig is voor een welbepaalde terugkeerperiode of frequentie. Alle buiduren tussen 10 minuten en de maximale buiduur (minimaal gelijk aan de maximale concentratietijd in het rioolsysteem) zitten dus vervat in één enkele buis.

Convectie: verschijnsel waarbij warmte zich vertikaal voortplant (in de lucht, de oceaan ...).

Cryosfeer: de gebieden op aarde waar water voorkomt in de vorm van sneeuw, permafrost, pakijs of gletsjers.

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.

Stormopzethoogte: toename van de waterspiegel ten gevolge van windgolven.

Grid: regelmatig raster van hulplijnen om het positioneren en uitlijnen van elementen te vergemakkelijken.

Hydraulisch: met betrekking tot de waterstroming (vb. langs een rivier).

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

Hydrosfeer: al het water dat zich in vloeibare vorm op aarde bevindt, in de oceanen, zeeën, rivieren, meren, grondwater

Klimaat: gemiddelde 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).

Kwantiel: waarde waarmee een bepaalde kans op voorkomen kan geassocieerd worden.

Overstromingsrisico: gemiddelde jaarlijks te verwachten schade ten gevolge van overstromingen in een bepaald gebied. Dit risico wordt berekend als het product van de theoretische schade bij een bepaalde diepte van overstroming en de kans dat deze overstroming zich voordoet. Het risico wordt uitgedrukt in euro/(m².jaar).

Percentiel: waarde die met een bepaalde frequentie wordt overschreden.

Perturbatiefactor: factor verandering ten gevolge van klimaatverandering.

Risico: product van de kans op voorkomen en de bijhorende schade = gemiddelde verwachte schade per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd.

Runoff: afstroming van hemelwater in een rivierbekken (naar het oppervlaktewater, vb. rivier).

Schade: economische kost van de negatieve gevolgen van een éénmalig event.

Significante golfhoogte: een begrip gebruikt in de maritieme techniek en voor een deel ook in de civiele techniek, is de gemiddelde hoogte van de hoogste één-derde deel van de gemeten golven.

Terugkeerperiode: gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende overschrijdingen.

Tweede Algemene Waterpassing of TAW: vertikaal referentienetwerk van België in 1948 vastgelegd door het Militair Geografisch Instituut, voorganger van het Nationaal Geografisch Instituut. Het fundamenteel basispunt is een merkteken in de Koninklijke Sterrenwacht te Brussel op 100,174 m. De zeeniveaumetingen kunnen tegenover dit referentievlak worden uitgedrukt.

Afkortingen

CCI-HYDR: Acronym onderzoeksproject “Climate change impact on hydrological extremes in Belgium” van K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica en KMI voor Federaal Wetenschapsbeleid

ETo: evapotranspiratie

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

IPCC: Intergovernmental Panel for Climate Change

KMI: Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

ORBP: overstromingsrisicobeheerplannen

RCM: Regional Climate Model (regionaal klimaatmodel)

TAW: Tweede Algemene Waterpassing

VHA: Vlaamse Hydrografische Atlas

VN: Verenigde Naties

[**Terug naar Inhoudsopgave**](#)