

Kasteelpark Arenberg 40
3001 Heverlee (Leuven)

tel. 016 32 16 58
fax 016 32 19 89
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

bwk.kuleuven.be/hydr

Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in Antwerpen

Studie voor Stad Antwerpen



september 2015

Uitvoerders studie:

Prof. dr. ir. Patrick Willems (Hoogleraar stedelijke hydrologie en rivierkunde KU Leuven, coördinatie studie)

ir. Jan De Niel (wetenschappelijk medewerker KU Leuven)

ir. Hossein Tabari (wetenschappelijk medewerker KU Leuven)

Contactpersoon opdrachtgever:

Griet Lambrechts

Andere leden opvolgingsvergadering bij deze studie:

Iris Gommers (stad Antwerpen)

Rebecca Beeckman (stad Antwerpen)

Lieve Custers (stad Antwerpen)

Marcello Serrao (stad Antwerpen)

Michiel Van Herck (stad Antwerpen)

Michel Gerits (stad Antwerpen)

Bart Bruelemans (stad Antwerpen)

Karel Van Hoeylandt (Brandweer Antwerpen)

Elfried Anthonissen (Brandweer Antwerpen)

Eric de Deckere (Port of Antwerp)

Daan Ongkowitzjojo (POM Antwerpen)

Paul Robbrecht (POM Antwerpen)

Jan Ronsijn (Provincie Antwerpen)

Yves Goossens (Provincie Antwerpen)

Dirk Vandenbussche (Provincie Antwerpen)

Geert Wellens (Aquaflin & Riolink)

Michel Craninx (VMM-AOW)

Joost Dewelde (VMM-AOW)

Luc Vancraen (VMM-AOW)

Paul Vanderkimpfen (Waterbouwkundig Laboratorium)

Jiri Nossent (Waterbouwkundig Laboratorium)

Dirk Lauwaet (VITO)

Inhoud

1	Inleiding.....	11
2	Afbakening van het studiegebied.....	13
3	Neerslaggegevens.....	20
3.1	<i>Pluviograafgegevens.....</i>	<i>20</i>
3.2	<i>Radargegevens.....</i>	<i>23</i>
3.3	<i>Klimaatmodelresultaten.....</i>	<i>25</i>
3.3.1	<i>Broeikasscenario's.....</i>	<i>25</i>
3.3.2	<i>Klimaatmodellen en -simulaties.....</i>	<i>28</i>
4	Toegepaste methodiek.....	35
4.1	<i>Analyse ruimtelijke neerslagpatronen huidig klimaat.....</i>	<i>35</i>
4.2	<i>Analyse klimaatveranderingssignaal.....</i>	<i>35</i>
4.3	<i>Statistische neerschaling.....</i>	<i>36</i>
4.4	<i>Klimaatscenario's: Hoog-midden-laag, Nat-Gematigd-Droog.....</i>	<i>38</i>
4.5	<i>Neerslagproducten voor eindgebruikers.....</i>	<i>40</i>
5	Resultaten voor de regio Antwerpen - Ruimtelijke neerslagpatronen huidig klimaat.....	41
6	Resultaten voor de regio Antwerpen - Klimaatveranderingssignaal.....	59
6.1	<i>Neerslag.....</i>	<i>59</i>
6.1.1	<i>Algemeen.....</i>	<i>59</i>
6.1.2	<i>Maand- en seizoensgemiddelde neerslag.....</i>	<i>59</i>
6.1.3	<i>Droge periodes.....</i>	<i>63</i>
6.1.4	<i>Ruimtelijke variatie binnen het studiegebied.....</i>	<i>69</i>
6.1.5	<i>Extreme dagneerslag.....</i>	<i>69</i>
6.2	<i>Temperatuur.....</i>	<i>75</i>
6.2.1	<i>Algemeen.....</i>	<i>75</i>
6.2.2	<i>Maandgemiddelde temperatuur.....</i>	<i>75</i>
6.2.3	<i>Extreme dagtemperaturen.....</i>	<i>77</i>
6.2.4	<i>Hittegolven.....</i>	<i>77</i>
6.2.5	<i>Ruimtelijke variatie binnen het studiegebied.....</i>	<i>78</i>
6.3	<i>Evapotranspiratie.....</i>	<i>80</i>
6.3.1	<i>Maangemiddelde evapotranspiratie.....</i>	<i>80</i>
6.3.2	<i>Extreme evapotranspiratie.....</i>	<i>82</i>
6.4	<i>Wind.....</i>	<i>84</i>
7	Aangeleverde neerslagproducten.....	86
7.1	<i>Voor impactanalyse op overstromingen langs rioleringen.....</i>	<i>86</i>
	<i>Input en vraagstelling Riolink.....</i>	<i>86</i>
	<i>Werkwijze en output.....</i>	<i>86</i>
7.2	<i>Voor impactanalyse op overstromingen langs waterlopen.....</i>	<i>88</i>
	<i>Input en vraagstelling Provincie Antwerpen.....</i>	<i>88</i>
	<i>Werkwijze en output.....</i>	<i>88</i>
	<i>Input en vraagstelling Waterbouwkundig Laboratorium.....</i>	<i>91</i>
	<i>Werkwijze en output.....</i>	<i>91</i>

	Input en vraagstelling Vlaamse Milieumaatschappij.....	92
	Werkwijze en output	92
8	Impactanalyses	93
8.1	<i>Riolink: Impact op overstromingskansen langs het rioleringsstelsel van de Stad Antwerpen</i>	<i>93</i>
8.2	<i>Ramses-Cities: Hoog-resolutie oppervlakteafstromingsmodel Stad Antwerpen</i>	<i>101</i>
8.3	<i>Waterbouwkundig Laboratorium: Impact op gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta - KBR</i>	<i>105</i>
8.4	<i>Lopende impactstudies waterlopen</i>	<i>107</i>
8.5	<i>Impact op riooloverstortfrequenties / ontwerpwaarden bufferbekkens</i>	<i>108</i>
8.6	<i>Zeespiegelstijging en Schelde</i>	<i>109</i>
9	Managementsamenvatting.....	110
9.1	<i>Inleiding / doel van de studie</i>	<i>110</i>
9.2	<i>Gemodelleerde klimaatveranderingssignalen</i>	<i>110</i>
9.3	<i>Ruimtelijke variaties in extreme regenval.....</i>	<i>111</i>
9.4	<i>Impactanalyse van de klimaatwijziging op riolering- en waterloopoverstromingen</i>	<i>112</i>
10	Beleidsaanbevelingen	113
10.1	<i>Tegengaan toename in hydrologische extremen</i>	<i>113</i>
10.2	<i>Klimaatadaptatie: Nu reeds rekening houden met de klimaatwijziging op een slimme manier</i>	<i>114</i>
10.3	<i>Een geïntegreerde benadering van ruimtelijke planning, stadsontwerp en stedelijk waterbeheer.....</i>	<i>122</i>
10.4	<i>Inzetten op een meerlaagse veiligheid</i>	<i>127</i>
10.5	<i>Verder monitoren van de het neerslagklimaat</i>	<i>128</i>
11	Bijlagen	129
	<i>Bijlage A. Pluviografennetwerk Stad Antwerpen.....</i>	<i>129</i>
	<i>Bijlage B. Illustraties van enkele recente pluviale overstromingen in de Stad Antwerpen</i>	<i>142</i>
	<i>Bijlage C. Aangeleverde neerslagproducten.....</i>	<i>147</i>
	<i>Bijlage D. Powerpoint-presentaties.....</i>	<i>148</i>
	<i>Bijlage E. Rapporten impactanalyses eindgebruikers.....</i>	<i>149</i>
12	Referenties	150

Lijst van figuren

Figuur 2-1: Voorstelling studiegebied.....	14
Figuur 2-2: Afbakening stroomgebieden van de waterlopen in de impactstudies (door Provincie Antwerpen & POM Antwerpen, VMM, WL).....	15
Figuur 2-3: Afbakening stroomgebieden van de Benedenvliet en de Struisbeek inclusief riolering (impactstudie VMM)	16
Figuur 2-4: De rioleringsstelsels in de stroomgebieden van de Benedenvliet en de Struisbeek (impactstudie VMM)	16
Figuur 2-5: Afbakening stroomgebieden van de Barbierbeek, Noordelijke Cuesta en Zuidelijke Cuesta (gevalstudie Barbierbeek – Wase cuesta – KBR door het WL) .	17
Figuur 2-6: Bodemgebruiksk kaart van het studiegebied	18
Figuur 2-7: Groene vegetatie binnen het studiegebied op basis van de NDVI index.....	18
Figuur 2-8: Digitaal hoogtemodel van het studiegebied (hoogte in m TAW)	19
Figuur 3-1: Locaties van de pluviografen in het studiegebied	21
Figuur 3-2: Beschikbaarheid van de pluviograafgegevens voor een tijdsresolutie van 15 minuten (boven) en 1 uur (onder)	22
Figuur 3-3: Radarlocaties in België (bron: http://radar.meteo.be/en/1682983-In+Belgium.html).....	24
Figuur 3-4: Stralingsforcering van de oude SRES-scenario's in vergelijking met de nieuwe RPC-scenario's (bron: IPCC, 2013)	26
Figuur 3-5: Wereldwijde CO2 uitstoot per RCP-scenario, samen met de historische waarden tot 2013 (bron: Peters et al., 2013).....	28
Figuur 4-1: Simulatieresultaten van de verschillende klimaatmodellen gecombineerd met statistische neerschaling om te komen tot specifieke klimaatscenario's voor het studiegebied van de Antwerpse regio	37
Figuur 4-2: Aantal simulatieresultaten neemt af met de resolutie van de klimaatmodellen	38
Figuur 4-3: Scenario's nat-gematigd-droog voor impactanalyse op hydrologische extremen	39
Figuur 5-1: Ruimtelijke variatie in 15-minuten neerslagintensiteit in functie van terugkeerperiode, voor alle radargridcellen boven de regio Antwerpen, o.b.v. de periode 2008-2014	41
Figuur 5-2: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen (T>1j, 15 minuten)	42
Figuur 5-3: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen (T>1j, 1 uur)	43
Figuur 5-4: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen (T>1j, 1 dag)	43
Figuur 5-5: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen, gemiddeld per deelstroomgebied waterlopen (T>1j, 15 minuten).....	44
Figuur 5-6: Vergelijking ruimtelijke variatie in 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode volgens de radargegevens, met de pluviograafgegevens te Kapellen, Wilrijk, Melsele en Stekene, o.b.v. de periode 2008-2014.....	45
Figuur 5-7: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor deelstroomgebieden met hoge en lage intensiteiten (deelstroomgebieden nr. 62 en 20) en gemiddeld voor alle deelstroomgebieden,	

o.b.v. de periode 2008-2012, met de 10-minuten neerslagintensiteiten te Ukkel voor de periode 1898-2012.....	46
Figuur 5-8: Relatieve locatie van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen t.o.v. de deelstroomgebieden met hogere en lagere neerslagkwantielen.	46
Figuur 5-9: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de pluviografen P3 en P12 van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen, met de ruimtelijke spreiding voor alle deelstroomgebieden, o.b.v. de periode 1994-2005.	47
Figuur 5-10: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de pluviografen te Melsele, Kapellen en Wilrijk, met de ruimtelijke spreiding voor alle deelstroomgebieden, o.b.v. de beschikbare meetperioden.....	48
Figuur 5-11: Vergelijking van de uurlijkse neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de KMI-pluviografen te Deurne versus Ukkel, o.b.v. de gemeenschappelijke periode 1965-2012 versus de periode vanaf 1898 te Ukkel.	49
Figuur 5-12: Vergelijking van de IDF-curven voor de pluviograaf P3 van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen voor tijdsduren tussen 15-minuten en 1 dag, met deze te Ukkel, o.b.v. de gemeenschappelijke periode 1994-2002 versus de periode 1901-2000 te Ukkel.....	50
Figuur 5-13: Vergelijking van de ruimtelijke variaties in extreme neerslagintensiteiten met de ruimtelijke variaties in verstedelijking (kaart groene vegetatie rechts boven) en topografie (kaart digitaal hoogtemodel rechts onder).	51
Figuur 5-14: Huidige ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen (T = 2 jaar, 15 minuten)	52
Figuur 5-15: Huidige ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen (T = 5 jaar, 15 minuten)	52
Figuur 5-16: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio (T = 2 jaar, 15 minuten).....	54
Figuur 5-17: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio (T = 5 jaar, 15 minuten).....	55
Figuur 5-18: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio (T = 20 jaar, 15 minuten).....	56
Figuur 5-19: Ondergrens (linker-deelfiguur), mediaan (midden-deelfiguur) en bovengrens (rechter-deelfiguur) van het 95%-betrouwbaarheidsinterval op de ruimtelijke variatie in neerslagextremen gebruikt aan de basis van de hypothesetoetsing (T>1j, 15 minuten)	57
Figuur 5-20: Deelstroomgebieden waarvoor de positieve of negatieve afwijkingen in extreme neerslagintensiteiten statistisch significant zijn (20% significantieniveau, T>1j, 15 minuten).....	58
Figuur 6-1: Verandering in maandgemiddelde neerslag	60
Figuur 6-2: Verandering in maandgemiddelde neerslag per RCP scenario	61
Figuur 6-3: Cumulatieve neerslag per seizoen.....	62

Figuur 6-4: Verandering van het aantal natte dagen per maand	63
Figuur 6-5: Verandering van het aantal natte dagen per maand en per RCP scenario ...	64
Figuur 6-6: Natte vs. droge dagen voor zomer- en winterseizoen.....	66
Figuur 6-7: Verandering in lengte (duurtijd) van droge periodes	67
Figuur 6-8: Lengte van droge periodes met $T = 30j$	67
Figuur 6-9: Lengte van droge periodes met $T = 5j$	68
Figuur 6-10: Lengte van droge periodes met $T = 2j$	68
Figuur 6-11: Ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen, $T = 5j$, 15-min (van boven tot onder: Huidig klimaat, 2030, 2050 en 2100)	70
Figuur 6-12: Extreme dagneerslag in functie van terugkeerperiode, voor zomer en winter	71
Figuur 6-13: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met $T = 30j$	72
Figuur 6-14: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met $T = 5j$	73
Figuur 6-15: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met $T = 2j$	74
Figuur 6-16: Absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur.....	75
Figuur 6-17: Absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur per RCP scenario	76
Figuur 6-18: Tijdsevolutie van extreme dagtemperaturen	77
Figuur 6-19: Aantal hittegolven per jaar	78
Figuur 6-20: Hitte-eiland effect (2013) (bron:VITO, 2013).....	79
Figuur 6-21: Hitte-eiland effect (2030) (bron: VITO, 2013).....	79
Figuur 6-22: Verandering in maandgemiddelde ETP	80
Figuur 6-23: Verandering in maandgemiddelde ETP per RCP scenario	81
Figuur 6-24: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 30j$	82
Figuur 6-25: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 5j$	82
Figuur 6-26: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 2j$	83
Figuur 6-27: Verandering in maandgemiddelde windsnelheid	84
Figuur 6-28: Verandering in maandgemiddelde windsnelheid per RCP scenario.....	85
Figuur 7-1: Composietbuizen voor terugkeerperioden van 5 en 20 jaar, voor de huidige klimaatcondities en het hoog klimaatscenario voor 2030	87
Figuur 7-2: Perioden waarvoor de klimaatperturbaties werden doorgevoerd voor de verschillende deelstroomgebieden voor de Provincie Antwerpen	90
Figuur 8-1: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor Vlaamse composietbuizen o.b.v. Ukkel (links) en de specifieke composietbuizen (rechts) voor de regio Antwerpen voor het huidig klimaat	94
Figuur 8-2: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor huidig klimaat (links boven) en toekomstig klimaat 2030 (rechts boven), 2050 (links onder) en 2100 (rechts onder) voor gemiddeld klimaatscenario	95
Figuur 8-3: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor huidig klimaat (links boven) en toekomstig klimaat 2030 (rechts boven), 2050 (links onder) en 2100 (rechts onder) voor hoog klimaatscenario	96
Figuur 8-4: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor de Vlaamse composietbuizen o.b.v. Ukkel voor het huidig klimaat + vergelijking met recente overstromingslocaties (zwarte punten)	99

Figuur 8-5: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor composietbuizen voor de regio Antwerpen voor het huidig klimaat + vergelijking met recente overstromingslocaties (zwarte punten incl. aanduiding overstromingsdatums)...	100
Figuur 8-6: Aantal recente historische overstromingen die gelokaliseerd zijn in zones die volgens het rioleringsmodel een niet-kritische, lage, matige, hoge en zeer hoge criticiteit hebben + vergelijking tussen de modelresultaten o.b.v. de Vlaamse composietbuizen o.b.v. Ukkel (linker balkjes) en de specifieke composietbuizen (rechter balkjes) voor de regio Antwerpen voor het huidig klimaat.....	101
Figuur 8-7: Ruimtelijke gegevens gebruikt in de CityCAT-oppevlakteafstromingsmodellering voor de Stad Antwerpen	102
Figuur 8-8: Overstromingsdiepte gesimuleerd door het CityCAT-oppevlakteafstromingsmodel voor een testrun op de Stad Antwerpen	103
Figuur 8-9: Overstromingsdiepte gesimuleerd door het CityCAT-oppevlakteafstromingsmodel voor een testrun op de Stad Antwerpen: ingezoomd op een deelgebied	104
Figuur 8-10: Situering van de polders van KBR als onderdeel van het oorspronkelijk Sigmaplan	105
Figuur 10-1: Duurzaam stedelijk waterbeheer zet best in op een groot aantal, kleine/goedkope en duurzame, oorzaak-wegnemende opwaartse bronmaatregelen i.p.v. een beperkt aantal, dure, technische maatregelen in of afwaarts het stedelijk waterafvoersysteem.....	116
Figuur 10-2: Ladder van stappen voor een meest duurzaam stedelijk waterbeheer	117
Figuur 10-3: Voorbeelden van lokale-opwaartse berging en infiltratiemogelijkheden als bronmaatregelen en kernelementen in duurzaam stedelijk waterbeheer	118
Figuur 10-4: Groene trambanen in de Mercatorstraat te Antwerpen, als voorbeeld van bronmaatregel	118
Figuur 10-5: Waterdoorlatende parkeerstroken (nu nog vaak gecementeerd) en groene voegen of grasdallen als mogelijkheden voor waterdoorlatende verharding	119
Figuur 10-6: Hol i.p.v. bol aanleggen van de straat vermeerderd het kombergingsvermogen van de straat en vermindert daardoor de kans op schade bij het optreden van water op straat	119
Figuur 10-7: Regenwaterberging in verlaagde sportterreinen	120
Figuur 10-8: Regenwaterberging in stadspaleinen: de waterpaleinen in Rotterdam	120
Figuur 10-9: Realiseren van bijkomende opwaartse berging en infiltratie door doordacht aanleggen van lokale depressies in openbaar terrein, vb. wadi's, als voorbeeld van bronmaatregelen en kernelementen in duurzaam stedelijk waterbeheer	121
Figuur 10-10: Wijkontwikkeling Nieuw Zuid, Antwerpen: Hemelwater volledig bufferen en maximaal infiltreren op de site	121
Figuur 10-11: Andere voorbeelden van lokale opwaartse berging en infiltratie uit andere landen.....	122
Figuur 10-12: Identificatie van groene zones in de stad die in aanmerking komen voor regenwaterberging en –infiltratie; voorbeeld Stad Turnhout (Nolf et al., 2012; De Vleeschauwer et al., 2012, 2015)	123
Figuur 10-13: Voorbeeld van mogelijkheid tot aangepaste ruimtelijke inrichting van een groene zone in de stad Turnhout: recreatie & regenwaterberging en –infiltratie combinerend (Nolf et al., 2012; De Vleeschauwer et al., 2012, 2015)	123

Figuur 10-14: Voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een riviervallei in een hoog urbaan gebied	125
Figuur 10-15: Andere voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een riviervallei in een hoog urbaan gebied	126
Figuur 10-16: Algemene principes meerlaagse waterveiligheid (MLWV) (bron: CIW) ...	127

Lijst van tabellen

Tabel 3-1: Aantal beschikbare klimaatmodelruns per RCP-scenario	30
Tabel 3-2: Klimaatmodelruns gebruikt voor de neerslaganalyse.....	31
Tabel 3-3: Klimaatmodelruns gebruikt voor de temperatuuranalyse.	31
Tabel 3-4: Klimaatmodelruns gebruikt voor de ETP-analyse.	32
Tabel 8-1: Wijziging maximale waterstand (in cm t.o.v. huidig klimaat).....	106
Tabel 8-2: Ontwerpwaarden voor buffervoorzieningen, aangepast aan de klimaatscenario's	108

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de resultaten van de studie “Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in Antwerpen” die door KU Leuven werd uitgevoerd in opdracht van de Stad Antwerpen. De studie behandelt de modellering van huidige en toekomstige neerslagpatronen in de Antwerpse regio t.a.v. relevante klimaatscenario's voor toepassing van het berekenen van toekomstige wateroverlast t.a.v. neerslag en lokale rivieroverstromingen.

Deze studie verliep in samenwerking met een aantal overheidsinstanties, bedrijven en onderzoeksinstanties, die zich engageerden om de neerslagmodelleringsresultaten bekomen in de studie te simuleren in hun hydrologische en hydraulische modellen om de impact te kwantificeren van de huidige en toekomstige neerslag op de overstromingscondities langs rioleringen en waterlopen in de regio. Dit gebeurde voor bepaalde instanties in het kader van een lopend project. Het gaat om de volgende instanties:

- Riolink: riolering Stad Antwerpen
- Provincie Antwerpen en Provinciale Ontwikkelingsmaatschappij Antwerpen (POM): stroomgebied van het Klein Schijn: i.k.v. conceptstudie waterhuishouding i.k.v. het Kaderplan Albertkanaal, incl. Klein Schijn
- VMM, Afdeling Operationeel Waterbeheer:
 - o stroomgebied van het Groot Schijn, i.k.v. haalbaarheidsstudie gravitaire afloop Groot Schijn
 - o stroomgebied van de Benedenvliet inclusief Struisbeek, i.k.v. impactstudies op het gecombineerd hydrologisch model (waterlopen + riolen) van het stroomgebied
- Waterbouwkundig Laboratorium (WL): stroomgebied van de Barbierbeek inclusief Noordelijke en Zuidelijke Cuesta i.k.v. gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta – KBR

Verder werd er een link gelegd met twee EU-projecten (Ramses-Cities en Decumanus) waarin de Stad Antwerpen betrokken is, en die raakvlakken hebben met deze studie. Beide EU-projecten handelen over klimaatadaptatie, met de Stad Antwerpen als één van de gevalstudies. Het project Ramses - Reconciling Adaptation, Mitigation and Sustainable Development for Cities is een EU-project onder het 7^{de} Kaderprogramma (<http://www.ramses-cities.eu/en>). In dat project is VITO (Dr. Dirk Lauwaet) de Belgische partner. The University of Newcastle (Prof. Alistair Ford) bouwt een hoog-resolutie topografisch oppervlakteafstromingsmodel op voor bepaalde steden waaronder de Stad Antwerpen. Dit model kan enerzijds gebruik maken van de neerslagmodelleringsresultaten van ons project. Anderzijds laat dit hoog-resolutie neerslagafstromingsmodel toe om de hydrologische component van het hydraulisch rioleringsmodel van Riolink voor de Stad Antwerpen te verfijnen.

In het project Decumanus - Development and Consolidation of Geospatial Sustainability Services for Adaptation of Environmental and Climate Change Urban Impacts, dat tevens door het EU 7^{de} Kaderprogramma wordt gefinancierd, wordt door UPM Madrid (Prof. Roberto San Jose) een zeer fijnmazig lokaal klimaatmodel gesimuleerd, o.a. ook voor het gebied van de Stad Antwerpen. Dit gebeurt voor een uitzonderlijk hoge ruimtelijke resolutie

van 200 m x 200 m. Omdat deze resolutie hoger is dan deze van de tot nog toe beschikbare globale en regionale klimaatmodellen, zijn zulke modelresultaten zeer bruikbaar als bijkomende klimaatmodeldata.

Hierna wordt in Deel 2 eerst het studiegebied toegelicht en in Deel 3 de neerslaggegevens die beschikbaar waren voor deze studie, zowel m.b.t. het huidige als het toekomstige klimaat. Deel 5 en Deel 6 beschrijven daarna hoe de modellering van de huidige en toekomstige neerslagpatronen voor de regio Antwerpen tot stand is gekomen. Vooraleer over te gaan tot die resultaten, wordt in Deel 4 eerst de algemene methodiek beschreven: hoe werden de beschikbare neerslaggegevens gebruikt om de huidige neerslagpatronen in kaart te brengen, en hoe werd er overgegaan van de beschikbare klimaatmodellen conform het laatste (vijfde) klimaat rapport (*AR5*) van het Intergovernmental Panel on Climate Change (*IPCC*), naar relevante klimaatscenario's voor de regio Antwerpen.

Verder geeft Deel 7 weer welke neerslagproducten er aan de verschillende eindgebruikers (overheidsinstanties, bedrijven en onderzoeksinstituten) aangeleverd werden. Die neerslagproducten dienen als input voor verschillende impactsanalyses op overstromingen, zowel langs rioleringen als waterlopen. Deel 8 beschrijft de resultaten van deze (en andere) impactsanalyses.

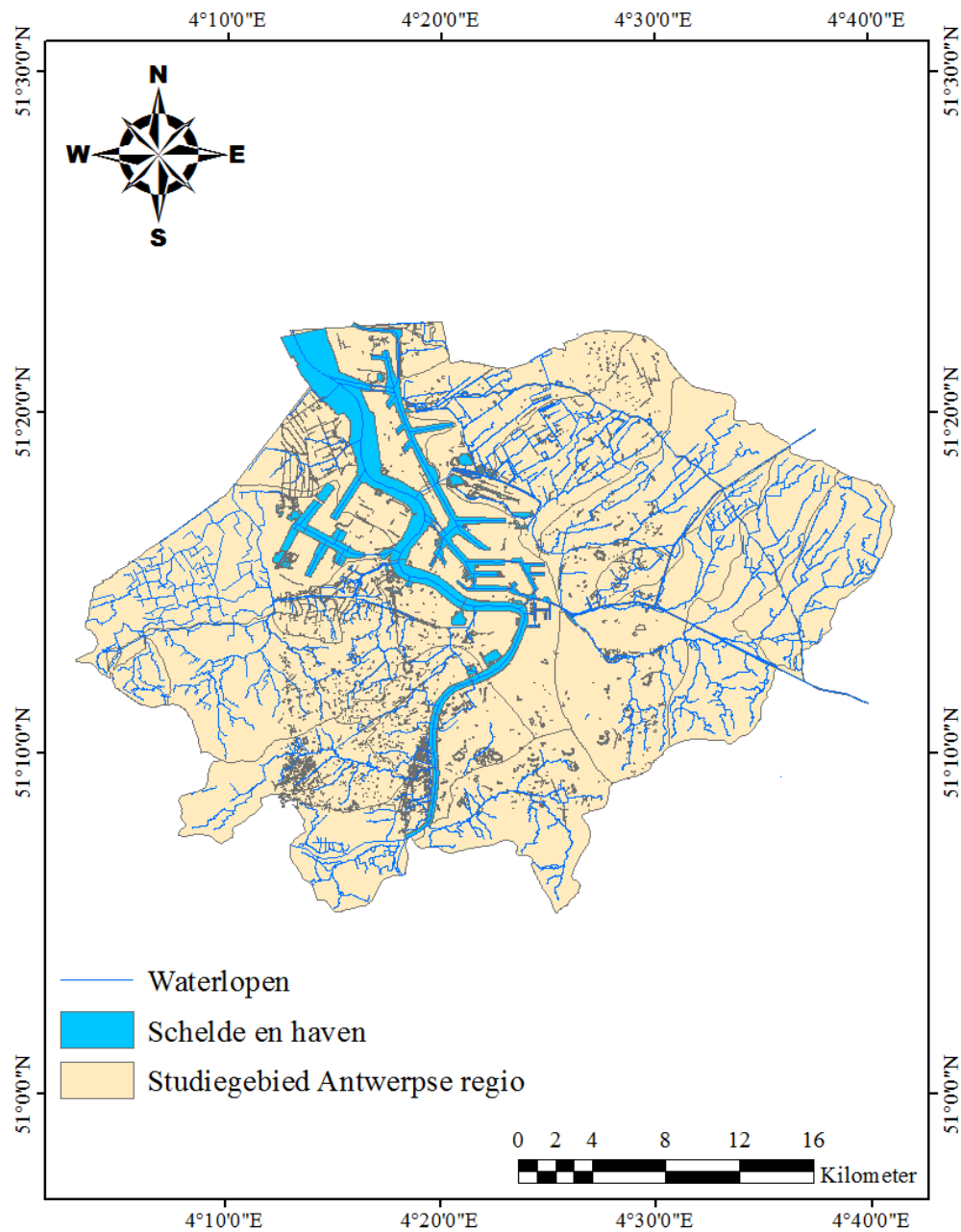
Al het voorgaande wordt tenslotte in Deel 9 geconsolideerd tot een bondige managementsamenvatting en in Deel 10 uitgebreid met een aantal beleidsaanbevelingen.

2 **Afbakening van het studiegebied**

Het studiegebied voor deze studie werd afgebakend zoals in Figuur 2-1. Het omvat het rioleringsstelsel van de Stad Antwerpen en de stroomgebieden van de waterlopen Benedenvliet & Struisbeek, Klein & Groot Schijn en de Barbierbeek. Dit studiegebied werd gekozen na overleg met de opdrachtgever en de leden van de stuurgroep, vooral met het oog op de impactanalyse voor:

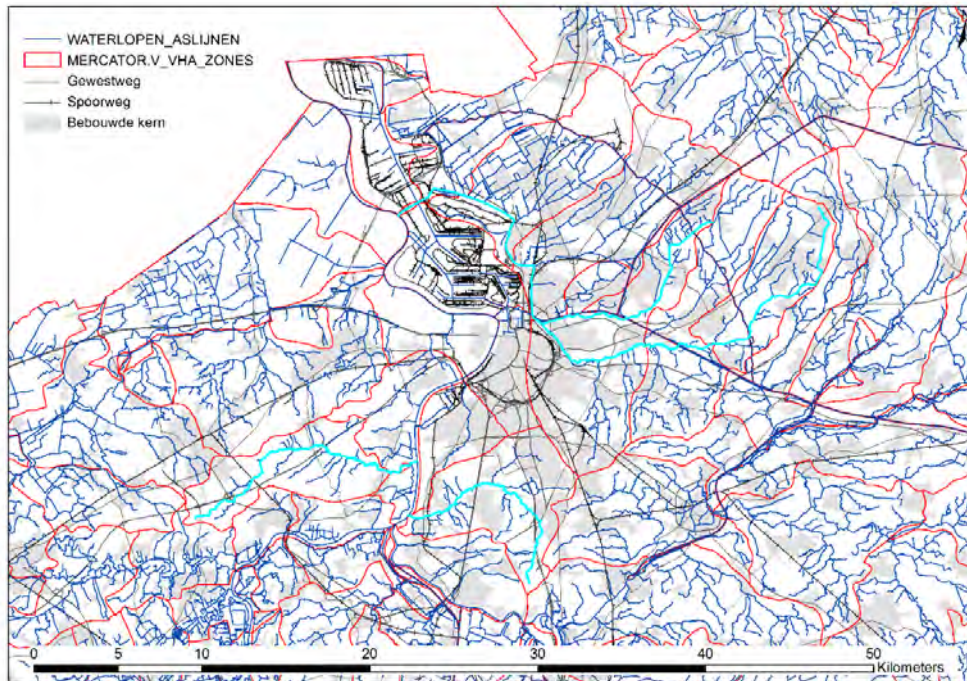
- de riolering van de Stad Antwerpen (door Riolink);
- het stroomgebied van het Klein Schijn (door de Provincie Antwerpen en de POM Antwerpen);
- het stroomgebied van het Groot Schijn (door VMM - Afdeling Operationeel Waterbeheer);
- het stroomgebied van de Benedenvliet inclusief Struisbeek inclusief de interactie met de riolering in het gebied (door VMM - Afdeling Operationeel Waterbeheer);
- de gevalstudie Barbierbeek – Wase cuesta – KBR (door het Waterbouwkundig Laboratorium).

De afbakening van het studiegebied hield dus rekening met de beoogde toepassingen: impactanalyse op riolering en lokale waterlopen. Voor de rioleringstoepassing zijn neerslaggegevens nodig voor het ganse rioleringsstelsel; voor de waterlooptoepassing is dit het ganse stroomgebied van de waterloop.

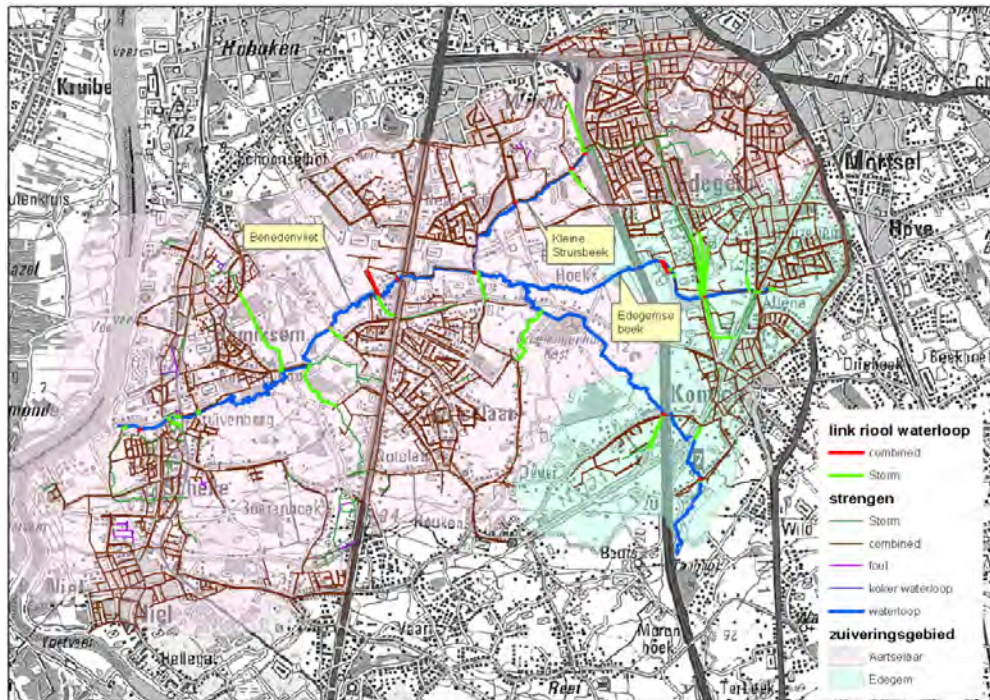


Figuur 2-1: Voorstelling studiegebied

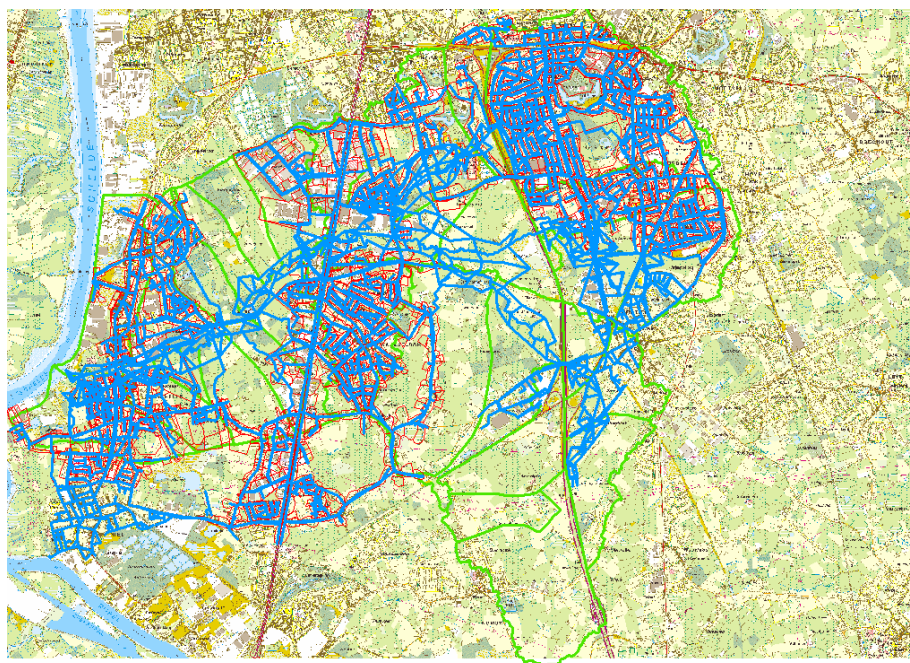
De figuren hierna geven de meer precieze afbakening weer van de stroomgebieden van de waterlopen in de verschillende impactstudies: Figuur 2-2 voor al deze stroomgebieden samen, Figuur 2-3 en Figuur 2-4 voor de gedetailleerde weergave van de gemodelleerde waterlopen en riolering voor de gevalstudie van de Benedenvliet en de Struisbeek (VMM); Figuur 2-5 voor de gevalstudie van Barbierbeek – Wase cuesta – KBR (WL).



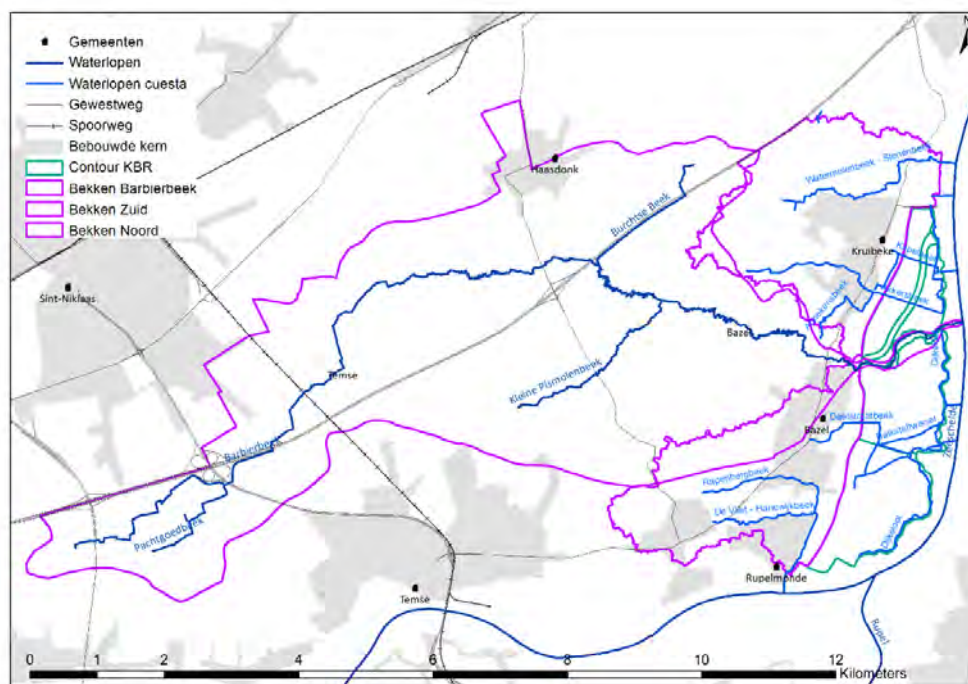
Figuur 2-2: Afbakening stroomgebieden van de waterlopen in de impactstudies (door Provincie Antwerpen & POM Antwerpen, VMM, WL)



Figuur 2-3: Afbakening stroomgebieden van de Benedenvliet en de Struisbeek inclusief riolering (impactstudie VMM)



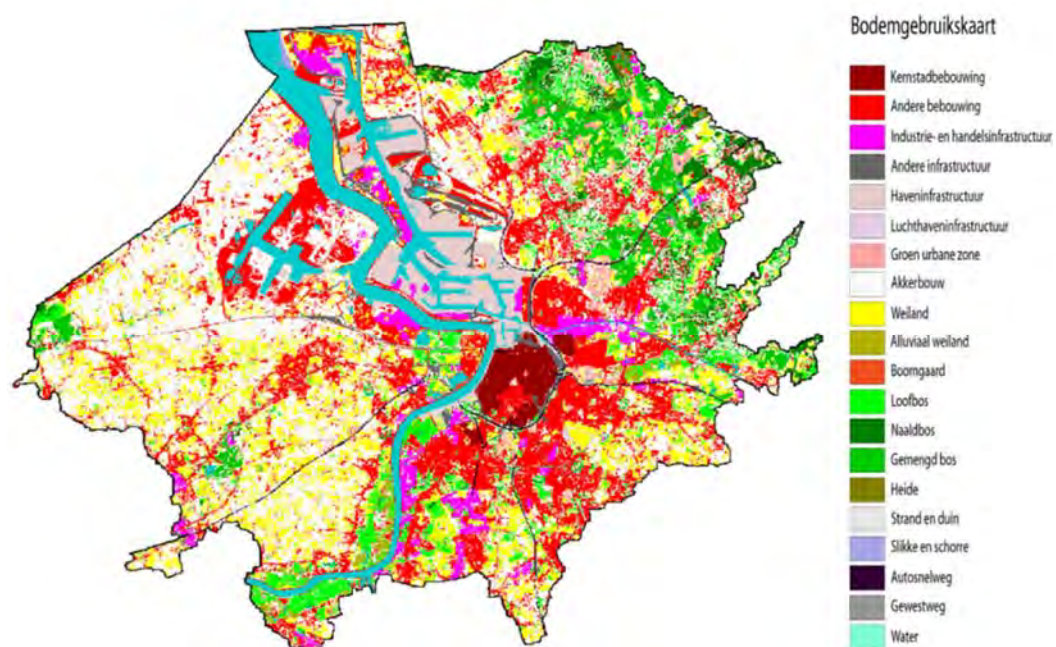
Figuur 2-4: De rioleringsstelsels in de stroomgebieden van de Benedenvliet en de Struisbeek (impactstudie VMM)



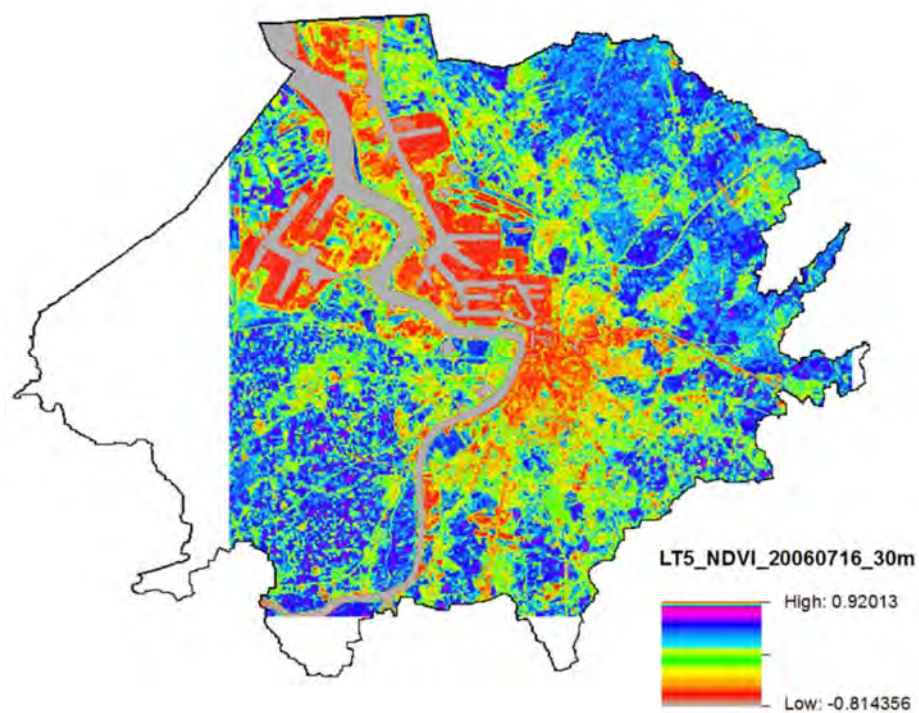
Figuur 2-5: Afbakening stroomgebieden van de Barbierbeek, Noordelijke Cuesta en Zuidelijke Cuesta (gevalstudie Barbierbeek – Wase cuesta – KBR door het WL)

Met het oog op de analyse van de ruimtelijke spreiding van de neerslag en de statistische neerschaling, worden hierna een aantal geografische eigenschappen van het studiegebied grafisch weergegeven:

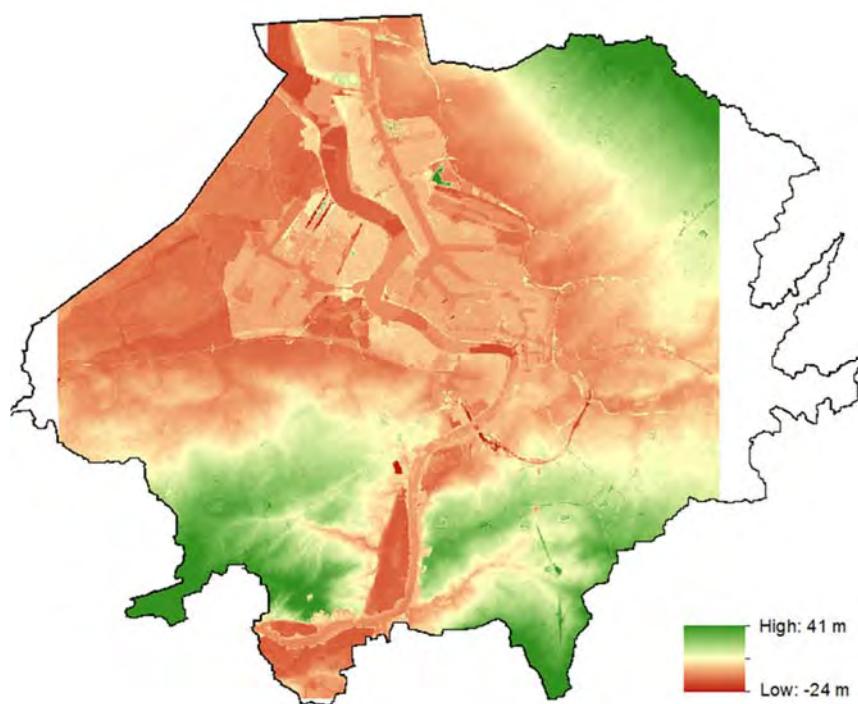
- Figuur 2-6: bodemgebruik;
- Figuur 2-7: groene vegetatie;
- Figuur 2-8: digitaal hoogtemodel.



Figuur 2-6: Bodemgebruiksk kaart van het studiegebied



Figuur 2-7: Groene vegetatie binnen het studiegebied op basis van de NDVI index



Figuur 2-8: Digitaal hoogtemodel van het studiegebied (hoogte in m TAW)

3 Neerslaggegevens

De neerslaggegevens gebruikt in deze studie bestaan enerzijds uit pluviograaf- en radarmetingen voor het huidige klimaat, en anderzijds uit simulatieresultaten van klimaatmodellen voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat. De simulatieresultaten van de klimaatmodellen werden gebruikt om het klimaatveranderingssignaal af te leiden door de resultaten voor het toekomstig klimaat “relatief” te vergelijken met deze voor het huidige klimaat. Aangezien de “absolute” waarden van de klimaatmodelresultaten minder nauwkeurig zijn dan pluviograaf- en radarwaarnemingen, werden deze laatste als referentie gebruikt voor het huidige klimaat.

3.1 Pluviograafgegevens

Figuur 3-1 toont de beschikbare pluviografen in het studiegebied. Het gaat om volgende pluviografen:

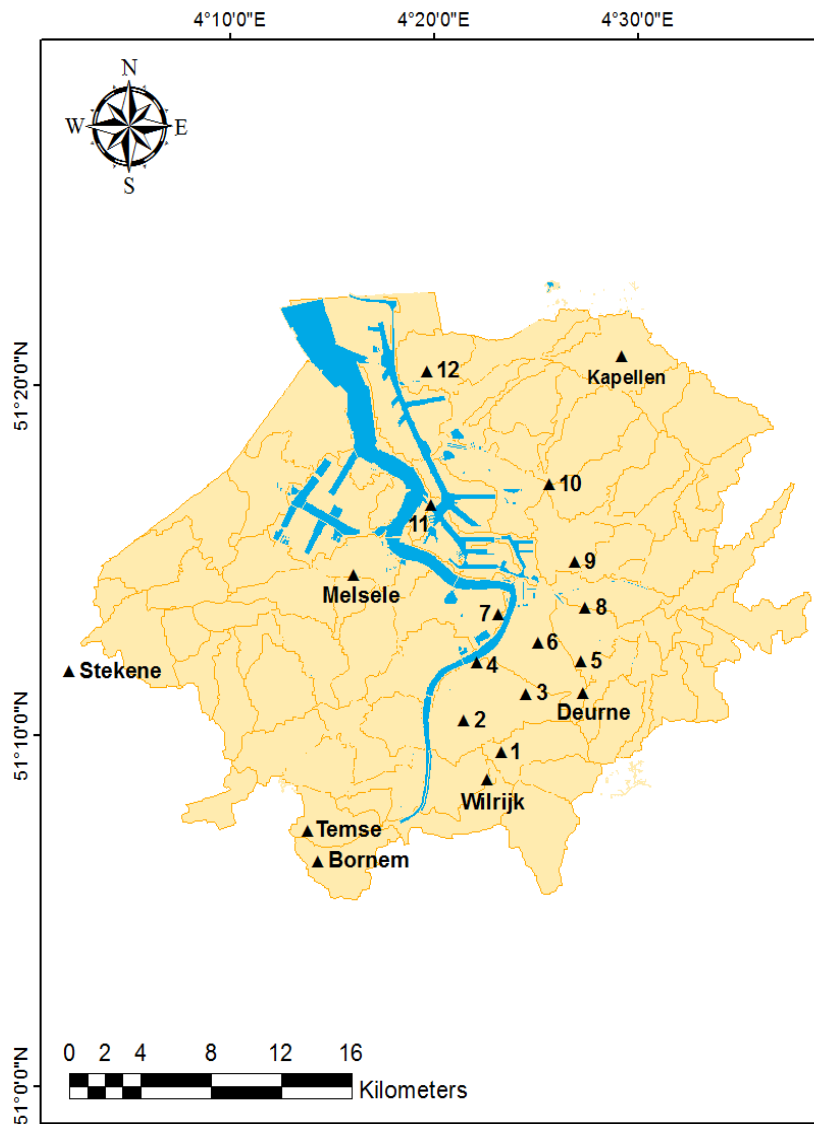
- 12 pluviografen, beheerd door de Stad Antwerpen (1-12). Er zijn meetgegevens beschikbaar vanaf 1994, met een zeer hoge tijdsresolutie van 1 minuut, en een neerslagresolutie van 0.2 mm. De neerslaggegevens van dit uniek netwerk van pluviografen met hoge ruimtelijke dichtheid werd eerder door de uitvoerder van deze studie (KU Leuven – Afdeling Hydraulica) gebruikt om de statistische eigenschappen van fijnschalige ruimtelijke spreiding van neerslag te analyseren en een stochastische ruimtelijke neerslaggenerator voor Vlaanderen af te leiden (Willems, 2001a). Ook werden deze gegevens gebruikt om de neerslaginvoeronzekerheid in hydrologische modellen in te schatten (Willems, 2001b). Zie Bijlage A voor de details bij deze 12 pluviografen, waaronder de locatie en kalibratiegegevens.

Een aantal van de pluviografen van dit netwerk zijn nog operationeel, maar een aantal niet meer. Bovendien worden de neerslagmetingen vanaf 2008 niet meer systematisch gecontroleerd en gearchiveerd. Analyse van de beschikbare meetgegevens gaf aan dat de periode 1994-2005 bruikbaar was. Binnen deze periode zijn er een aantal ontbrekende periodes per pluviograaf, maar deze zijn beperkt. Na 2005 zijn er zeer veel ontbrekende periodes, waardoor de gegevens minder bruikbaar zijn voor verdere analyse na dat jaartal.

- 4 pluviografen, beheerd door de VMM (Kapellen, Melsele, Wilrijk en Stekene). Er zijn meetgegevens beschikbaar voor de periode 2004-2014, met een tijdstap van 15 minuten. Ook deze hebben een aantal ontbrekende periodes per pluviograaf, maar deze zijn beperkt.
- 2 pluviografen, beheerd door het Hydrologische Informatiecentrum (HIC) van de Vlaamse Overheid (Temse en Bornem). Er zijn metingen beschikbaar voor 2007-2014, voor een uurlijkse tijdstap, opnieuw met een aantal ontbrekende periodes per pluviograaf.

- 1 pluviograaf, beheerd door het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) (Deurne). Er zijn volledige meetgegevens beschikbaar van deze studie voor de periode 1965-2005, voor een uurlijkse tijdstap.

In de verdere analyse (zie Deel 4 en Deel 5) werden de neerslaggegevens gebruikt bij drie verschillende tijdstappen: 15 minuten, 1 uur en 1 dag. Hoe groter de tijdstap, hoe meer pluviografen er beschikbaar waren (zie Figuur 3-2). Merk op dat alle pluviografen meetgegevens beschikbaar hebben bij een tijdstap van 15 minuten, uitgezonderd deze beheerd door het KMI en het HIC, waarvoor enkel uurlijkse waarden beschikbaar waren van deze studie.



Figuur 3-1: Locaties van de pluviografen in het studiegebied

Pluvio	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
P1	0.5	1	1	1	1	1	1	0.5	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0.5	1	1	1	1	1	1	0	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0.5	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0.5	1	1	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P12	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kapellen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Melsela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Stekene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Wilrijk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Aantal	5.5	12	12	12	12	11	8	6	4.5	4	7	9	1	1	3	3	4	4	4	4	4

Pluvio	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
P1	0.5	1	1	1	1	1	1	0.5	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0.5	1	1	1	1	1	1	0	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0.5	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0.5	1	1	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	0.5	1	1	1	1	1	1	0.5	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P12	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kapellen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Melsela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Stekene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Wilrijk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Bornem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Temse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1	1	1	0.5	0	0
Deurne	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aantal	6.5	13	13	13	13	12	9	7	5.5	5	8	10	1	1.5	4	4	5	5	4.5	5	5

1	met data
0	zonder data
0.5	maar meer dan 50% ontbrekende gegevens

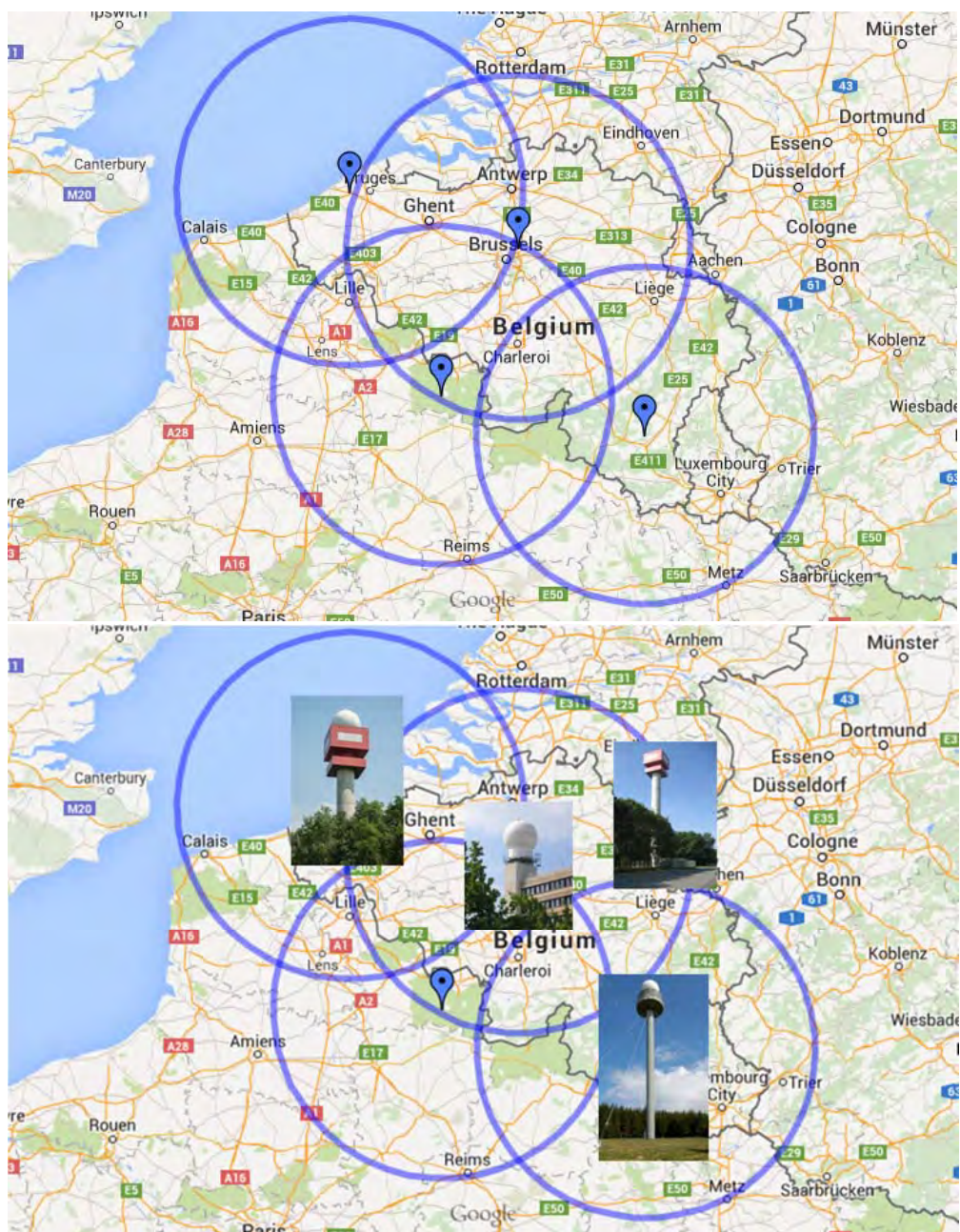
Figuur 3-2: Beschikbaarheid van de pluviograafgegevens voor een tijdsresolutie van 15 minuten (boven) en 1 uur (onder)

3.2 Radargegevens

Radargegevens over het studiegebied werden ter beschikking gesteld door de VMM voor de periode 2008-2014. Deze zijn afkomstig van de radarbeelden van de C-band radars van het KMI te Wideumont, Zaventem en Jabbeke. Figuur 3-3 toont de locaties van de Belgische radars samen met hun bereik (radius van 100 km): Wideumont in het zuiden van België, Zaventem centraal en Jabbeke in het noord-westen. De figuur toont, ter info, ook de radar van Avesnois (beheerd door Meteo-France), waarvan het bereik een groot deel van België beslaat. Een bijkomende radar van VMM te Houthalen-Helchteren (niet aangeduid op de figuur) zal binnenkort operationeel worden. Antwerpen wordt evenwel vooral door de radar van Zaventem goed bestreken.

De composietradarbeelden, aangeleverd aan de VMM door het KMI, worden door VMM in real-time geherkalibreerd op basis van metingen van 42 VMM-pluviografen, aan de hand van de methode ontwikkeld door Moore et al. (1994). Gezien deze methode gebaseerd was op een studie te Londen en dus bepaalde tekortkomingen had bij toepassingen in Vlaanderen, werd een nieuwe methodiek voorgesteld door Martens et al. (2013). Dit werd onlangs (begin 2015) geïmplementeerd in de operationele systemen van de VMM. De beelden die voor deze studie werden aangeleverd zijn echter nog gebaseerd op de methode van Moore et al. (1994).

Het interpreteren van deze geherkalibreerde radargegevens moet echter met een zekere omzichtigheid gebeuren en verder onderzoek in dit gebied lijkt aangewezen. Bijvoorbeeld, in het specifieke geval waarbij een intense bui beweegt tussen de schaarse pluviografen door, kan het algoritme de radarbeelden nog verder versterken, wat tot onrealistisch hoge (gecorrigeerde) neerslagintensiteiten kan leiden. Er wordt momenteel onderzoek gedaan naar verbeterde algoritmes (vb. Wang et al., 2015a,b), maar daar is in deze studie nog geen gebruik van gemaakt.



Figuur 3-3: Radarlocaties in België (bron: <http://radar.meteo.be/en/1682983-In+Belgium.html>)

3.3 Klimaatmodelresultaten

Deze studie maakte gebruik van de bestaande relevante en meest recente simulatieresultaten met globale, regionale en lokale klimaatmodellen. Deze bestaan in hoofdzaak uit de nieuwste generatie klimaatsimulaties, op basis van het World Climate Research Programme – Phase 5 (CMIP5), zoals ook gebruikt aan de basis van het 5^{de} klimaatrapport van het IPCC. Per klimaatmodel zijn er meerdere simulaties beschikbaar. Deze bestaan uit historische controleruns en toekomstige klimaatprojectieruns voor een aantal broeikasgasscenario's; de zogenaamde scenario's RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5. Deze RCP-scenario's zijn de nieuwste broeikasgasscenario's van het IPCC op basis van zogenaamde "Representative Concentration Pathways". Zij vervangen de vroegere "SRES" broeikasgasemissiescenario's van het IPCC, die tot het vorige (4^{de}) klimaatrapport van het IPCC gebruikt werden. De benaming "controlerun" verwijst naar de simulatie van historische klimaatcondities (voor een historische periode), die toelaat om het klimaatmodelresultaat te vergelijken met historische waarnemingen, dus om het model te valideren. De benaming "scenariorun" verwijst naar de simulatie van een bepaald scenario bij de toekomstige uitstoot van broeikasgassen. Zo worden vaak "projectieruns" genoemd omdat ze horen bij een bepaalde toekomstprojectie voor het klimaat. De naam "projectie" wordt bij voorkeur gebruikt i.p.v. "predictie" of "voorspelling" omdat men het toekomstig klimaat niet kan voorspellen; men gaat uit van een aantal mogelijke toekomsthypothese's of scenario's.

3.3.1 Broeikasscenario's

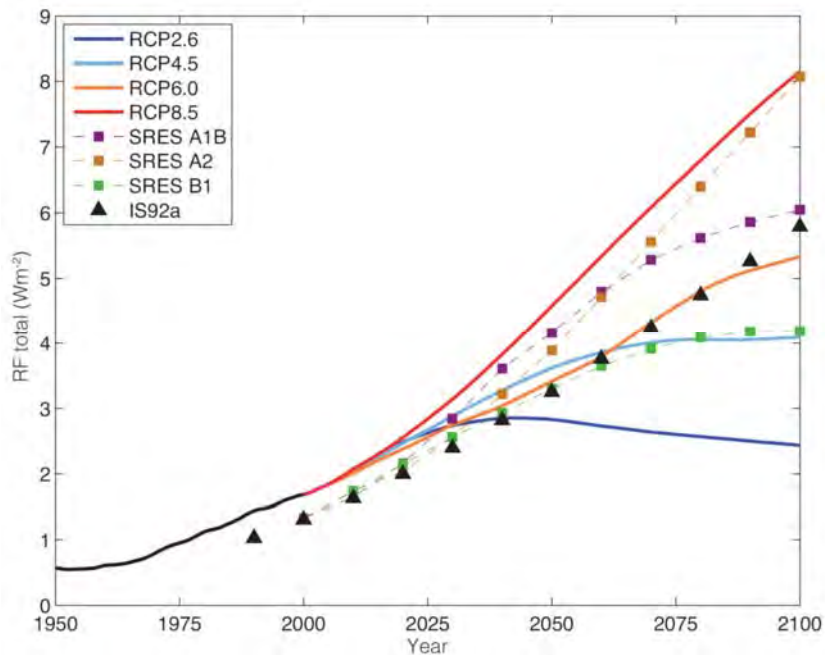
Vroeger (tot en met het vorige – 4^{de} – klimaatrapport van het IPCC) werden scenario's m.b.t. de toekomstige uitstoot en concentratie aan broeikasgassen gedefinieerd op basis van verschillende factoren zoals demografische, socio-economische, technologische en sociale ontwikkelingen, die op hun beurt leiden tot een verandering in de uitstoot van broeikasgassen en gepaarde klimaatverandering. De zogenaamde IPCC Special Reports on Emission Scenarios (SRES) vatten deze scenario's samen. Sensibilisering van de bevolking (resultierend in een verlaging van broeikasgassen) of een specifiek (overheids-)beleid ten aanzien van het terugschroeven van de broeikasgassen en andere mitigerende factoren worden hierbij niet in rekening gebracht.

In de aanloop van het huidige – 5^{de} – klimaatrapport (IPCC, 2013), heeft het IPCC deze aanpak veranderd, onder andere om aan hoger genoemde tekortkoming tegemoet te komen. Het concept van dit laatste rapport is een set van vier zogenaamde Representative Concentration Pathways (RCP). In tegenstelling tot de oude SRES-scenario's, zijn de RCPs niet gebaseerd op (achterliggende) ontwikkelingen die de uitstoot van broeikasgassen beïnvloeden. De RCPs zijn gedefinieerd op basis van een vastgelegde netto inkomende zonnestraling (zonnestralingsforcering genoemd) in het jaar 2100. Op basis van deze vastgelegde stralingsforceringen heeft men verhaallijnen gemaakt voor de verschillende factoren die de emissie van broeikasgassen beïnvloeden (zoals demografische, socio-economische, technische en sociale ontwikkelingen). De stralingsforcering is de hoeveelheid extra energie beschikbaar gemaakt aan de top van de atmosfeer door verschillende factoren die het klimaat beïnvloeden. Wanneer bijvoorbeeld de concentratie van broeikasgassen stijgt, dan zal een groter deel van de warmtestraling die door het aardoppervlak wordt uitgezonden in de atmosfeer worden geabsorbeerd. Dit deel van de warmtestraling bereikt dus niet meer de top van de atmosfeer waardoor de totale uitgezonden warmtestraling door het systeem aarde inclusief de atmosfeer

gereduceerd wordt. Dit resulteert in een positieve stralingsforcering, waardoor de aarde opwarmt.

Men kan stellen dat terwijl de SRES scenario's eerder een sequentiële aanpak volgden, de RCP's eerder in parallel werken tussen de socio-economische invloedsfactoren, de uitstoot van broeikasgassen en de voorspelde klimaatsverandering. De oude SRES-scenario's gingen uit van een projectie van socio-economische factoren om zo de verandering in emissie van broeikasgassen te voorspellen (wat op zijn beurt leidt tot de klimaatverandering). De RCPs daarentegen stellen de broeikasgassen zelf centraal (uitgedrukt in een verandering in stralingsforcering). Van daaruit wordt in parallel gerekend naar klimaatsimpact aan de ene kant en verandering in de socio-economische factoren aan de andere kant.

Figuur 3-4 toont hoe de vier nieuwe RCP-scenario's en (enkele van) de oude SRES-scenario's zich tot elkaar verhouden, betreffende stralingsforcering. Men ziet duidelijk dat de nieuwe RCP-scenario's het volledige bereik van de oude SRES-scenario's omvat, waarbij bovendien één van de nieuwe RCP-scenario's in een daling in stralingsforcering voorziet. Zoals hoger al vermeld, hadden de SRES-scenario's zulk mitigatiescenario nog niet in rekening gebracht.



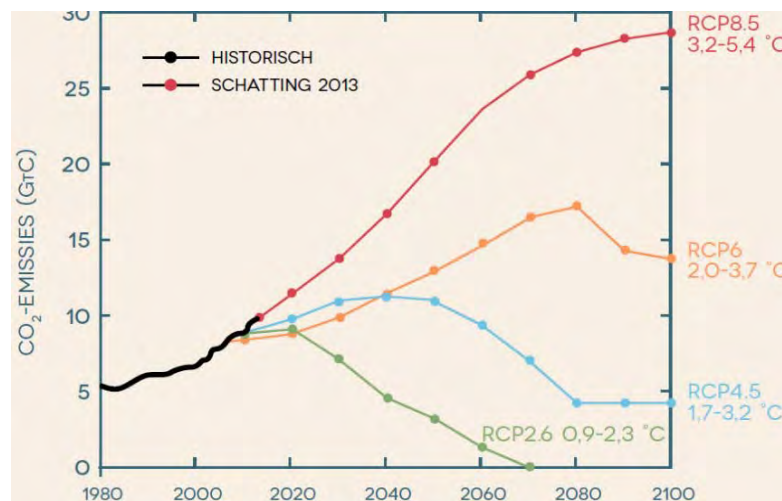
Figuur 3-4: Stralingsforcering van de oude SRES-scenario's in vergelijking met de nieuwe RCP-scenario's (bron: IPCC, 2013)

De vier RCP-scenario's worden als volgt beschreven:

1. RCP8.5: Dit scenario wordt gekenmerkt door groeiende broeikasgasemissies over de tijd resulterend in een stralingsforcering van 8.5 W/m^2 in 2100. Het scenario is representatief voor scenario's in de literatuur die leiden tot hoge broeikasgasconcentraties. RCP8.5 is een hoog energie-intensief scenario met een hoge groei van de wereldbevolking tot ongeveer 12 miljard in 2100 en een lage technologische ontwikkeling.
2. RCP6.0: Dit is een scenario waar de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert tot 6.0 W/m^2 zonder overshoot. Dit scenario wordt gekenmerkt door een reeks aan technologieën en strategieën om energieverbruik en broeikasgasemissies te beperken. Er is echter nauwelijks een vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. In het scenario wordt een midden-projectie voor groei in de wereldbevolking tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen.
3. RCP4.5: Dit is een scenario waar de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert zonder overshoot. Dit scenario wordt gekenmerkt door een grotere range aan technologieën en strategieën om broeikasgasemissies te beperken dan in RCP6. In het scenario wordt een midden-projectie voor populatie tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Het verschilt vooral van het RCP6.0 scenario, omdat dit scenario uitgaat van een sterke vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. Kenmerkend voor RCP4.5 is het verondersteld gebruik van bio-energie en koolstofopvang en –opslag.
4. RCP2.6 (of RCP3-PD): Dit scenario is een 'zogenamd 'piek-en-afname' scenario, waar de stralingsforcering eerst piekt tot waarden van 3.1 W/m^2 en daarna afneemt tot 2.6 W/m^2 in 2100. Om deze niveaus te bereiken zijn substantiële reducties in de emissies van broeikasgassen noodzakelijk. In het scenario wordt een midden-projectie voor bevolkingsgroei tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Kenmerkend voor RCP2.6 is dat emissies laag zijn door het gebruik van bio-energie en dat koolstofopvang en –opslag zal leiden tot negatieve emissies.

De CO₂-uitstoot gelinkt aan bovenstaande scenario's wordt grafisch voorgesteld in Figuur 3-5. Uit de beschrijving in bovenstaande paragraaf kan men stellen dat RCP8.5 een extreem scenario is. Echter, wanneer men de historische waarden van CO₂ uitstoot naast de toekomstscenario's legt (Figuur 3-4), lijkt dit extreem scenario helemaal niet onrealistisch.

Het IPCC kent geen waarschijnlijkheid toe aan de verschillende broeikasgasscenario's, waardoor de vier scenario's met een gelijke kans moeten behandeld worden. De scenario's moeten dus alle vier doorgerekend worden, waarbij de realiteit, met hoge waarschijnlijkheid, ergens binnen het bereik van de vier scenario's zal liggen.



Figuur 3-5: Wereldwijde CO₂ uitstoot per RCP-scenario, samen met de historische waarden tot 2013 (bron: Peters et al., 2013)

3.3.2 Klimaatmodellen en -simulaties

Deze studie is gebaseerd op de nieuwste generatie mondiale klimaatsimulaties van het World Climate Research Programme – Phase 5 (CMIP5), statistisch geanalyseerd voor het studiegebied van de Antwerpse regio. Er zijn recent een groot aantal CMIP5-klimaatmodelruns op basis van de RCP-scenario's beschikbaar gekomen. Voor het studiegebied van de Antwerpse regio zijn er meer dan 200 simulaties met 34 verschillende mondiale klimaatmodellen van toepassing (Tabel 3-1).

Binnen CMIP5 zijn voor bepaalde klimaatmodellen en bepaalde RCP-scenario's meerdere simulaties beschikbaar waarbij verschillende initiële modelcondities werden aangelegd (Tabel 3-1). Deze simulaties laten toe om de potentiële verschillen in klimaatmodelresultaten te bestuderen als gevolg van interne (natuurlijke) variabiliteit van het klimaat, zoals weerspiegeld in het klimaatmodel.

Voor hydrologische en hydraulische impactanalyse zijn vooral de neerslagresultaten van belang, maar ook variabelen die de verandering in verdamping bepalen. In de impactmodellen van de eindgebruikers van deze studie (zie Deel 4.5) gebeurt de invoer van verdampingsgegevens onder de vorm van “potentiële evapotranspiratie” (hierna afgekort als ETP). Alhoewel vele klimaatmodellen ETP als modeluitvoer ter beschikking stellen, werden deze ETP-resultaten in deze studie niet rechtstreeks gebruikt. Dit omwille van de eerdere ervaring dat de ETP-berekeningsmethode gebruikt in verschillende klimaatmodellen niet consistent is en bovendien vaak systematisch afwijkt van de historische waarnemingen (Baguis et al., 2010). Daarom werden de ETP-resultaten in deze studie zelf berekend via de methode van Bultot (Bultot, 1983) o.b.v. de volgende meteorologische variabelen (telkens aan of in de onmiddellijk nabijheid van de oppervlakte): luchtdruk, zonnestraling, gemiddelde, maximale en minimale luchttemperatuur, windsnelheid, relatieve vochtigheid.

Niet elk van deze klimaatmodelsimulaties hebben resultaten beschikbaar voor elk van de meteorologische variabelen verwerkt voor deze studie: neerslag, gemiddelde temperatuur en de verschillende variabelen die bijkomend vereist zijn voor de berekening van de potentiële evapotranspiratie (ETP): luchtdruk, zonnestraling, minimale temperatuur, maximale temperatuur, windsnelheid en relatieve vochtigheid. Tabel 3-2, Tabel 3-3 en Tabel 3-4 geven een overzicht van het aantal klimaatmodelruns met beschikbare resultaten voor neerslag, temperatuur en ETP. Neerslagresultaten waren voor de Antwerpse regio beschikbaar voor 136 klimaatmodelruns o.b.v. 28 verschillende klimaatmodellen (Tabel 3-2). Voor temperatuur werden 71 klimaatmodelruns in rekening gebracht, komende van 20 klimaatmodellen (Tabel 3-3). Voor ETP werden 33 klimaatmodelruns in rekening gebracht, komende van 12 klimaatmodellen (Tabel 3-4). Omdat niet alle modellen alle variabelen die nodig zijn om de ETP te berekenen als uitvoer geven, waren slechts 12 klimaatmodellen beschikbaar voor ETP.

Tabel 3-1: Aantal beschikbare klimaatmodelruns per RCP-scenario

N°	Model	Historisch	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Totaal
1	ACCESS 1.0	1	X	1	X	1	3
2	ACCESS 1.3	1	X	1	X	1	3
3	BCC-CSM1.1	3	1	1	1	1	7
4	BCC-CSM1.1(m)	1	1	1	1	1	5
5	BNU-ESM	1	1	1	X	1	4
6	CCSM4	1	1	1	3	1	7
7	CAM5	1	1	2	3	3	10
8	CANESM2	5	5	5	X	5	20
9	CMCC-CM	1	X	1	X	1	3
10	CMCC-CMS	1	X	1	X	1	3
11	CMCC-CESM	1	X	X	X	1	2
12	CNRM_CM5	1	1	1	X	1	4
13	CSIRO-MK3.6.0	10	10	10	10	10	50
14	EC-EARTH	1	X	1	X	3	5
15	FGOALS-G2	1	1	1	X	1	4
16	GFDL-CM3	2	1	3	1	1	8
17	GFDL-ESM2G	1	1	1	1	1	5
18	GFDL-ESM2M	1	X	1	1	1	4
19	GISS-E2-H	2	X	X	X	X	2
20	GISS-E2-R	3	X	2	X	X	5
21	HADGEM2-AO	1	1	1	1	1	5
22	HADGEM2-CC	3	X	1	X	1	5
23	HADGEM2-ES	1	1	2	1	2	7
24	INM-CM4	1	X	1	X	1	3
25	IPSL-CM5A-LR	4	1	4	1	4	14
26	IPSL-CM5A-MR	1	1	1	1	1	5
27	IPSL-CM5B-LR	1	X	1	X	1	3
28	MIROC-ESM	1	1	1	1	1	5
29	MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	1	5
30	MIROC5	3	2	1	1	3	10
31	MPI-ESM_LR	1	1	1	X	1	4
32	MPI-ESM_MR	1	1	1	X	1	4
33	MRI-CGCM3	1	1	1	1	1	5
34	NORESM1-M	3	1	1	1	1	7

Tabel 3-2: Klimaatmodelruns gebruikt voor de neerslaganalyse.

N°	Model	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Totaal
1	ACCESS 1.0	-	1	-	1	2
2	ACCESS 1.3	-	1	-	1	2
3	BCC-CSM1.1(m)	1	1	1	1	4
4	BNU-ESM	1	1	-	1	3
5	CANESM2	5	5	-	5	15
6	CMCC-CM	-	1	-	1	2
7	CMCC-CMS	-	1	-	1	2
8	CMCC-CESM	-	-	-	1	1
9	CNRM_CM5	1	1	-	1	3
10	CSIRO-MK3.6.0	10	10	10	10	40
11	FGOALS-G2	1	1	-	1	3
12	GFDL-CM3	1	1	1	1	4
13	GFDL-ESM2G	1	1	1	1	4
14	GFDL-ESM2M	-	1	1	1	3
15	GISS-E2-R	-	2	-	-	2
16	HADGEM2-CC	-	1	-	1	2
17	HADGEM2-ES	1	-	-	-	1
18	INM-CM4	-	-	-	1	1
19	IPSL-CM5A-LR	-	3	1	3	7
20	IPSL-CM5A-MR	1	1	1	1	4
21	IPSL-CM5B-LR	-	1	-	1	2
22	MIROC-ESM	1	1	1	1	4
23	MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	4
24	MIROC5	2	1	1	3	7
25	MPI-ESM_LR	1	1	-	1	3
26	MPI-ESM_MR	1	1	-	1	3
27	MRI-CGCM3	1	1	1	1	4
28	NORESM1-M	1	1	1	1	4

Tabel 3-3: Klimaatmodelruns gebruikt voor de temperatuuranalyse.

N°	Model	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Totaal
1	BNU-ESM	1	1	-	1	3
2	CANESM2	5	5	-	5	15
3	CMCC-CMS	-	1	-	1	2
4	CMCC-CESM	-	-	-	1	1
5	CNRM_CM5	1	1	-	1	3
6	CSIRO-MK3.6.0	1	1	2	2	6
7	GFDL-ESM2G	1	1	1	1	4
8	GFDL-ESM2M	-	1	1	1	3
9	GISS-E2-R	-	2	-	-	2
10	HADGEM2-CC	-	1	-	1	2

N°	Model	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Totaal
11	HADGEM2-ES	1	1	-	-	2
12	IPSL-CM5A-LR	-	2	1	2	5
13	IPSL-CM5A-MR	1	1	1	1	4
14	IPSL-CM5B-LR	-	1	-	1	2
15	MIROC-ESM	1	1	1	1	4
16	MIROC5	-	-	1	3	4
17	MPI-ESM_LR	-	-	-	1	1
18	MPI-ESM_MR	1	1	-	1	3
19	MRI-CGCM3	-	1	1	1	3
20	NORESM1-M	-	-	1	1	2

Tabel 3-4: Klimaatmodellruns gebruikt voor de ETP-analyse.

N°	Model	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Totaal
1	BNU-ESM	1	1	-	-	2
2	CNRM_CM5	-	1	-	1	2
3	GFDL-CM3	1		1	1	3
4	GFDL-ESM2G	1	1	1	1	4
5	GFDL-ESM2M	-	1	1	1	3
6	HADGEM2-CC	-	1	-	-	1
7	INM-CM4	-	1	-	-	1
8	IPSL-CM5A-LR	1	-	1	1	3
9	IPSL-CM5A-MR	1	-	1	1	3
10	MIROC-ESM	1	1	1	1	4
11	MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	4
12	MRI-CGCM3	1	1	-	1	3

Naast deze nieuwste generatie mondiale klimaatmodelresultaten zijn er recent ook een aantal bijhorende Europese regionale klimaatmodelsimulaties ter beschikking gekomen. Dit zijn simulaties met klimaatmodellen met een hogere ruimtelijke resolutie voor het specifieke Europese gebied. Aan de randen van dit gebied zijn de resultaten van CMIP5 mondiale klimaatmodellen opgelegd. De regionale Europese klimaatmodelsimulaties gebeuren in het kader van het project CORDEX (Jacob et al., 2013). Bij de aanvang van deze studie waren er simulaties met 11 Europese regionale klimaatmodellen beschikbaar.

Daarnaast worden er momenteel door het KMI en de KU Leuven - Afdeling Geografie specifiek voor België simulaties uitgevoerd met fijnchalige klimaatmodellen. Deze hebben een ruimtelijke resolutie tot 3-4 km, wat toelaat om extreme regenbuien van convectieve oorsprong (zomeronweders) expliciet, dus nauwkeuriger, te modelleren. De volgende fijnchalige klimaatmodelruns waren bij de aanvang van deze studie beschikbaar voor België:

- van het KMI en de U.Gent (onderzoeksgroep prof. Piet Termonia):
 - o Historische controlesimulaties voor:
 - Het ALARO-model (ruimtelijke resoluties van 4 km, 10 km en 40 km), waarbij aan de randen historisch klimatologische gegevens werden opgelegd, meer specifiek ERA-40 historische gegevens, dit zijn historische reconstructies van het klimaat op basis van klimaatmodellen. Deze controlesimulaties gebeurden voor de periode 1961-1990, voor dagelijkse en uurlijkse tijdstappen.
 - Het ALADIN-model (afkomstig van het model CNRM_RM4.5, dat eerder gebruikt werd in het EU ENSEMBLES-project), waarbij aan de randen ook ERA-40 historische klimatologische reconstructiegegevens werden opgelegd voor 1961-1990, met dagelijkse tijdstappen.
 - o Toekomstige projectieruns voor:
 - Het ALARO-model (ruimtelijke resolutie van 4 km), waarbij aan de randen de simulatieresultaten werden opgelegd met het mondiaal klimaatmodel Arpège voor de toekomstperiode 2071-2100, gebaseerd op het SRES broeikasgasemissiescenario A1B, met dagelijkse tijdstappen.
- van KU Leuven (onderzoeksgroep prof. Nicole Van Lipzig; projecten CLIMAQS en MACCBET):
 - o Het CCLM-model (ruimtelijke resoluties van 25 km, 7 km en 3 km), waarbij aan de randen zowel historische reconstructiegegevens werden opgelegd (deze keer ERA-interim), als de simulatieresultaten met het globaal klimaatmodel EC-Earth (CMIP5-simulaties) voor de RCP4.5 en RCP8.5 broeikasscenario's, huidig en toekomstig landgebruik (verstedelijking). De simulaties hebben 15-minuten tijdstappen en waren beschikbaar voor:
 - 2001-2010 ERA-interim
 - 2001-2010 EC-Earth
 - 2026-2035 EC-Earth RCP4.5
 - 2061-2070 EC-Earth RCP4.5

- 2061-2070 EC-Earth RCP8.5
- 2001-2010 ERA-interim, huidig landgebruik
- 2001-2010 EC-Earth, huidig landgebruik
- 2061-2070 EC-Earth RCP4.5 en RCP8.5, huidig landgebruik
- 2061-2070 EC-Earth RCP4.5 en RCP8.5, toekomstig landgebruik.

Verder werden oorspronkelijk ook de hoge-resolutie resultaten met het WRF/CHEM-model, die in het kader van het DECUMANUS-project bekomen worden, vooropgesteld (zie Deel 1). Het WRF/CHEM-model gebruikt aan de randen zowel ERA40 historische reconstructiegegevens als simulatieresultaten met het CCSM-model, en heeft een zeer hoge ruimtelijke resolutie van 200 meter. Toekomstscenario's worden gesimuleerd voor RCP4.5 en RCP8.5, voor toekomstperioden van 2030, 2040 en 2050. Helaas bleken deze modelresultaten tijdens de uitvoering van deze studie slechts beschikbaar voor maand- en jaargemiddelde waarden, wat niet bruikbaar was voor deze studie. Omwille van de focus van deze studie op neerslagmodellering voor impactanalyse op overstromingen langs rioleringen en waterlopen, waren klimaatmodelresultaten vereist bij een tijdstap van 1 dag of kleiner.

Voor al de beschikbare klimaatmodelsimulaties werden de modeluitvoerresultaten verzameld voor de volgende variabelen:

- Neerslag (Precipitation)
- Gemiddelde dagtemperatuur (Mean 2-meter Air Temperature)
- Maximale dagtemperatuur (Maximum 2-meter Air Temperature)
- Minimale dagtemperatuur (Minimum 2-meter Air Temperature)
- Gemiddelde luchtdruk (Mean Sea Level Pressure)
- Zonnestraling (Surface Downwelling Shortwave Radiation)
- Windsnelheid (Mean 10-meter Wind Speed)
- Relatieve vochtigheid (Near-Surface Relative Humidity)

De resultaten van gemiddelde, maximale, minimale dagtemperatuur, gemiddelde luchtdruk, zonnestraling, windsnelheid en relatieve vochtigheid waren nodig om de ETP te berekenen. Deze ETP stelt de maximaal mogelijke verdamping voor, en is naast neerslag nodig om de invloed van klimaatverandering op neerslagafstroming / stroomgebiedshydrologie te kunnen berekenen. De ETP werd hier berekend volgens de methode van Bultot (1983). Deze methode wordt aanbevolen door het KMI.

Alle klimaatmodelresultaten werden verzameld in de vorm van continue tijdreeksen voor de kleinst beschikbare tijd- en ruimteschalen en voor de beschikbare tijdshorizonten tot 2100.

Deze simulatieresultaten van de klimaatmodellen bij de verschillende resoluties zijn gebruikt (zie Deel 4) om specifieke klimaatscenario's af te leiden die bruikbaar zijn voor impactanalyse op riolerings- en waterloopoverstromingen in de Antwerpse regio.

4 Toegepaste methodiek

4.1 Analyse ruimtelijke neerslagpatronen huidig klimaat

De pluviograaf- en radarmetingen werden vooreerst gebruikt om de ruimtelijke neerslagpatronen boven de Antwerpse regio voor het huidig klimaat te bepalen. Daarna werden ze ook gebruikt aan de basis van de statistische neerschaling van de beschikbare simulatieresultaten van de klimaatmodellen.

Vermits voor zowel de riolerings- als de waterlooptoepassingen (zie Deel 4.5) neerslagstatistieken vereist zijn in de vorm van kwantielwaarden, werd de ruimtelijke spreiding onderzocht van de neerslagkwantielen over de Antwerpse regio. Neerslagkwantielen zijn neerslagintensiteiten voor welbepaalde voorkomingskansen of terugkeerperiodes. De terugkeerperiode is de gemiddelde herhalingstijd, d.i. de gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende tijdstippen waarbij een bepaalde neerslagintensiteit wordt bereikt of overschreden.

4.2 Analyse klimaatveranderingssignaal

Voor elk van de beschikbare klimaatmodelruns werden de klimaatveranderingssignalen afgeleid (zie hieronder en in Deel 3) door vergelijking van de toekomstprojecties via de scenarioruns met de historische meteorologische condities in de controleruns. Dit gebeurde voor de meteorologische variabelen neerslag, temperatuur en ETP. Zoals in Deel 3 beschreven, werd de ETP niet als een directe output is van de klimaatmodellen gebruikt, maar werd ze berekend via de methode van Bultot (Bultot, 1983) o.b.v. de meteorologische variabelen luchtdruk, zonnestraling, gemiddelde, maximale en minimale luchttemperatuur, windsnelheid en relatieve vochtigheid.

Voor de historische controleruns werd de periode 1961-1990 beschouwd, terwijl voor de RCP-runs de periode 2071-2100 gebruikt werd. Met de veronderstelling van een lineaire trend (die goed blijkt op te gaan, zie Van Lipzig & Willems, 2015) werd dit verschaald naar toekomstperspectieven met een tijdshorizon van 30, 50 en 100 jaar. Dit komt dan typisch overeen met een herschaling van de CMIP5 resultaten met een factor 30/110, 50/110 en 100/110.

De aanpak die hier gevolgd werd voor de statistische analyse van het klimaatveranderingssignaal is conform de aanpak gevolgd voor de MIRA 2015 rapportering (MIRA, 2015; Van Lipzig & Willems, 2014; Tabari et al., 2014b) en de studie rond “Bijsturing van de Vlaamse klimaatscenario's voor hydrologische en hydrodynamische impactanalyse inclusief hydrologische extremen” voor VMM-AOW (Tabari et al., 2014a). Voor de MIRA-rapportering zijn de resultaten evenwel gebaseerd op de locatie Ukkel. De voorstellingswijze werd in deze meer recente studie ook verder verbeterd.

4.3 Statistische neerschaling

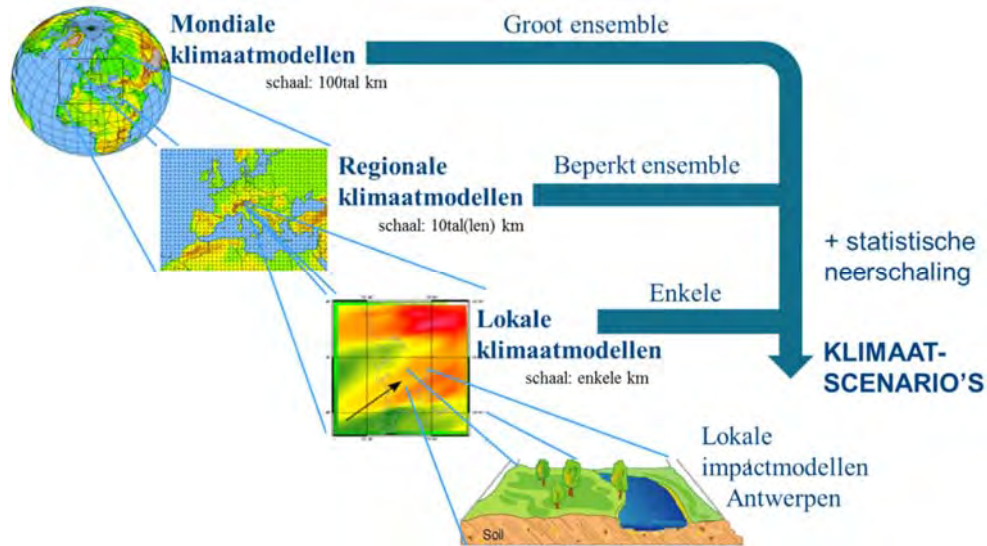
De gebruikte klimaatmodellen zoals in Deel 3 opgelijst hebben een te grote/grove ruimtelijke resolutie voor heel wat toepassingen; ook voor de toepassingen van overstromingsimpactberekeningen langs rioleringen en waterlopen, zoals in deze studie beoogd. Zo worden convectieve zomeronweders, die typisch verantwoordelijk zijn voor rioleringsoverstromingen (Willems et al., 2012a, 2012b; Kendon et al., 2012; Prein et al., 2013; Ban et al., 2014) slechts expliciet gemodelleerd bij een ruimtelijke resolutie van 3 à 4 km of fijner. Omwille van deze beperkingen van de klimaatmodellen is een verdere neerschaling van de bekomen modelresultaten op basis van statistische technieken nodig.

In overleg met de leden van de stuurgroep werden de ruimtelijke en temporele resoluties bepaald die vereist zijn voor de impactmodellering, dus de ruimtelijke en temporele resoluties tot dewelke de statistische neerschaling diende uitgevoerd te worden. Voor de rioleringsstoepassing was dat een tijdsresolutie van 10-minuten (rekening houdend met de concentratietijd van het rioleringsstelsel en tijdsresolutie die momenteel in het rioleringsmodel gehanteerd wordt) en een ruimtelijke resolutie gelijk aan de puntschaal (omdat het bestaand rioleringsmodel gebruik maakt van puntneerslag, vb. composietbuien die gebaseerd zijn op de puntneerslag te Ukkel). Het rioleringsmodel heeft evenwel de mogelijkheid om gebruik te maken van ruimtelijk variabele neerslag, meer specifiek onder de vorm van puntneerslag of meerdere locaties in het rioleringsgebied.

Voor de waterlooptoepassingen was neerslaginformatie vereist bij een tijdsresolutie van 15-minuten tot 1 uur (afhankelijk van de concentratietijd van de oppervlakteafstroming per deelstroomgebied) en voor elk van de individuele deelstroomgebieden. Omdat geen of onvoldoende klimaatmodelsimulaties beschikbaar zijn met deze hoge resolutie, werd in deze studie statistische neerschaling toegepast.

Er zijn een groot aantal technieken beschikbaar voor statistische neerschaling. Voor een uitgebreide technische beschrijving van de methoden wordt verwezen naar de literatuur (vb. Willems et al., 2012b). De uitvoerder van deze studie heeft zeer uitgebreide ervaring met deze methoden. In het verleden werden reeds vele methoden toegepast en onderling vergeleken/geëvalueerd; ook in het kader van internationale samenwerkingen (vb. Sunyer et al., 2015). Op basis van deze ervaring wordt de “kwantielperturbatiemethode” als een internationaal state-of-the-art methode naar voor geschoven (Willems & Vrac, 2011; Willems, 2013b; Ntegeka et al., 2015).

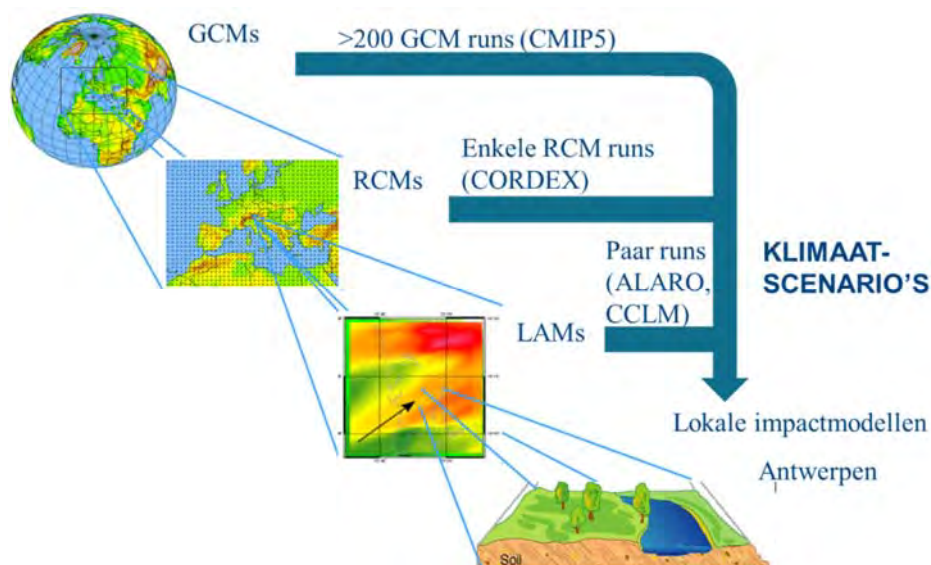
In deze studie werden de simulatieresultaten van de verschillende klimaatmodellen gecombineerd met de pluviograafmeetgegevens, volgens het concept zoals in Figuur 4-1 schematisch weergegeven.



Figuur 4-1: Simulatieresultaten van de verschillende klimaatmodellen gecombineerd met statistische neerschaling om te komen tot specifieke klimaatscenario's voor het studiegebied van de Antwerpse regio

Zoals hiervoor in Deel 3 aangegeven zijn er van de lokale klimaatmodellen (ruimtelijke resolutie van 3-4 km, uurlijkse en sub-uurlijkse tijdstap) slechts enkele beschikbaar bij het KMI en de KU Leuven. Omdat dit aantal te klein is om de totale onzekerheid in de toekomstige klimaatprojecties te bestrijken, moeten de lokale klimaatmodellen gelokaliseerd worden in de bredere set (ensemble) van Europese regionale klimaatmodellen. Omdat de lokale klimaatmodellen aan de rand van het gemodelleerde gebied gebruik maken van ("genest" zijn) in welbepaalde regionale klimaatmodellen, kan nagegaan worden waar deze regionale modellen gelokaliseerd zijn in de ganse set van beschikbare regionale modellen. Hetzelfde geldt voor de regionale versus de mondiale klimaatmodellen: de regionale klimaatmodellen bestrijken een "beperkt ensemble" maar zijn genest in de mondiale klimaatmodellen, waarvan een veel ruimer ensemble beschikbaar is (Figuur 4-2).

Uiteraard moet bij het vergelijken van de resultaten van fijn- met grofschaligere klimaatmodelsimulaties rekening worden gehouden met het verschil in resolutie van de modellen. Bij het positioneren van de fijnschaligere klimaatmodelsimulaties in de grofschaligere gebeurt dat door de resultaten van de fijnschaligere klimaatmodellen "op te schalen" naar de schaalgrootte van de grofschaligere modellen. Dit gebeurt door uitmiddeling van de simulatieresultaten. Anderzijds moeten, na lokalisatie, de klimaatprojecties met de grofschaligere modellen vertaald worden naar klimaatprojecties bij de kleinere schaalgroottes. Dit gebeurt via de statistische neerschaling.



Figuur 4-2: Aantal simulatieresultaten neemt af met de resolutie van de klimaatmodellen

Het eindresultaat zijn statistieken (tabellen en ruimtelijke kaarten) met % verandering in neerslag bij verschillende tijds- en ruimteschalen: over de Antwerpse regio (in het algemeen) en over het rioleringsgebied en de stroomgebieden van de lokale waterlopen (meer specifiek).

Deze statistieken werden afgeleid voor de afzonderlijke RCP-scenario's (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5) en voor de toekomsthorizonten 2030, 2050 en 2100.

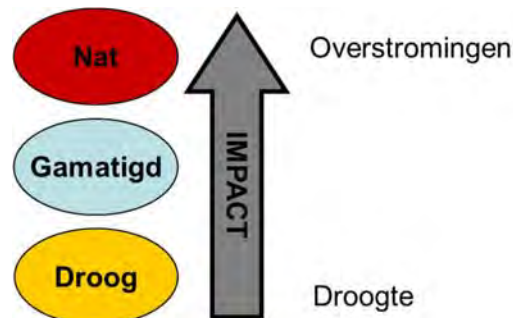
4.4 Klimaatscenario's: Hoog-midden-laag, Nat-Gematigd-Droog

Omwille van het groot aantal beschikbare klimaatmodelsimulaties en de lange rekentijden van bepaalde hydrologische en hydraulische impactmodellen, is het aantal door te rekenen scenario's beperkt tot drie of vier. Deze scenario's beogen het 95% betrouwbaarheidsinterval (op basis van al de beschikbare klimaatmodelruns) te bestrijken. Dit gebeurt via klimaatscenario's die "hoog", "midden" en "laag" benoemd worden; zij komen overeen met de bovengrens, mediaan en ondergrens van de het betrouwbaarheidsinterval. Deze hoog-midden-laag klimaatscenario's zijn afgeleid voor elke meteorologische variabele en dit bij elke tijdschaal die in deze studie onderzocht werd.

Bij hydrologische impactanalyse langs waterlopen dienen naast de klimaatscenario's voor extreme neerslag ook de klimaatscenario's voor ETP beschouwd. Het hoog-klimaatscenario voor extreme neerslag komt hierbij niet voor alle seizoenen overeen met het hoog-klimaatscenario voor ETP. Ook doet het hoog-klimaatscenario voor extreme neerslag bij een bepaalde seizoen (vb. winter) zich niet noodzakelijk gelijktijdig voor met het hoog-klimaatscenario voor de andere seizoenen. De klimaatscenario's voor de afzonderlijke variabelen en seizoenen dienen dus op een welbepaalde wijze gecombineerd te worden (zie Willems, 2013b, Ntegeka et al., 2014, voor de technische details hierbij).

De combinaties die tot de sterkste hydrologische impacts leiden, of tot gematigde impacts, of tot de laagste impacts zijn hierbij het meest interessant (Figuur 4-3). Ze laten toe om het bereik aan mogelijke toekomstige hydrologische impacts (in grootteorde) in te schatten. Meer specifiek werden de volgende vier scenario's voor hydrologische impactanalyse afgeleid:

- Hoog-winter scenario (ook Nat-winter scenario genoemd): geeft een hoge impact op piekafvoeren in de winter; dus voor rivieren waarbij extreme neerslag in combinatie met grote voorafgaandelijke neerslag (sterke bodemverzadiging) tot hoge piekafvoeren en overstromingen leidt
- Hoog-zomer scenario: geeft een hoge impact op piekafvoeren in de zomer, als gevolg van extreme zomerse onweders, dus voor rioleringen en kleine rivieren met een korte responstijd
- Gematigd scenario: geeft een middelmatige impact op zowel piekafvoeren als laagwaterafvoeren
- Droog scenario: geeft een sterke impact m.b.t. droogte, dus een sterke daling van de laagwaterafvoeren langs rivieren, sterke daling van de grondwaterstanden, enz.



Figuur 4-3: Scenario's nat-gematigd-droog voor impactanalyse op hydrologische extremen

Het doorrekenen van deze vier scenario's in hydrologische en hydraulische impactmodellen laat toe om een grootteorde-inschatting te bekomen van onderlimiet-mediaan-bovenlimiet van het ganse bereik (volgens 95% betrouwbaarheidsintervallen op neerslag en ETP) aan mogelijke toekomstige klimaatverandering. Voor bepaalde toepassingen kan men zich beperken tot drie i.p.v. scenario's. Voor overstromingsstudies langs grote rivieren (waar overstromingen zich vooral in de winter voordoen, bij hoge bodemverzadiging), bijvoorbeeld, hoeft geen hoog-zomer scenario doorgerekend (dat scenario zal een impactresultaat geven dat zich tussen het huidig klimaat en het hoog-winter resultaat situeert). Voor overstromingsstudies langs rioleringen hoeft geen hoog-zomer scenario doorgerekend omdat rioleringsoverstromingen vooral het gevolg zijn van extreme zomerse onweders.

Het hoog-scenario is dus het scenario dat de sterkste impact geeft m.b.t. overstromingen, terwijl het laag-scenario de sterkste impact geeft m.b.t. droogte en laagwater. Uiteraard wordt ook steeds het huidig klimaat als referentie genomen. Indien bepaalde scenario's een impact geven die gunstiger is dan het huidig klimaat dan wordt daar best geen rekening mee gehouden in het beheer of ontwerp. Ontwerpen of beheersmaatregelen dienen immers ook voor de huidige klimatologische omstandigheden te voldoen.

Een andere belangrijke opmerking bij de scenario's is dat – in tegenstelling met wat vaak verondersteld wordt – het gematigd scenario niet noodzakelijk het meest waarschijnlijke scenario is. De waarschijnlijkheid van elk van de scenario's is immers niet gekend. Daarom wordt aanbevolen om elk van de scenario's door te rekenen (of minstens het hoog-winter scenario voor overstromingsstudies langs grote rivieren, hoog-winter en hoog-zomer voor overstromingen langs kleine rivieren en rioleringen, droog-scenario voor droogte/laagwaterstudies). Zo wordt een grootteorde-inschatting bekomen van het bereik aan mogelijke toekomstige klimaatverandering.

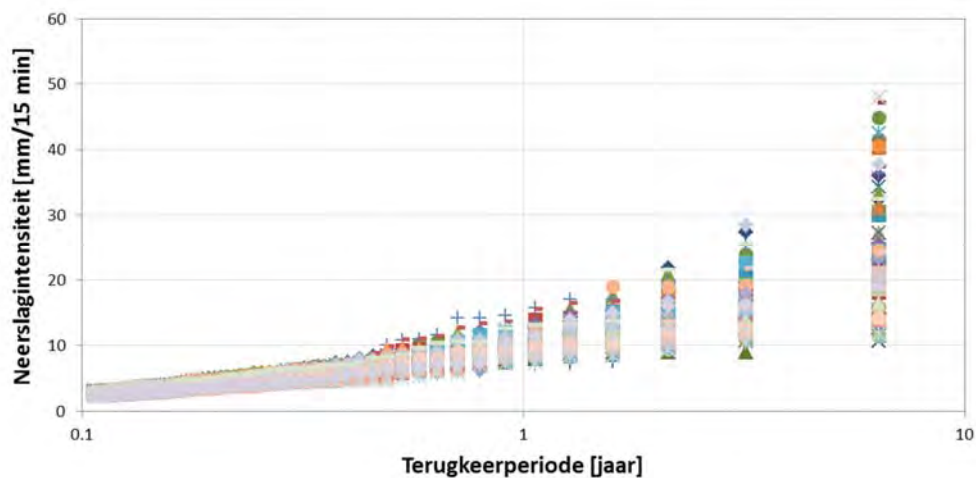
4.5 Neerslagproducten voor eindgebruikers

In overleg met de leden van de stuurgroep bij deze studie werd vastgelegd onder welke vorm de neerslaginformatie (statistisch) verwerkt moet worden. Voor impactmodellering langs rioleringen is dit typisch onder de vorm van ontwerpbuien (de zogenaamde composietbuien) bij terugkeerperioden van 2, 5, 10 en 20 jaar (zie Code van Goede Praktijk voor het ontwerp van rioleringssystemen). Voor impactmodellering langs waterlopen zijn typisch langdurige tijdreeksen nodig van 15-minuten of uurlijkse neerslag en uurlijkse of daggemiddelde ETP. Na doorrekening van deze tijdreeksen in het hydrologisch model van het stroomgebied, gebeurt typisch een statistische naverwerking, waaruit maatgevende afvoeren worden afgeleid en doorgerekend in het waterloopmodel om afvoeren, waterhoogten en overstromingscondities te bekomen bij welbepaalde terugkeerperioden (Willems, 2013a). Door de tijdreeksen aan te passen aan de klimaatscenario's, kunnen deze opnieuw doorgerekend worden in het hydrologisch model. Dit laat toe om debieten, waterhoogten en overstromingscondities te analyseren voor terugkeerperioden tot de lengte van de beschouwde tijdreeks of meer (op basis van extreme-waarden-analyse).

Naast deze neerslaginformatie onder de vorm zoals nodig is voor de impactanalyse door de eindgebruikers, werden ook meer algemene statistieken afgeleid voor de managementsamenvatting bij deze studie (zie Deel 9). Dit gebeurde voor de jaargemiddelden, seizoen-gemiddelden en maandgemiddelden doorheen de komende decennia tot 2100. De resultaten werden samengevat voor perioden gecentreerd rond 2030 en 2050 en tot 2100. Ook de impact op neerslagextremen, op het aantal natte en droge dagen, op de lengte van droge perioden, op extreme temperaturen, op hittegolven, op extreme ETP, op windsnelheid, enz. werd geanalyseerd. De klimaatimpact werd voor al deze parameters voorgesteld in de vorm van absolute of relatieve veranderingen voor elke beschouwde toekomstperiode t.o.v. de actuele situatie.

5 Resultaten voor de regio Antwerpen - Ruimtelijke neerslagpatronen huidig klimaat

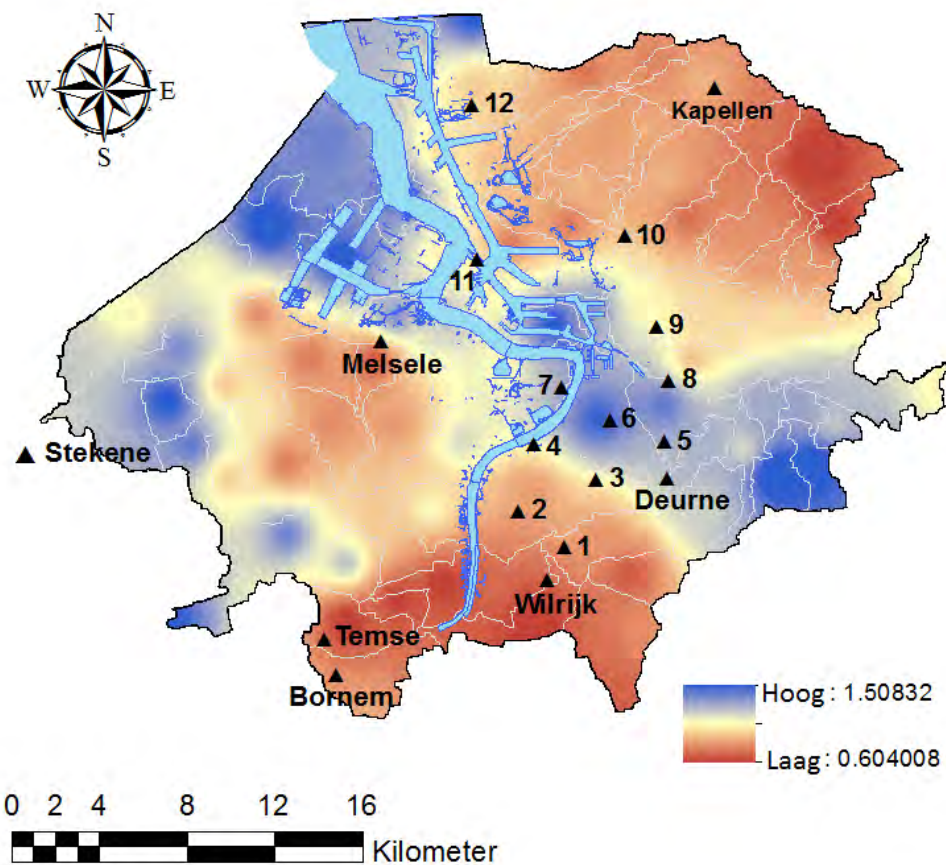
Figuur 5-1 geeft op basis van de radarbeelden de neerslagkwantielen weer, dit zijn de neerslagintensiteiten in functie van de terugkeerperiode, voor alle radargridcellen die het studiegebied omvatten en voor de oorspronkelijke tijdstap van 15 minuten. Er is een zeer sterke ruimtelijke variatie zichtbaar in extreme neerslagstatistieken, vooral voor de grotere terugkeerperioden (de meer uitzonderlijke regenbuien).



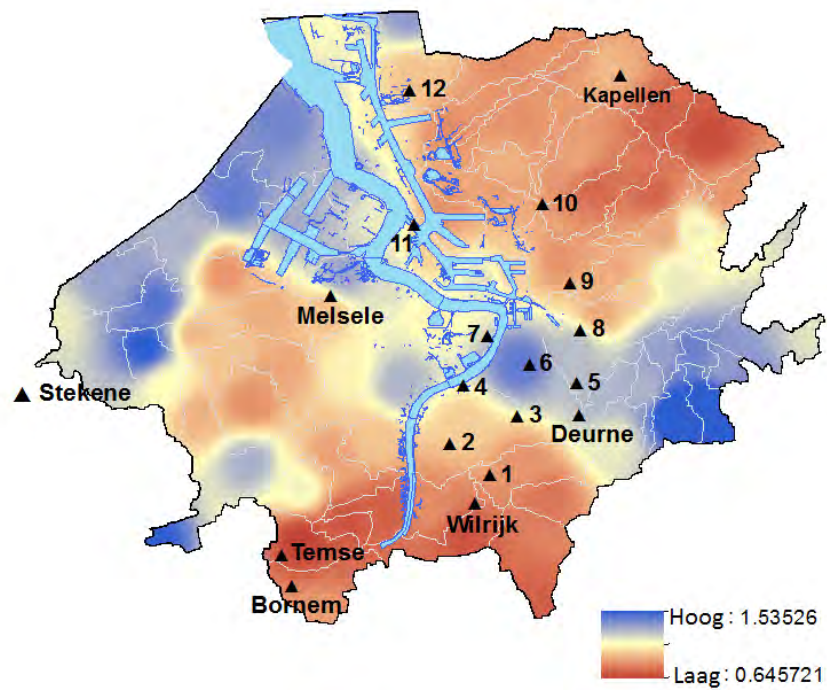
Figuur 5-1: Ruimtelijke variatie in 15-minuten neerslagintensiteit in functie van terugkeerperiode, voor alle radargridcellen boven de regio Antwerpen, o.b.v. de periode 2008-2014

Deze spreiding in neerslagintensiteiten wordt in Figuur 5-2 ruimtelijk weergegeven als factor verschil t.o.v. de gemiddelde neerslagintensiteit, na ruimtelijke interpolatie. Dit gebeurde gemiddeld voor alle neerslagkwantielen groter dan een terugkeerperiode van 1 jaar, dus voor de grotere terugkeerperioden ($T > 1$ jaar). Dit zijn de terugkeerperioden die typisch gebruikt worden aan de basis van het rioleringsontwerp. Ook voor de waterlooptoepassingen zijn enkel de grotere terugkeerperioden relevant.

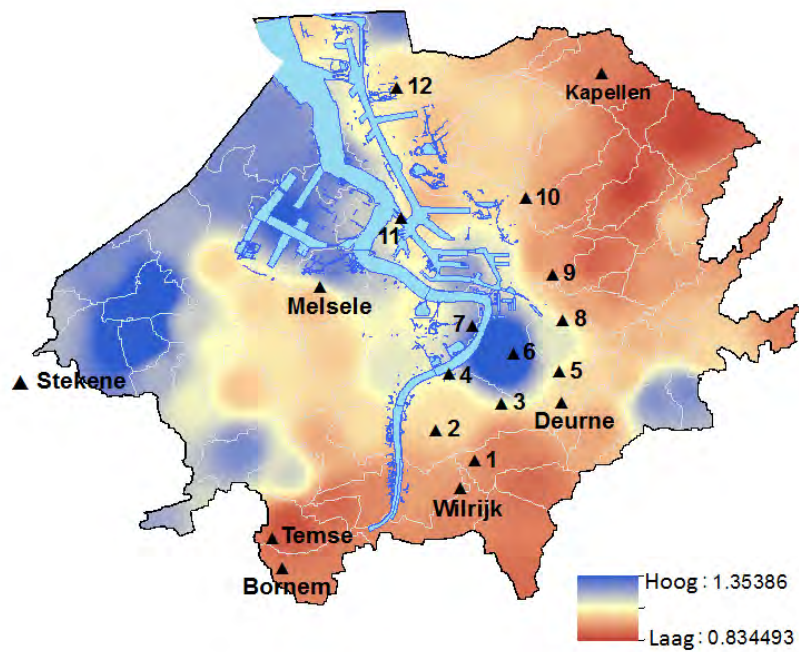
In de figuur staat de factor 1 (weergegeven in het geel) voor de gebiedsgemiddelde neerslagkwantielen; de rode gebieden zijn de gebieden met lagere extreme neerslagintensiteiten en de groene gebieden met hogere extreme neerslagintensiteiten. Gelijklopende patronen worden gevonden voor neerslagkwantielen bij tijdsduren van 15 minuten (Figuur 5-2), 1 uur (Figuur 5-3) en 1 dag (Figuur 5-4). In Figuur 5-6 is de factor gemiddeld voor elk van de deelstroomgebieden van de waterloopstroomgebieden weergegeven.



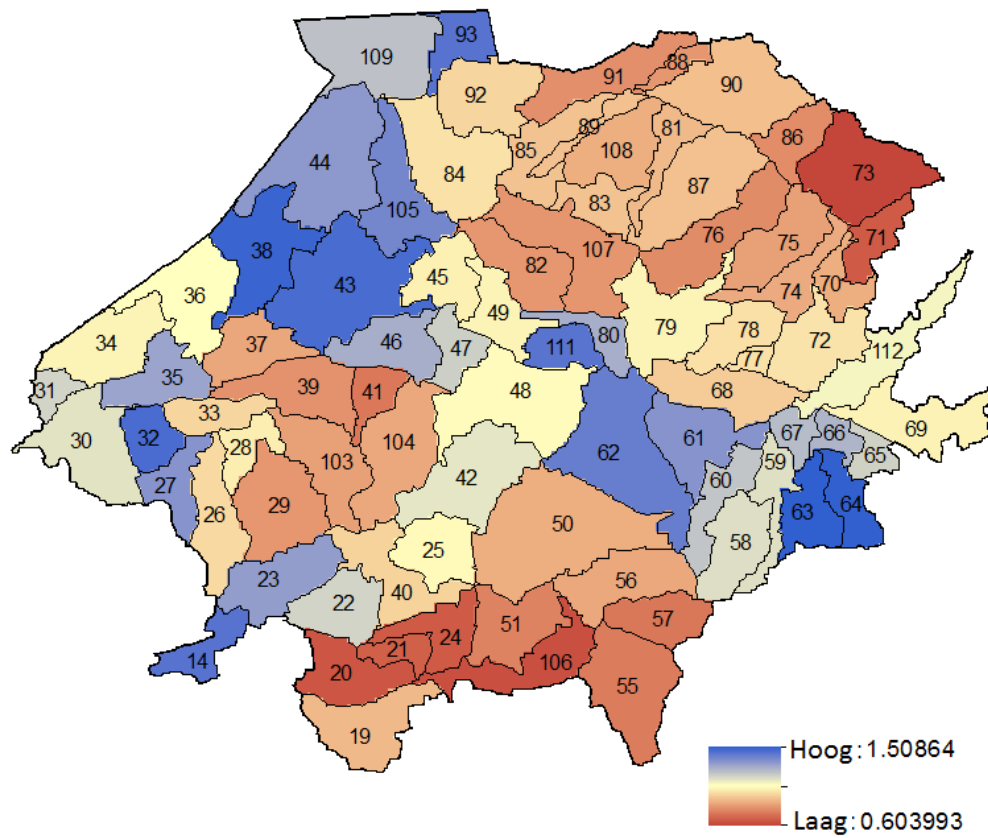
Figuur 5-2: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen ($T > 1j$, 15 minuten)



Figuur 5-3: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen ($T > 1j$, 1 uur)

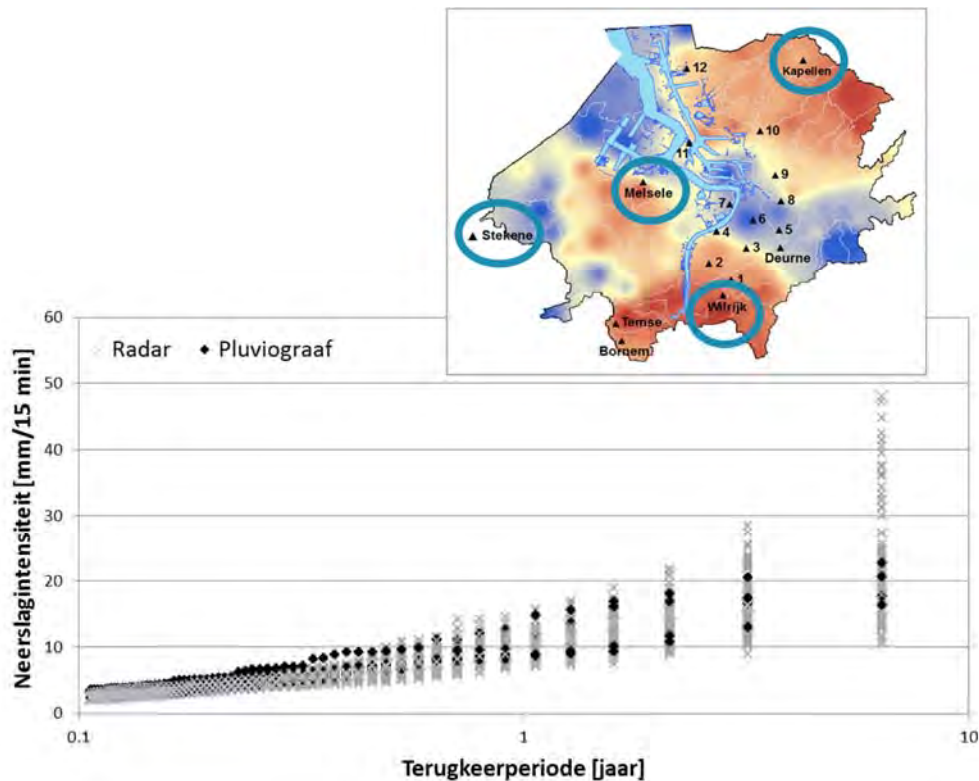


Figuur 5-4: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen ($T > 1j$, 1 dag)

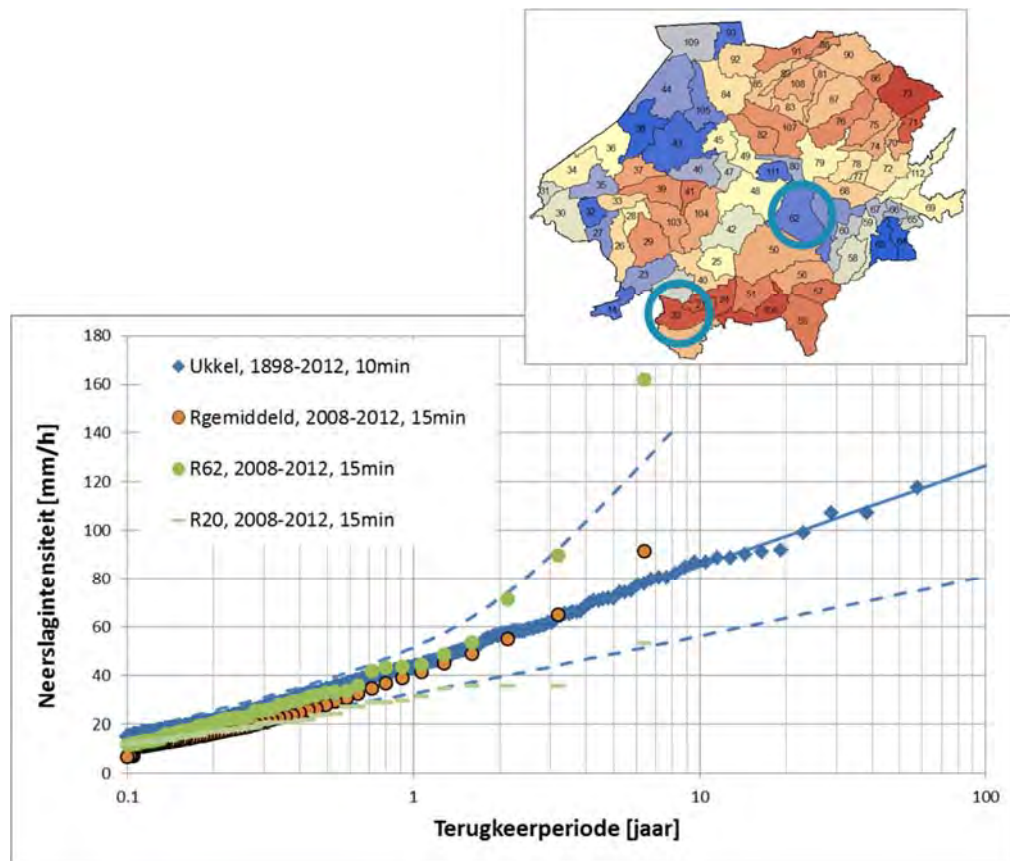


Figuur 5-5: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen, gemiddeld per deelstroomgebied waterlopen ($T > 1j$, 15 minuten)

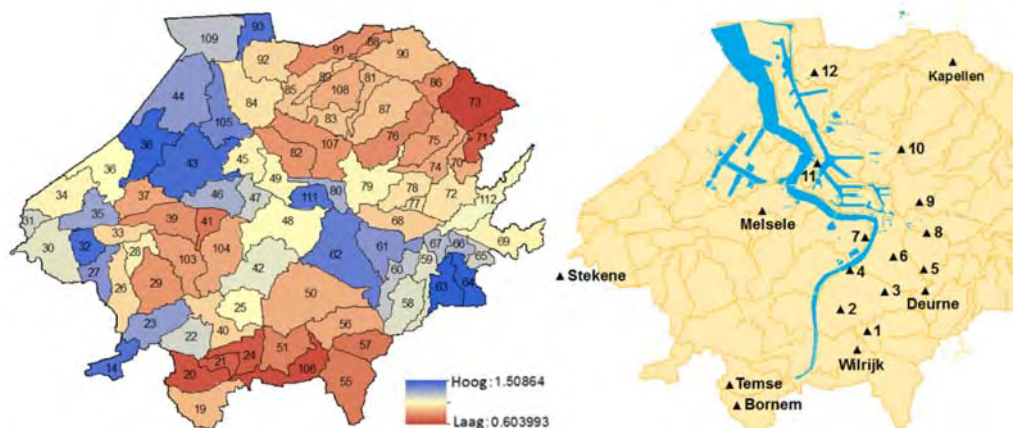
Wanneer de neerslagkwantielen worden geanalyseerd op basis van de pluviograafgegevens worden in grootteorde vergelijkbare ruimtelijke verschillen gevonden; zie Figuur 5-6 voor de 15-minuten pluviograafgegevens te Kapellen, Wilrijk, Melsele en Stekene. Wanneer deze neerslagkwantielen worden vergeleken met deze te Ukkel blijken ze gemiddeld voor de ganse regio Antwerpen vergelijkbaar te zijn met deze te Ukkel (zie Figuur 5-7). Voor individuele locaties of deelstroomgebieden kunnen de neerslagkwantielen wel sterk verschillen met deze te Ukkel. Figuur 5-7 illustreert hoe sterk de verschillen kunnen zijn voor twee deelstroomgebieden (nr. 62 en 20) met zeer hoge en lage neerslagkwantielen. Merk op dat in Figuur 5-7 de 15-minuten neerslagkwantielen voor de regio Antwerpen werden vergeleken met de 10-minuten neerslagintensiteiten te Ukkel, omwille van de beschikbare kleinste tijdstappen voor Antwerpen en Ukkel. Voor Ukkel is een langere periode met waarnemingen beschikbaar (vanaf 1898), wat toelaat om de extrapolatie van de neerslagkwantielen naar grotere terugkeerperioden (groter dan 100 jaar) te evalueren. Zulke extrapolatie wordt typisch via een extreme-waarden-verdeling gemodelleerd. In Figuur 5-7 werd de Veralgemeende Pareto-verdeling (Generalized Pareto Distribution: GPD) gekalibreerd aan zowel de neerslagextremen te Ukkel, als aan de neerslagextremen voor de regio Antwerpen voor de deelgebieden met de grootste en laagste neerslagextremen. De kalibratie gebeurde via de methode beschreven in Willems, 2000, 2013b en Willems et al., 2007; d.i. dezelfde methode als gebruikt aan de basis van de IDF-curve voor Ukkel en de composietbuien die standaard in Vlaanderen gebruikt worden voor het ontwerp van rioleringsystemen (zie de Code van Goede Praktijk voor Rioleringsystemen, van de Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid) (CIW, 2012; Willems, 2009, 2011).



Figuur 5-6: Vergelijking ruimtelijke variatie in 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode volgens de radargegevens, met de pluviograafgegevens te Kapellen, Wilrijk, Melsele en Stekene, o.b.v. de periode 2008-2014

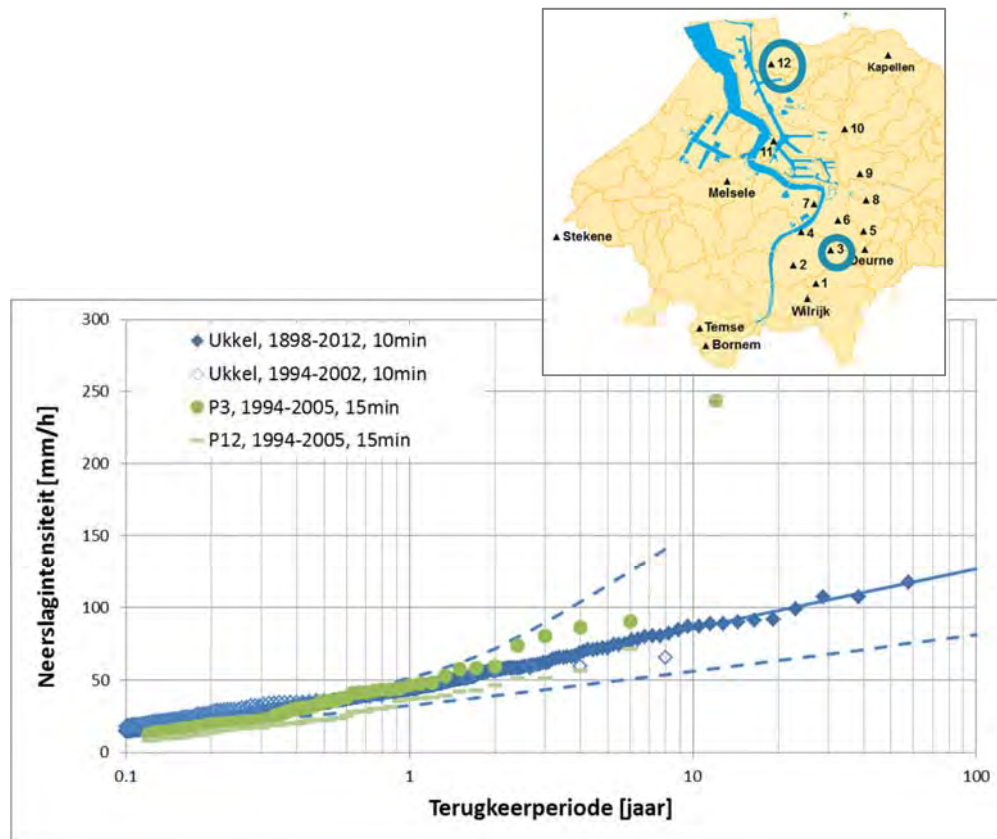


Figuur 5-7: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor deelstroomgebieden met hoge en lage intensiteiten (deelstroomgebieden nr. 62 en 20) en gemiddeld voor alle deelstroomgebieden, o.b.v. de periode 2008-2012, met de 10-minuten neerslagintensiteiten te Ukkel voor de periode 1898-2012.

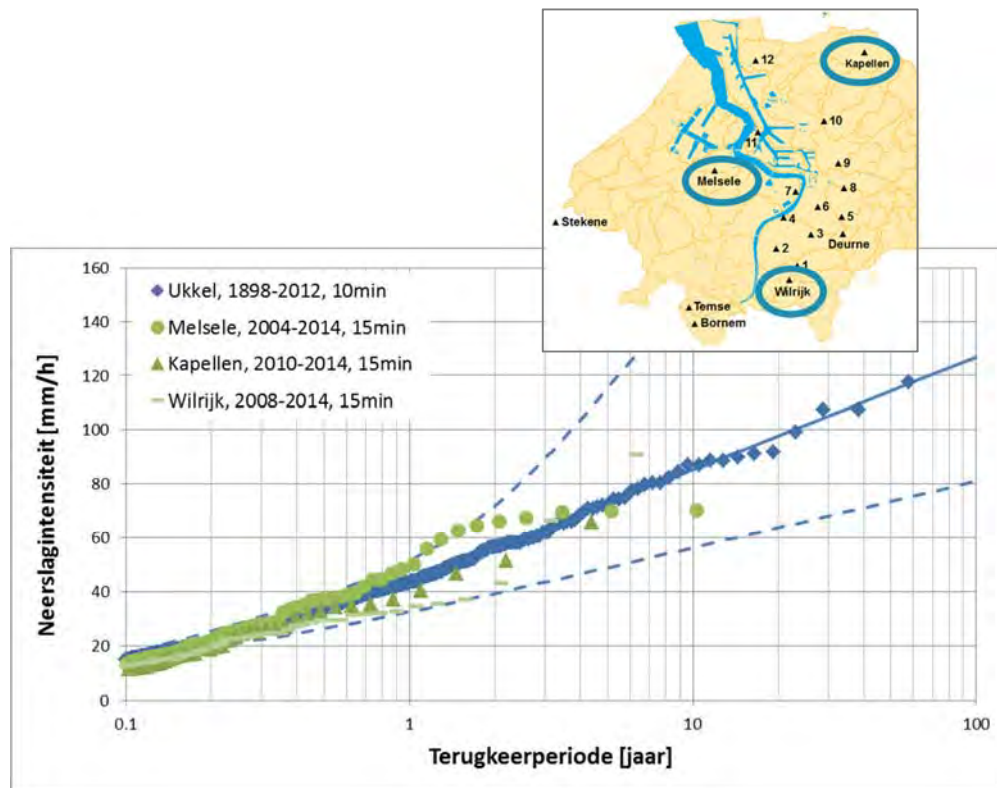


Figuur 5-8: Relatieve locatie van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen t.o.v. de deelstroomgebieden met hogere en lagere neerslagkwantielen.

Ook voor de 12 pluviografen van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen worden neerslagkwantielen gevonden met vergelijkbare ruimtelijke variaties (Figuur 5-9); de variaties zijn wel iets minder groot, wat logisch is omdat geen van de pluviografen in gebieden gelokaliseerd zijn met de grootste en kleinste ruimtelijke verschillen (Figuur 5-8). Dit is ook het geval voor de pluviografen van VMM (Figuur 5-10). Merk op dat de meetperioden telkens verschillen, wat kan bijdragen aan de verschillen in neerslagkwantielen tussen de pluviografen onderling.

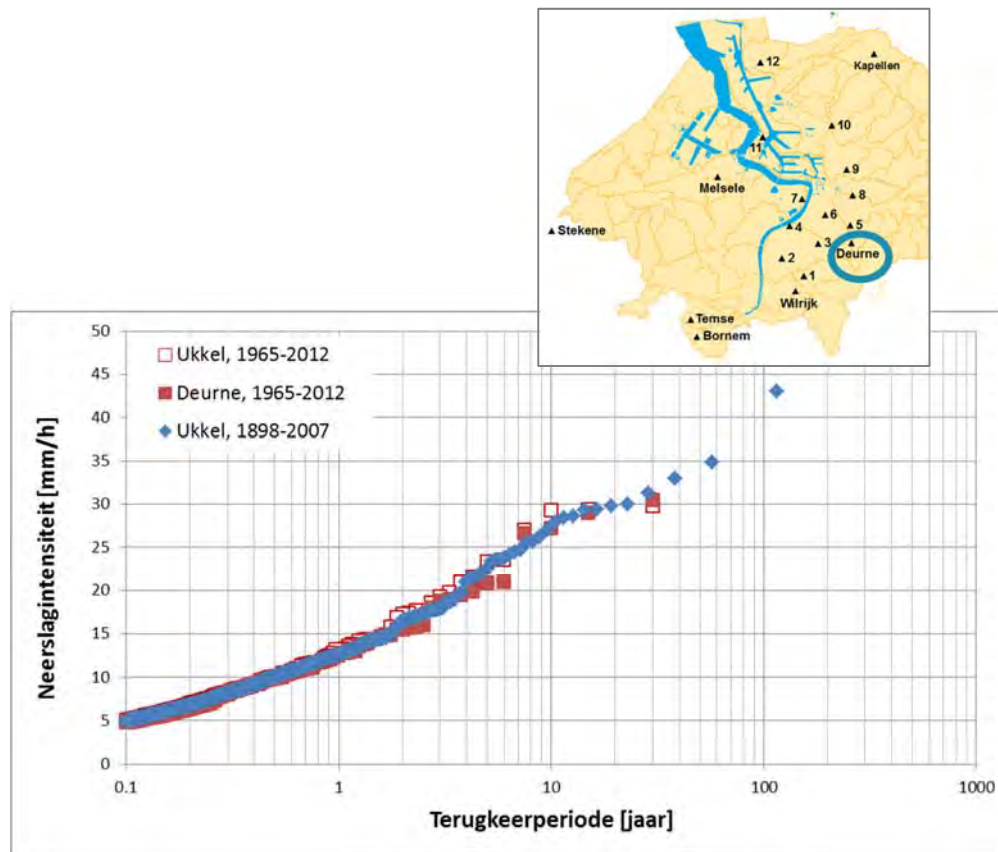


Figuur 5-9: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de pluviografen P3 en P12 van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen, met de ruimtelijke spreiding voor alle deelstroomgebieden, o.b.v. de periode 1994-2005.



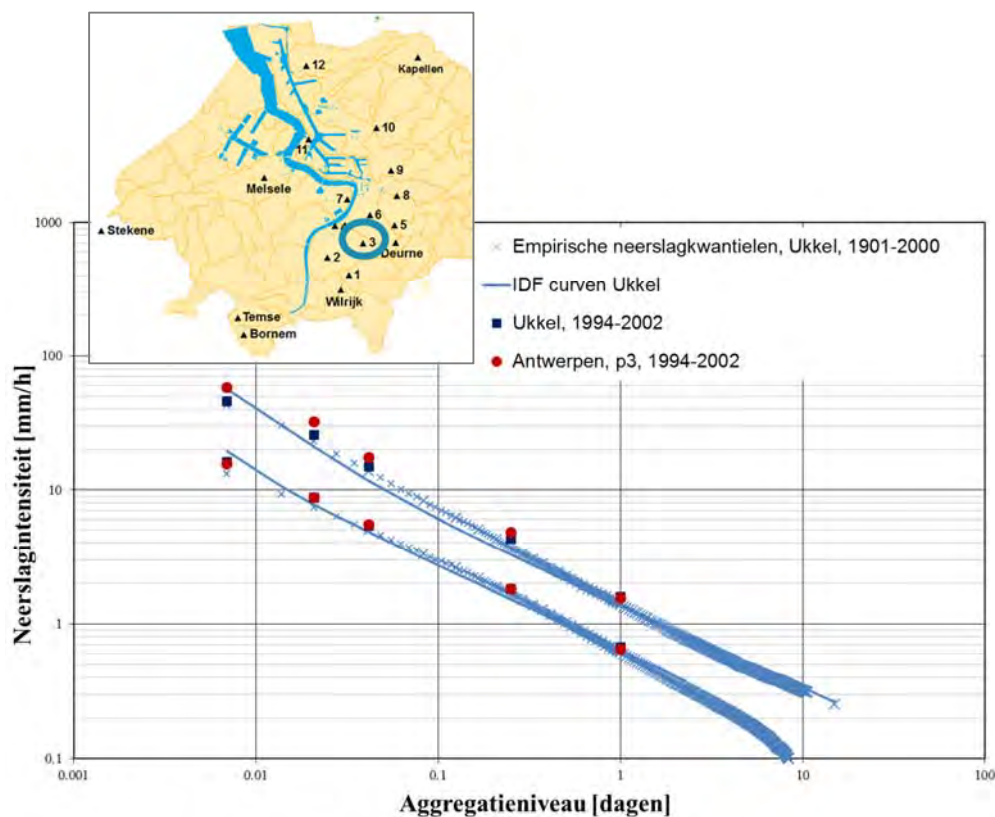
Figuur 5-10: Vergelijking van de 15-minuten neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de pluviografen te Melsele, Kapellen en Wilrijk, met de ruimtelijke spreiding voor alle deelstroomgebieden, o.b.v. de beschikbare meetperioden.

Omdat de pluviografen van de Stad Antwerpen en VMM geen windscherm bevatten en niet altijd in open ruimtes zijn opgesteld, zonder hindernissen voor de luchtstroming in de omgeving (vb. bomen, hoge gebouwen), dit is tegenstelling met de pluviografen van het KMI, was het nuttig om ook een vergelijking te maken met de neerslagmetingen van het KMI te Deurne. De neerslagkwantiteiten te Deurne en Ukkel blijken vergelijkbaar; ook het verschil in meetperiode (vanaf 1898 te Ukkel, vanaf 1965 te Deurne) blijken weinig verschil te kennen (Figuur 5-11).



Figuur 5-11: Vergelijking van de uurlijkse neerslagintensiteit in functie van de terugkeerperiode voor de KMI-pluviografen te Deurne versus Ukkel, o.b.v. de gemeenschappelijke periode 1965-2012 versus de periode vanaf 1898 te Ukkel.

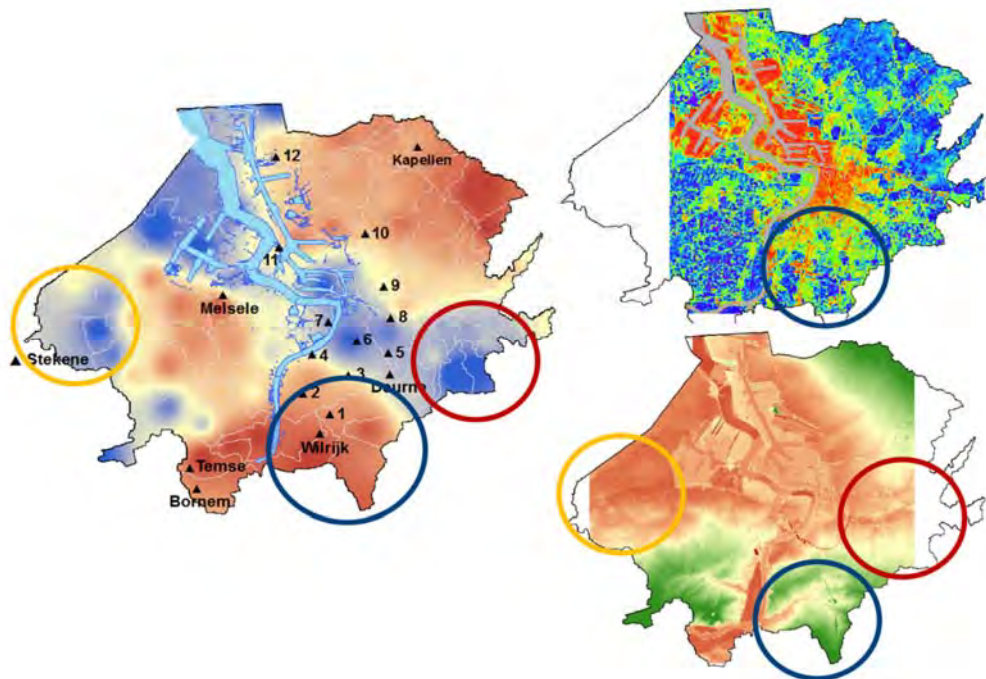
Zoals verwacht treden de ruimtelijke verschillen in extreme neerslagkwantielen vooral bij de kleine tijdsduren op. Vergelijking van Figuur 5-4 met Figuur 5-3 en Figuur 5-2 gaf al aan dat de ruimtelijke verschillen bij dagelijkse intensiteiten kleiner zijn dan bij uurlijkse en 15-minuten intensiteiten. Dit wordt bevestigd in Figuur 5-12, waar het verschil in IDF-curven wordt vergeleken. Deze IDF-curven geven weer hoe de extreme neerslagintensiteiten bij welbepaalde terugkeerperioden afhankelijk zijn van de tijdsduur (het zogenaamde aggregatieniveau). Wanneer de neerslagintensiteiten voor de pluviograaf P3 worden vergeleken met die van Ukkel, zowel voor dezelfde periode als de langere periode te Ukkel, blijken de intensiteiten voor de P3 hoger vooral bij de kleinere tijdsduren. De verschillen worden kleiner voor de grotere tijdsduren. Dit bevestigt dat de ruimtelijke verschillen in extreme neerslagintensiteiten vooral het gevolg zijn van de kortdurende, extreme regenbuien (vb. zomeronweders van convectieve oorsprong).



Figuur 5-12: Vergelijking van de IDF-curven voor de pluviograaf P3 van het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen voor tijdsduren tussen 15-minuten en 1 dag, met deze te Ukkel, o.b.v. de gemeenschappelijke periode 1994-2002 versus de periode 1901-2000 te Ukkel.

De ruimtelijke verschillen stemmen niet perfect overeen met de ruimtelijke verschillen in de radargegevens, maar geven wel in grote lijnen ruimtelijke verschillen weer van dezelfde grootteorde. Dit geeft aan dat de ruimtelijke verschillen o.b.v. de radargegevens niet als perfect (100% nauwkeurig) moeten verondersteld worden (zie ook verder), maar onderhevig zijn aan statistische onzekerheid als gevolg van de relatief beperkte periode met beschikbare neerslaggegevens. Hetzelfde geldt voor de pluviograafgegevens. Daarom werd later ook een statistische hypothesetoets uitgevoerd om de significantie van de ruimtelijke verschillen verder te testen.

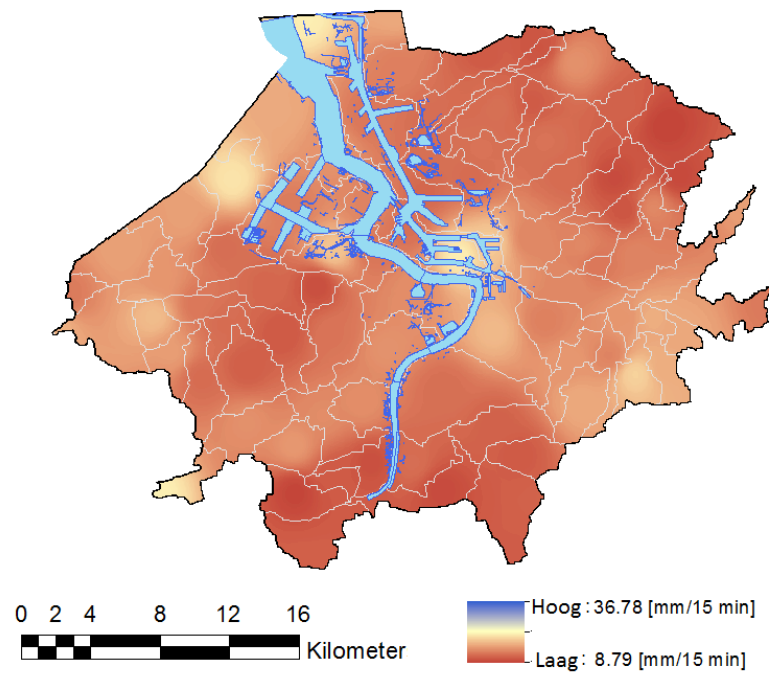
Vergelijking van deze ruimtelijke patronen in extreme neerslag met de locaties van het meest urbaan gebied en de haven (Figuur 2-6 en Figuur 2-7) en met het digitaal hoogtemodel van de regio (Figuur 2-8) toont dat deze ruimtelijke neerslagpatronen geïnduceerd worden door een combinatie van verstedelijking (het welbekende hitte-eilandeffect en verhoogde neerslagcondensatie als gevolg van verhoogde concentraties aan aerosolen boven de haven en het stadscentrum) met topografische invloed. De neerslagkwantielen zijn inderdaad systematisch en significant hoger in de lager gelegen gebieden en boven of aan de lijzijde van de haven en het stadscentrum (Figuur 5-13).



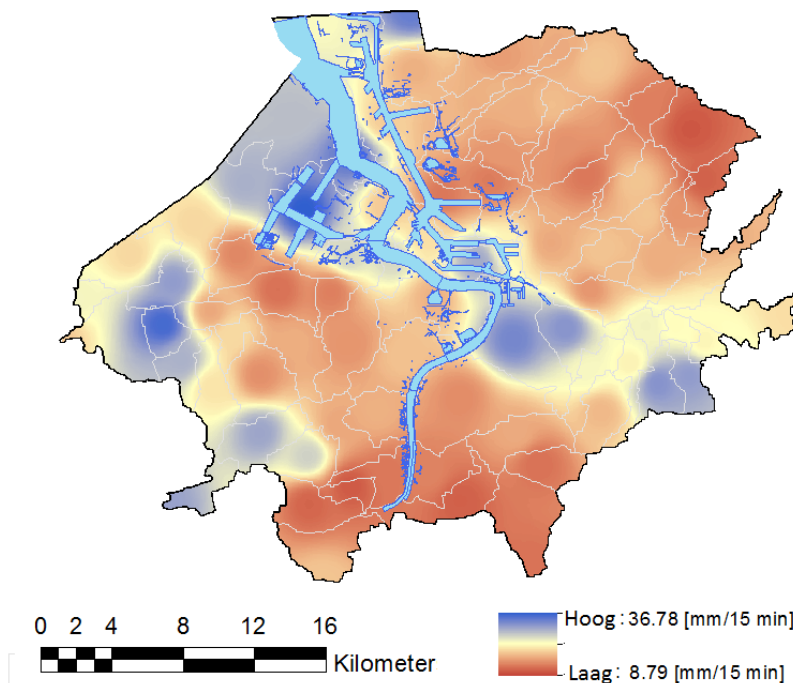
Figuur 5-13: Vergelijking van de ruimtelijke variaties in extreme neerslagintensiteiten met de ruimtelijke variaties in verstedelijking (kaart groene vegetatie rechts boven) en topografie (kaart digitaal hoogtemodel rechts onder).

Gelijkaardige ruimtelijke patronen worden verkregen wanneer men andere drempel terugkeerperiodes analyseert ($T=2$ jaar of $T=5$ jaar i.p.v. $T=1$ jaar); zie Figuur 5-14 en Figuur 5-15. Bij hogere terugkeerperiodes ziet men overigens duidelijk hogere neerslagextremen; de kleurschalen werden voor Figuur 5-14 en Figuur 5-15 gelijk gekozen, zodat het verschil in intensiteitswaarden direct via de kleur zichtbaar is. Merk op dat in Figuur 5-14 en Figuur 5-15 de absolute neerslagkwantielwaarden werden geplotted, dit in

tegenstelling tot Figuur 5-2, Figuur 5-3 en Figuur 5-4, waar relatieve waarden werden getoond worden (ten opzichte van het gebiedsgemiddelde neerslagkwantielen).



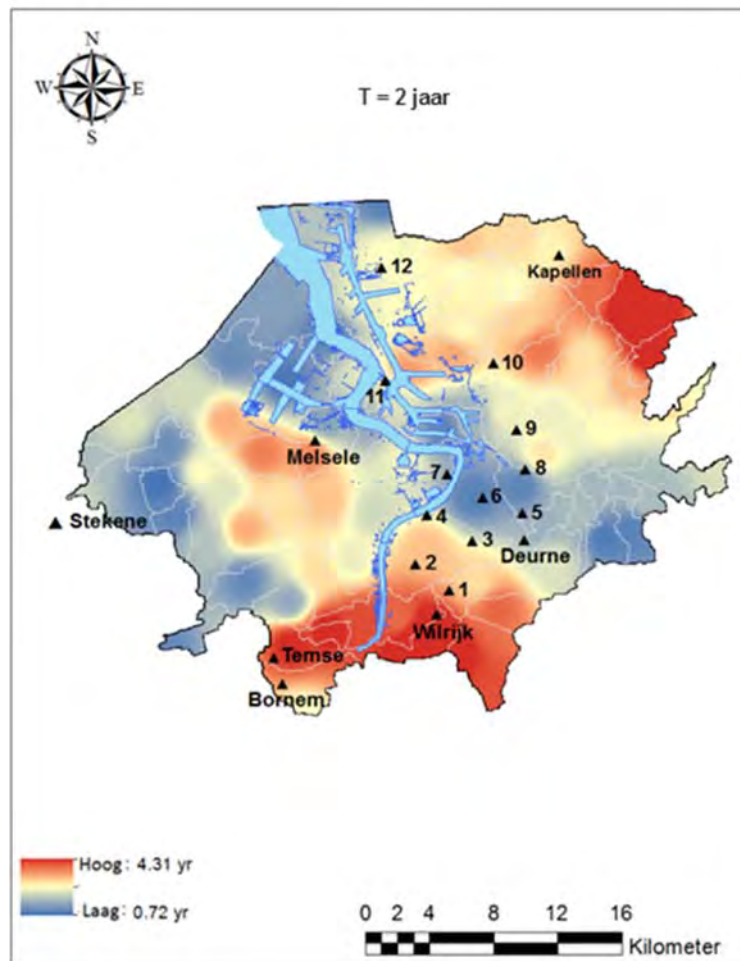
Figuur 5-14: Huidige ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen ($T = 2$ jaar, 15 minuten)



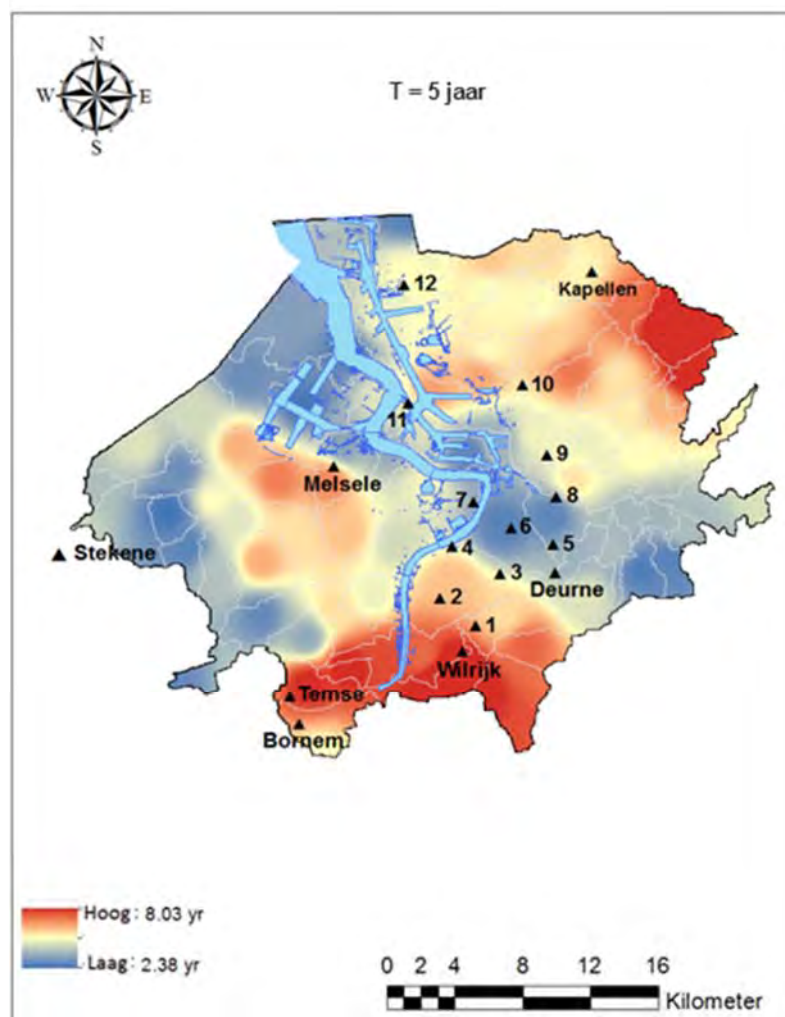
Figuur 5-15: Huidige ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen ($T = 5$ jaar, 15 minuten)

Concreet betekenen de vorige resultaten dat er bepaalde gebieden zijn in de Antwerpse regio waarvoor de neerslagextremen groter zijn dan gemiddeld voor de regio, en dus ook groter dan de overeenkomstige neerslagwaarden te Ukkel, terwijl er andere gebieden zijn waar het omgekeerde geldt: neerslagextremen kleiner dan gemiddeld, en dus ook kleiner dan de overeenkomstige neerslagwaarden te Ukkel. Dit heeft consequenties voor het waterbeheer. Bij rioleringsontwerp bijvoorbeeld worden ontwerpen standaard gemaakt op basis van de statistieken te Ukkel, conform de Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels. De Antwerpse neerslagkaarten geven aan dat het gebruik van deze uniforme statistieken voor gans Vlaanderen in bepaalde gebieden tot onderdimensioneringen leiden en in andere gebieden tot overdimensioneringen. Omdat rioleringsontwerpen typisch gebeuren o.b.v. welbepaalde terugkeerperioden voor de neerslag, worden de over- en onderschattingen hieronder ook weergegeven via het verschil in terugkeerperiode.

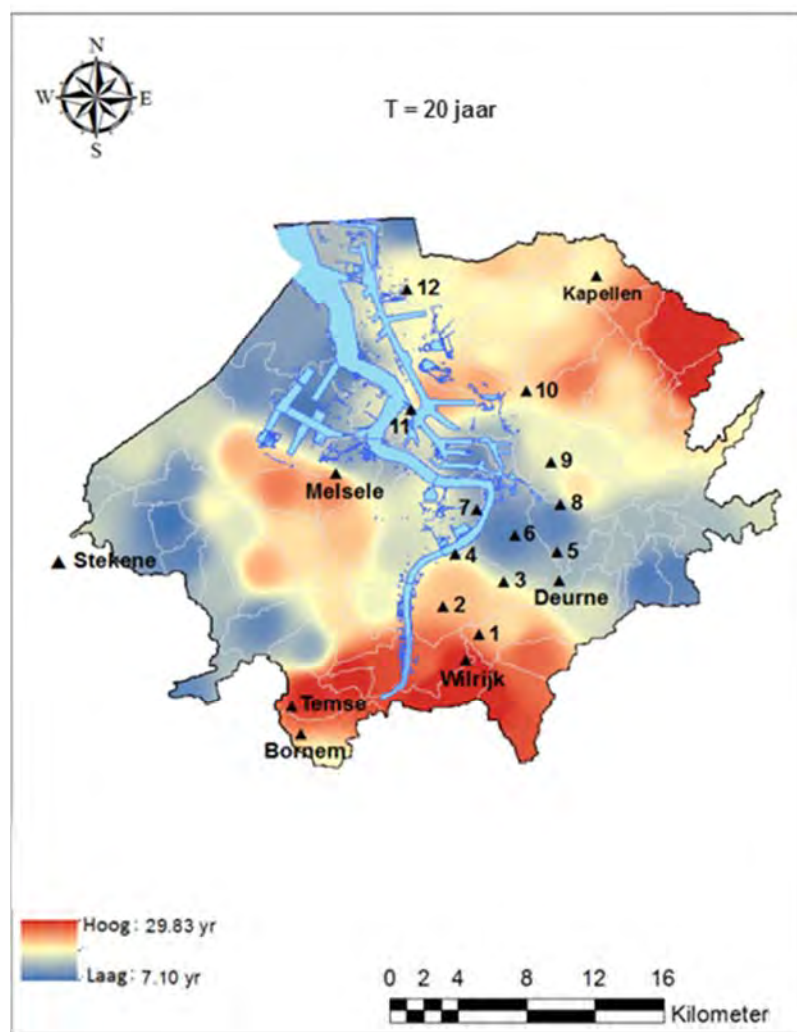
Figuur 5-16, Figuur 5-17 en Figuur 5-18 tonen voor de 15-minuten neerslagwaarden met welbepaalde terugkeerperioden (2, 5 en 20 jaar) voor de Antwerpse regio met welke terugkeerperiode deze neerslagwaarden overeenkomen indien ze worden afgelezen in de neerslagstatistieken gebruikt in de Vlaamse Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels. Voor een terugkeerperiode van 5 jaar bijvoorbeeld toont Figuur 5-17 dat de Antwerpse neerslagwaarden voor bepaalde gebieden overeenkomen met hogere terugkeerperioden volgens de Code tot 8.03 jaar en in andere gebieden met lagere terugkeerperioden tot 2.38. Voor de gebieden waarbij de geplotte terugkeerperiodes waarden lager zijn dan 5 jaar, zijn rioleringen ontworpen volgens de Code mogelijks ondergedimensioneerd in vergelijking met de werkelijke Antwerpse neerslagstatistieken. Men zou kunnen stellen dat bepaalde rioleringsstrengen, waarvoor beoogd werd dat ze gemiddeld slechts één maal per 5 jaar water op straat geven, door deze onderdimensionering gemiddeld één maal per 2.38 jaar water op straat geven. Maar zo eenvoudig is het niet. Vooreerst worden rioleringsstelsels zodanig ontworpen dat ze geen water op straat geven voor een welbepaalde terugkeerperiode in de meest kritieke punten van het stelsel. Voor de andere locaties is de terugkeerperiode van water op straat dus hoger. Bovendien zijn de neerslagstatistieken, zowel deze in de Code als deze voor de Antwerpse regio, onderhevig aan niet-onbelangrijke onzekerheden (zie ook hierna). Ten derde worden rioleringsstelsels soms overgedimensioneerd, o.a. via afrondingen bij het ontwerp. Figuur 5-16, Figuur 5-17 en Figuur 5-18 worden daarom best met de nodige zorgvuldigheid geïnterpreteerd. Zo beogen enkel een ruwe indicatie te geven van de mogelijke grootteorde van de over/onderdimensioneringen.



Figuur 5-16: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio (T = 2 jaar, 15 minuten)

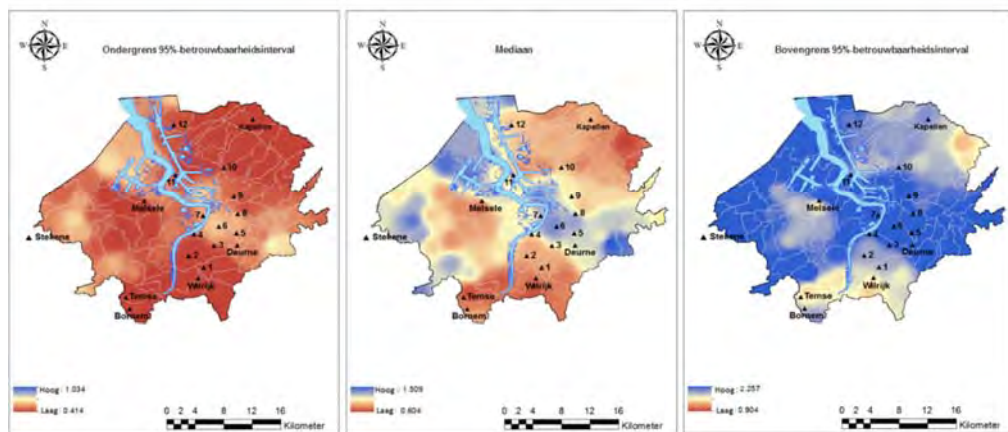


Figuur 5-17: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio ($T = 5$ jaar, 15 minuten)



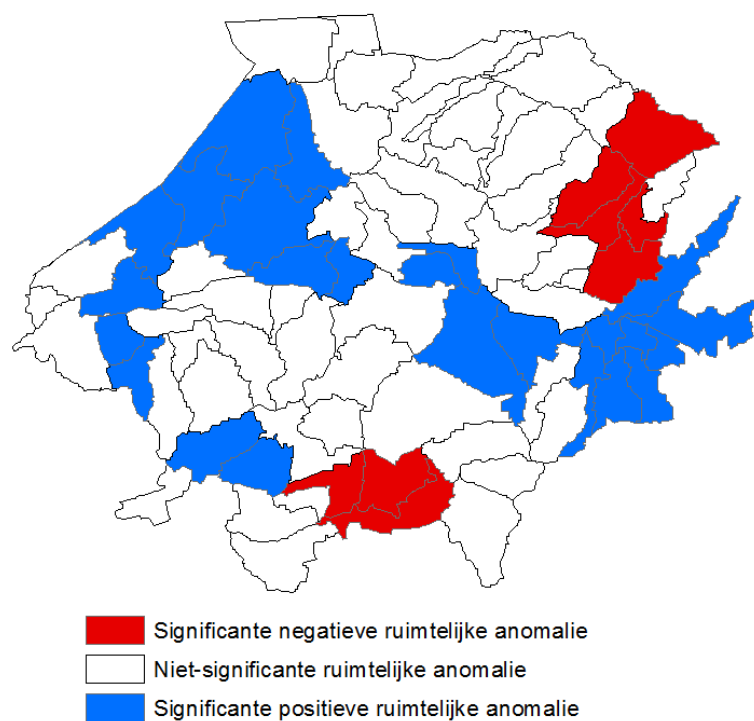
Figuur 5-18: Terugkeerperiode volgende de Vlaamse Code van de Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsstelsels horende bij de neerslagwaarden met een welbepaalde terugkeerperiode voor elke locatie in de Antwerpse regio (T = 20 jaar, 15 minuten)

Zoals hiervoor al aangegeven moeten de ruimtelijke neerslagkaarten niet als “exact” geïnterpreteerd te worden. Ze zijn immers onderhevig aan niet onbelangrijke onzekerheid als gevolg van de sterke natuurlijke variabiliteit in neerslag in combinatie met de beperkte lengte van de beschikbare meetreeksen van neerslaggegevens (beperkte “steekproefomvang” in de statistiek). Daarom werd via statistische hypothesetoetsing de significantie van de ruimtelijke verschillen geanalyseerd. Hiervoor werd uitgegaan van een nulhypothese waarbij er geen ruimtelijke verschillen bestaan over de Antwerpse regio. Via de statistische techniek van “niet-parametrische bootstrapping” voor kwantificering van onzekerheden, werd voor elke locatie in de Antwerpse regio het 95%-betrouwbaarheidsinterval berekend op de factor verschil in extreme neerslagkwantielen (deze factor vormde de basis voor de ruimtelijke neerslagkaart). Figuur 5-19 toont ter illustratie de ruimtelijke variatie van de onder- en bovengrenzen van dit 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de ruimtelijke neerslagfactor voor 15-minuten neerslagextremen. Deze figuur geeft een beeld van de onzekerheid op de ruimtelijke factor. De ruimtelijke neerslagvariatie kan minder sterk zijn, zoals in de linker-deelfiguur van Figuur 5-19 weergegeven, of sterker zoals in de rechter-deelfiguur weergegeven, maar met hoge waarschijnlijkheid zal de ruimtelijke neerslagvariatie zich situeren tussen deze weergegeven in de linkerfiguur en deze in de rechterfiguur, met een beste maar onzekere schatting zoals in de midden-deelfiguur.



Figuur 5-19: Ondergrens (linker-deelfiguur), mediaan (midden-deelfiguur) en bovengrens (rechter-deelfiguur) van het 95%-betrouwbaarheidsinterval op de ruimtelijke variatie in neerslagextremen gebruikt aan de basis van de hypothesetoetsing ($T > 1j$, 15 minuten)

Op basis van deze onzekerheidsberekeningen geeft Figuur 5-20 aan voor welke deelstroomgebieden de ruimtelijke verschillen in extreme neerslagintensiteiten statistisch significant zijn (bij een significantieniveau van 20%): de gebieden met de grootste ruimtelijke verschillen blijken dus effectief significant, maar voor de gebieden met de minder sterke ruimtelijke verschillen (de witte gebieden in Figuur 5-20) kunnen de gedetailleerde ruimtelijke verschillen evengoed het gevolg zijn van toeval; idem voor de gedetailleerde ruimtelijke verschillen in de blauwe en rode gebieden in Figuur 5-20. De ruimtelijke verschillen moeten dus in grote lijnen, niet ruimtelijk zeer precies geïnterpreteerd worden.



Figuur 5-20: Deelstroomgebieden waarvoor de positieve of negatieve afwijkingen in extreme neerslagintensiteiten statistisch significant zijn (20% significantieniveau, $T > 1j$, 15 minuten)

6 Resultaten voor de regio Antwerpen - Klimaatveranderingssignaal

Dit deel beschrijft de klimaatveranderingssignalen die werden bekomen voor de regio Antwerpen. Gezien de enorme hoeveelheid aan data (wat zijn oorzaak vindt in de meer dan 200 beschikbare runs) en om het overzicht te bewaren, werden de resultaten gegroepeerd. Eerst werden alle klimaatmodelruns samen genomen in één enkele groep. Dit gebeurde enerzijds om het overzicht te bewaren en anderzijds om tegemoet te komen aan bovenvermelde opmerking dat het IPCC geen waarschijnlijkheid toekent aan de verschillende klimaatscenario's. Daarna werden de resultaten ook afzonderlijk per RCP scenario geanalyseerd. Bij de voorstellingswijze wordt hierna vooral gebruik gemaakt van box-plots waarbij de verschillende klimaatmodelruns worden geconsolideerd tot slechts 5 runs, nl. de runs overeenstemmend met de minimum waarde, het 25^e percentiel, de mediaan, het 75^e percentiel en de maximum waarde. Gezien de grote seizoensvariabiliteit, worden de resultaten meestal verder gegroepeerd per maand. Bij bepaalde grafieken wordt een rode lijn toegevoegd, als visuele hulp om de mediaan van de historische waarden mee te geven. De klimaatveranderingssignalen worden hierna weergegeven voor een toekomstperiode van 100 jaar, tenzij anders vermeld.

6.1 Neerslag

6.1.1 Algemeen

In deze studie werden volgende vragen gesteld die betrekking hebben op de toekomstige neerslag in en rond Antwerpen:

1. Wat zijn de maandelijkse vooruitzichten wat betreft totale neerslag? Is er een verschil tussen zomer en winter?
2. Hoe zullen de periodes van droogte wijzigen? Hoeveel droge dagen mogen er verwacht worden per maand/per seizoen en hoe verhoudt zich dit tot de huidige situatie?
3. Wat zijn de verwachtingen voor dagen met extreme neerslag?
4. Wat is de ruimtelijke variabiliteit van de neerslag in het studiegebied vandaag en hoe zal dit veranderen naar de toekomst toe?

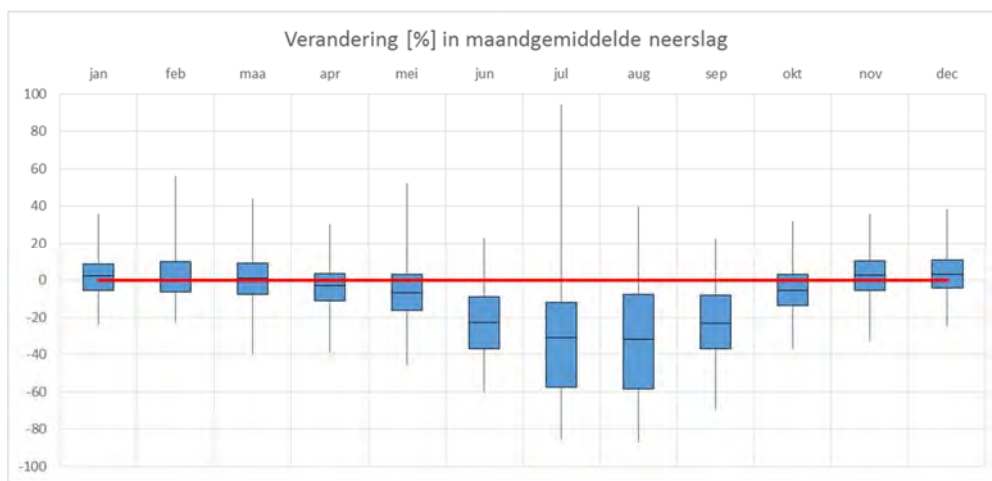
Deze aspecten worden hierna in afzonderlijke secties behandeld.

6.1.2 Maand- en seizoensgemiddelde neerslag

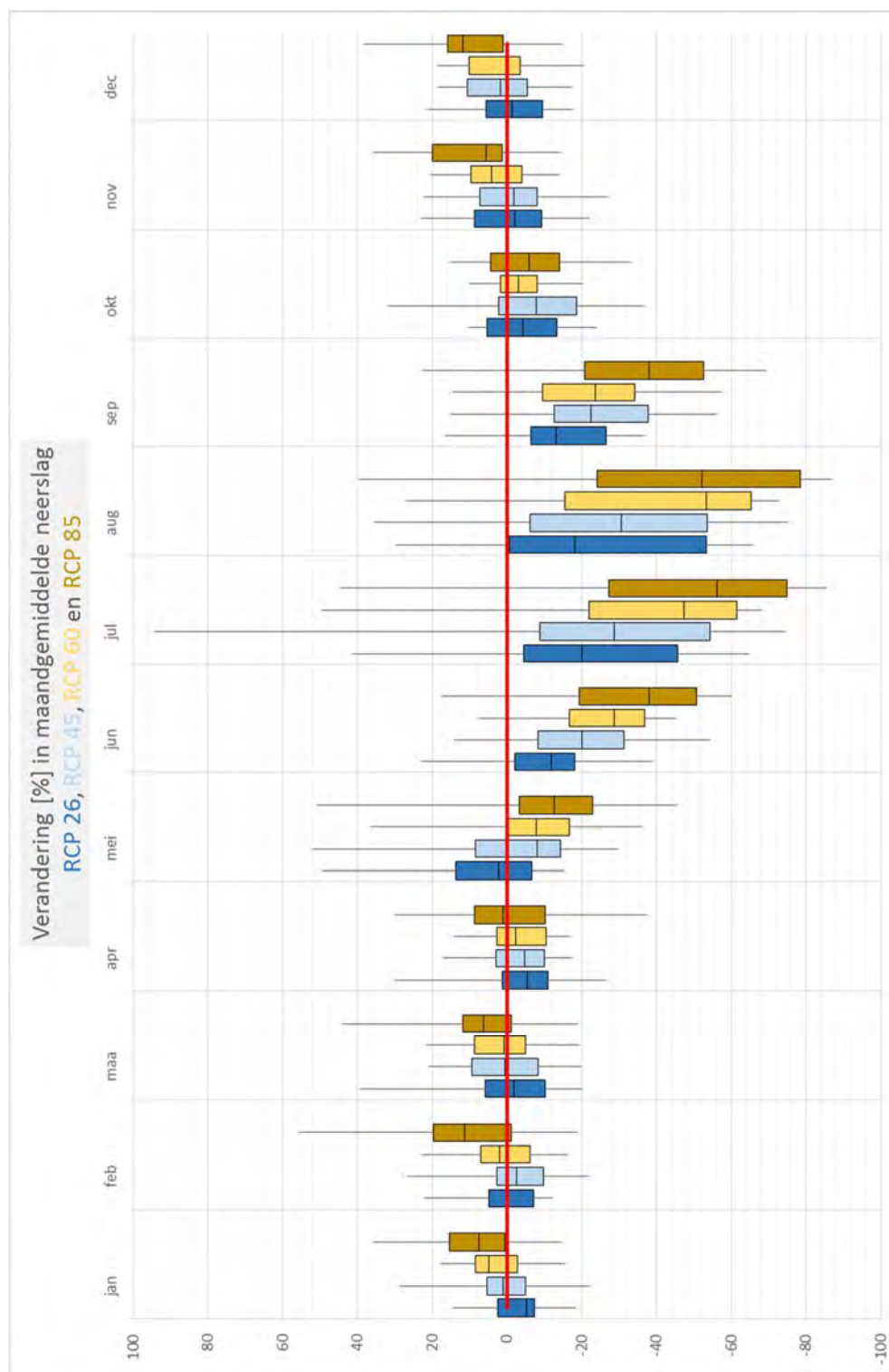
Figuur 6-1 toont de verwachte relatieve verandering in maandgemiddelde neerslag, uitgesplitst per maand, waarbij alle RCP scenario's worden gecombineerd. Figuur 6-2 toont diezelfde resultaten, maar nog verder uitgesplitst per scenario. Afgezien van de grote spreiding van de klimaat modellen kan in het algemeen besloten worden dat de wintermaanden iets natter kunnen worden (gemiddeld enkel procenten) en dat de zomermaanden droger worden, met juli en augustus als uitschieters, gemiddeld zelfs tot 30%. Let wel, deze resultaten hebben betrekking op de totale neerslaghoeveelheid per

maand. Verder in dit rapport worden impactresultaten getoond voor het aantal natte dagen per maand, voor de neerslagintensiteiten van de extreme regenbuien, etc., die samen met deze resultaten moeten geïnterpreteerd worden.

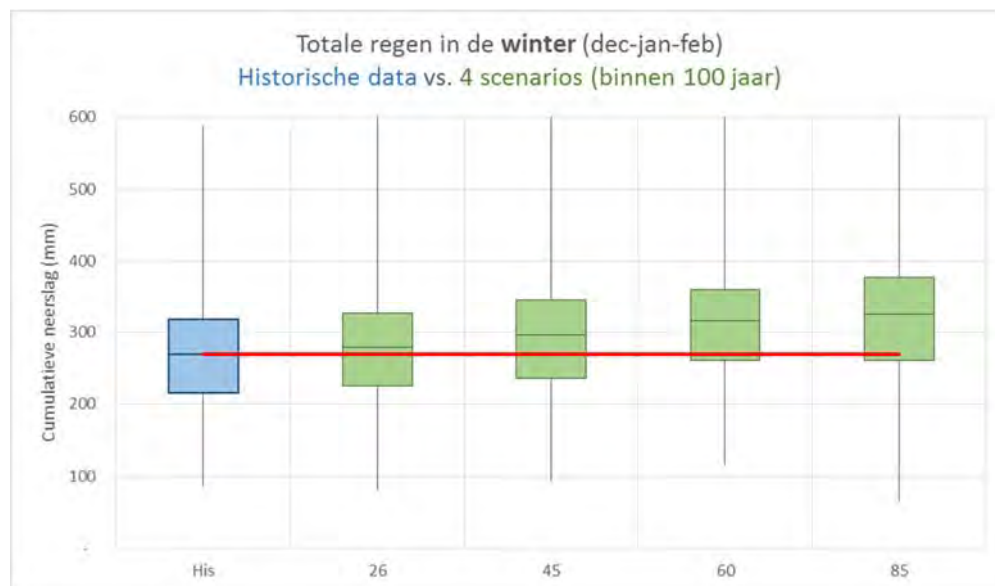
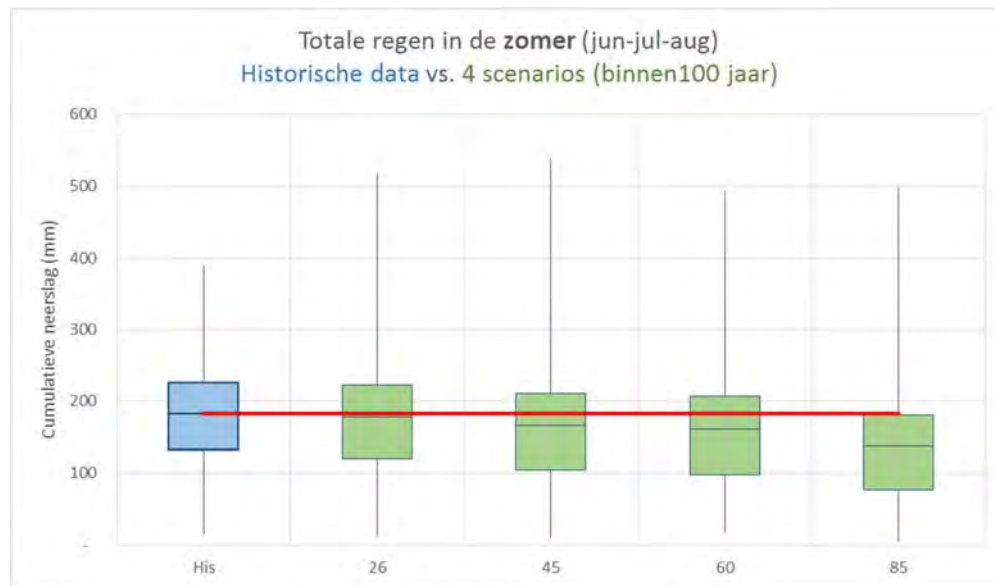
Dezelfde resultaten worden op een andere manier weergegeven in Figuur 6-3, waar de afzonderlijke resultaten voor zomer en winter getoond worden. Het besluit van drogere zomers en iets nattere winters uit Figuur 6-1 wordt hier bevestigd.



Figuur 6-1: Verandering in maandgemiddelde neerslag



Figuur 6-2: Verandering in maandgemiddelde neerslag per RCP scenario

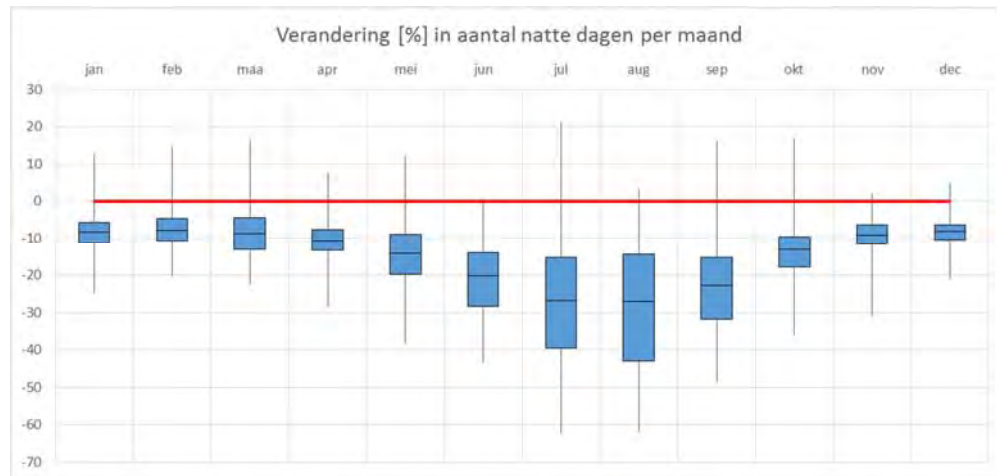


Figuur 6-3: Cumulatieve neerslag per seizoen

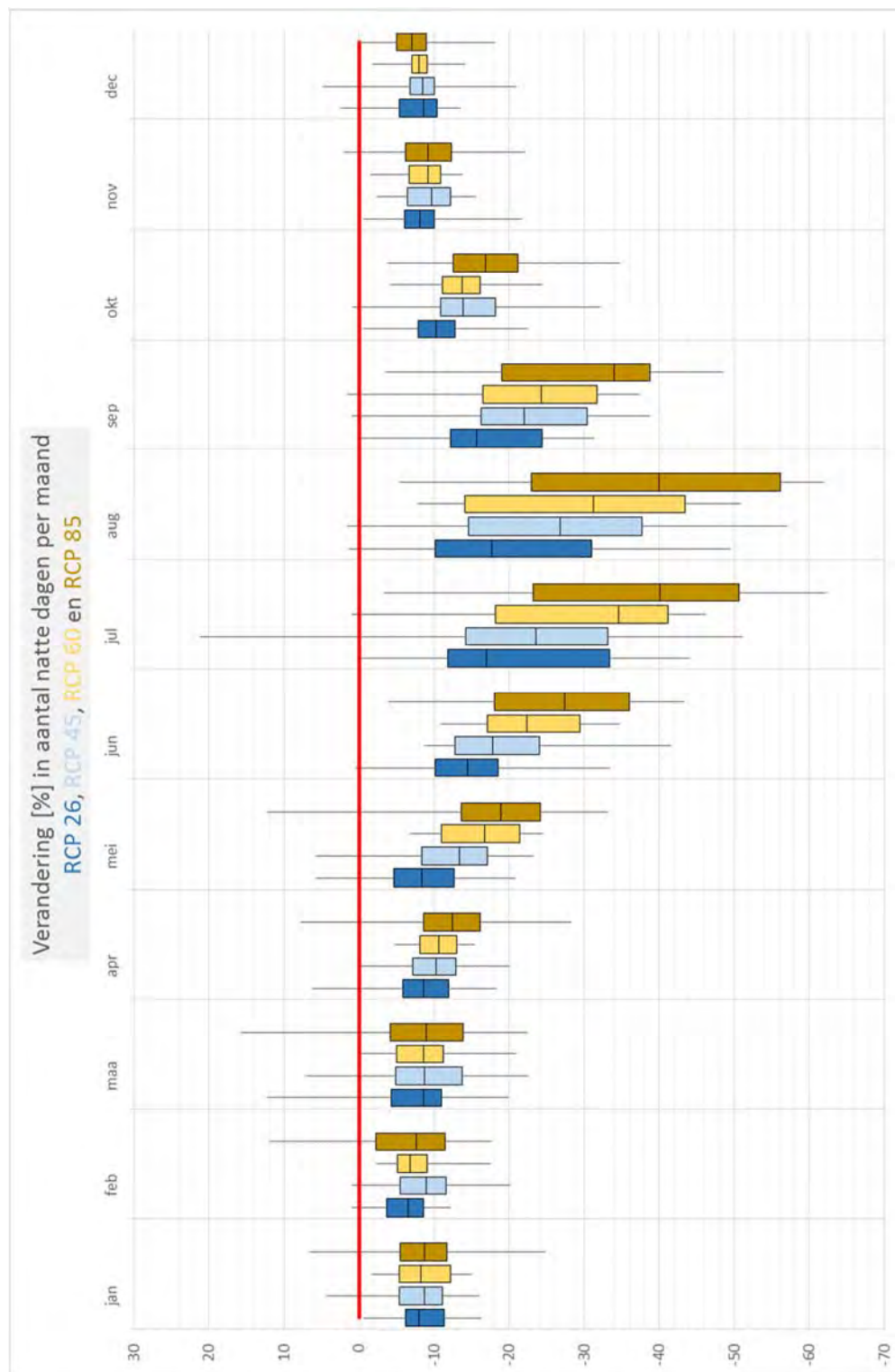
6.1.3 Droge periodes

In deze studie wordt een droge dag gedefinieerd als een dag waarbij de neerslag lager ligt dan 0.1 mm. In tegenstelling tot een strikte definitie van een droge dag (d.i. neerslag = 0.0 mm), wordt het welbekende probleem dat klimaatmodellen te veel dagen met zeer lichte neerslag simuleren, uitgefilterd.

Figuur 6-4 en Figuur 6-5 tonen de relatieve verandering van het aantal natte dagen per maand, zowel voor alle scenario's samen (Figuur 6-4) als uitgesplitst per scenario (Figuur 6-5). Hier ziet men dat - afgezien van de spreiding van de klimaatmodelresultaten - alle maanden minder natte dagen krijgen, waarbij dit effect duidelijker naar voor komt in de zomermaanden. Hoewel de winter gemiddeld gezien iets natter wordt (zie Deel 6.1.2), is dit volgens Figuur 6-4 en Figuur 6-5 niet te wijten aan een verhoging van het aantal natte dagen; integendeel, het aantal natte dagen in de wintermaanden daalt in beperkte mate. Verder ziet men aan de smallere boxplots in de wintermaanden, dat de modellen iets meer uniformiteit vertonen in die periode in vergelijking met de zomermaanden.



Figuur 6-4: Verandering van het aantal natte dagen per maand



Figuur 6-5: Verandering van het aantal natte dagen per maand en per RCP scenario

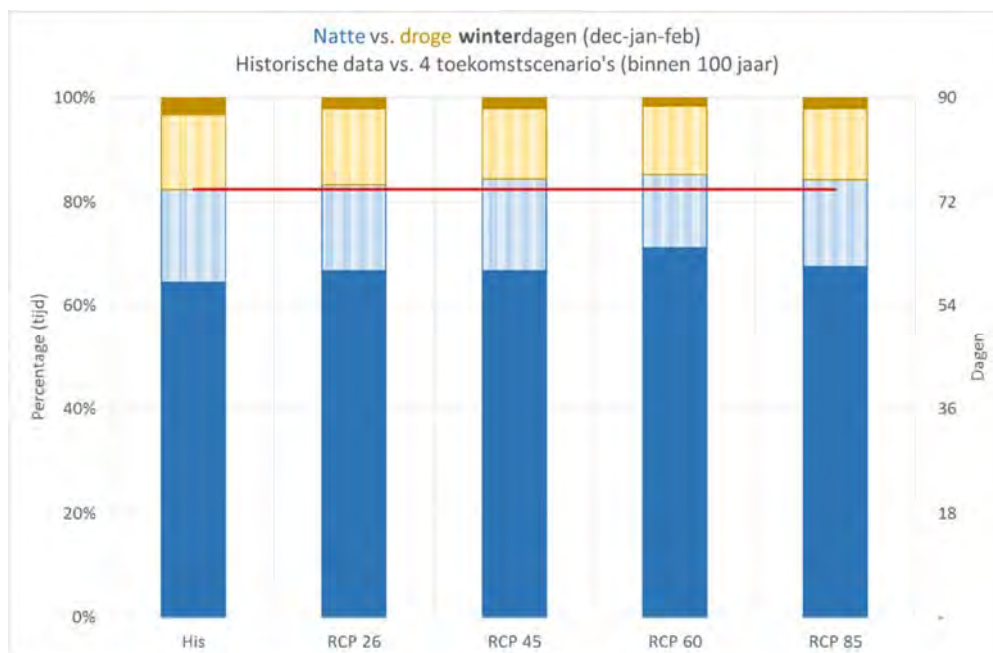
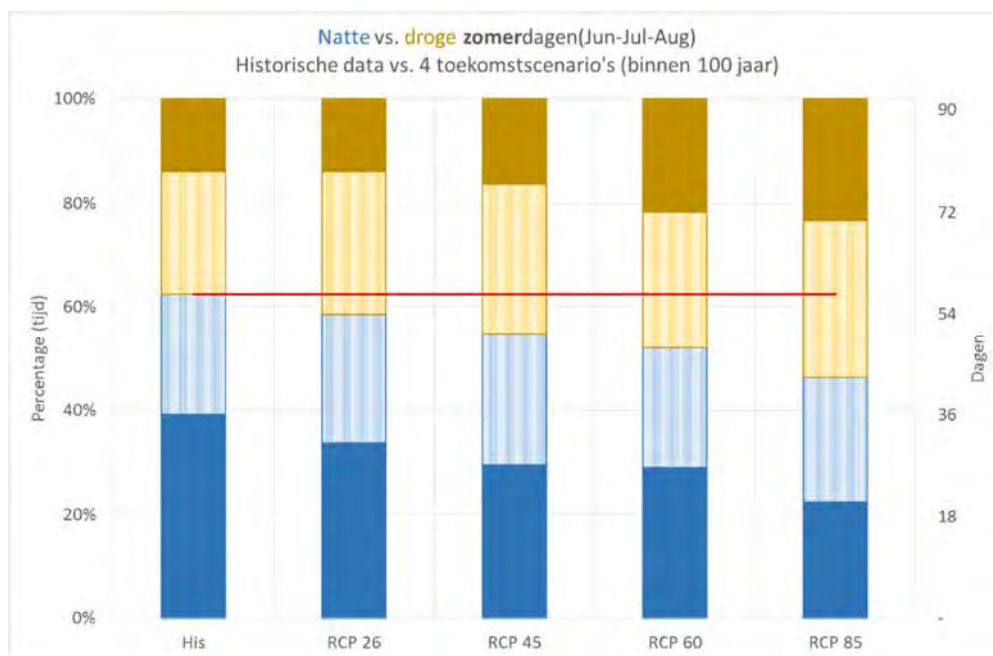
Verder geeft Figuur 6-6 een andere weergave van dezelfde resultaten, opgesplitst per seizoen (zomer en winter) en per RCP. Hoe deze figuur gelezen moet worden, wordt uitgelegd met een kort voorbeeld:

- De historische data geeft aan dat een gemiddelde winter iets meer dan 80% natte dagen heeft. Dit komt overeen met de scheiding geel-blauw op de grafiek.
- Een typische (huidige) droge winter (5^e percentiel wat betreft aantal natte dagen) komt overeen met iets meer dan 60% natte dagen. Dit komt overeen met de scheiding gearceerd blauw – vol blauw op de grafiek.
- Een typische (huidige) natte winter (95^e percentiel wat betreft aantal natte dagen) komt overeen met bijna 100% natte dagen, wat af te lezen valt op de scheiding gearceerd geel – vol geel op de grafiek.

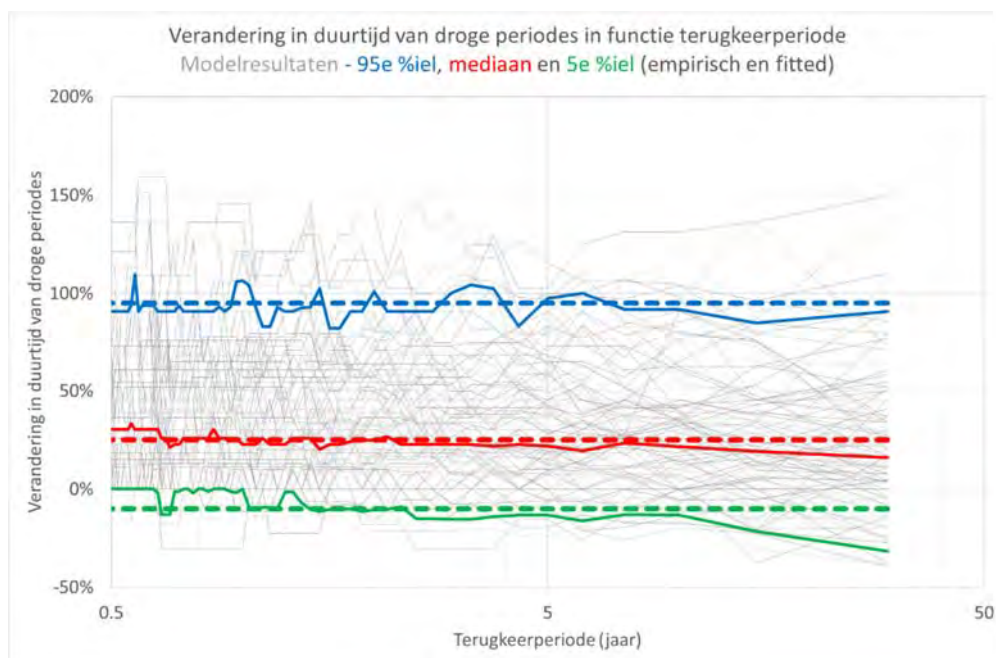
Hetzelfde besluit als voordien blijft hier dus geldig: de zomers krijgen duidelijk minder natte dagen, terwijl de winters iets natter kunnen worden.

Merk op dat de boxplots in Figuur 6-4 het minimum, 25^e percentiel, mediaan, 75^e percentiel en maximum van de verschillende modellen tonen, terwijl Figuur 6-6 het 5^e percentiel, mediaan en 95^e percentiel van de verschillende modellen toont. Dit moet in het achterhoofd gehouden worden wanneer beide figuren met elkaar vergeleken worden.

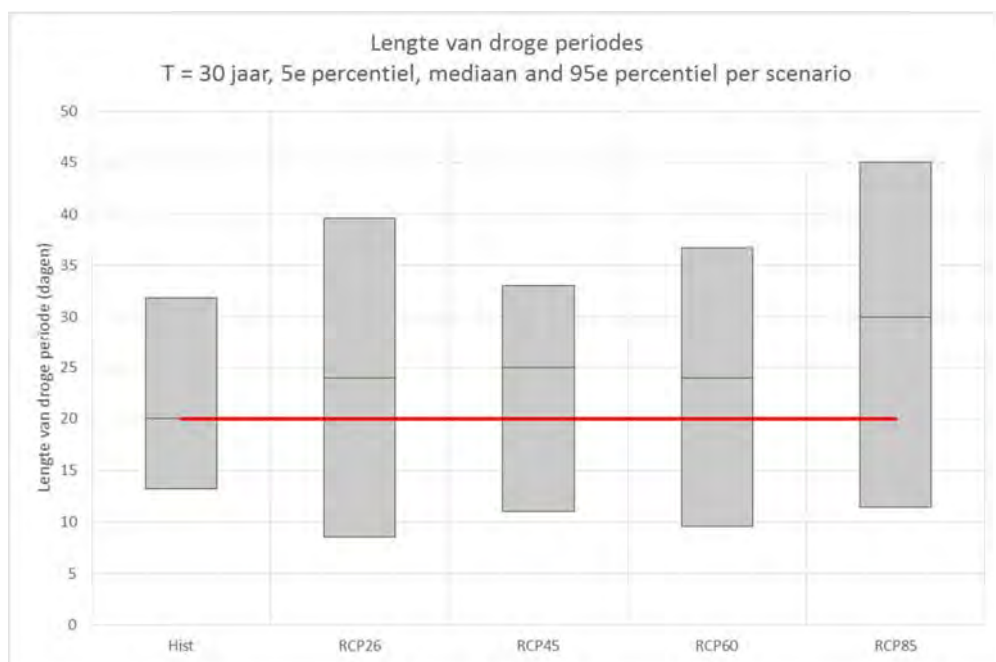
Als derde en laatste aspect binnen deze sectie rond droge periodes wordt gekeken naar de duur van de extreem droge periodes. Figuur 6-7 geeft de relatieve verandering van de lengte van droge periodes weer in functie van de terugkeerperiode. Figuur 6-8, Figuur 6-9 en Figuur 6-10 tonen meer in detail de lengte van droge periodes met terugkeerperiode $T = 30, 5$ en 2 jaar. Hieruit blijkt dat een gemiddelde (mediaan) droge periode 25% langer duurt binnen honderd jaar, vrijwel onafhankelijk van de terugkeerperiode. Het 95^e percentiel van de klimaatscenario's geeft bijna een verdubbeling van de lengte van droge periodes aan.



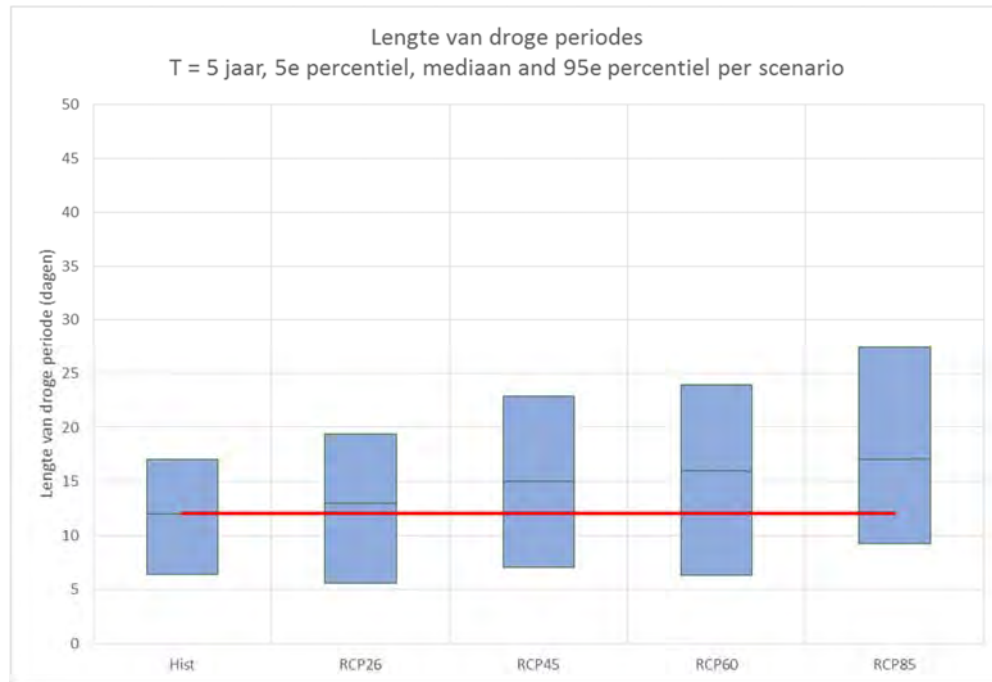
Figuur 6-6: Natte vs. droge dagen voor zomer- en winterseizoen



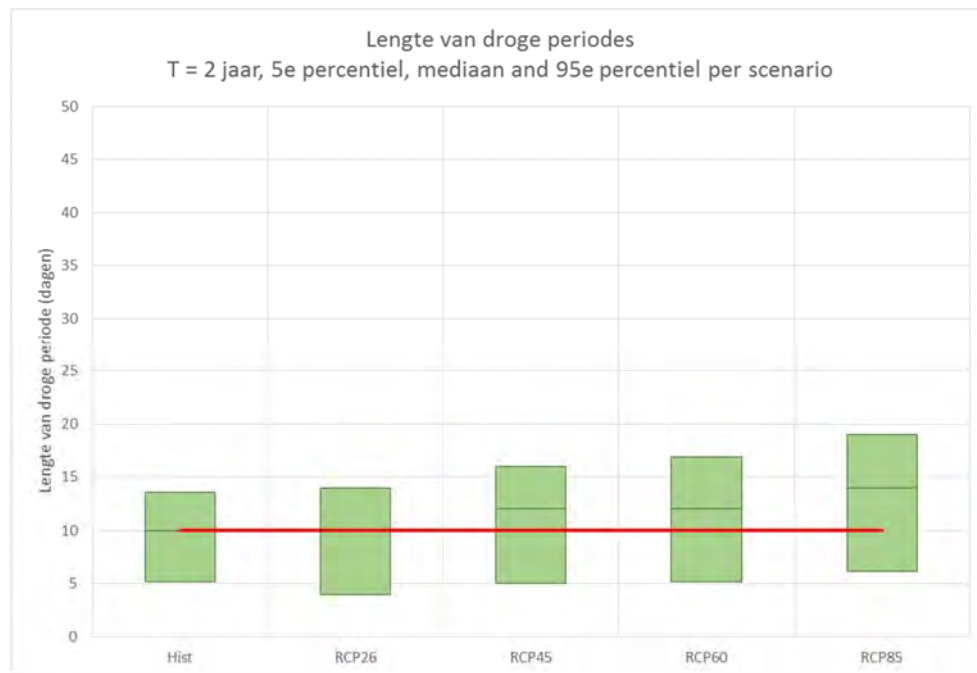
Figuur 6-7: Verandering in lengte (duurtijd) van droge periodes



Figuur 6-8: Lengte van droge periodes met $T = 30j$



Figuur 6-9: Lengte van droge periodes met T = 5j



Figuur 6-10: Lengte van droge periodes met T = 2j

6.1.4 Ruimtelijke variatie binnen het studiegebied

Op de resultaten in Deel 6.1.4, waarbij de (gebiedsgemiddelde) extreme dagneerslag onderzocht werd kan nu de statistische neerschaling (zie Deel 4.3) toegepast worden, gebruikmakend van de ruimtelijke variatie in extreme neerslag in het studiegebied bij tijdschalen van 15 minuten of 1 uur voor het huidig klimaat. Dit resulteert in Figuur 6-11, waar projecties van de ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen ($T = 5$ jaar, buiduur 15 min) voor toekomsthorizonten 2030, 2050 en 2100 getoond worden, samen met de huidige situatie. Noteer dat het bovenste luik van deze figuur identiek is aan Figuur 5-15, waarbij enkel de kleurenschaal aangepast werd, om te voorzien voor de toekomstige hogere waarden.

Dezelfde type kaarten kunnen aangemaakt worden voor elke terugkeerperiode $T > 1$ jaar.

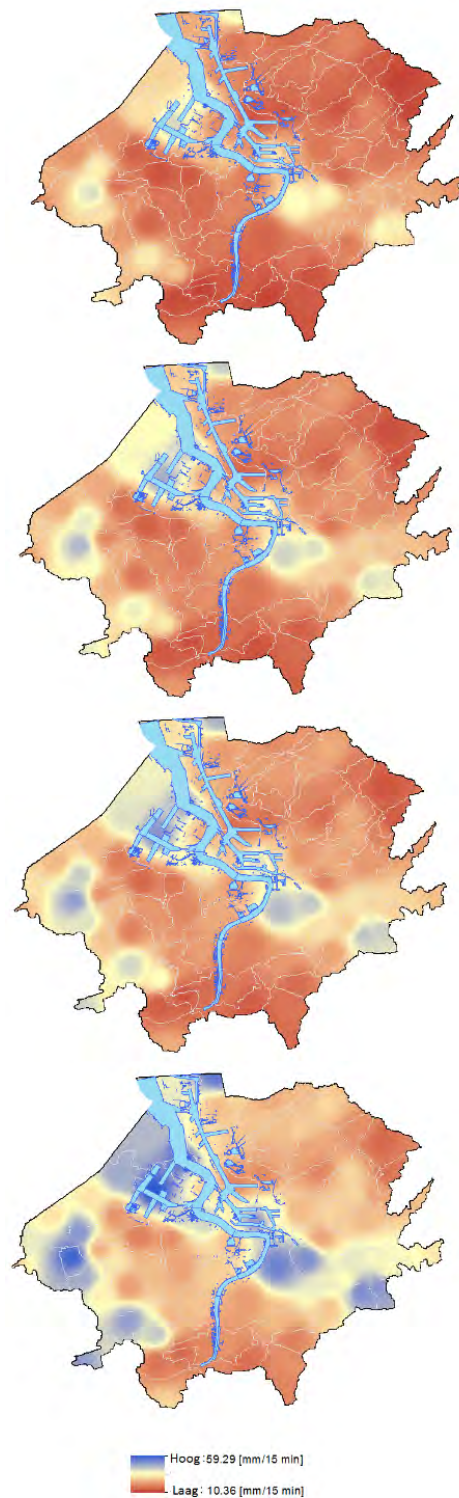
6.1.5 Extreme dagneerslag

Naast totale neerslag en droge periodes, werd ook de extreme dagneerslag onder de loep genomen. In Figuur 6-12 ziet men de stijging in extreme dagneerslag in functie van de terugkeerperiode, voor zowel zomer als winter. Om het overzicht te bewaren, wordt enkel het 95^e percentiel en de mediaan van alle klimaat modellen weergegeven. Op de grafiek is zowel voor de zomer als voor de winter een duidelijk stijgende trend te zien wat betreft extreme dagneerslag bij hogere terugkeerperiodes. De figuur toont extrapolaties tot 50 jaar, maar verdere extrapolaties – uiteraard met grotere onzekerheid - zijn mogelijk. In deze studie zijn de extrapolaties beperkt tot 100 jaar (zie Deel 8.4).

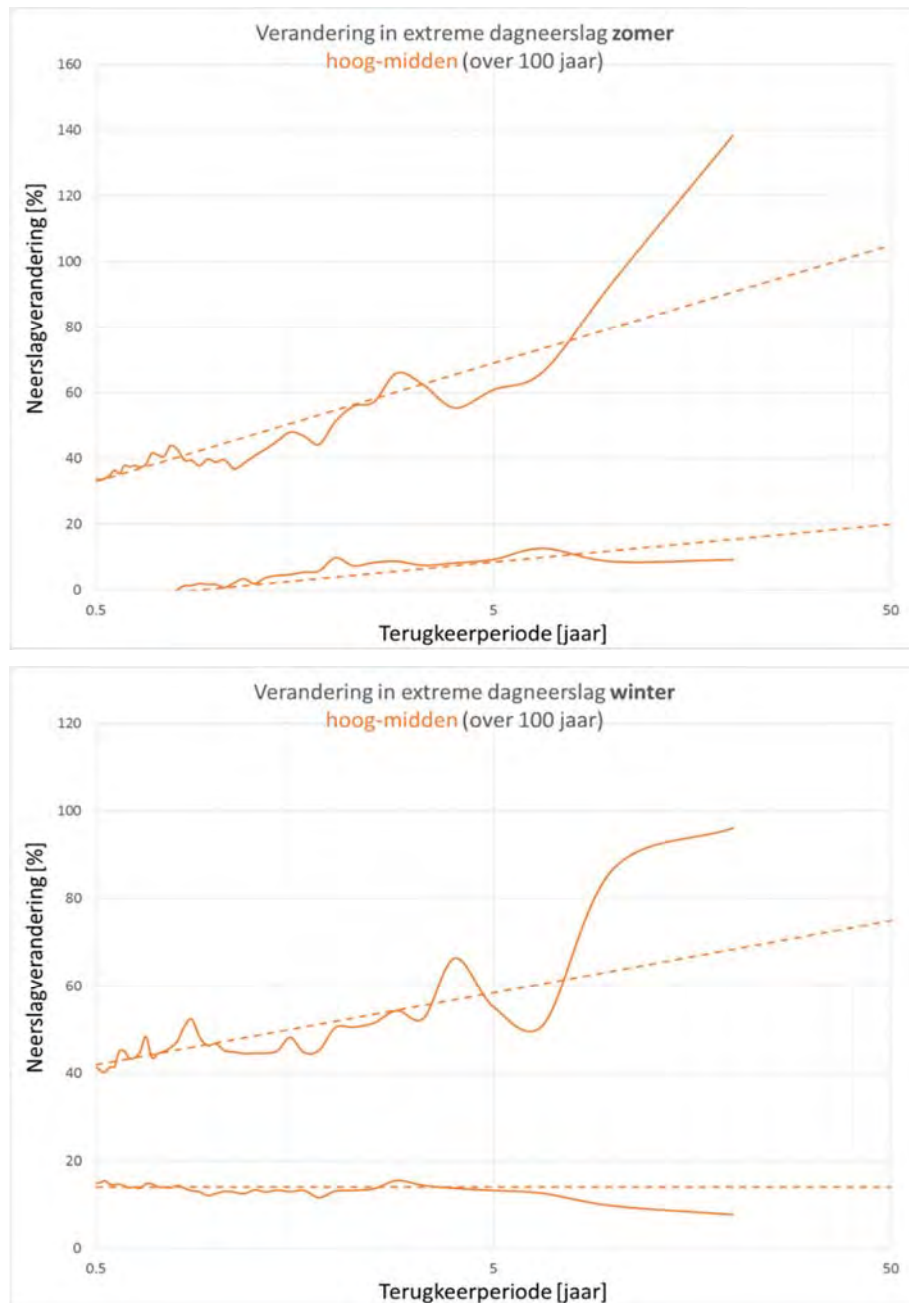
Het resultaat voor de zomer (extremere neerslag bij hogere terugkeerperiodes) moet samen bekeken worden met voorgaande resultaten. De zomer wordt over het algemeen droger (lagere seizoensneerslag, zie Deel 6.1.2), waarbij er minder natte dagen zijn (zie Deel 0). Een natte dag zal echter wel extremer zijn.

Het resultaat voor de winter vult de besluiten uit vorige Delen 6.1.2 en 0 verder aan. De winter wordt algemeen gezien natter (Deel 6.1.2), wat niet te wijten is aan een stijging in aantal natte dagen (Deel 0). Zoals nu blijkt uit Figuur 6-12 vindt een nattere winter zijn oorzaak in een stijging van de extreme dagneerslag, d.w.z. een natte dag (die in aantal weliswaar vermindert) wordt nog natter.

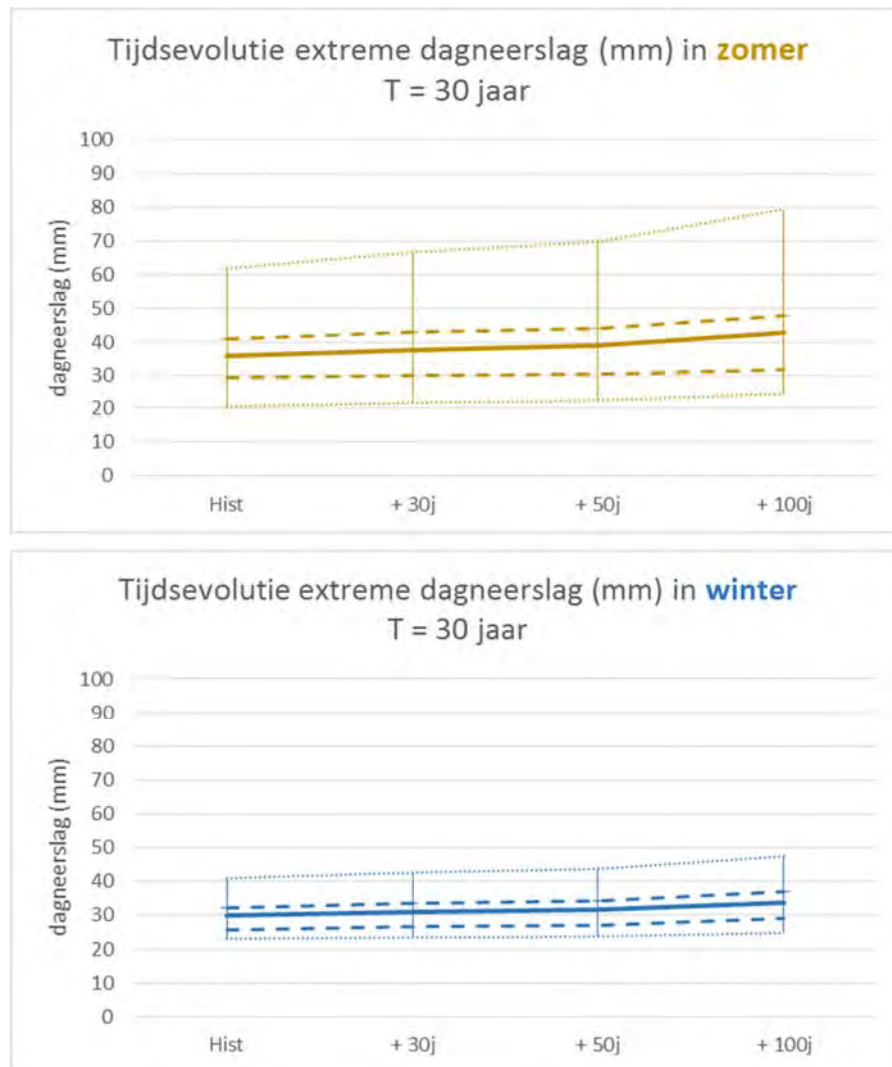
Een andere grafische weergave betreffende de extreme dagneerslag wordt gegeven in Figuur 6-13, Figuur 6-14 en Figuur 6-15, waar een tijdsevolutie voor de extreme dagneerslag met terugkeerperiode $T = 30, 5$ en 2 jaar getoond wordt. Minimum, 25^e percentiel, mediaan, 75^e percentiel en maximum worden meegegeven. Dezelfde besluiten als voorheen blijven geldig.



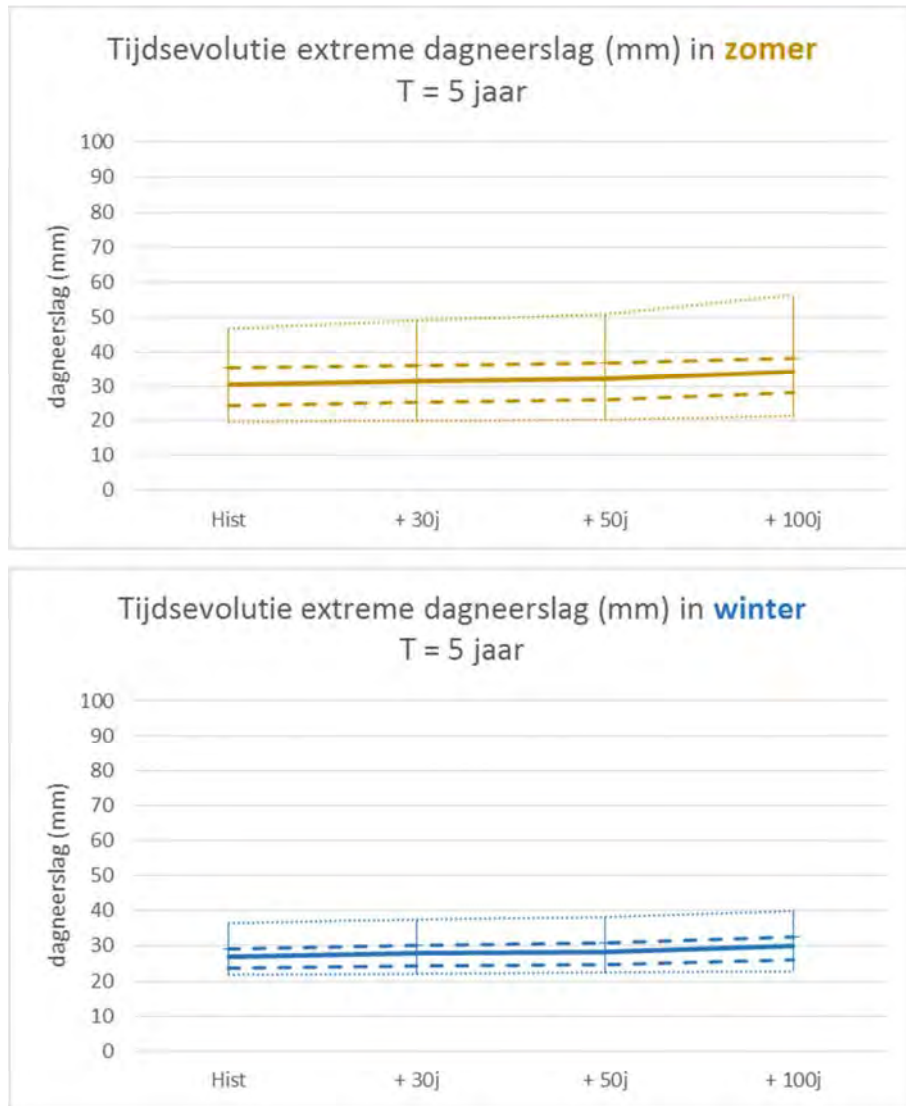
Figuur 6-11: Ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen, $T = 5j$, 15-min (van boven tot onder: Huidig klimaat, 2030, 2050 en 2100)



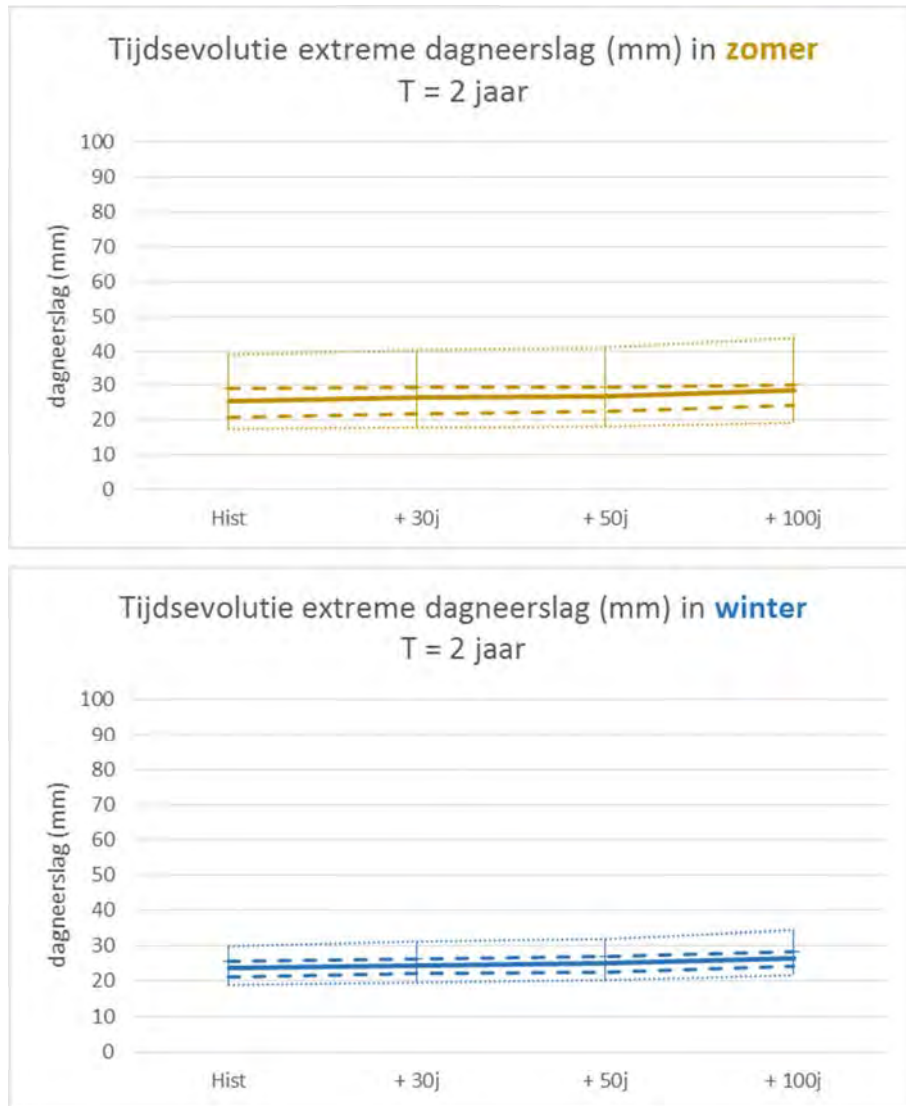
Figuur 6-12: Extreme dagneerslag in functie van terugkeerperiode, voor zomer en winter



Figuur 6-13: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met $T = 30j$



Figuur 6-14: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met T = 5j



Figuur 6-15: Tijdsevolutie extreme dagneerslag voor zomer en winter met $T = 2j$

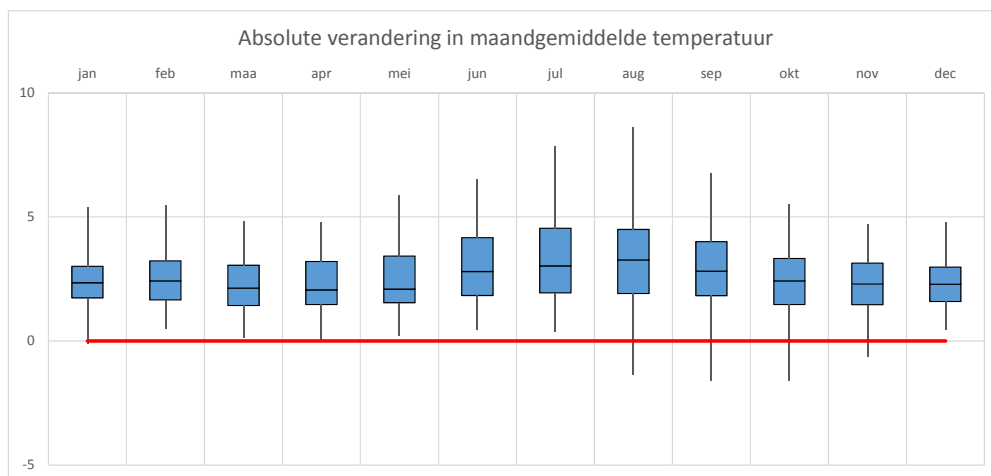
6.2 Temperatuur

6.2.1 Algemeen

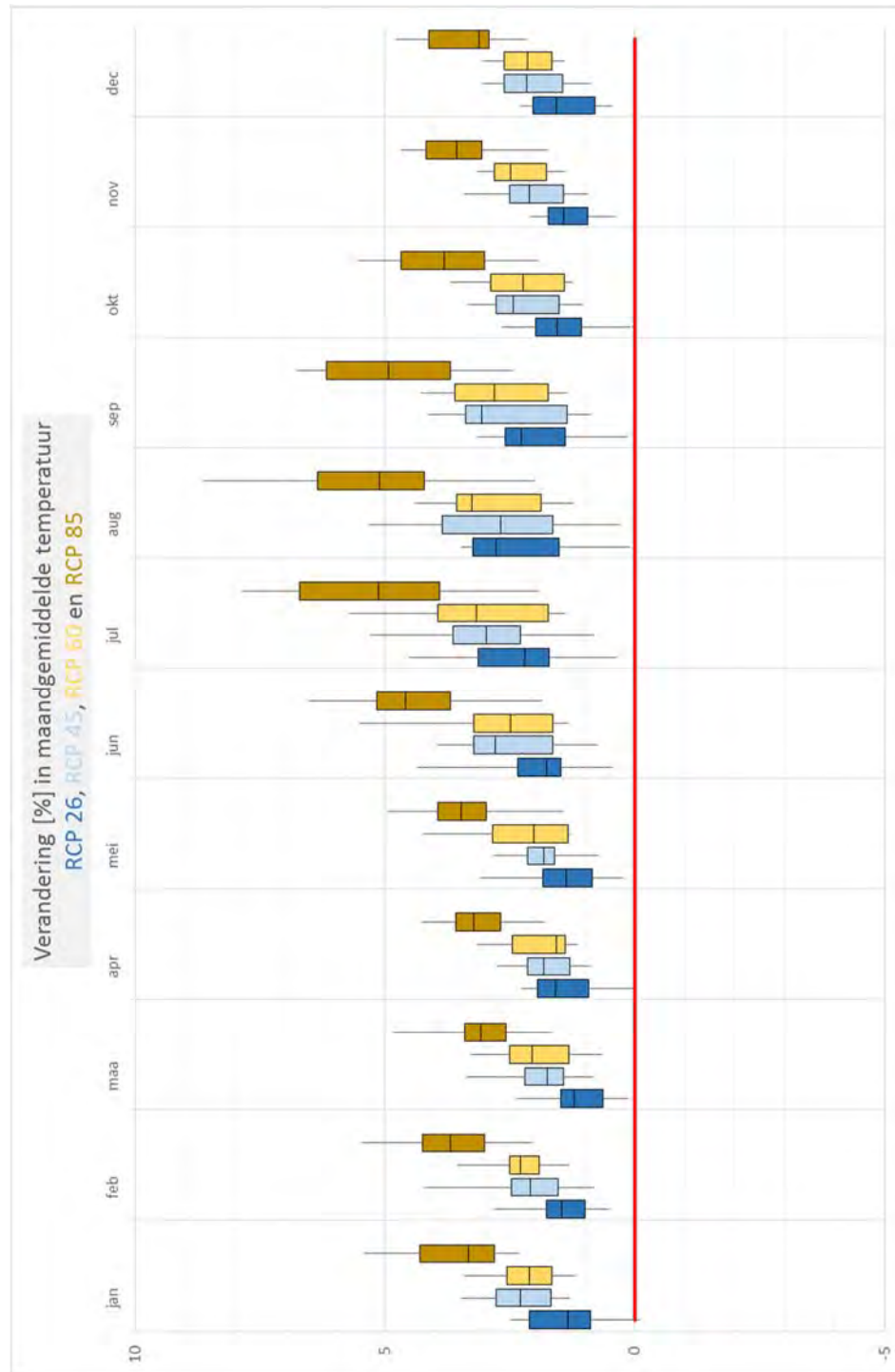
De klimaatveranderingssignaal in gemiddelde dagelijkse temperatuur, zoals afgeleid uit de verschillende klimaatmodelruns, werd geanalyseerd. Zoals bij de neerslag kunnen opnieuw verschillende variabelen bekeken worden, zoals de absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur, de extreme dagtemperaturen en het aantal hittegolven per jaar.

6.2.2 Maandgemiddelde temperatuur

De absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur wordt weergegeven in Figuur 6-16 (alle RCPs in één boxplot) en Figuur 6-17 (één boxplot per RCP). Men ziet voor de regio Antwerpen over een periode van honderd jaar een gemiddelde stijging tussen 2 en 3 °C, met extremen tot een stijging met 9 °C bij het RCP 8.5 scenario in augustus.



Figuur 6-16: Absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur

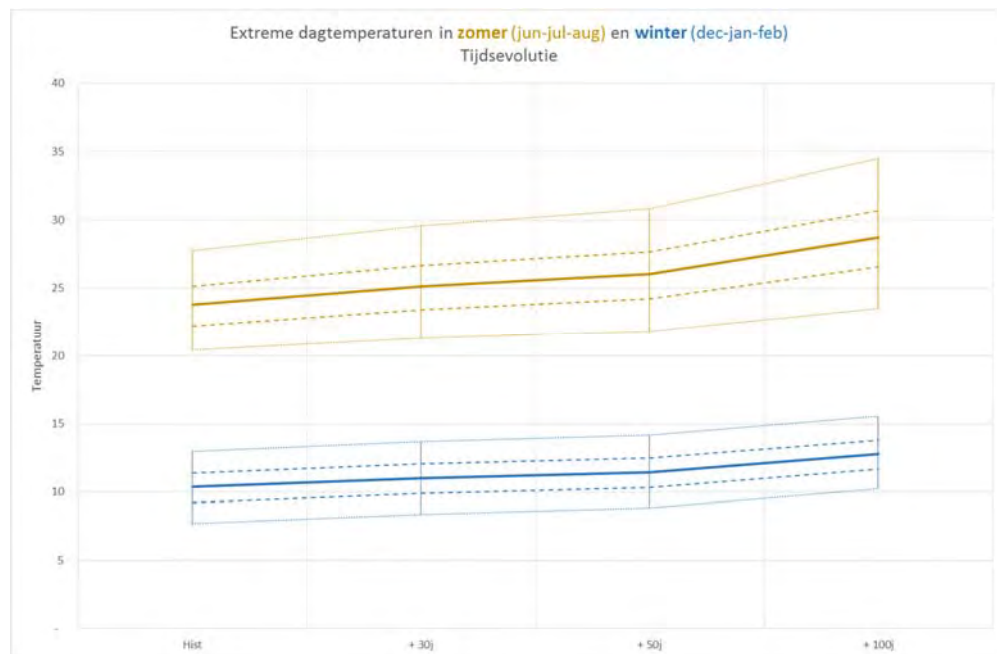


Figuur 6-17: Absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur per RCP scenario

6.2.3 Extreme dagtemperaturen

Absolute veranderingen in extreme dagtemperaturen, gedefinieerd als dagtemperaturen met een terugkeerperiode T groter dan 0.1 jaar, staan voor zowel winter als zomer weergegeven in functie van de tijdshorizon in Figuur 6-18. Alle RCPs werden hierbij gegroepeerd. Opnieuw zijn hier minimum, 25^e percentiel, mediaan, 75^e percentiel en maximum waarden getoond.

Zoals verwacht, ziet men een duidelijke stijging over de jaren heen, waarbij de stijging in extreme dagtemperatuur hoger is dan de stijging in de gemiddelde temperatuur (die hoger besproken werd in Deel 6.2.2).



Figuur 6-18: Tijdsevolutie van extreme dagtemperaturen

6.2.4 Hittegolven

Met betrekking tot de extreme dagtemperaturen werd meer specifiek ook de verandering in het voorkomen van hittegolven bestudeerd. Klimatologisch spreekt het KMI van een hittegolf wanneer “minstens 5 opeenvolgende dagen een temperatuur van 25 graden Celsius of meer wordt opgemeten, waarvan bovendien minstens 3 dagen met temperaturen van 30 graden Celsius of meer”. Op basis van deze definitie werd de verandering in het jaarlijks aantal hittegolven berekend. Een kleine bemerking hierbij is dat deze definitie geen rekening houdt met de duur en/of intensiteit van de hittegolf: een ‘nipte’ hittegolf van bv. 5 dagen aan 25 graden Celsius (waarvan 3 dagen met temperaturen van 30 graden Celsius) wordt in deze analyse gelijkgesteld aan een ‘ruime’ hittegolf van bv. 10 dagen aan 35 graden Celsius. Bovendien zal bv. een lange warme periode met één dag in bv. 15 dagen waar de temperatuur onder 25 graden Celsius daalt, gezien wordt als twee afzonderlijke hittegolven, terwijl dit in realiteit eerder ervaren wordt als één lange hittegolf. Los van bovenstaande bemerkingen, ziet men in Figuur 6-19 een duidelijk stijgende trend

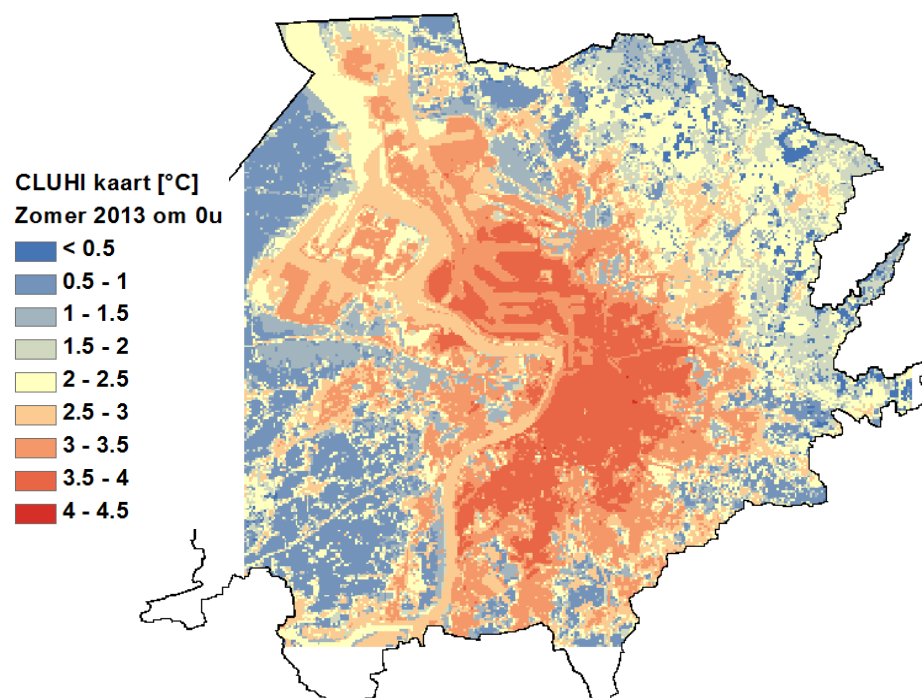
in het aantal hittegolven over 100 jaar. Een typische zomer in het huidige klimaat zal gemiddeld gezien slechts één hittegolf hebben, terwijl we binnen honderd jaar gemiddeld gezien twee tot drie hittegolven krijgen, waarbij extremen tot negen mogelijk zijn.



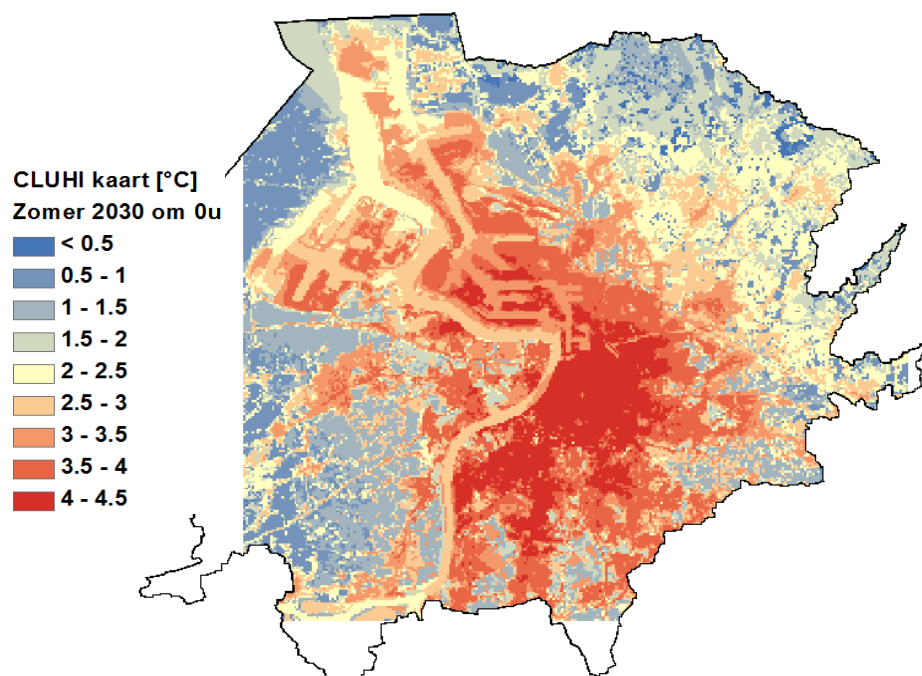
Figuur 6-19: Aantal hittegolven per jaar

6.2.5 Ruimtelijke variatie binnen het studiegebied

De ruimtelijke variaties in extreme temperaturen over de regio Antwerpen werden in een vroegere studie van het VITO bestudeerd (VITO, 2013). In die studie werd het bestaan van het zogenaamd hitte-eiland aangetoond; zie Figuur 6-20 en Figuur 6-21. Ze werd hier niet verder bestudeerd.



Figuur 6-20: Hitte-eiland effect (2013) (bron: VITO, 2013)



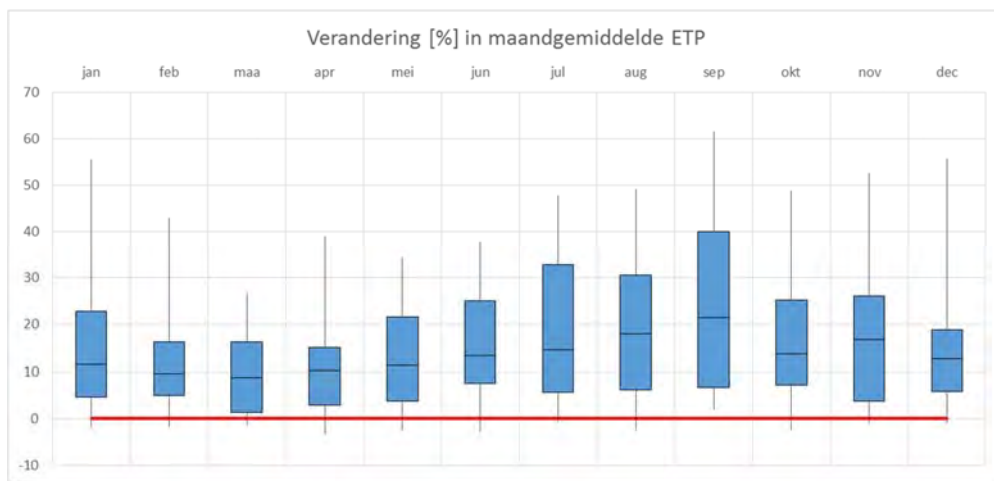
Figuur 6-21: Hitte-eiland effect (2030) (bron: VITO, 2013)

6.3 Evapotranspiratie

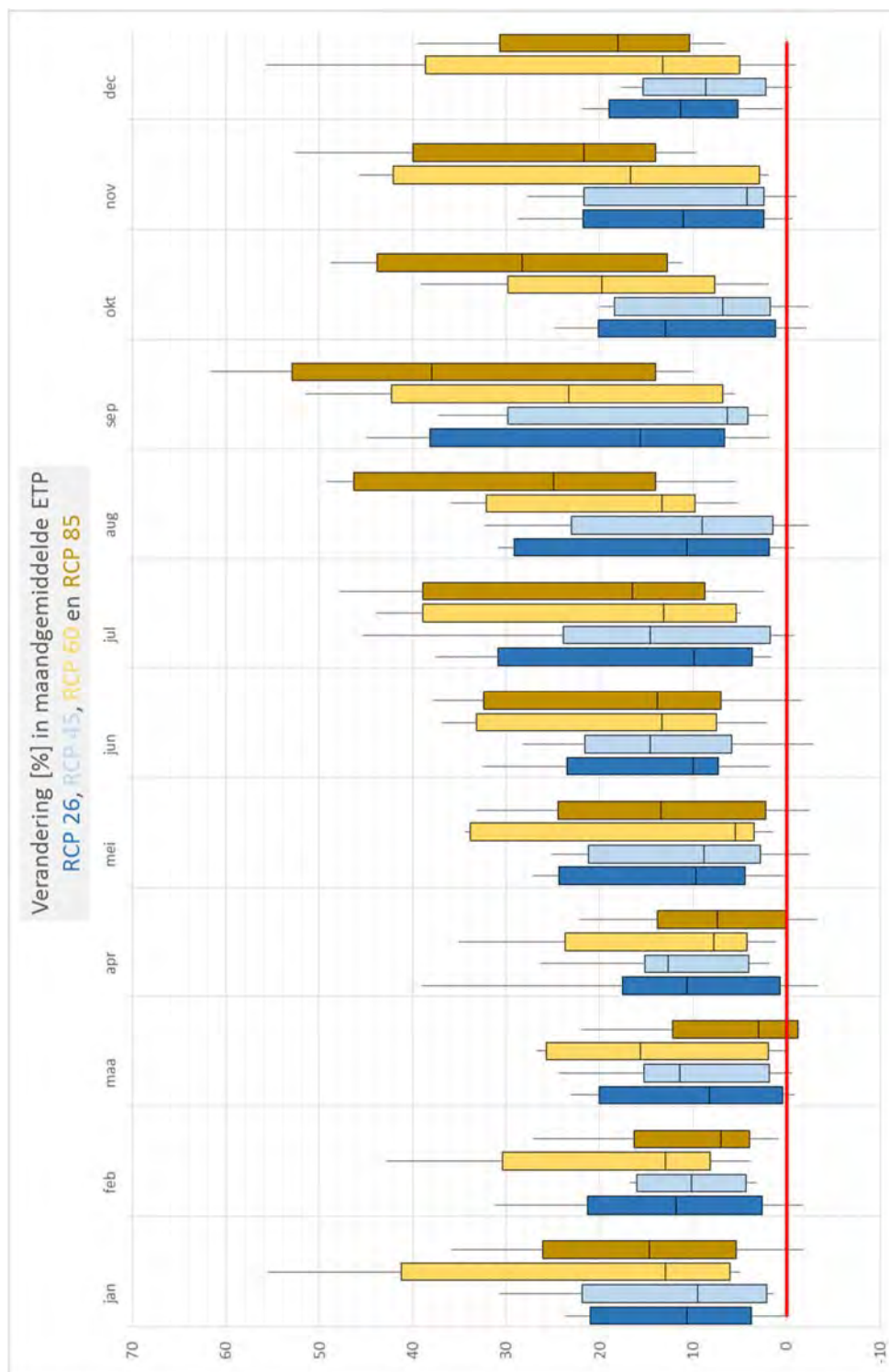
6.3.1 Maandgemiddelde evapotranspiratie

Zoals uiteengezet in Deel 3.3 werd de potentiële evapotranspiratie (ETP) berekend uit de klimaatmodelresultaten via de methode van Bultot (Bultot, 1983). De relatieve verandering in maandgemiddelde ETP is weergegeven in Figuur 6-22 (alle scenario's samen) en Figuur 6-23 (per scenario).

Er wordt een gemiddelde relatieve stijging van 10% tot 15% getoond, waarbij er een duidelijke seizoensfactor aanwezig is, met de hoogste stijging bij het einde van de zomer en de laagste verandering bij het einde van de winter (wat nog altijd een stijging inhoudt).



Figuur 6-22: Verandering in maandgemiddelde ETP

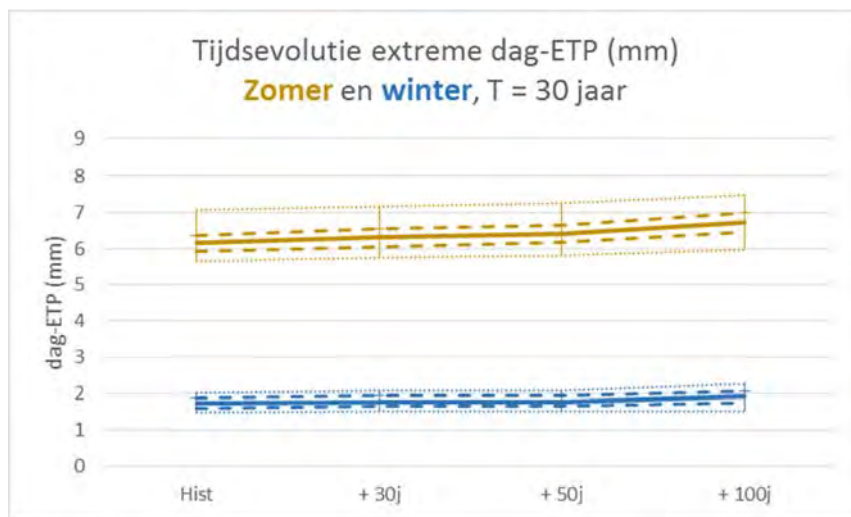


Figuur 6-23: Verandering in maandgemiddelde ETP per RCP scenario

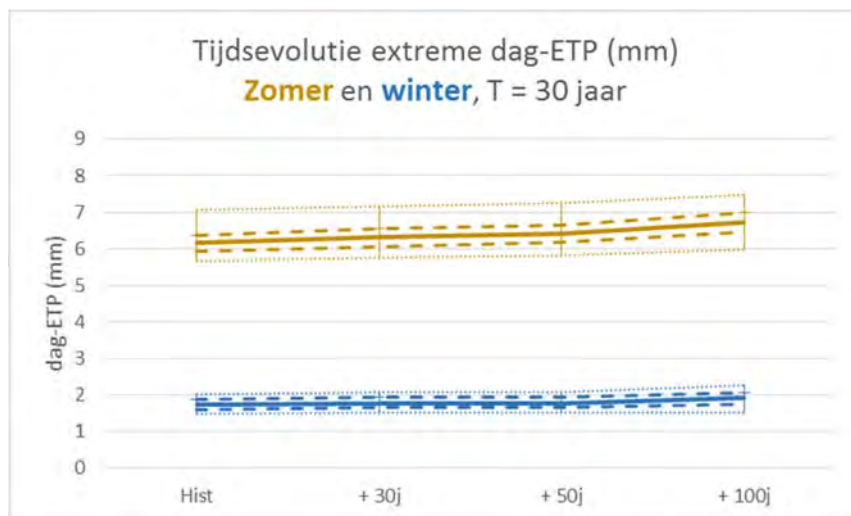
6.3.2 Extreme evapotranspiratie

Naast (relatieve verandering/stijging van) maandgemiddelde waarden, werd ook voor ETP het gedrag van de dagextremen van evapotranspiratie en hun evolutie (binnen 30, 50 en 100 jaar) geanalyseerd. Meer specifiek werden de dagextremen bestudeerd voor terugkeerperioden $T = 2$ jaar, 5 jaar en 30 jaar. Hier wordt logischerwijze de opsplitsing gemaakt tussen zomer en winter, gezien de grote seizoensafhankelijkheid van deze variabele. Resultaten worden weergegeven in Figuur 6-24, Figuur 6-25 en Figuur 6-26.

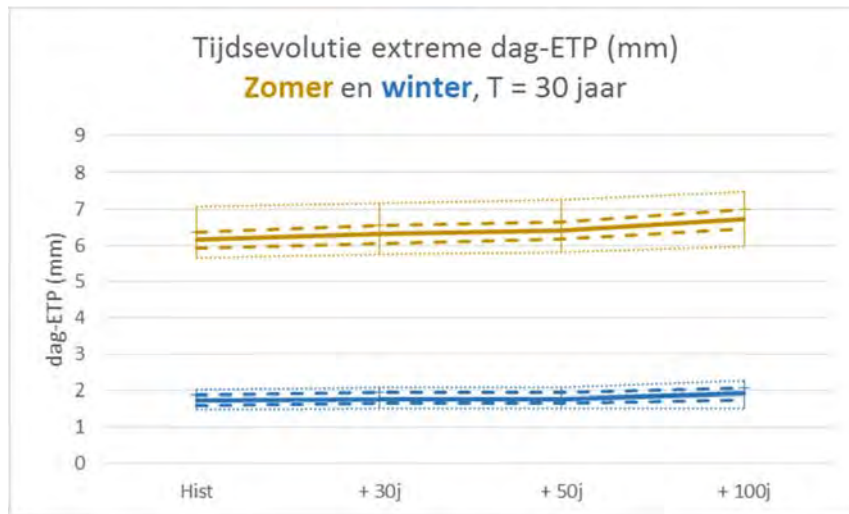
Men ziet duidelijk de sterke seizoensvariatie in ETP-extremen, met beduidend lagere waarden in de winter dan in de zomer. Verder is de absolute stijging van de dag-extremen van ETP duidelijk sterker voor de zomermaanden in vergelijking met de wintermaanden.



Figuur 6-24: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 30j$



Figuur 6-25: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 5j$

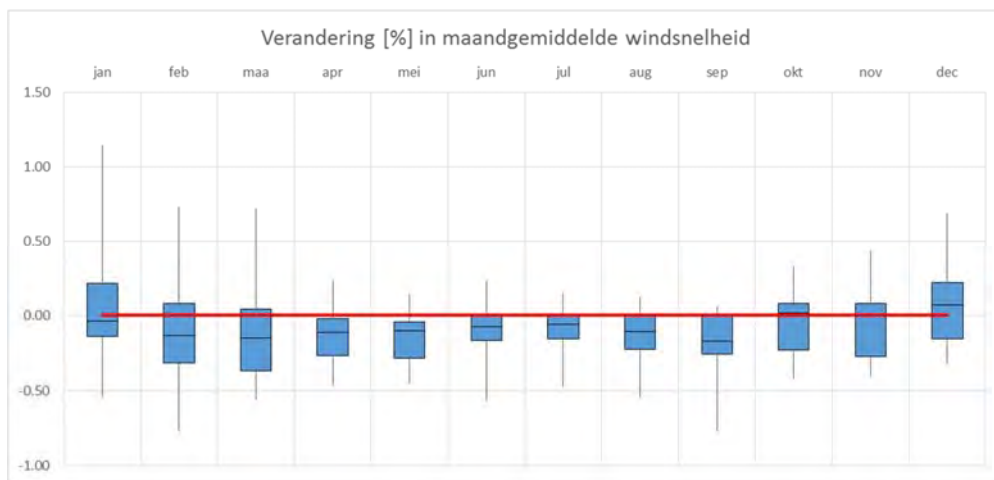


Figuur 6-26: Tijdsevolutie extreme dag-ETP, $T = 2j$

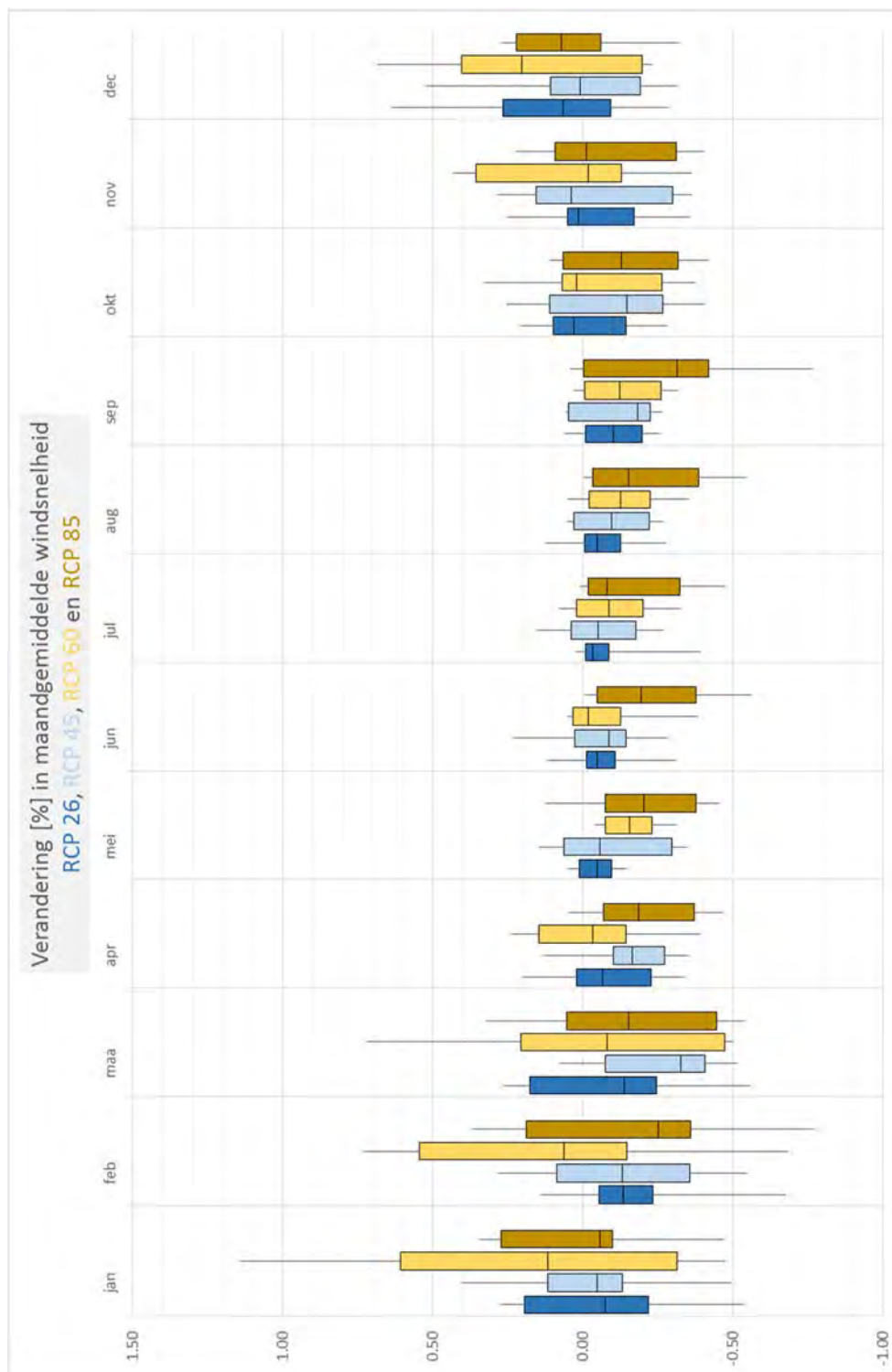
6.4 Wind

Omdat voor de berekening van de ETP de winsnelheid beschikbaar was, werd ook de relatieve verandering in maandgemiddelde windsnelheid afzonderlijk bestudeerd in Figuur 6-27 (alle scenario's samen) en Figuur 6-28 (per scenario).

De klimaatmodelresultaten geven geen duidelijk beeld van de windsnelheid in de toekomstige winters: sommige modellen geven een stijging weer, andere modellen een daling. Verder is de spreiding van de model-resultaten in de winter beduidend groter dan de resultaten in de zomer. Voor die zomer wordt toch voornamelijk een (lichte) daling voorspeld, maar de relatieve verandering (stijging/daling) blijft zeer beperkt: tussen -1% en +1.5%.



Figuur 6-27: Verandering in maandgemiddelde windsnelheid



Figuur 6-28: Verandering in maandgemiddelde windsnelheid per RCP scenario

7 Aangeleverde neerslagproducten

7.1 Voor impactanalyse op overstromingen langs rioleringen

Input en vraagstelling Riolink

Er werd gevraagd om nieuwe, geperturbeerde composietbuien op te stellen, voor het gebied onder het beheer van Riolink, conform de klimaatscenario's afgeleid in deze studie voor de regio Antwerpen. Om een zekere ruimtelijke variabiliteit in rekening te brengen, werd gekozen om per (hydrologisch) deelbekken een afzonderlijke composietbui op te stellen. Deze kunnen later gecombineerd worden in de modelruns door Riolink.

Er werd gevraagd naar composietbuien met terugkeerperiodes $T = 2, 5, 10$ en 20 jaar.

Werkwijze en output

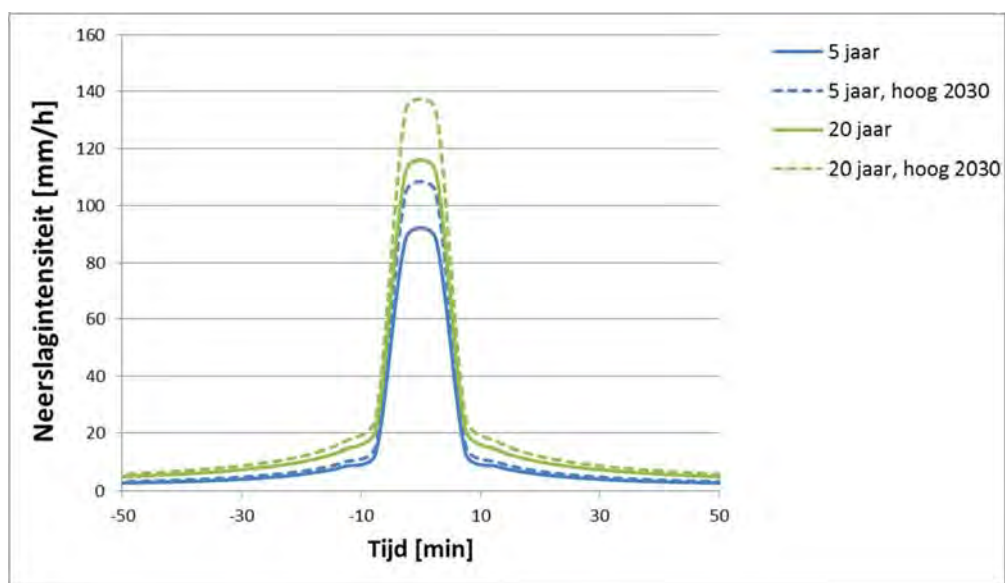
De huidige composietbuien zoals gebruikt door Riolink, zijn gebaseerd op de neerslag van Ukkel (Willems, 2011). Vooreerst werden ruimtelijke neerslagfactoren berekend, om de composietbuien specifiek te maken voor de regio. Verder werden perturbatiefactoren berekend om de verschillende klimaatscenario's (met verschillende terugkeerperiodes) in rekening te brengen. Dit resulteerde in een aantal nieuwe composietbuien:

- 30 deelbekkens (de coördinaten van de centerpunten van de gebiedjes werden meegegeven)
- 3 terugkeerperiodes
- Huidige toestand, + hoog (=hoog-zomer) en midden (=gematigd) klimaatscenario voor 30, 50 en 100 jaar.

De nieuwe composietbuien werden aangemaakt in .csv-formaat, waarbij compatibiliteit met de InfoWorks-CS software (rioleringsmodel) verzekerd werd.

Verder werd nog een kaart gemaakt die de ruimtelijke variatie van de neerslagextremen (>1 jaar) binnen het studiegebied weergeeft.

Figuur 7-1 geeft een voorbeeld van de composietbuien voor terugkeerperioden van 5 en 20 jaar; voor en na aanpassing aan een klimaatscenario. Het zijn deze composietbuien en terugkeerperioden die standaard gebruikt worden aan de basis van het ontwerp van rioleringssystemen.



*Figuur 7-1: Composietbuien voor terugkeerperioden van 5 en 20 jaar, voor de huidige
klimaatcondities en het hoog klimaatscenario voor 2030*

7.2 Voor impactanalyse op overstromingen langs waterlopen

Input en vraagstelling Provincie Antwerpen

Er werd gevraagd om nieuwe, geperturbeerde tijdreeksen op te stellen voor de neerslag- en ETP-invoer in de huidige PDM hydrologische modellen voor de verschillende deelstroomgebieden, conform de klimaatscenario's afgeleid in deze studie voor de regio Antwerpen. De volgende invoertijdreeksen werden bezorgd:

- Neerslag- en ETP-tijdreeksen:
 - o Deze invoerdata werden bezorgd via een aantal verschillende bestanden met verschillende formateringen.

 Benedenvliet_evaporatie.xlsx	Microsoft Excel W...	1,427 KB
 benedenvliet_neerslag_1960-2010.xlsx	Microsoft Excel W...	78,043 KB
 gebied_grsch.met	MET File	28,557 KB
 gebied_klsch.met	MET File	23,344 KB
 gebied_weze.met	MET File	28,557 KB
 Koudebeek_1900-2004.xlsx	Microsoft Excel W...	13,035 KB
 laarbeek_1900-2005.xlsx	Microsoft Excel W...	12,971 KB
 laarsebeek_1900-2004.xlsx	Microsoft Excel W...	17,388 KB
 polderwaterlopen_1900-2004.xlsx	Microsoft Excel W...	17,320 KB
 Rolle-diepe-grotemerrie_1900-2006.xlsx	Microsoft Excel W...	13,403 KB
 schoonschijn_1900-2005.xlsx	Microsoft Excel W...	20,809 KB

- o Alle bestanden, uitgezonderd de data betreffende Benedenvliet en Laarsebeek, beschrijven 1 deelbekken.
- o De ontvangen neerslagdata van de Benedenvliet beschrijven 33 deelbekkens. De ontvangen geografische info beschrijft slechts 31 deelbekkens. Er wordt verder gewerkt met de 31 deelbekkens die geïdentificeerd werden bij de geografische info.
- o De ontvangen data van de Laarsebeek beschrijven 2 deelbekkens.
- o Dit alles brengt het totaal op 41 deelbekkens.
- o Alle neerslagdata werden bezorgd met een uurlijkse tijdstap.
- o Alle ETP-data werden bezorgd als dagelijkse waarden, uitgezonderd de data betreffende Grote en Kleine Schijn, Schoonschijn en Wezelsebeek waar uurlijkse waarden gebruikt worden.
- Geografische info: verschillende shape-files beschrijven de geografische ligging van de verschillende deelbekkens.

Werkwijze en output

- Algemeen: De ontvangen neerslag- en ETP-tijdreeksen werden vooreerst omgezet naar een uniform formaat.

- Voor de neerslag-tijdreeksen:
 - o Sommige tijdreeksen bevatten data vanaf begin 1900. Toen werd echter nog geen lokale data gemeten; het blijkt te gaan over waarden gemeten te Ukkel. Er wordt per tijdreeks nagegaan tot wanneer de Ukkel-data werden gebruikt, en vanaf welke datum lokale data werden gebruikt.
 - o De tijdreeksen werden geperturbeerd, conform de vier klimaatscenario's afgeleid in deze studie voor de regio Antwerpen. De perturbaties voor de verschillende deelstroomgebieden binnen eenzelfde stroomgebied dienden daarbij gecombineerd te gebeuren. Hiervoor moeten de tijdreeksen van alle deelbekkens dezelfde periode beschrijven. Op basis van de input, worden twee perturbaties voorgesteld:
 - 1^e periode van 1-Feb-1900 9:00 tot 31-Dec-1959 23:00
 - 2^e periode van 1-Jan-1960 00:00 tot 31-Mar-2004 08:00
 - o Figuur 7-2 toont de perioden waarvoor de data gebruikt werden voor de klimaatperturbaties, en welke data buiten deze periodes vallen.
 - o De ontvangen tijdreeksen, gefilterd en opgesplitst in de twee periodes, werden per periode samen geperturbeerd tot aangepaste tijdreeksen volgens de vier klimaatscenario's: hoog-winter, hoog-zomer, midden = gematigd en laag = droog. Achteraf werden de twee periodes per deelstroomgebied en per scenario samen gezet.
- Voor de ETP-tijdreeksen: De ETP-tijdreeks werd per deelbekken geperturbeerd. Daar waar uurlijkse waarden gegeven waren, werden deze eerst geaggregeerd tot dagelijkse waarden en nadien terug opgesplitst per 24uur naar uurlijkse waarden.
- Finaal werden volgende reeksen aangeleverd:
 - o 1 neerslagreeks per deelbekken (41 deelbekkens) en per klimaatscenario (3 scenario's)
 - o 1 ETP-reeks per deelbekken (41 deelbekkens) en per klimaatscenario (3 scenario's)
 - o Elk tijdreeksbestand bevat:
 - op de eerste lijn de naam van het deelbekken en de variabele
 - volgende lijnen zijn datum (yyyy-mm-dd HH:MM:SS) en waarde
 - o Opmerking: sommige deelbekkens werden oorspronkelijk benoemd met namen die incompatibel zijn met bestandsnamen in Windows. Bv. "MAN024' " is een ongeldige bestandsnaam. In deze gevallen werd de incompatibele karakter vervangen door "_0 ".
 - BV081B' => BV081B_0
 - MAN024B' => MAN024B_0



Figuur 7-2: Perioden waarvoor de klimaatperturbaties werden doorgevoerd voor de verschillende deelstroomgebieden voor de Provincie Antwerpen

Input en vraagstelling Waterbouwkundig Laboratorium

In hun bestaande studie “Barbierbeek – Wase cuesta – KBR” gebruikt het Waterbouwkundig Laboratorium de volgende gegevens:

- ETP:
 - o vrij wateroppervlak
 - o dagelijks
 - o 1967-2013
 - o reeks samengesteld uit observaties van het KMI (Melle) en VMM (Liedekerke, Boekhoute, Herentals, ...)
- neerslag (landelijk):
 - o uurlijks
 - o 1967-2013
 - o dagelijkse gebiedsneerslag bepaald uit dagelijkse observaties van het KMI (Belsele, Beveren, Bornem, Nieuwkerken, Wintam) (Thiessen-methode)
 - o uurlijkse variatie bepaald op basis van uurlijkse observaties van het KMI (Deurne, Melle, Ukkel, Hove, Zelzate, Sint-Katelijne-Waver)
 - o voor (1) Barbierbeek, (2) noordelijke cuesta en (3) zuidelijke cuesta, verschillende input voor elk deelgebied
- neerslag (stedelijk):
 - o bestaande composietbuien voor rioleringsstudies
 - o gebaseerd op neerslag Ukkel
 - o 5 minutelijks, duur 48 uur
 - o T1, T2, T5, T10, T20, T25, T50, T100
 - o enkel voor noordelijke en zuidelijke cuesta, zelfde input voor beiden

De verschillende tijdreeksen werden aangeleverd in Excel formaat, samen met GIS bestanden die geografische info verschaffen over de gebieden.

Voor aanvullende berekeningen was het Waterbouwkundig Laboratorium geïnteresseerd in de impact van de klimaatwijziging op de ETP- en neerslagreeksen. De ruimtelijke variatie binnen het gevalstudiegebied is niet belangrijk. Concreet is de vraag om één dagelijkse ETP-reeks voor het volledige gevalstudiegebied, 3 uurlijkse deelgebiedsneerslagreeksen en verschillende composietbuien te perturberen. De verschillende klimaatscenario's en tijdshorizonten waren gewenst.

Werkwijze en output

Op basis van de klimaatscenario's voor de regio Antwerpen, zoals afgeleid in deze studie, werden de nieuwe tijdreeksen voor ETP en landelijke neerslag berekend, voor de verschillende scenario's en verschillende tijdshorizonten. Voor de stedelijke neerslag werden de composietbuien geperturbeerd aan de klimaatscenario's, conform de methode gevolgd voor Riolink.

Input en vraagstelling Vlaamse Milieumaatschappij

Voor de studiegebieden van het Groot Schijn en de Benedenvliet - Struisbeek leverde de Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer neerslag- en ETP-tijdreeksen voor de verschillende deelstroomgebieden en het rioleringsgebied in hun beschikbare modellen.

Het waterloopmodel van het Schijn beschikt over een uniforme neerslagreeks voor alle deelstroomgebieden van het Noordelijk Schijn of Benedenschijn en een andere voor het Zuidelijk Schijn of Groot Schijn. De PET-data zijn deze van Ukkel (Bultot-methode) uitgebreid met de Penman-Monteith data van Melsele en is dezelfde voor de Noordelijke en Zuidelijke gebieden. De gebiedsneerslag werd bepaald op basis van alle bij VMM en KMI beschikbare neerslagdata (dagtotalen en uurlijkse data). Eerst werden voor het stroomgebied de dagtotalen berekend op basis van een Thiesseninterpolatie van alle beschikbare reeksen waarna deze dagtotalen worden verdeeld over de 24 uren op basis van het neerslagprofiel van de meest nabijgelegen pluviometer.

Het gecombineerd model van de Benedenvliet maakt voor het rioleringsgedeelte gebruik van de 10-minuten neerslagreeks te Ukkel voor de periode 1900-2007. Hier wordt abstractie gemaakt van verdamping. Het waterloopgedeelte wordt gevoed met de uurlijkse neerslag en dagtotalen voor PET te Ukkel.

Werkwijze en output

Op basis van de klimaatscenario's voor de regio Antwerpen, zoals afgeleid in deze studie, werden de nieuwe tijdreeksen voor neerslag en ETP berekend, voor de verschillende scenario's en verschillende tijdshorizonten. Deze aanpak is conform deze gevolgd voor de Provincie Antwerpen en het Waterbouwkundig Laboratorium.

8 Impactanalyses

Dit deel beschrijft de eerste impactresultaten die door eindgebruikers werden bekomen met de aangeleverde neerslagproducten.

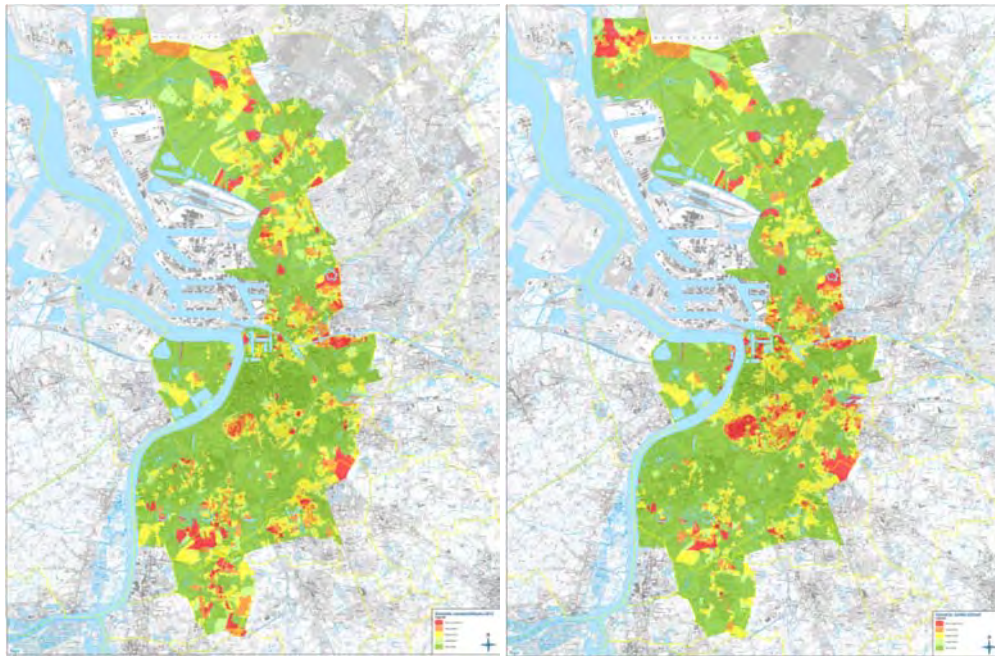
8.1 Riolink: Impact op overstromingskansen langs het rioleringsstelsel van de Stad Antwerpen

Riolink berekende met hun model de overstromingskansen langs het rioleringsstelsel van de Stad Antwerpen. Figuur 8-1, Figuur 8-2 en Figuur 8-3 vatten de impactresultaten samen. De kleurcodes verwijzen naar verschillende niveaus van “kriticiteit” m.b.t. de kans op rioleringsoverstroming. Deze kriticiteit is gebaseerd op de terugkeerperiode van de gesimuleerde composietbui, zoals hieronder verduidelijkt:

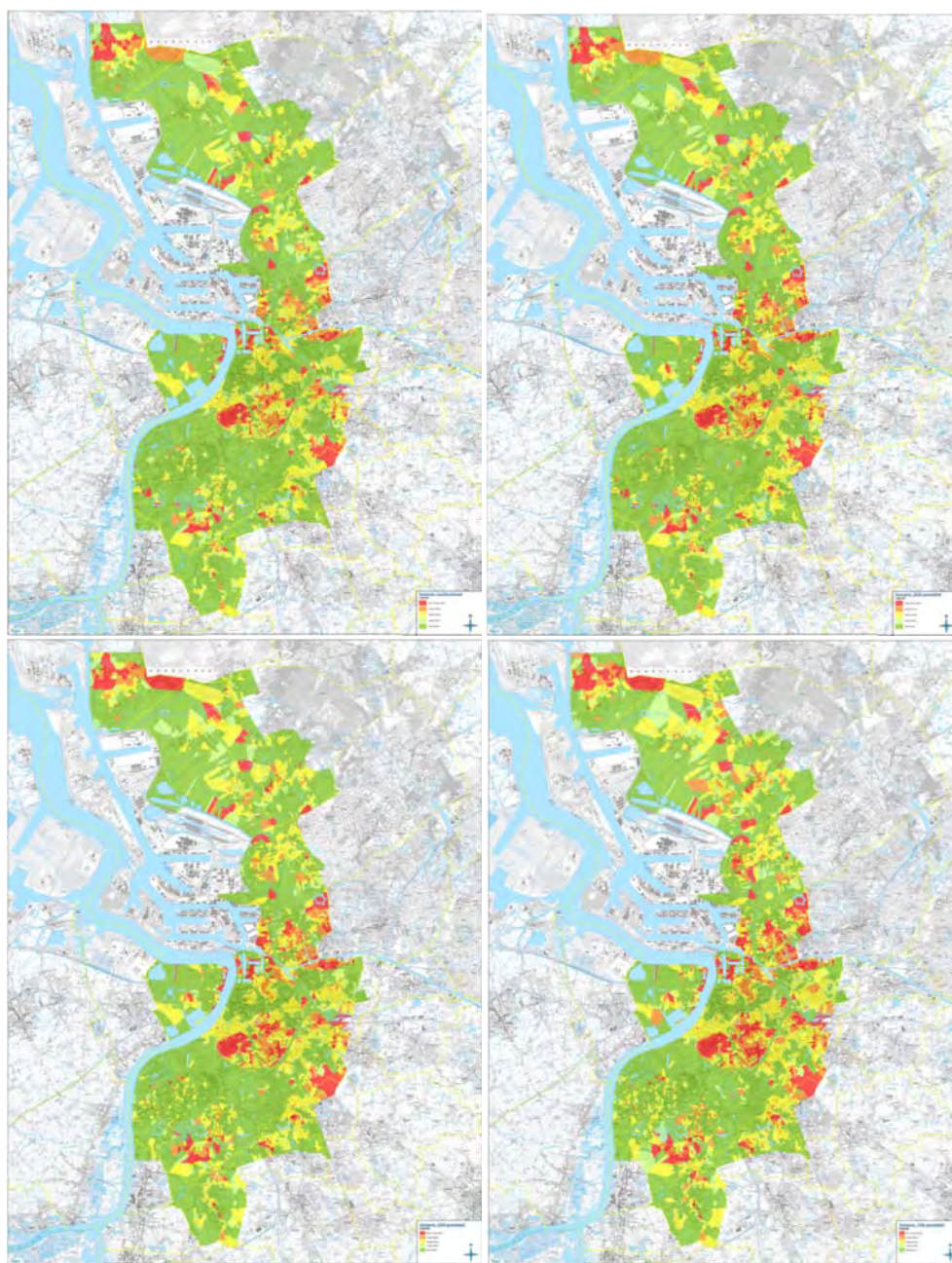
	kriticiteit		criterium
	zeer hoog kritisch	=	water op straat bij T = 2 jaar
	hoog kritisch	=	water op straat bij T = 5 jaar
	matig kritisch	=	water op straat bij T = 20 jaar
	laag kritisch	=	vrijboord < 0,2 m bij T = 20 jaar
	niet kritisch	=	vrijboord ≥ 0,2 m bij T = 20 jaar

In Figuur 8-1 wordt voor het huidig klimaat de vergelijking gemaakt tussen de impactresultaten met de composietbuizen zoals momenteel gebruikt bij het ontwerp van rioleringssystemen in Vlaanderen, d.i. op basis van de composietbuizen voor Ukkel, en de composietbuizen die in deze studie specifiek voor de regio Antwerpen werden afgeleid. De ruimtelijke verschillen in neerslagstatistieken weerspiegelen zich in de resultaten.

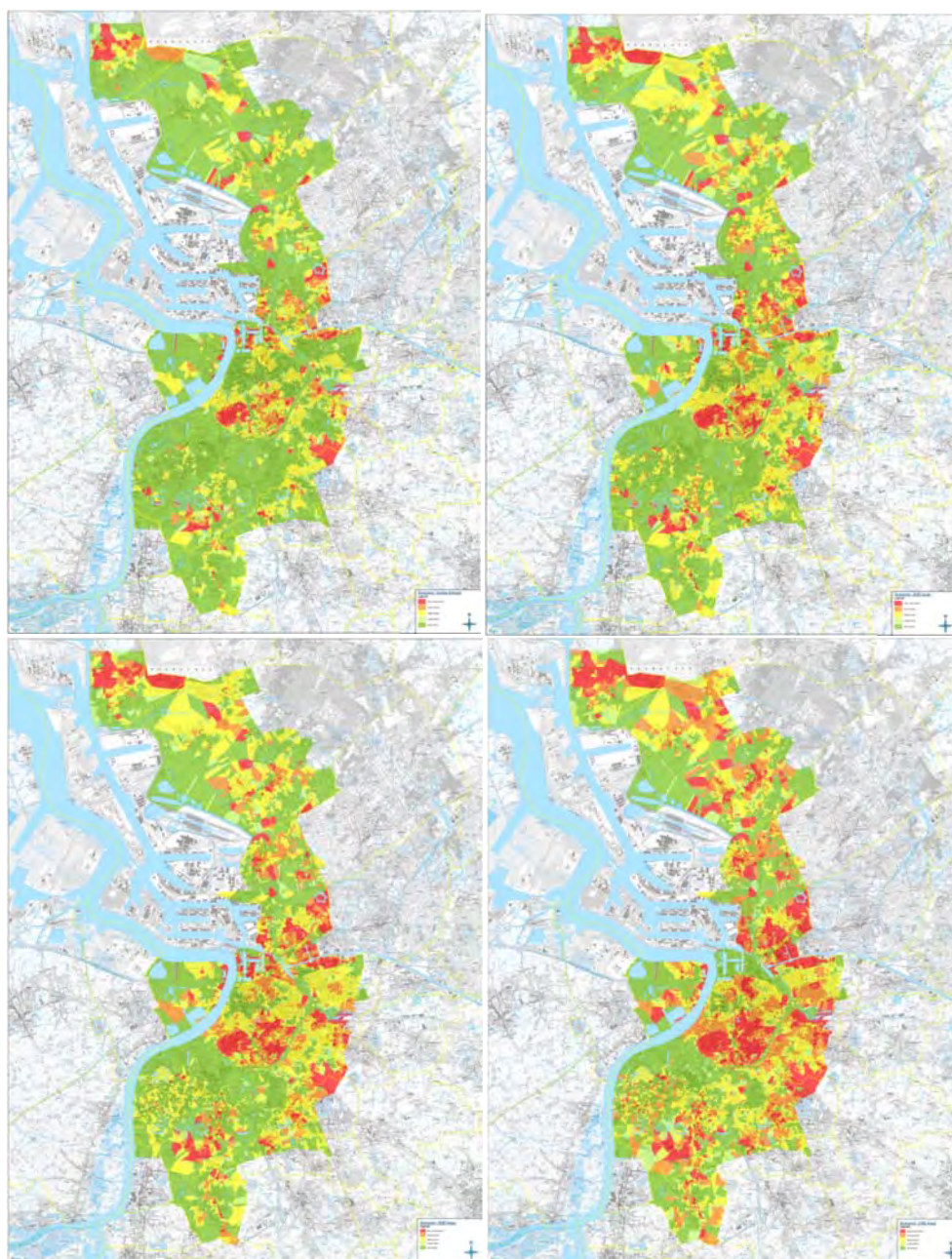
Op basis van de specifieke composietbuizen voor de regio Antwerpen geven Figuur 8-2 en Figuur 8-3 de verhoging in ruimtelijke overstromingskansen weer onder toekomstige klimaatcondities: Figuur 8-2 voor het midden-klimaatscenario en Figuur 8-3 voor het hoog-klimaatscenario. Een duidelijke verdonkering van de kleuren en evolutie naar meer rood gekleurde gebieden bij langere toekomsthorizon wijst op een verhoging van de overstromingskansen.



Figuur 8-1: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor Vlaamse composietbuizen o.b.v. Ukkel (links) en de specifieke composietbuizen (rechts) voor de regio Antwerpen voor het huidige klimaat



Figuur 8-2: Impactresultaten Rioliink voor riolering Stad Antwerpen voor huidig klimaat (links boven) en toekomstig klimaat 2030 (rechts boven), 2050 (links onder) en 2100 (rechts onder) voor gemiddeld klimaatscenario



Figuur 8-3: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor huidig klimaat (links boven) en toekomstig klimaat 2030 (rechts boven), 2050 (links onder) en 2100 (rechts onder) voor hoog klimaatscenario

Om het realisme van de impactresultaten te evalueren, werd voor de composietbuis-simulaties onder huidige klimatologische condities een vergelijking gemaakt van de impactresultaten met recent overstroomde gebieden. Hiertoe werd door de brandweer een lijst ter beschikking gesteld van interventies die mogelijks te maken hebben met rioleringsoverstromingen. De lijst werd opgemaakt via een opzoeking op basis van zoektermen in de volledige databank van recente interventies tussen september 2011 en december 2014. In het totaal, werd een lijst van 377 interventies doorgegeven, maar verder onderzoek gaf aan dat slechts ongeveer 18% (67 interventies) verwijzen naar werkelijke rioleringsoverstromingen. De andere interventies (377 – 67) hadden voornamelijk te maken met verstopte rioolputjes. In Bijlage B worden enkele van de grotere overstromingen geïllustreerd.

Figuur 8-5 en Figuur 8-5 tonen een overlegging van de impactresultaten voor de specifieke composietbuis voor de regio Antwerpen, zoals in deze studie afgeleid, en de locaties van de 67 interventies die te maken hebben met (al dan niet grote) rioleringsoverstromingen. De overstromingsdatums staan aangeduid in Figuur 8-5, wat toelaat na te gaan welke overstromingen over dezelfde gebeurtenis gaan (zelfde datum, locaties dicht bij elkaar). Rond Mortsel worden bijvoorbeeld vijf gebeurtenissen vermeld op 11/7/2014; deze moeten dus beschouwd worden als slechts 1 overstroming. Ook in het noordoosten, net buiten de ring, zijn er twee overstromingsgebeurtenissen op 2 opeenvolgende dagen (10 en 11/8/2014) wat eventueel ook als 1 gebeurtenis kan aanzien worden.

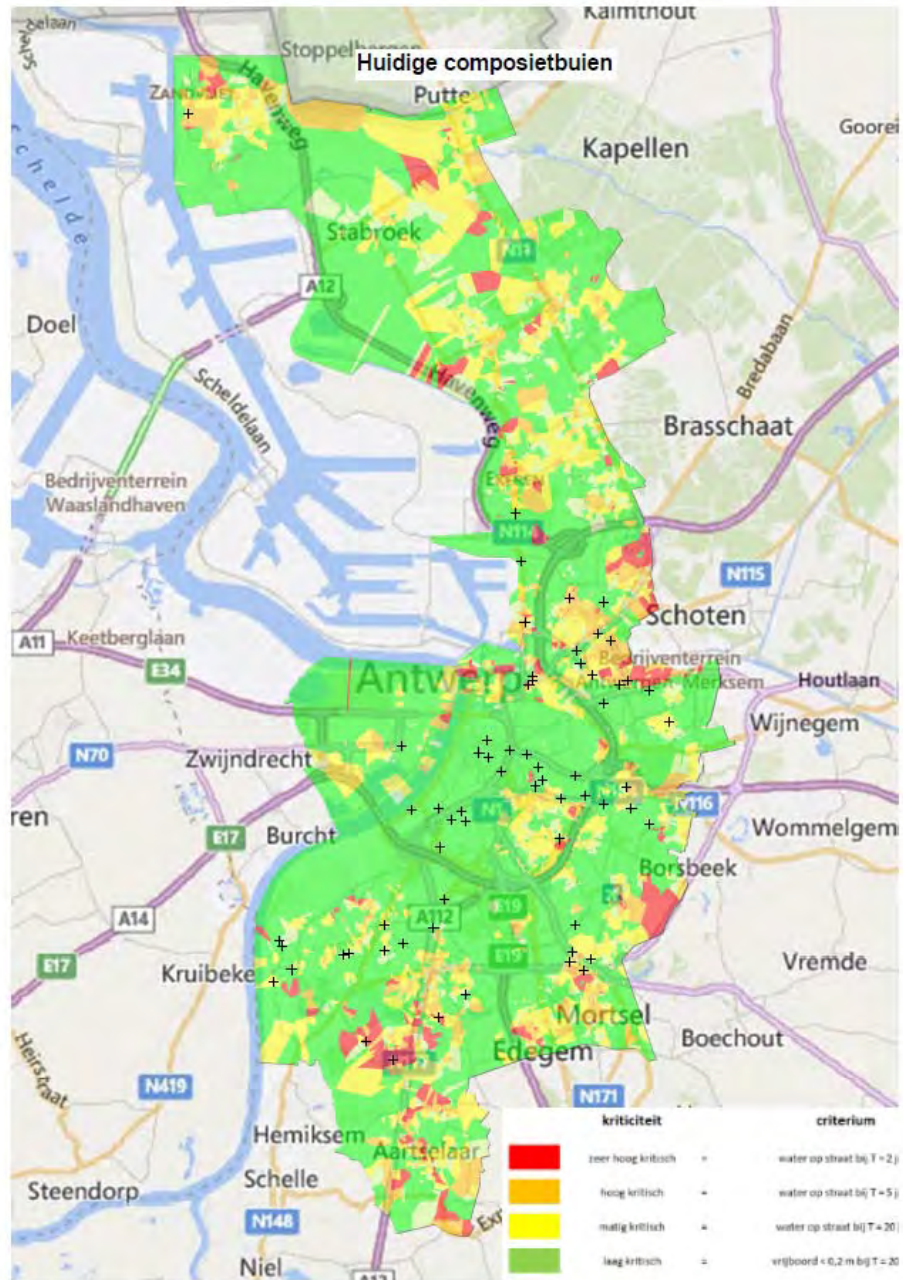
Rekening houdend met zowel de intrinsieke onzekerheid in de resultaten van het rioleringsmodel als de lijst van interventies (die zowel grote als minder significante overstromingen omvat), is in Figuur 8-5 de overeenkomst tussen de kritische gebieden (volgens de modelsimulaties) en de locaties van de effectieve overstromingen OK, uitgezonderd voor enkele gebieden. Na evaluatie van de deze resultaten en verschillen tijdens twee overlegvergaderingen met Riolink en de Stad Antwerpen, en in aanwezigheid van de stadsambtenaar Noodplanning Bart Bruelemans tijdens de eerste vergadering, werden o.a. volgende bevindingen geformuleerd:

- Antwerpen centrum – gebied binnen de ring wordt door de specifieke Antwerpse composietbuis kritischer ingeschat. Daar zijn inderdaad historisch een aantal overstromingen geregistreerd.
- In de ZW-rand zijn er aantal overstromingen, die in beide modelresultaten niet in erg kritisch gebied liggen.
- Gebied rond Aartselaar (zuiden) en gebied ten noorden van E19 (rond Stabroek) wordt door de specifieke Antwerpse buis minder kritisch ingeschat. In dat gebied zijn er inderdaad minder tot geen (geregistreerde) overstromingen. Vraag is wel of er geen overstromingen waren of deze niet door de brandweer geregistreerd werden.
- Gebied Edegem-Mortsel: beide modelresultaten lopen ongeveer gelijk, maar hier zijn er geen geregistreerde overstromingen.
- Oosten (net buiten de ring): de specifieke Antwerpse buis geven kritischer impactresultaten. Hier zijn effectief een aantal overstromingen geregistreerd.
- Noord-oost rand (net buiten de ring): bij modelresultaten blijken goed overeen te komen met de geregistreerde overstromingen.
- Helemaal in het noorden van het gebied (Zandvliet) geven de specifieke Antwerpse buis een iets kritischer resultaat, terwijl dit misschien niet volledig

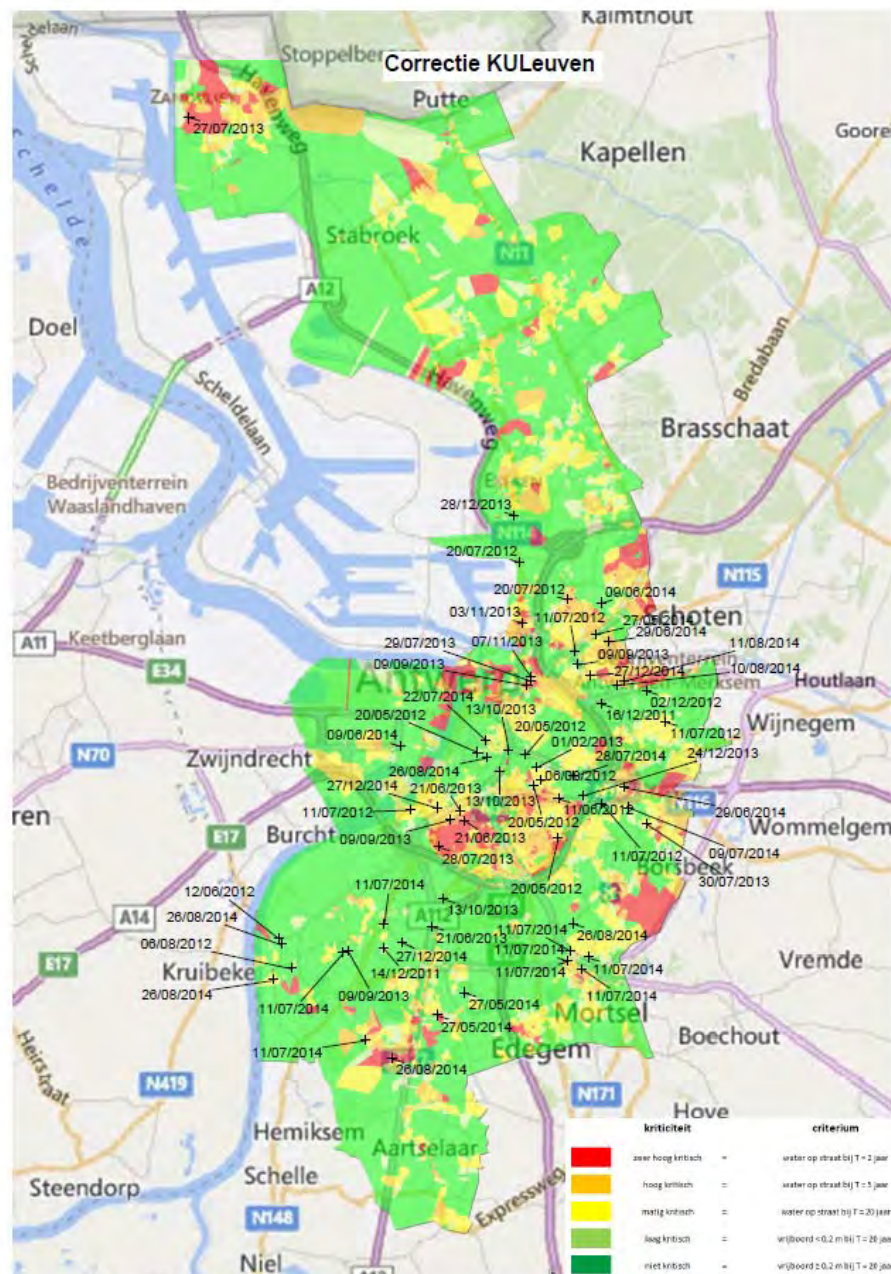
terecht is. Vraag is wel of de landbouwers in dit gebied niet eerder zelfredzaam optreden.

Een interessante vraag die zich bij deze resultaten stelde is of het gebruik van de aangepaste composietbuien voor de Antwerpse regio tot een betere overeenstemming leidt van de modelresultaten met de recente historische overstromingslocaties in vergelijking met het gebruik van de Vlaamse composietbuien o.b.v. Ukkel. Figuur 8-6 geeft de resultaten weer van zulke analyse. Ze plot het aantal recente historische overstromingen die gelokaliseerd zijn in zones die volgens het rioleringsmodel een niet-kritische, lage, matige, hoge en zeer hoge criticiteit hebben en vergelijkt deze aantallen tussen de modelresultaten o.b.v. de Vlaamse composietbuien o.b.v. Ukkel en deze o.b.v. de specifieke composietbuien voor de regio Antwerpen voor het huidig klimaat. De analyse bevestigt dat de specifieke composietbuien voor de regio Antwerpen een hogere overeenstemming geven tussen de modelresultaten en de locaties van de recente overstromingsgebeurtenissen: meer overstromingsgebeurtenissen zijn gelokaliseerd in de zones met een matige, hoge en zeer hoge criticiteit en minder in de zones met een lage criticiteit. Ook daalt het aantal overstromingen in zones die volgens het rioleringsmodel niet kritisch zijn.

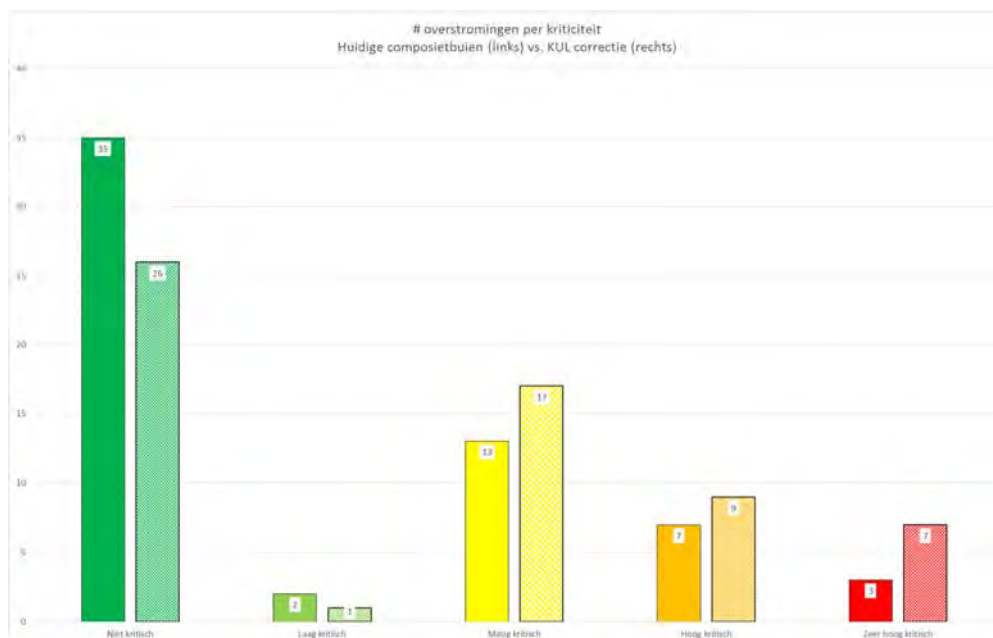
Wel blijft – ook na toepassing van de specifieke Antwerpse composietbuien – het aantal overstromingen in de niet-kritische zones hoog. Dit kan enerzijds het gevolg zijn van de onzekerheden waaraan elk model – dus ook dit rioleringsmodel – onderhevig is, en van de ruimtelijke resolutie van de afgebakende zones met een bepaalde criticiteit in het model. Het model simuleert de overstromingen aan de oppervlakte immers niet specifiek, maar maakt gebruik van overstromingskegels om het water op straat zeer ruw te schematiseren. Door oppervlakteaafstroming kunnen de precieze overstromingslocaties dus afwijken van de kritische zones aangeduid in het model. Anderzijds zijn de ruimtelijke neerslagkaarten voor de regio Antwerpen onderhevig aan niet onbelangrijke onzekerheden. Via een meer nauwkeurige correctie van de radarbeelden aan de pluviograafgegevens is er bovendien ruimte voor verfijning. Een ander aandachtspunt is de lijst van historische overstromingslocaties zelf: deze is zeer onvolledig en niet alle locaties in de lijst zijn werkelijke overstromingen als gevolg van het onder druk komen van de riolering.



Figuur 8-4: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor de Vlaamse composietbuien o.b.v. Ukkel voor het huidig klimaat + vergelijking met recente overstromingslocaties (zwarte punten)



Figuur 8-5: Impactresultaten Riolink voor riolering Stad Antwerpen voor composietbuizen voor de regio Antwerpen voor het huidige klimaat + vergelijking met recente overstromingslocaties (zwarte punten incl. aanduiding overstromingsdatums)

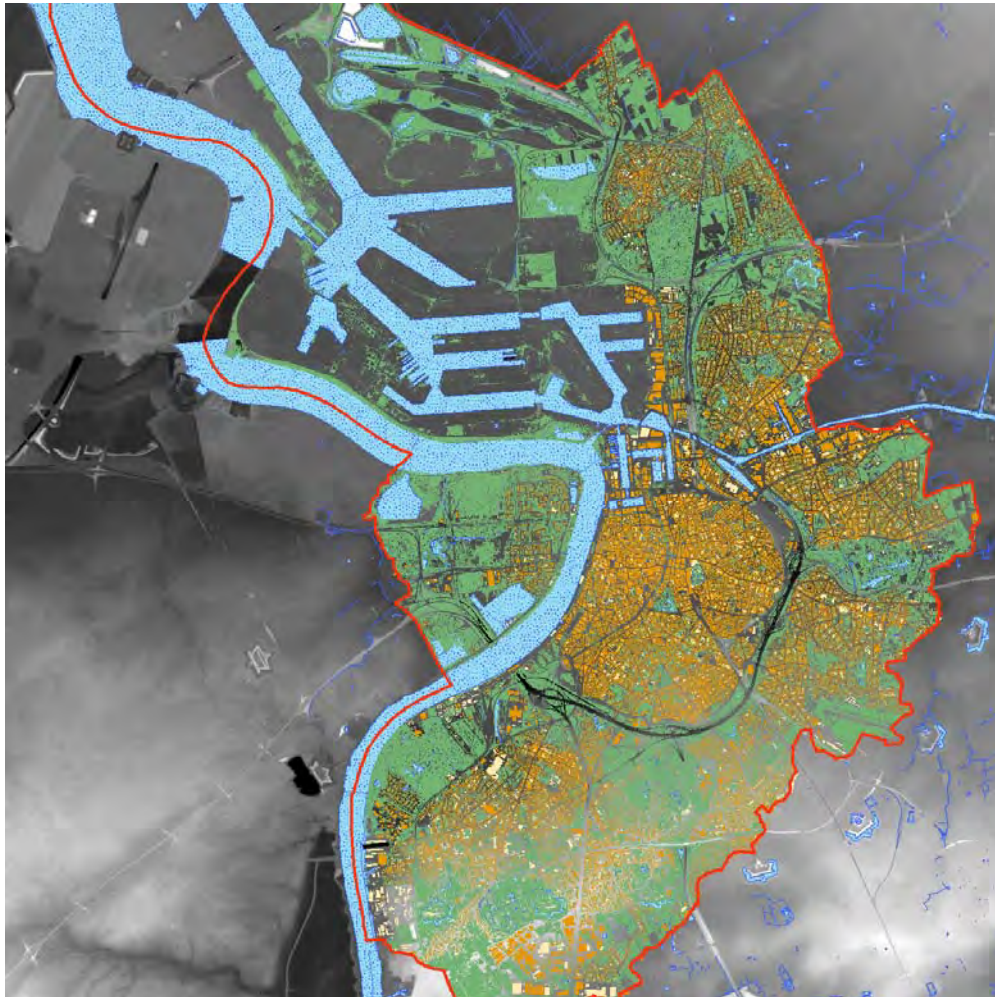


Figuur 8-6: Aantal recente historische overstromingen die gelokaliseerd zijn in zones die volgens het rioleringsmodel een niet-kritische, lage, matige, hoge en zeer hoge criticiteit hebben + vergelijking tussen de modelresultaten o.b.v. de Vlaamse composietbuizen o.b.v. Ukkel (linker balkjes) en de specifieke composietbuizen (rechter balkjes) voor de regio Antwerpen voor het huidige klimaat

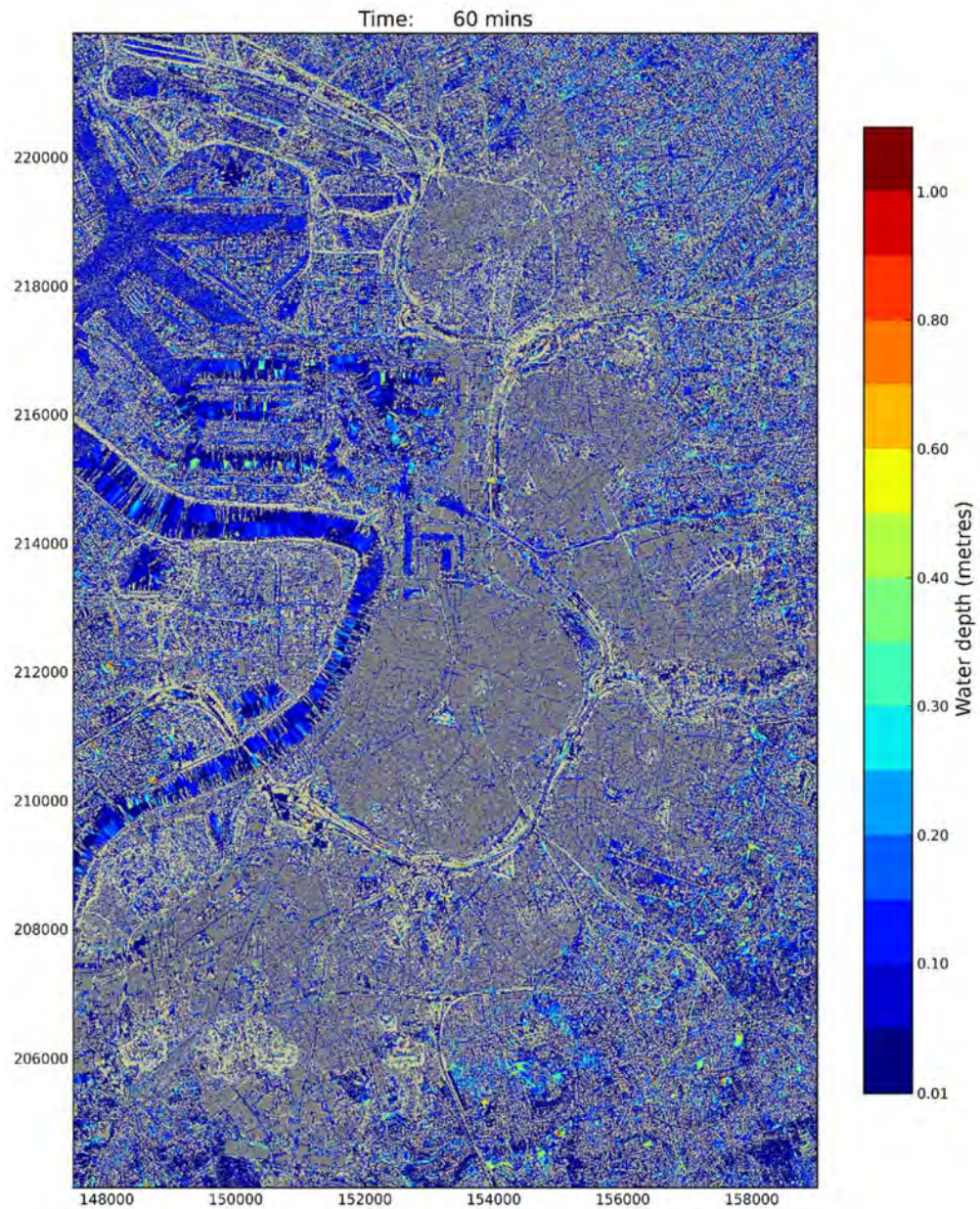
8.2 Ramses-Cities: Hoog-resolutie oppervlakteafstromingsmodel Stad Antwerpen

De impactresultaten van Rio-link werden bekomen met een hydrodynamisch rioleringsmodel waarin de oppervlakteafstroming en de overstromingen aan de oppervlakte niet expliciet gemodelleerd worden. Dit zorgt voor een onnauwkeurigheid in de overstromingsresultaten en in de afbakening van de zones met verschillende criticiteit. In het lopend Ramses-Cities project o.l.v. het VITO wordt dit verbeterd. Op basis van een digitaal hoogtemodel met zeer hoge ruimtelijke resolutie van 1 m, ter beschikking gesteld door AGIV, en andere ruimtelijke gegevens (Figuur 8-7) kan de oppervlakteafstroming in de Stad Antwerpen nauwkeurig gemodelleerd worden. Dit geeft verbeterde instroom in het rioleringsmodel. Anderzijds worden de overstromingen nauwkeuriger gesimuleerd: het water dat op straat terecht komt, wordt via het CityCAT oppervlakteafstromingsmodel en het hoog-resolutie digitaal hoogtemodel nauwkeurig tweedimensionaal gesimuleerd. Ook met de bi-directionele interacties tussen het ondergronds rioleringsstelsel en de bovengrondse oppervlakteafstroming wordt rekening gehouden. Rio-link heeft daartoe de gegevens van het ondergronds rioleringsstelsel ter beschikking gesteld aan University of Newcastle voor implementatie in de CityCAT software. Voor de impactsimulaties zijn dezelfde composietbuizen, aangepast aan de klimaatscenario's voor de Antwerpse regio en voor de verschillende tijdshorizonten, als aangeleverd aan Riolinek ter beschikking gesteld. De finale resultaten van CityCAT simulaties waren nog niet beschikbaar bij de opmaak van dit rapport. Toont het resultaat van de oppervlakteafstromingsmodellering voor een testrun

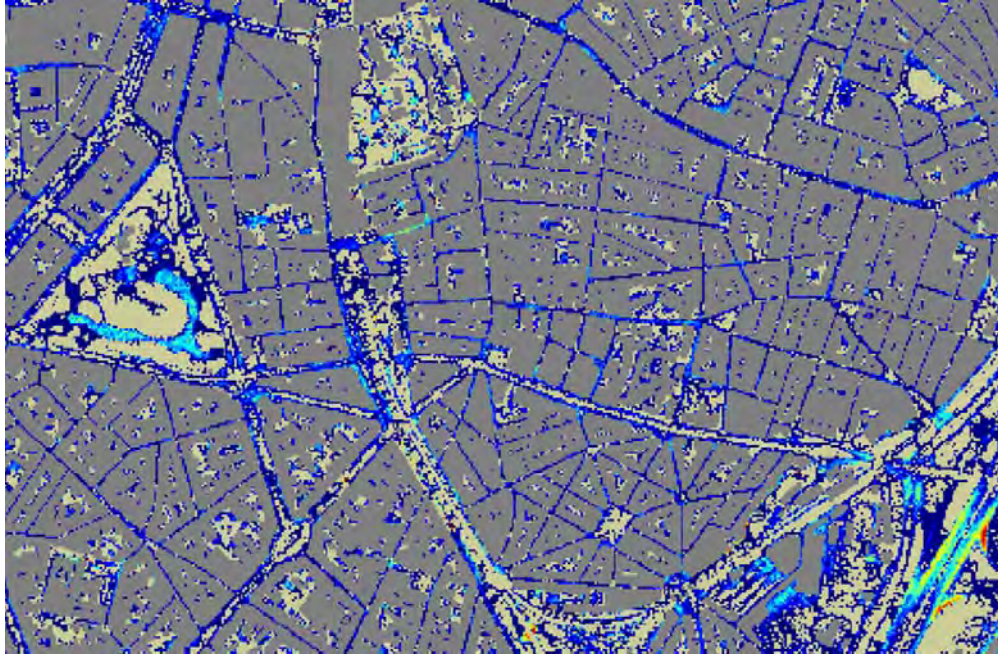
(Figuur 8-8, Figuur 8-9), maar deze houdt nog geen rekening met het rioleringsstelsel. Bovendien maakte deze test-run nog geen gebruik van het 1m hoog-resolutie digitaal hoogtemodel maar van een ouder digitaal hoogtemodel met 5m ruimtelijke resolutie. Het uitgebreider rapport is bijgevoegd (Bijlage E).



Figuur 8-7: Ruimtelijke gegevens gebruikt in de CityCAT-oppervlakteafstromingsmodellering voor de Stad Antwerpen



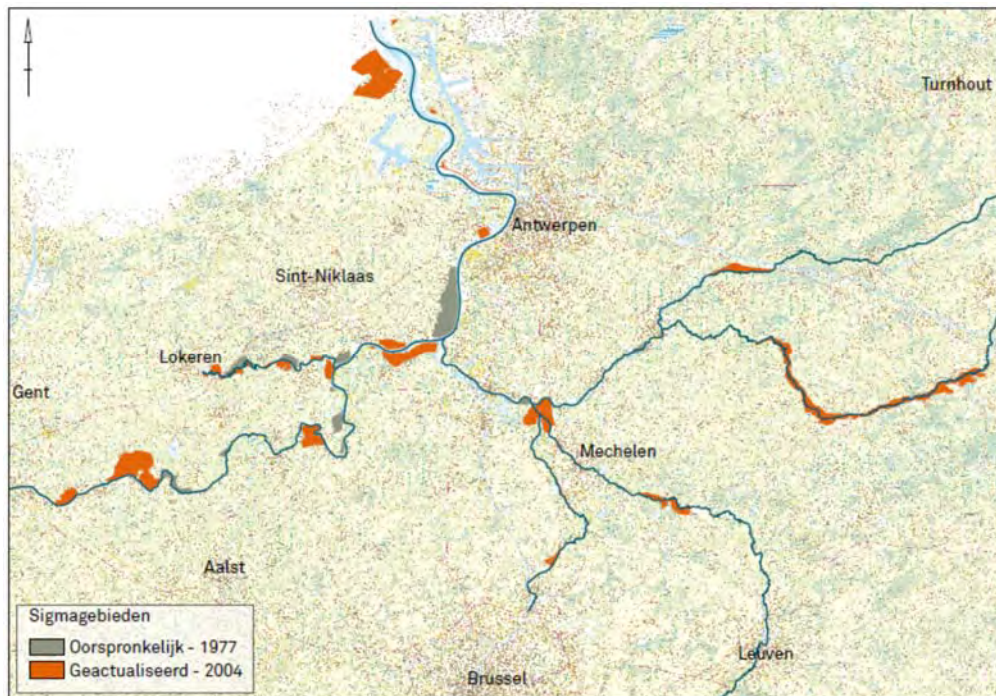
Figuur 8-8: Overstromingsdiepte gesimuleerd door het CityCAT-oppervlakteafstromingsmodel voor een testrun op de Stad Antwerpen



Figuur 8-9: Overstromingsdiepte gesimuleerd door het CityCAT-oppervlakteafstromingsmodel voor een testrun op de Stad Antwerpen: ingezoomd op een deelgebied

8.3 Waterbouwkundig Laboratorium: Impact op gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta - KBR

Het Waterbouwkundig Laboratorium bestudeerde de impact voor het gebied van de polders van Kruibeke, Bazel en Rupelmonde (KBR), waar de afdeling Zeeschelde van Waterwegen en Zeekanaal NV (W&Z) een gecontroleerd overstromingsgebied (GOG) aanlegt. Sommige compartimenten van dit GOG zullen onderhevig zijn aan een gecontroleerd gereduceerd getij (GGG). Het GOG-GGG KBR vormt een onderdeel van het oorspronkelijke Sigmaplan (Figuur 8-10) en beslaat een oppervlakte van ongeveer 600 ha. Het zal in het najaar van 2015 in gebruik genomen worden.



Figuur 8-10: Situering van de polders van KBR als onderdeel van het oorspronkelijk Sigmaplan

De aanleg van een nieuwe ringdijk rond de polders heeft een invloed op de afwatering van de waterlopen die de Wase cuesta ontwateren en de polders doorkruisen (Figuur 2-5). Van deze waterlopen is de Barbierbeek de belangrijkste. Er worden dan ook een aantal maatregelen getroffen (doorlaatconstructies in de ringdijk, ringgrachten en wachtbekkens buiten de ringdijk) om te beletten dat het gelijktijdig optreden van hevige regenval in het Waasland en een stormtij op de Schelde zou leiden tot wateroverlast aan de voet van de cuesta, net buiten de ringdijk.

De neerslagproducten aangeleverd via deze studie werden gebruikt om na te gaan of een toename van de neerslagintensiteit als gevolg van klimaatwijziging na verloop van tijd bijkomende maatregelen ter preventie van wateroverlast nodig zou kunnen maken. Dit gebeurde op basis van de hydrologische en hydraulische modellen van het Waterbouwkundig Laboratorium voor het studiegebied.

Tabel 8-1 toont de verwachte wijziging van de maximale waterstand in de Barbierbeek (nabij het wachtbekken), de noordelijke ringgracht (nabij de uitlaat van de Kapelbeek) en de zuidelijke ringgracht (nabij de uitlaat aan de Lange Gaanweg) t.o.v. het huidige klimaat. De variatie werd berekend voor de hoog-winter en midden (=gematigd) klimaatscenario's en voor zes maatgevende gebeurtenissen. Deze maatgevende gebeurtenissen bestaan uit een hoge waterstand (H) op de Schelde als gevolg van stormtij voor terugkeerperioden van 100 jaar (H_{100}) en 25 jaar (H_{25}) en voor een gemiddeld getij (H_{gem}), gecombineerd met een hoge bovenafvoer (Q) voor terugkeerperioden van 50 jaar (Q_{50}) en 25 jaar (Q_{25}). De invloed van de zeespiegelstijging op de waterstanden in de Schelde werd in deze analyse niet in rekening gebracht.

Tabel 8-1: Wijziging maximale waterstand (in cm t.o.v. huidig klimaat).

	Barbierbeek		Zuidelijke ringgracht		Noordelijke ringgracht	
	100-midden	100-hoog	100-midden	100-hoog	100-midden	100-hoog
$H_{100} Q_{50}$	+1	+34	0	+28	+5	+35
$H_{100} Q_{25}$	0	+15	-1	+23	+2	+29
$H_{25} Q_{50}$	+1	+8	0	+18	+4	+30
$H_{25} Q_{25}$	0	+6	-1	+21	+2	+25
$H_{gem} Q_{50}$	+2	+55	+1	+12	+3	+17
$H_{gem} Q_{25}$	+1	+40	0	+11	+2	+13

De resultaten in Tabel 8-1 geven aan dat bij het midden scenario de invloed van de klimaatwijziging zeer beperkt is (enkele cm). Bij toepassing van het hoog scenario (het meest geschikt voor dit type evaluaties) stijgen de piekwaterstanden voor de meest extreme gebeurtenis ($H_{100} Q_{50}$) met 25 à 35 cm. Deze stijging is volledig toe te schrijven aan de toename van de bovenafvoer (Q_{50}). Het waterpeil op de Schelde (H_{100}) is ongewijzigd gebleven. Er werd immers geen rekening gehouden met de verwachte zeespiegelstijging.

Conclusie van deze impactanalyse is dat in de verre toekomst een verhoging van de extreme neerslag de kans op wateroverlast aan de voet van de Wase cuesta waarschijnlijk zal doen toenemen. Aangezien de uitgevoerde analyse betrekking heeft op een situatie die pas over 100 jaar zal optreden, blijft er wel meer dan voldoende tijd om aanvullende maatregelen uit te werken en te implementeren. Om de totale impact van de klimaatwijziging in te schatten, is het noodzakelijk om naast de invloed van de wijziging in extreme neerslag ook de invloed van de zeespiegelstijging op de waterstanden in de Schelde in rekening te brengen.

Het uitgebreider rapport bij deze impactanalyse is bijgevoegd (Bijlage E).

8.4 Lopende impactstudies waterlopen

Naast de gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta - KBR zijn er nog drie andere impactstudies langs waterlopen in de Antwerpse regio lopende:

- Impactstudie op de locatie Hoekakker (Laarse Beek, Donkse)
- Impactstudie hemelwaterafvoer Klein Schijn zone Albertkanaal
- Impactstudies Groot Schijn en Benedenvliet - Struisbeek

De resultaten van deze impactstudies waren nog niet bekend bij de opmaak van dit rapport.

8.5 Impact op riooloverstortfrequenties / ontwerpwaarden bufferbekkens

Naast deze impactresultaten door eindgebruikers werden de klimaatscenario's voor de regio Antwerpen ook doorgerekend in een continue simulatietool dat aan de basis wordt gebruikt voor het ontwerp van bufferbekkens (vb. langs rioleringen), conform de Code van Goede Praktijk voor Rioleringsystemen (Willems, 2009, 2011). In deze tool wordt de beschikbare 100-jaar 10-minuten neerslagtijdreeks te Ukkel volledig doorgerekend, voor en na perturbatie aan de klimaatscenario's, en de tijdreeksresultaten statistisch verwerkt. Omdat de neerslagextremen te Ukkel gemiddeld dezelfde zijn als voor de regio Antwerpen (zie Deel 5), kon dezelfde tijdreeks gebruikt worden, mits perturbatie aan de lokale klimaatwijzigingen.

Gemiddeld voor de regio Antwerpen blijken de klimaatwijzigingen en dus ook de vereiste aanpassingen aan de ontwerpwaarden voor bufferbekkens dezelfde als deze voor Ukkel. Lokaal kunnen er wel verschillen zijn. Bovendien geven de nieuwe RCP-gebaseerde scenario's een aanpassing in vergelijking met de vorige klimaatscenario's zoals gebruikt voor de berekening van de gewijzigde ontwerpwaarden onder veranderende klimaatcondities (zie Willems, 2009, 2011 voor meer details).

Tabel 8-2: Ontwerpwaarden voor buffervoorzieningen, aangepast aan de klimaatscenario's

terugkeerperiode lange termijn simulaties bij constante doorvoer, huidig klimaat		±1 jaar	±2 jaar	±5 jaar	±20 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij constante doorvoer, hoog klimaatscenario		±0.5 jaar	±1 jaar	±2 jaar	±10 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij lineaire doorvoerrelatie, huidig klimaat		±0.5 jaar	±1 jaar	±2 jaar	±10 jaar
terugkeerperiode lange termijn simulaties bij lineaire doorvoerrelatie, hoog klimaatscenario		<0.5 jaar	±0.5 jaar	±1 jaar	±5 jaar
maximaal ledigingsdebiet (via infiltratie, afgeknepen doorvoer, verdamping, ...)	40 l/(s.ha)	50 m ³ /ha 5 mm	100 m ³ /ha 10 mm	150 m ³ /ha 15 mm	200 - 250 m ³ /ha 20 - 25 mm
	10 l/(s.ha)	100 m ³ /ha 10 mm	150 m ³ /ha 15 mm	200 - 250 m ³ /ha 20 - 25 mm	300 - 400 m ³ /ha 30 - 40 mm

8.6 Zeespiegelstijging en Schelde

Zoals aangegeven beperkte deze studie zich tot de overstromingen als gevolg van extreme neerslagcondities (pluviale gevolgen). Naast deze gevolgen is er voor de Stad Antwerpen natuurlijk ook de invloed van de zeespiegelstijging en toenemende waterstanden langs de Schelde.

De kustregio krijgt te kampen met de gevolgen van de zeespiegelstijging en het gewijzigd windklimaat. Zoals uit Deel 6.4 bleek, kunnen de klimaatprojecties geen uitsluitsel geven of er nu een stijging, dan wel een daling van de gemiddelde en extreme windsnelheden komt. Dit komt neer op een grote onzekerheid m.b.t. de wijziging in stormopzet, en dus de waterstanden langs de Schelde.

De zeespiegelstijging is dus belangrijker dan de verandering in stormopzet. Volgens berekeningen van Meyvis et al. (2003), zal – bij een gemiddelde zeespiegelstijging van 60 cm tegen het jaar 2100 – de overstromingskans langs de Schelde dalen van een terugkeerperiode van 350 jaar tot een terugkeerperiode van 25 jaar in het jaar 2100. De meest recente resultaten van de klimaatprojecties geven een nog extremere zeespiegelstijging aan, wat de situatie zeker niet ten goede komt. Dit geeft aan dat het volledig uitvoeren van het (geactualiseerde) Sigmaplan een absolute noodzaak is. Om het gewenste veiligheidsniveau te halen (terugkeerperiode overstroming langs de Schelde grootteorde 4000 jaar) is nog ongeveer 4000 ha bijkomend overstromingsgebied vereist. In het nieuwe Sigmaplan, dat op basis van een optimale kostenbatenanalyse werd herzien (Meyvis et al., 2003; RA, 2005; De Nocker et al., 2006; Broekx et al., 2011), zijn er bijkomende overstromingsgebieden voorzien tegen 2050 voor een totaal van 1325 ha, aangevuld met 23 km dijkverhogingen en een muur in Antwerpen.

De zeespiegelstijging zal verder nog een aangepaste zoet-zoutwater verdeling veroorzaken, wat op ecologisch vlak leidt tot veranderende habitats en aanleiding geeft tot bepaalde fysiologische effecten voor dieren en planten. Opnieuw zijn exacte effecten hier (nog) niet gekend.

9 Managementsamenvatting

9.1 Inleiding / doel van de studie

Op basis van alle momenteel beschikbare klimaatmodellen en de resultaten die zij geven voor de regio Antwerpen, werd de impact bestudeerd van de klimaatverandering op het voorkomen van extreme neerslag in de regio. Er werden klimaatscenario's afgeleid die bruikbaar zijn om de impact te berekenen van de klimaatverandering op overstromingskansen- en gevolgen langs zowel rioleringen als waterlopen. De Schelde, waarvoor ook andere invloeden spelen zoals de zeespiegelstijging en toename in stormopzet, werd wel buiten beschouwing gelaten. Deze studie beperkte zich tot de zogenaamde "pluviale" overstromingsproblematiek (overstromingen als gevolg van extreme regenval).

Om de invloed te kunnen bestuderen van veranderingen in extreme regenval op overstromingsrisico's, zijn naast de klimaatscenario's voor extreme neerslag ook klimaatscenario's vereist voor temperatuur en verdamping. De toename in neerslag zou immers voor een deel gecompenseerd kunnen worden door de gelijktijdige toename in verdamping. Vooral bij impactanalyse langs waterlopen is de verdamping een belangrijke component van de hydrologische cyclus. Daarom werd in deze studie het klimaatveranderingssignaal niet enkele voor de neerslag bepaald maar ook voor de temperatuur en de maximaal mogelijke verdamping (de zogenaamde potentiële evapotranspiratie, die typisch gebruikt wordt als invoer voor hydrologische studies langs waterlopen en stroomgebieden). Verder werd ook de toekomstige verandering in windsnelheid bestudeerd. Voor neerslag en temperatuur werden niet enkel de veranderingen in extremen bestudeerd (extreem hoge neerslagintensiteiten, aantal droge of natte dagen, aantal hittegolven, enz.) maar ook de veranderingen in langdurigere, vb. maandgemiddelde, waarden.

9.2 Gemodelleerde klimaatveranderingssignalen

Hierna worden de belangrijkste bevindingen m.b.t. deze "meteorologische" klimaatveranderingen samengevat (zie Deel 6 van dit rapport voor de details). De getalwaarden die hierna worden gegeven bij de klimaatveranderingen gelden voor een toekomstperiode van 100 jaar; in deze studie werden echter ook inschattingen gemaakt van de te verwachten veranderingen voor kortere toekomstperioden van 30 jaar en 50 jaar.

Alhoewel de precieze invloeden nog erg onzeker zijn, zijn de tendensen (richtingen van verandering) duidelijk. Conform de veranderingen die eerder voor Ukkel werden vastgesteld, krijgt de regio Antwerpen in de toekomst door de toenemende uitstoot aan broeikasgassen te maken met drogere zomers (dalende totale neerslaghoeveelheden in de zomermaanden, vooral voor juli en augustus). De verandering in winterneerslag is minder duidelijk; de wintermaanden kunnen iets natter worden (gemiddeld enkel procenten). en dat de zomermaanden droger worden, met juli en augustus als uitschieters, gemiddeld zelfs tot 30%. De daling in totale aantal millimeters zomerneerslag is vooral het gevolg van een sterke afname in het aantal dagen met neerslag. Zowel in de winter als de

zomer wordt er een afname gevonden van het aantal regenbuien, maar vooral in de zomermaanden kan die afname zeer sterk zijn. Dit betekent echter niet dat de neerslagintensiteiten in de zomer niet kunnen toenemen. Het tegendeel is waar: het regent minder vaak, maar als het regent zal het harder regenen (hogere neerslagintensiteiten, vooral tijdens de zomermaanden).

De dalende totale neerslaghoeveelheden in de zomer zorgen voor dalende waterbeschikbaarheid tijdens deze periode, die nog verder versterkt wordt door de toenemende temperatuur en verdamping. Voor alle maanden van het jaar wordt er een temperatuurstijging vooropgesteld: tussen 2 en 3 °C gemiddeld per maand, met uitschieters tot 9 °C in augustus. De stijging in maximale dagtemperaturen is nog hoger dan de stijging in gemiddelde dagtemperaturen. Het jaarlijks aantal hittegolven zal daardoor stijgen. Een hittegolf wordt hierbij – conform het KMI – gedefinieerd als een periode met minstens 5 opeenvolgende dagen een temperatuur van 25 °C of meer, waarvan bovendien minstens 3 dagen een temperatuur van 30 graden °C of meer kennen. Een typische zomer in het huidige klimaat zal gemiddeld gezien slechts 1 hittegolf hebben, terwijl het jaarlijks aantal hittegolven binnen 100 jaar gemiddeld 2 tot 3 zal bedragen.

Voor de potentiële evapotranspiratie wordt een gemiddelde relatieve stijging van 10% tot 15% gevonden, waarbij er een duidelijke seizoensfactor aanwezig is, met de hoogste stijging bij het einde van de zomer en de laagste stijging bij het einde van de winter.

De verandering in windsnelheid is daarentegen eerder beperkt, met veranderingen tussen -1% en +1.5%. Zoals uit Deel 6.4 bleek, kunnen de klimaatprojecties geen uitsluitsel geven of er nu een stijging, dan wel een daling van de gemiddelde en extreme windsnelheden komt. Dit komt neer op een grote onzekerheid m.b.t. de wijziging in stormopzet, en dus de waterstanden langs de Schelde.

De zeespiegelstijging is dus belangrijker dan de verandering in stormopzet. Volgens berekeningen van Meyvis et al. (2003), zal – bij een gemiddelde zeespiegelstijging van 60 cm tegen het jaar 2100 – de overstromingskans langs de Schelde dalen van een terugkeerperiode van 350 jaar tot een terugkeerperiode van 25 jaar in het jaar 2100. De meest recente resultaten van de klimaatprojecties geven een nog extremere zeespiegelstijging aan, wat de situatie zeker niet ten goede komt. Dit geeft aan dat het volledig uitvoeren van het (geactualiseerde) Sigmaplan een absolute noodzaak is.

9.3 Ruimtelijke variaties in extreme regenval

De veranderingen in extreme neerslagintensiteiten, namelijk deze die typisch verantwoordelijk zijn voor de lokale riolerings- en waterloopoverstromingen, blijken gemiddeld vergelijkbaar met deze te Ukkel, maar zijn wel ruimtelijk zeer sterk variabel in en rond de Stad Antwerpen. Dit heeft te maken met de sterke ruimtelijke verschillen in verstedelijking / hitte-eiland effect in combinatie met topografische hoogteverschillen.

Figuur 6-11 toont de ruimtelijke variaties in extreme neerslagintensiteiten boven de regio Antwerpen, voor de huidige en toekomstige klimaatcondities voor 2030, 2050 en 2100. Die figuur geldt voor neerslagintensiteiten bij een tijdsduur van 15 minuten en een gemiddelde herhalingstijd van 5 jaar (gemiddelde tijd tussen 2 regenbuien met zulke 15-minuten intensiteit of hoger). De ruimtelijke variatie werd ook voor andere gemiddelde

herhalingstijden groter dan 1 jaar bestudeerd. Het ontwerp van rioleringsystemen gebeurt typisch voor gemiddelde herhalingstijden van 2, 5 en 20 jaar. Voor waterlooptoepassingen gaat men naar grotere herhalingstijden. In deze studie werden extrapolaties gemaakt tot 100 jaar.

9.4 Impactanalyse van de klimaatwijziging op riolerings- en waterloopoverstromingen

De ruimtelijke wijziging in neerslagextremen en kaarten zoals Figuur 6-11 geven een algemeen beeld van de invloed van de klimaatwijziging op lokale meteorologische condities, maar zijn niet rechtstreeks bruikbaar voor impactanalyse op riolerings- en waterloopoverstromingen. De klimaatwijzigingen aan de meteorologische statistieken kunnen wel gebruikt worden om de meteorologische producten (ontwerpbuizen en tijdreeksen) zoals standaard gebruikt aan de basis van hydrologische en hydraulische riolerings- en waterloop/stroomgebiedsmodellering, aan te passen. Dit gebeurde in deze studie voor Riolink (rioleringsmodel Stad Antwerpen), Provincie Antwerpen (waterlopenmodel Klein Schijn), het Waterbouwkundig Laboratorium (waterlopenmodel gebied Barbierbeek - Wase cuesta - KBR) en de Vlaamse Milieumaatschappij (geïntegreerd waterlopen-rioleringsmodel Benedenvliet incl. Struisbeek).

De impactanalyse van de gewijzigde meteorologische condities op de overstromingscondities langs de riolering en de waterlopen in de Antwerpse regio gebeurde door de hogervermelde instanties.

Voor het rioleringsstelsel van de Stad Antwerpen resulteerden de impactberekeningen met het rioleringsmodel door Riolink tot aangepaste impactresultaten, waarbij bepaalde gebieden op een hogere criticiteit wijzen en andere gebieden op een lagere criticiteit in vergelijking met de vroegere impactberekeningen o.b.v. de neerslagstatistieken te Ukkel. Vergelijking van de impactberekeningen met een lijst van recente overstromingen, die door de brandweer ter beschikking werd gesteld, gaf aan dat de impactberekeningen met de gewijzigde neerslagcondities voor de Antwerpse regio nauwkeuriger modelresultaten opleveren. Er wordt dus verwacht dat deze gewijzigde neerslagcondities ook een nauwkeurigere scenarioanalyse toelaten. Ze worden daarom aanbevolen aan de basis van toekomstige planningsprojecten. Tegelijkertijd wordt ook gewezen op de onzekerheid waaraan de neerslagstatistieken onderhevig zijn, en de mogelijkheden tot verdere verfijning in de toekomst. De impactresultaten worden daarom best niet als "100% juist" beschouwd, maar indicatief. Hetzelfde geldt voor de toekomstige impact van de klimaatverandering. Hoe met deze onzekerheid best omgegaan wordt, wordt hierna in Deel 10 verder toegelicht (zie "no-regret" aanpak).

Voor de gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta - KBR berekende het Waterbouwkundig Laboratorium dat de toename in extreme neerslag als gevolg van de klimaatwijziging voor een toename zorgt van de bovendebieten en daardoor van de piekwaterstanden met meerdere tientallen cm. Door de zeespiegelstijging kan dit verder toenemen. Dit zal in de toekomst bijkomende maatregelen vereisen.

Voor de stroomgebieden van de Benedenvliet – Struisbeek en het Schijn zullen de impactberekeningen pas later gebeuren.

10 Beleidsaanbevelingen

10.1 Tegengaan toename in hydrologische extremen

Naast de impactanalyse op riolerings- en waterloopoverstromingen, zijn er nog een aantal andere gevolgen van de klimaatwijziging, die in deze studie niet gekwantificeerd werden. Eerder werden in Vlaanderen echter reeds studies uitgevoerd, weliswaar op basis van de vorige generatie klimaatscenario's en voor Ukkel. Vermits de klimaatscenario's afgeleid in deze studie – afgezien van de lokale ruimtelijke verschillen – grotendeels in dezelfde lijn liggen, kunnen de resultaten van die studies – samen met de resultaten van deze studie – als leidraad gebruikt worden voor het formuleren van beleidsaanbevelingen voor de regio.

Naast de toename in overstromingskansen en –risico's (zie Deel 0) langs zowel rioleringen als waterlopen, wijzen studies op verminderde waterbeschikbaarheid in droge zomerperioden (MIRA, 2015). Hydrologische impactresultaten van de verschillende studies (waarbij verschillende hydrologische modellen en stroomgebieden werden bestudeerd) geven allemaal een toekomstige daling van laagwaterafvoeren aan, tussen 10% en 70% daling (Vansteenkiste et al., 2012, 2014; Boukhris et al., 2008). Dit resultaat is afkomstig van de oude klimaatscenario's. De klimaatscenario's afgeleid in deze studie geven echter hogere evapotranspiratie tijdens de zomermaanden, waardoor de impact nog extremer wordt: nog lagere laagwaterdebieten en sterkere droogtetrends. De precieze impact van de nieuwe resultaten voor het studiegebied is dus nog niet concreet berekend.

Extremere laagwater-afvoeren van de rivieren hangen deels samen met een algemene verlaging van de jaarlijkse grondwateraanvulling, zoals reeds bewezen door bv. Dams et al. (2012) en Vansteenkiste (2014). De specifieke impact voor dit studiegebied werd (nog) niet uitgevoerd. Hoewel de resultaten dus niet specifiek op het studiegebied afgestemd zijn, kan gesteld worden dat de meeste modellen en studies in Vlaanderen een lichte stijging tonen in de winter en een iets grotere daling in de zomer. Dit resulteert in een netto daling van grondwater, vb. met een gemiddelde van -7% grondwateraanvulling per jaar voor de Kleine Nete (Dams et al., 2012). Let wel, opnieuw zijn deze resultaten gebaseerd op de oude klimaatscenario's en kan opnieuw (analoog aan de laagwaterafvoeren) besloten worden dat het effectieve toekomstscenario voor de regio Antwerpen met een hoge waarschijnlijkheid extremer zal zijn dan deze daling van 7%.

Naast de klimaattrends zijn er andere evoluties die ook belangrijk zijn, zoals de toenemende urbanisatie. Een vroegere studie van Vansteenkiste et al. (2014) toonde een lineair stijgend verband aan tussen het percentage verstedelijkt gebied en de relatieve toename van piekafvoeren als gevolg van de klimaatscenario's. In een andere studie door Poelmans et al. (2011) werden stedelijke expansiescenario's voor Vlaanderen opgesteld, op basis van extrapolatie van satellietbeelden. Uit die studie blijkt dat tussen 1976 en 2000 het percentage verharding ongeveer verdubbeld is in Vlaanderen: van 4 tot 5% in 1976 tot ongeveer 10% in 2000. Dit werd geëxtrapoleerd tot gemiddeld 20% in 2050. Het resultaat van deze studie ligt in lijn met het resultaat bekomen door Vansteenkiste et al. (2014): neerslagafstromingsdebieten stijgen in functie van (onder andere) landgebruik (verhoogde verharding). De resultaten van deze twee studies kunnen doorgetrokken worden naar het studiegebied van dit rapport: hoe meer verstedelijking, hoe groter de piekafvoeren.

Al deze resultaten duiden op een toename in het voorkomen van hydrologische extremen, dus meer tijdsvariatie in de meteorologische en hydrologische condities. Klimaatadaptatie zal zich dus moeten focussen op het terugdringen van deze toename naar meer hydrologische extremen. Hierbij wordt best in de eerste plaats ingezet op bronmaatregelen omdat deze de meest kosten-efficiënte wijze zijn om zowel toenemende overstromingskansen als toenemende droogte hand-in-hand aan te pakken (Willems et al., 2012b; Van Lipzig & Willems, 2014; MIRA, 2015). Hierna volgen concrete adviezen.

10.2 Klimaatadaptatie: Nu reeds rekening houden met de klimaatwijziging op een slimme manier

Een belangrijke uitdaging zal er dus in bestaan om ons 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 (Willems & Arnbjerg-Nielsen, 2013; Willems et al., 2012b). Dit houdt een betere planning van de regenwaterafvoer in op het stadsniveau. Bij het (her)dimensioneren van rioleringen en de bijhorende buffervoorzieningen (regenwatertanks, infiltratiebekkens, enz.) moet rekening gehouden worden met meer intense neerslagperiodes (zie ook Deel 8.4).

Hoe dat best gebeurt en wanneer wel en wanneer niet, kan via het risicoconcept verduidelijkt worden. Het “risico” van de meer extreme regenval wordt technisch berekend als de kans op voorkomen vermenigvuldigd met de bijhorende gevolgen:

$$\text{Risico} = \text{Kans op voorkomen} * \text{Gevolgen}$$

Indien ofwel de kans groot is, ofwel de gevolgen, of beide, kan het risico groot zijn, en is het belangrijk om met de klimaatwijzigingen rekening te houden. Daarom wordt aanbevolen om de effecten van de klimaatscenario's te begroten. Dit kan zoals in deze opdracht door de eindgebruikers gedaan o.b.v. hun riolerings- en waterloopmodellen. Indien de effecten belangrijk blijken, dient het voorzichtigheidsprincipe gehanteerd. Dit wil zeggen dat met de mogelijke toekomstige klimaatverandering rekening wordt gehouden. Het negeren van grote potentiële gevolgen zou getuigen van onverantwoordelijk gedrag; onafhankelijk van de waarschijnlijkheid waarmee de klimaatscenario's zich zullen voordoen. Elk risicobeheer is daarop gebaseerd; net zoals wij als goede huismoeder of huisvader onze kinderen verbieden om risicovolle zaken te doen, allerhande verzekeringen nemen (ook al is de kans op voorkomen klein, vb. brand, ongevallen), enz. Enkel indien de gevolgen van een bepaald klimaatscenario niet belangrijk zijn, hoeft men zich geen zorgen te maken over dat scenario.

Meer concreet wordt aanbevolen om de klimaatscenario's, zoals afgeleid in deze studie (hoog-midden-laag; nat-gematigd-droog), door te rekenen in de impactmodellen (riolerings- en/of waterloopmodellen) en op die manier het bereik aan mogelijke gevolgen in te schatten (in grootteorde). Indien deze gevolgen – voor bepaalde klimaatscenario('s) – groot zijn, dient er mee rekening gehouden. Hoe dat best gebeurt wordt hierna verder toegelicht. Merk op dat bij studies inzake wateroverlast het hoog/nat scenario de grootste

impacts geeft (hoog-zomer scenario langs rioleringen en kleine waterlopen; hoog-winter scenario langs grote rivieren). De andere klimaatscenario's geven een lagere impact. Daarom is het doorrekenen van het hoog-klimaatscenario het belangrijkste. Het geeft de grootste impacts.

In de praktijk wordt er soms verkeerdelijk voor gekozen om enkel voor het midden scenario de gevolgen te bestuderen. Men gaat er immers van uit dat het midden scenario het meest waarschijnlijke scenario is. Dit is evenwel een verkeerde redenering: er kunnen geen kansen gekoppeld worden aan de klimaatscenario's. Om te voorkomen dat verkeerdelijk enkel het midden scenario wordt beschouwd, worden in bepaalde landen (zoals in Nederland en door het IPCC) geen 3 scenario's maar minstens 4 scenario's (dus geen midden scenario) afgeleid.

Uit voorgaande blijkt dat het belangrijk is om voor de klimaatscenario's – zeker voor het scenario met de grootste gevolgen, vb. hoog scenario bij wateroverlast – de gevolgen te begroten. Indien deze gevolgen groot zijn, is het belangrijk om – naast het voeren van een beleid dat er alles aan doet om te voorkomen dat wij in dat scenario terecht komen – rekening te houden met dat potentieel scenario in de beleidsvoering en het beheer. Met “rekening houden” wordt bedoeld dat beleids- en beheersbeslissingen, en bijhorende maatregelen en technische ontwerpen, zo worden genomen/gemaakt dat ze “no regret” en “climate proof” zijn. Dat gebeurt door – in het licht van de grote onzekerheden – de veerkracht (vb. van het watersysteem) te vergroten zodat ze beter de klimaatschokken aankunnen. Omdat de precieze toekomstige klimaatverandering niet gekend is, worden de maatregelen en technische ontwerpen best flexibel-adaptief gemaakt zodat ze – met beperkte kost – in de toekomst verder kunnen aangepast worden aan ev. bijkomende noden. De klimaatscenario's geven daarbij – op basis van de huidige wetenschappelijke kennis – een grootteorde-beeld van de grenzen waarbinnen deze toekomstige noden zich zouden kunnen situeren. Uiteraard wordt hierbij ook best rekening gehouden met de toekomstperioden van de verschillende klimaatscenario's in vergelijking met de levensduur van de aanpassingen (vb. technische ontwerpen).

Ook worden best maatregelen genomen die duurzaam zijn, d.w.z. effectief en kosten-efficiënt zijn in elk klimaatscenario, onafhankelijk van hoe het toekomstig klimaat precies evolueert (binnen de bandbreedte van de klimaatscenario's). Er moet in ieder geval worden voorkomen dat aanpassingen worden gedaan die verdere bijstellingen in de toekomst (zie de klimaatscenario's) onmogelijk of zeer duur zouden kunnen maken. Het betekent ook dat men aanpassingen zoekt die niet enkel in de context van de klimaatverandering voordelig zijn, maar sowieso tegelijkertijd ook voor andere doeleinden voordelen bieden. Klimaatscenario's leggen trouwens vaak pijnpunten bloot in het huidige beheer. Door de effecten van klimaatscenario's te bestuderen, dus de meteorologische situatie extremer voor te stellen dan ze momenteel is, komen problemen in het beheer – die er nu ook al zijn, maar minder zichtbaar – duidelijker aan de oppervlakte. Eenvoudige, kleine, korte-termijn, niet duurzame oplossingen volstaan dan vaak niet meer, en daarom dient men op zoek te gaan naar meer intelligente, meer geavanceerde, meer structureel ingrijpende oplossingen die ook op de lange termijn duurzaam zijn. Ook bewustmaking en -wording bij de bevolking wordt dan belangrijk.

Om deze principes wat concreter te maken worden hierna enkele voorbeelden gegeven. Flexibel ontwerpen betekent dat er niet langer, zoals klassiek in de waterbouwkunde gebeurde, met vaste ontwerpregels (die gemiddeld in alle omstandigheden beste

ontwerpen geven) wordt gewerkt, maar men meer rekening houdt met de onbekende tijds- en plaats-specifieke factoren en meer accepteert dat onze kennis onvolkomen is en in de nabije toekomst sterk kan/zal evolueren. Dat proces wordt “actief leren” genoemd, en betekent ook dat de ontwerpen niet enkel door ingenieurs worden gestuurd maar ook gedragen worden door en gebaseerd worden op kennis van alle betrokken partijen in de maatschappij. Bij stedelijke hydrologie, dat zeer sterk afhankelijk is van plaatsafhankelijke, lokale kennis, betekent dat bijvoorbeeld dat (vertegenwoordigers van) lokale gemeenschappen meer betrokken worden in het beslissingsproces. Het adaptief maken van de ontwerpen betekent in deze context dat men bij vernieuwing of renovatie, rekening houdt met de al gewijzigde klimaatomstandigheden en de mogelijkheid voorziet om eventueel later (met beperkte kost) bijkomende afkoppeling van regenwater, bijkomende berging, bijkomende pompcapaciteit, enz. te realiseren.

Bijvoorbeeld, voor de riolering van de Stad Antwerpen werden de toekomstige neerslagsscenario's afgeleid in deze studie, door Riolink doorgerekend. Hieruit bleek dat voor het hoog klimaatscenario de kans op wateroverlast en de gevolgen ervan zeer sterk toenemen. Het is evenwel geen goed idee om het rioleringsstelsel nu al via “klassieke” technische maatregelen aan dit klimaatscenario aan te passen. Met klassieke technische maatregelen worden maatregelen bedoeld die op dit ogenblik typisch gebruikt worden bij het ontwerp of aanpassing van rioleringsstelsels, zoals het plaatselijk vergroten van de leidingdiameters of het installeren van bijkomende bufferbekkens, pompstations, enz. Indien de klimaattevoeltes in de toekomst minder sterk zouden blijken dan het hoog-klimaatscenario, dan zou het rioleringssysteem daardoor overgedimensioneerd worden. Zulke overdimensionering wordt best vermeden, niet enkel om economische redenen maar ook omwille van technische nadelen (vb. verminderde stroomsnelheden en dus verhoogd gevaar op sedimentatie en verstopping). Wat wel zin heeft, en zelfs sterk aanbevolen wordt, is om bijkomende bronmaatregelen – zoals opwaartse berging en infiltratie - te nemen. Deze hebben een gunstig effect onder elk klimaatscenario (zie ook verder). Ze zijn dus klimaatbestendig en duurzaam, en zullen zelfs zonder bijkomende toekomstige klimaatverandering kostenbesparend werken. Ze reduceren niet enkel de gevolgen van toenemende neerslagintensiteiten, maar gaan ook de gevolgen tegen van de toenemende urbanisatie-verharding en van de toenemende verdroging. Ook geven ze meerdere functies aan open ruimtes; dus geven ze een beter beheer van de schaarse open ruimtes. Kortom, in plaats van te investeren in een beperkt aantal, dure bijkomende technische aanpassingen aan het rioleringsstelsel of in afwaartse gevolg-mitigerende maatregelen, wordt best maximaal geïnvesteerd in een groot aantal, kleine, goedkope en duurzame, oorzaak-wegnemende bronmaatregelen (Figuur 10-1).



Figuur 10-1: Duurzaam stedelijk waterbeheer zet best in op een groot aantal, kleine/goedkope en duurzame, oorzaak-wegnemende opwaartse bronmaatregelen i.p.v. een beperkt aantal, dure, technische maatregelen in of afwaarts het stedelijk waterafvoersysteem.

Naar analogie met afvalbeheer:



In volgorde van afnemend belang:

- Bronmaatregelen: regenwater opwaarts ophouden (gebruiken, infiltreren)
- Bergen (wachtbekkens)
- Vertraagd afvoeren

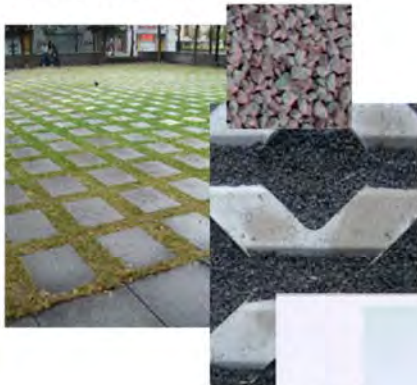
Voor onvermijdbare overstromingen:

- Waarschuwen, evacueren
- Gevolgen verminderen

Figuur 10-2: Ladder van stappen voor een meest duurzaam stedelijk waterbeheer

Voorbeelden van duurzame maatregelen zijn deze die hoogst staan in de ladder zoals in Figuur 10-2 geschetst en dit naar analogie met het afvalbeheer. Hoogst in deze ladder staan de bronmaatregelen, zoals opwaartse bergings- en infiltratievoorzieningen; zie voorbeelden in Figuur 10-3, Figuur 10-4, Figuur 10-5. Maximaal inzetten op opwaartse infiltratie (daar waar de ondergrond dit toelaat) laat toe om wateroverlast en verdroging gelijktijdig en meest efficiënt aan te pakken. Dit vraagt een betere afstemming tussen ruimtelijke planning (ook in de stedelijke omgeving) en waterbeheer (Nolf et al., 2012a).

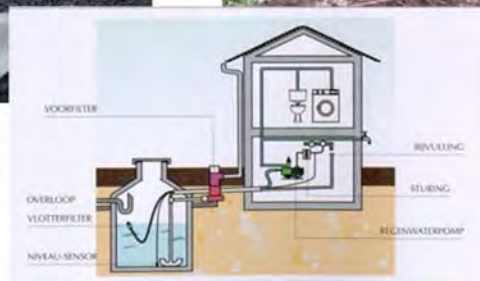
Doorlatende verharding:



Individuele infiltratie:



Regenwater
berging en
hergebruik:



Figuur 10-3: Voorbeelden van lokale-opwaartse berging en infiltratiemogelijkheden als bronmaatregelen en kernelementen in duurzaam stedelijk waterbeheer

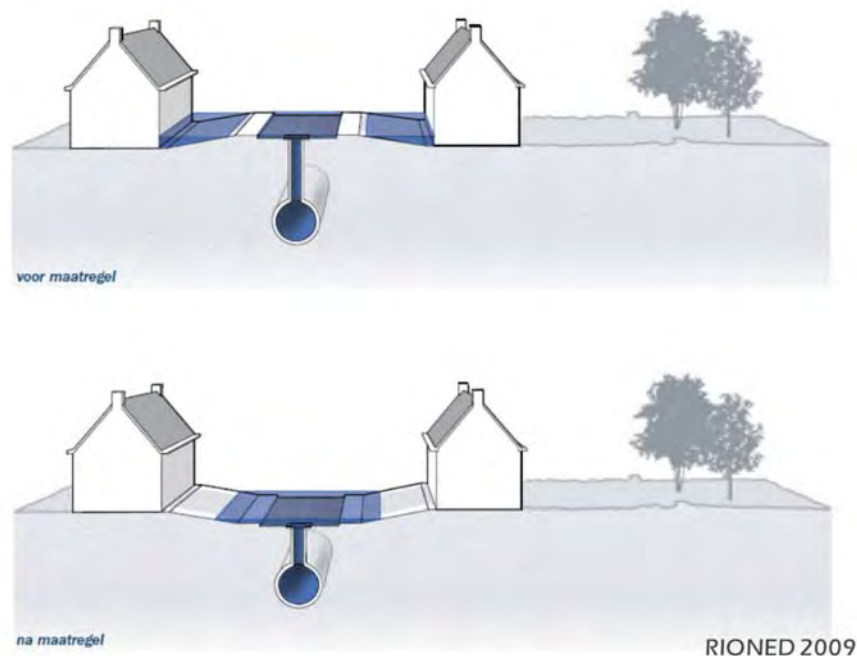


Figuur 10-4: Groene trambanen in de Mercatorstraat te Antwerpen, als voorbeeld van bronmaatregel



Figuur 10-5: Waterdoorlatende parkeerstroken (nu nog vaak gecementeerd) en groene voegen of grasdallen als mogelijkheden voor waterdoorlatende verharding

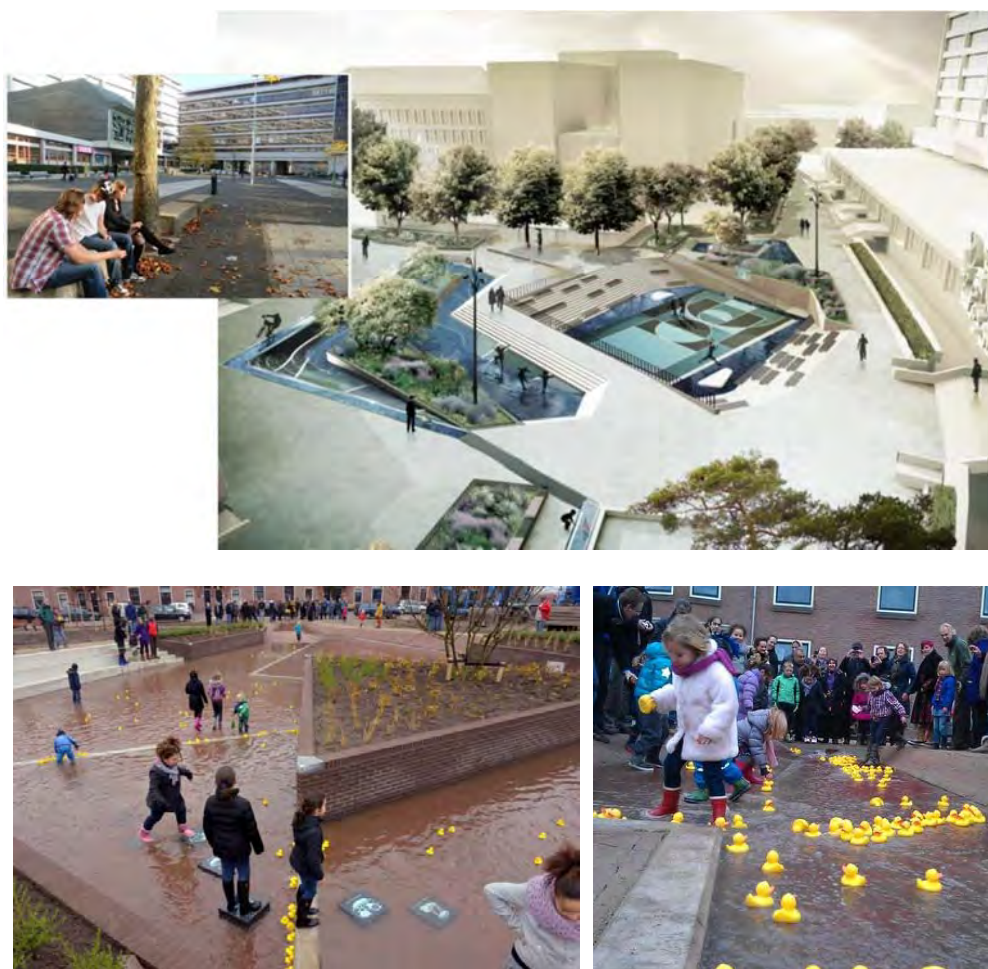
Verder zal het belang van lokale maatregelen toenemen, zoals verhoogde stoepranden en verdieping van de straat (voorbeelden in Figuur 10-6) of het doordacht aanleggen van lokale depressies in het openbaar domein. Dit laatste kan aan pleinen, sport- of andere verharde terreinen in de stad (voorbeelden in , Figuur 10-7 en Figuur 10-8) of nog beter – omdat naast waterberging ook infiltratie gerealiseerd wordt – in parken of andere groengebieden (voorbeeld Figuur 10-9), onverharde sportterreinen en speeltuinen. Ook individuele afkoppeling/infiltratie van regenwater op privéterrein, waar mogelijk, is essentieel (voorbeelden in Figuur 10-3, Figuur 10-10 en Figuur 10-11). Dergelijke lokale en individuele maatregelen kunnen overstromingsschade beperken en cumulatief (wanneer op grote schaal uitgevoerd) meest efficiënt wateroverlast en verdroging hand-in-hand tegengaan.



Figuur 10-6: Hol i.p.v. bol aanleggen van de straat vermeerderd het kombergingsvermogen van de straat en vermindert daardoor de kans op schade bij het optreden van water op straat



Figuur 10-7: Regenwaterberging in verlaagde sportterreinen



Figuur 10-8: Regenwaterberging in stadspleinen: de waterpleinen in Rotterdam

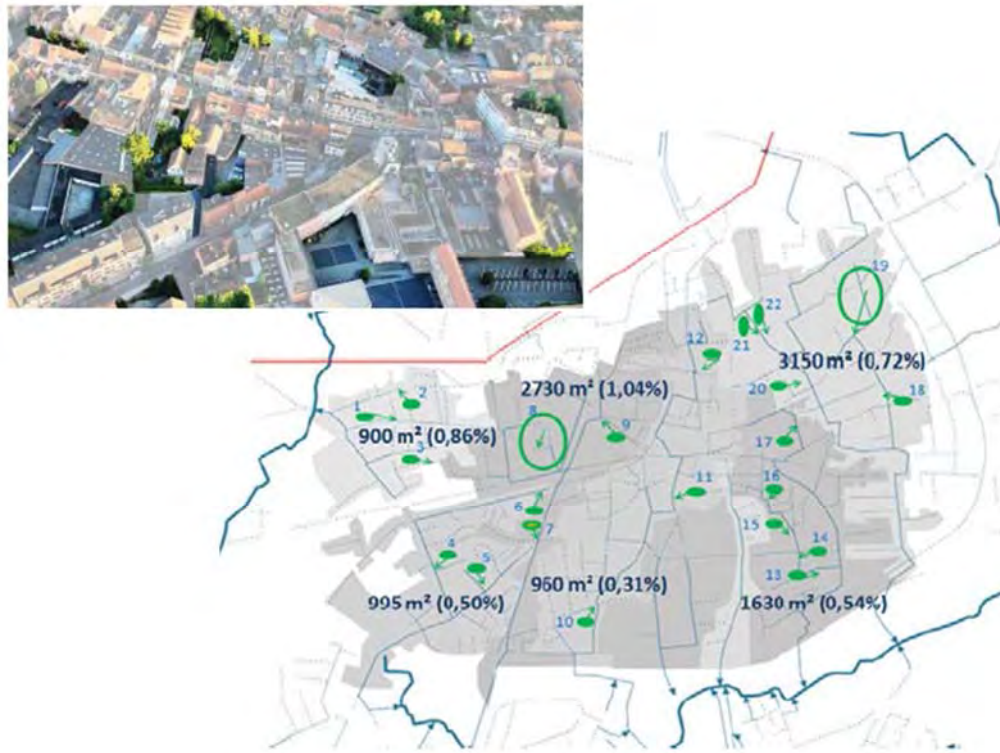


Figuur 10-9: Realiseren van bijkomende opwaartse berging en infiltratie door doordacht aanleggen van lokale depressies in openbaar terrein, vb. wadi's, als voorbeeld van bronmaatregelen en kernelementen in duurzaam stedelijk waterbeheer

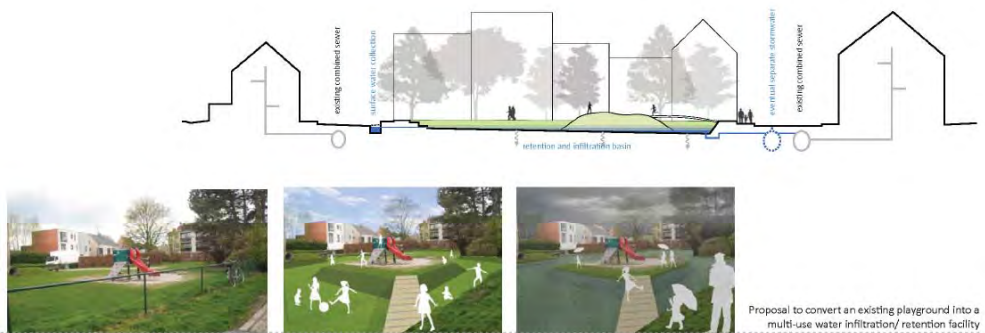


Figuur 10-10: Wijkontwikkeling Nieuw Zuid, Antwerpen: Hemelwater volledig bufferen en maximaal infiltreren op de site

buffering mogelijk is in combinatie met andere ruimtelijke functies werden geïdentificeerd na een interdisciplinaire samenwerking tussen waterbouwkundigen en stedelijke ontwerpers (Figuur 10-12, Figuur 10-13). Voor het begroten van de effecten op de overstromingsrisico's werden rioleringsmodellen met riviermodellen gekoppeld en werden deze fysisch-gebaseerde simulatiemodellen met statistische tijdreeksanalyse gecombineerd. Om de tijdreeks simulaties voor het integrale en uitgestrekte riolerings-riviersysteem haalbaar te maken, werden vereenvoudigd conceptuele modellen geïdentificeerd en gekalibreerd aan de gedetailleerde volledig hydrodynamische modellen.



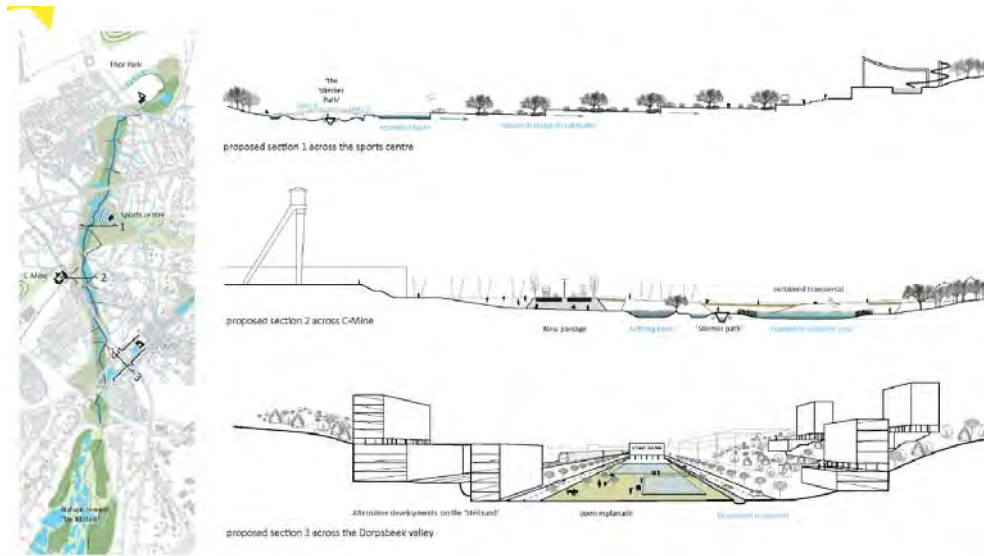
Figuur 10-12: Identificatie van groene zones in de stad die in aanmerking komen voor regenwaterberging en –infiltratie; voorbeeld Stad Turnhout (Nolf et al., 2012; De Vleeschauwer et al., 2012, 2015)



Figuur 10-13: Voorbeeld van mogelijkheid tot aangepaste ruimtelijke inrichting van een groene zone in de stad Turnhout: recreatie & regenwaterberging en –infiltratie combinerend (Nolf et al., 2012; De Vleeschauwer et al., 2012, 2015)

Samenvattend werd in de studie van De Vleeschauwer et al. (2012, 2015) gevonden dat het implementeren van berging in groene zones voor amper 1% van de neerslagafstromingsoppervlakte van de stad tot een sterke reductie leidt van het overstromingsvolume langsheen de riolering met 30% tot 50%. De impact van deze groene zones op de afwaartse waterloop is echter verwaarloosbaar. Buffers afwaarts langs de riolering zorgen anderzijds voor een sterke reductie van de piekafvoeren naar de waterloop, maar door de tijdsverschuiving tussen de piekafvoeren van de riolering en deze in de waterloop, zorgt dit slechts voor een zeer beperkte ontlasting van de waterloop. Naast de nood aan een betere afstemming tussen stedelijk waterbeheer en stedelijke ruimtelijke planning, is er ook nog steeds hoge nood aan een betere afstemming tussen waterloop- en rioleringsbeheer.

Voor het aanpakken van de gecombineerde waterloop-rioleringsproblemen (zie de voorbeelden in deze studie langs het Klein Schijn en de Benedenvliet-Struisbeek) wordt volgens gelijklopende principes van integratie van groen en blauw water aanbevolen om groenblauwe netwerken op macroniveau uit te bouwen (Figuur 10-14, Figuur 10-15). Dergelijke netwerken laten immers toe om zowel hemelwater aan de bronnen te bufferen als ruimte te geven aan de rivier voor het bufferen van overtollig rivierwater. Ze bieden dus een geïntegreerde oplossing voor zowel de hemelwater- als de rivieroverstromingsproblematiek en bieden tegelijkertijd meervoudige functies inzake recreatie, ecologische verbindingen, buffering tegen stedelijke hitte-eilandproblematiek (hittestress), oppervlaktewater-zuivering en aanpak droogteproblematiek (hemelwaterinfiltratie). De Schijn-Scheldeverbinding (Groot Schijn) is een voorbeeld voor de Antwerpse regio waar zulk netwerk met meervoudige duurzame oplossingen in praktijk kan gebracht worden.



Mill River Park and Greenway by OLIN, Location: Stamford, Connecticut, USA
Will Belcher, RLA, Landscape Architect / OLIN

Figuur 10-14: Voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een rivervallei in een hoog urbaan gebied



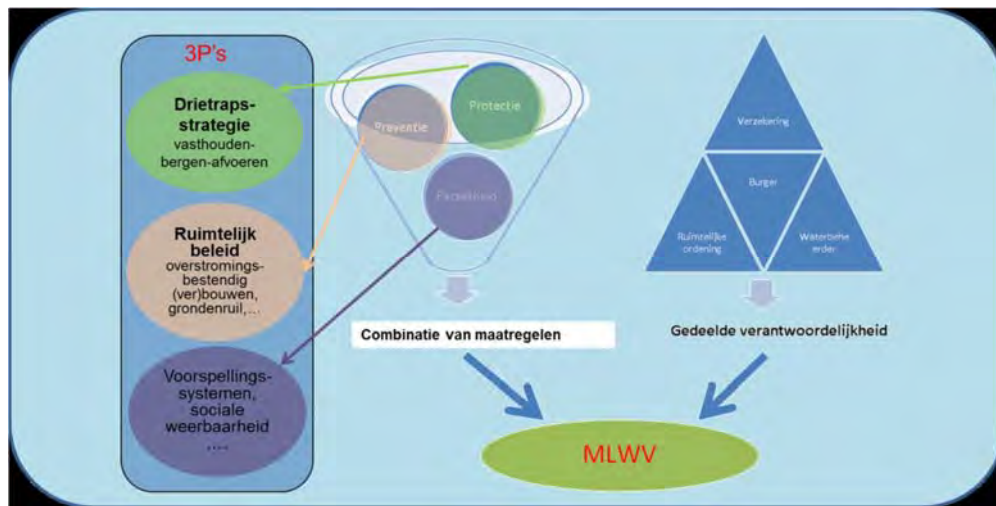
Red Ribbon Tanghe River Park, Qinhuangdao, China



Figuur 10-15: Andere voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een riviervallei in een hoog urbaan gebied

10.4 Inzetten op een meerlaagse veiligheid

Zoals de ladder in Figuur 10-2 reeds aangaf wordt er best gewerkt met beheerstrategieën die maximaal inzetten op meest duurzame oplossingen die de problemen aan de bron aanpakken, maar waarbij er tegelijkertijd ook nood blijft aan andere oplossingen zoals buffer- en wachtbekkens en maatregelen om de afvoercapaciteit van het watersysteem te vergroten. Hierbij dient er meer ingezet te worden op geavanceerde technologische oplossingen zoals bijvoorbeeld de intelligente sturing van onze bergings- en afvoersystemen. Zowel bij Aquafin als bij VMM lopen er pilootprojecten naar zulke intelligente sturing van rioleringsstelsels (Aquafin) en wachtbekkens langs rivieren (VMM).



Figuur 10-16: Algemene principes meerlaagse waterveiligheid (MLWV) (bron: CIW)

Ook maatregelen die de gevolgen van extreme regenval beperken zijn essentieel. In dit kader wordt verwezen naar het principe van de meerlaagse waterveiligheid en de 3 P's: Protectie, Preventie en Paraatheid (Figuur 10-16), zoals vermeld in het Adaptatieplan Vlaanderen, maar ook in de visie van de Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid (CIW) en in de overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP's) van VMM. Terwijl de hoger vermelde maatregelen beogen om de overstromingskansen te verminderen (Protectie), kunnen via Preventie de potentiële gevolgen van overblijvende overstromingen verminderd worden. Dit kan bijvoorbeeld via het resiliënt (ver)bouwen van woningen en industrie, via bouwstop met planologische grondenruil, enz. Tot slot kan men de gevolgen ook beperken door het verhogen van de Paraatheid. Dat laatste kan via bewustwordingscampagnes die niet enkel het maatschappelijk draagvlak voor maatregelen zoals bronmaatregelen verhoogt maar ook de zelfredzaamheid van mensen vergroot.

Binnen de context van het verhogen van de Paraatheid, moeten wij ook blijven inzetten op het verder verbeteren van onze voorspellings- en waarschuwingssystemen: voor zowel extreme meteorologische omstandigheden als neerslag, hagel, windstormen, ..., maar ook voor overstromingen (en zelfs watertekorten). Voor rivieroverstromingen bestaat er reeds een voorspellings- en waarschuwingssysteem bij de Vlaamse Overheid: VMM & Waterbouwkundig Laboratorium (www.waterinfo.be). Het voorspellen van extreme zomeronweders en pluviale overstromingen blijft daarbij een grote moeilijkheid.

Zomeronweders zijn immers zeer lokaal en van korte duur, wat hun voorspelbaarheid sterk bemoeilijkt. Er zijn eerste Europese en Belgische onderzoeksprojecten lopende rond het voorspellen van pluviale overstromingen, o.a. door gebruik te maken van lokale X-band radartechnologie (zie www.raingain.eu en <http://www.kuleuven.be/hydr/plurisk>). Ze beogen het huidige waarschuwingssysteem Be-Alert van de Crisiscentrum van de Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken te verfijnen met een betere/preciezere voorspelling van de locatie en intensiteit van extreme regenval en de bijhorende potentiële gevolgen.

10.5 Verder monitoren van de het neerslagklimaat

De klimaatscenario's, zoals afgeleid in deze studie, en de potentiële gevolgen omspannen een bereik waarvan verwacht wordt dat ze de toekomstige werkelijkheid met hoge waarschijnlijkheid omvatten. Maar men kan echter nooit zeker zijn van deze werkelijkheid. De klimaatscenario's zijn gebaseerd op een aantal broeikasgasscenario's gesimuleerd in een reeks klimaatmodellen, maar zowel de toekomstschattingen inzake broeikasgassen als de fysische klimaatkennis en dus ook de klimaatmodellen zijn onderhevig aan onzekerheden. Verder kunnen er – met een bepaalde, maar ongekende kans – klimaattransities optreden met een verregaande impact in Vlaanderen (zie ook het MIRA Klimaatrapport 2015). Met deze verregaande transities is bij de opmaak van de klimaatscenario's geen rekening gehouden. Het is onmogelijk en ook niet nodig om in het beleid reeds expliciet met deze bijkomende onzekerheden rekening te houden. Wel is het belangrijk om ons bewust te zijn van het bestaan ervan, dus dat de toekomst met een bepaalde, maar nog onbekende (hopelijk kleine) kans nog extremer kan zijn dan wat de huidige klimaatscenario's aangeven. Daarom dient men in de toekomst de klimaatevoluties continu op te volgen en bij significant veranderende trends de klimaatprojecties bij te stellen.

Niet enkel de toekomstige klimaatprojecties dienen regelmatig bijgesteld; het is ook belangrijk om het huidige en historische klimaat voldoende te meten. De ruimtelijke neerslagkaarten die in deze studie werden afgeleid voor de regio Antwerpen zijn bijvoorbeeld gebaseerd op beschikbare pluviograaf- en radargegevens. Het dichte netwerk van 12 pluviografen zoals dat in 1994 werd geïnstalleerd in de stad was daarbij van grote waarde. Maar door het operationeel stopzetten van een aantal pluviografen tussen 2000 en 2005 zijn deze meetreeksen – afhankelijk van de pluviograaf – maar 6-11 jaar lang. Voldoende lange meetreeksen zijn nodig om met goede nauwkeurigheid de temporele variabiliteit van neerslag en vooral de voorkomingskansen van extreme neerslag te kunnen inschatten. Ook een voldoende hoge ruimtelijke dichtheid is belangrijk. Het netwerk van 12 pluviografen boven een stedelijke omgeving vormde op dat vlak een unieke dataset om de invloed van het microklimaat in een sterk urbane stad als Antwerpen op de lokale extreme regenval in te schatten. Meten is immers weten! Daarom wordt aanbevolen om het dichte netwerk van pluviografen in de stad te heractiveren, eventueel na optimalisatie van locaties of meettoestellen. Ook het systematisch bijhouden van een overstromingsdatabank, met de historische overstromingsgebeurtenissen, hun locaties, eventuele aanduiding van de overstromingsdiepte, -uitgestrektheid en –duur, eventuele schade, is van essentieel belang voor verdere analyses ter validatie van de lokale neerslagproducten en resultaten van de overstromingsmodellering (zie de impactmodelleringen door de eindgebruikers, zoals Rio-link).

11 Bijlagen

Bijlage A. Pluviografennetwerk Stad Antwerpen

Het pluviografennetwerk van de Stad Antwerpen is in deze studie als een belangrijke gegevensbron gebruikt. Vooral de hoge ruimtelijke resolutie van de puntheerslaggegevens van dit netwerk zijn uniek. In deze bijlage worden voor de 12 pluviografen van dit netwerk enkele bijkomende details gegeven:

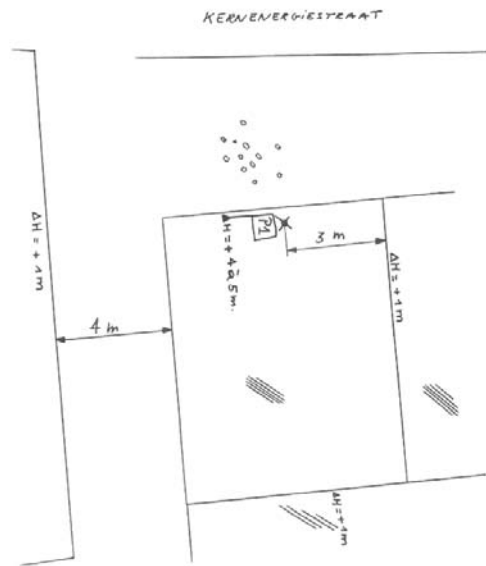
- het adres;
- de Lambertcoördinaten;
- schets van het lokaal liggingsplan, met aanduiding van de lokale hindernissen voor de windstroming;
- een foto;
- het kalibratieverband, zoals bepaald door KU Leuven - Afdeling Hydraulica.

Pluviograaf P1

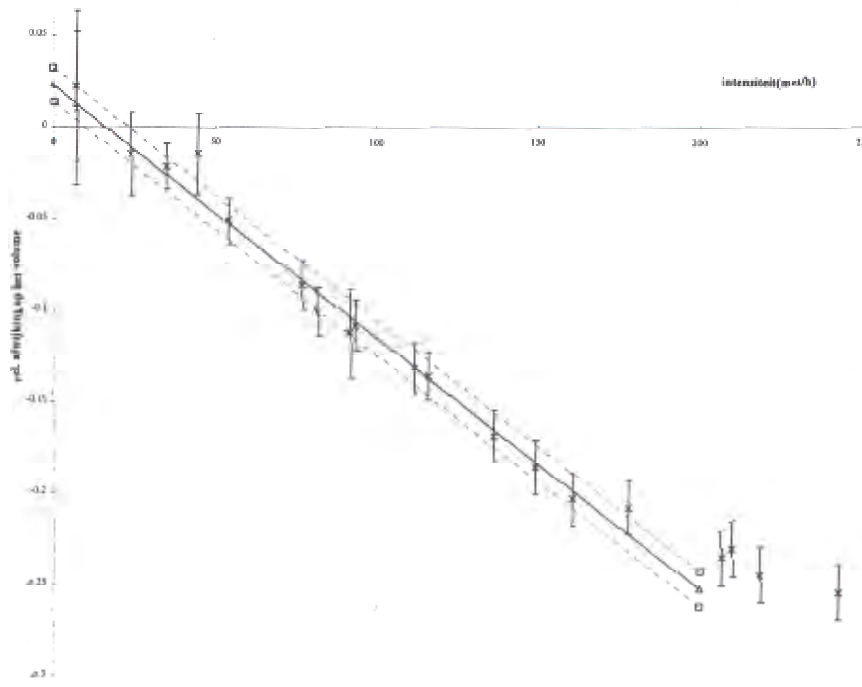
aan gebouw: Groenvoorzieningen Stad Antwerpen, Kernenergiestraat, WILRIJK

Lambertcoördinaten: X = 151.335

Y = 205.541



Kalibratiekromme:

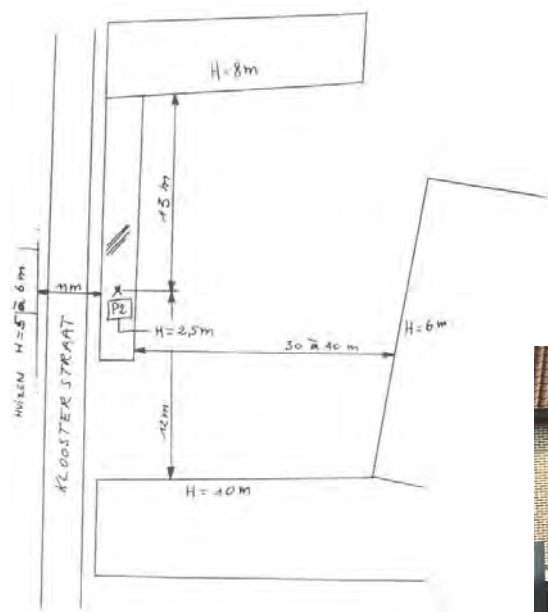


Pluviograaf P2

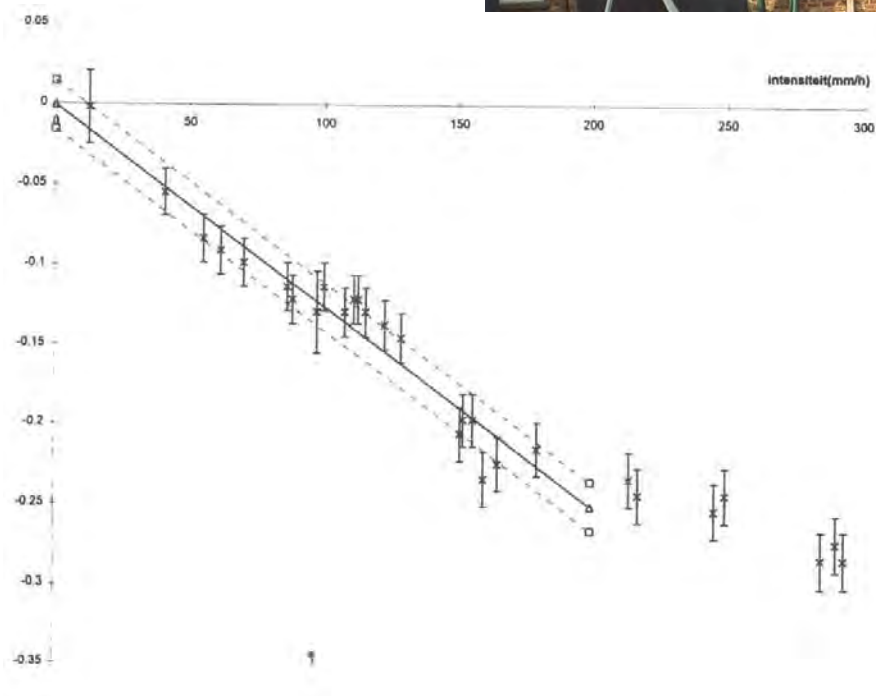
aan gebouw: Wegen Stad Antwerpen, Kloosterstraat 117, HOBOKEN

Lambertcoördinaten: X = 149.206

Y = 207.188



Kalibratiekromme:

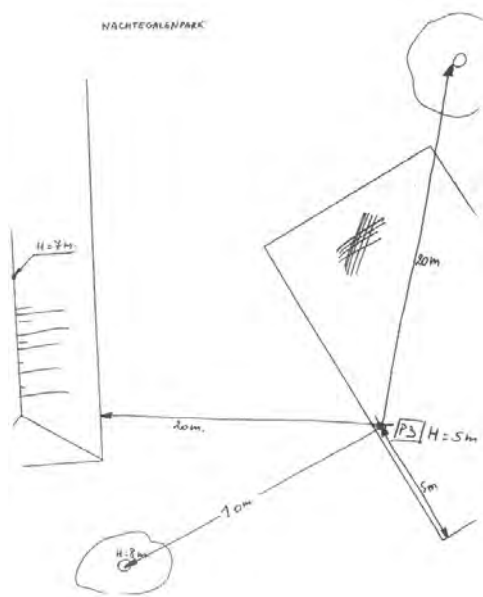


Pluviograaf P3

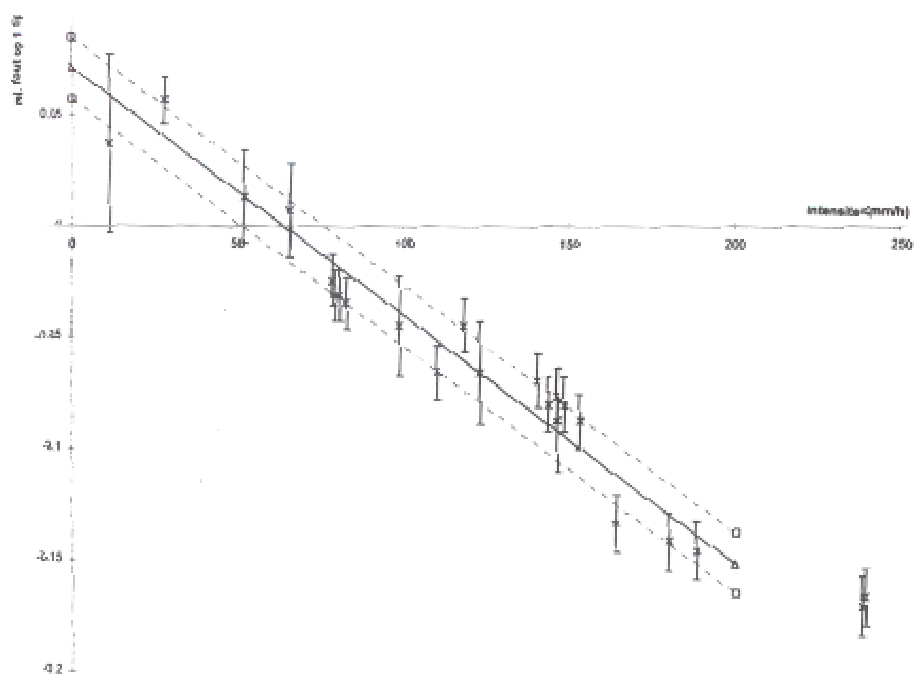
aan gebouw:

Groenvoorzieningen Stad Antwerpen, NACHTEGALENPARK, Le Grellelaan 5

Lambertcoördinaten: X = 152.746
Y = 208.592



Kalibratiekromme:

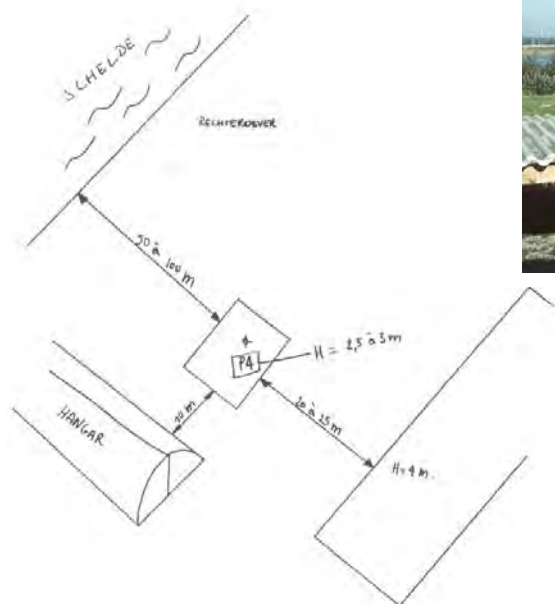


Pluviograaf P4

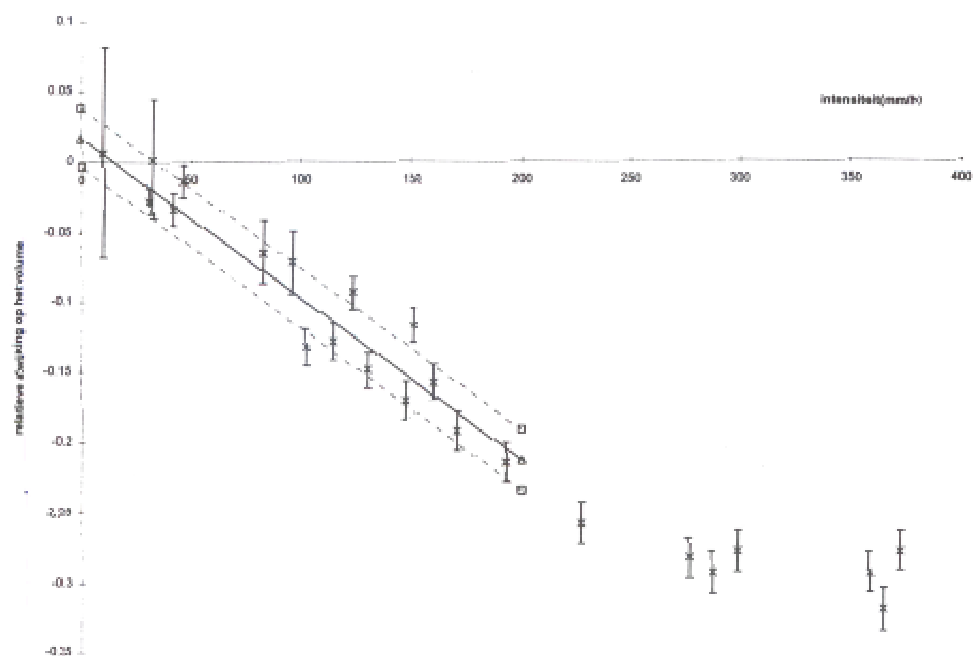
aan gebouw: Wegen Stad Antwerpen, d'Herbouvillekaai, Hangar 8, KAAIEN ZUID

Lambertcoördinaten: X = 149.962

Y = 210.244



Kalibratiekromme:

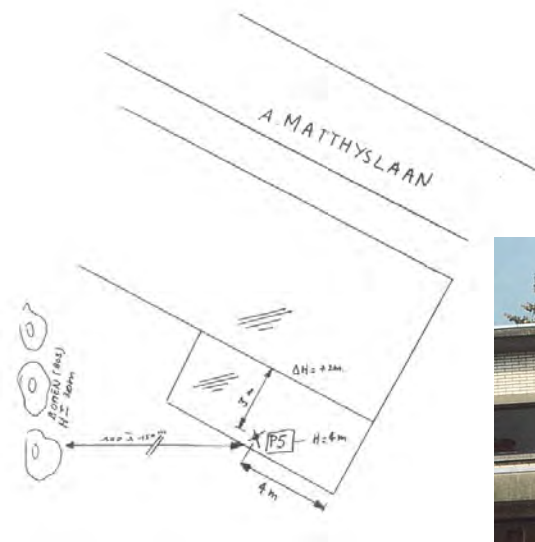


Pluviograaf P5

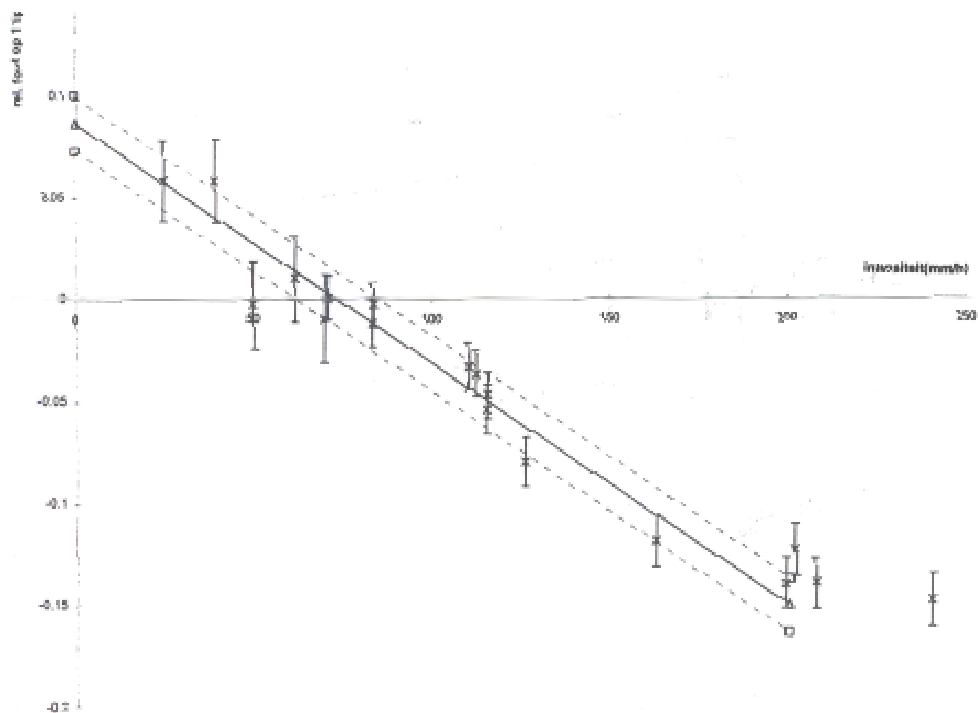
aan gebouw: Groenvoorzieningen Stad Antwerpen, A. Matthyslaan DEURNE

Lambertcoördinaten: X = 155.880

Y = 210.319



Kalibratiekromme:

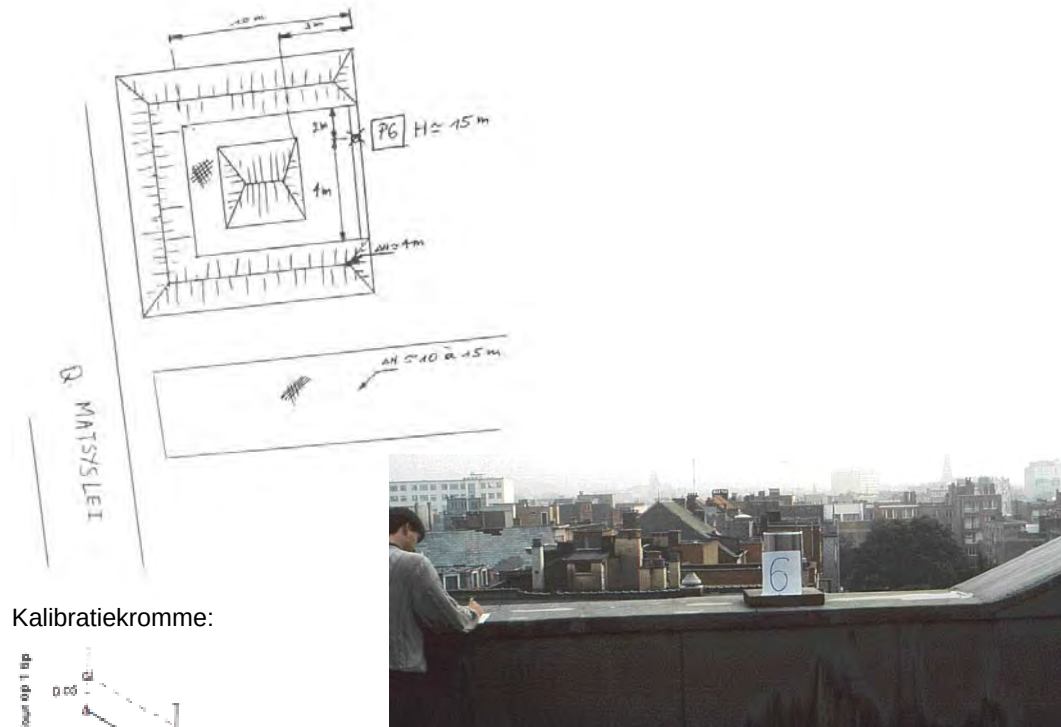


Pluviograaf P6

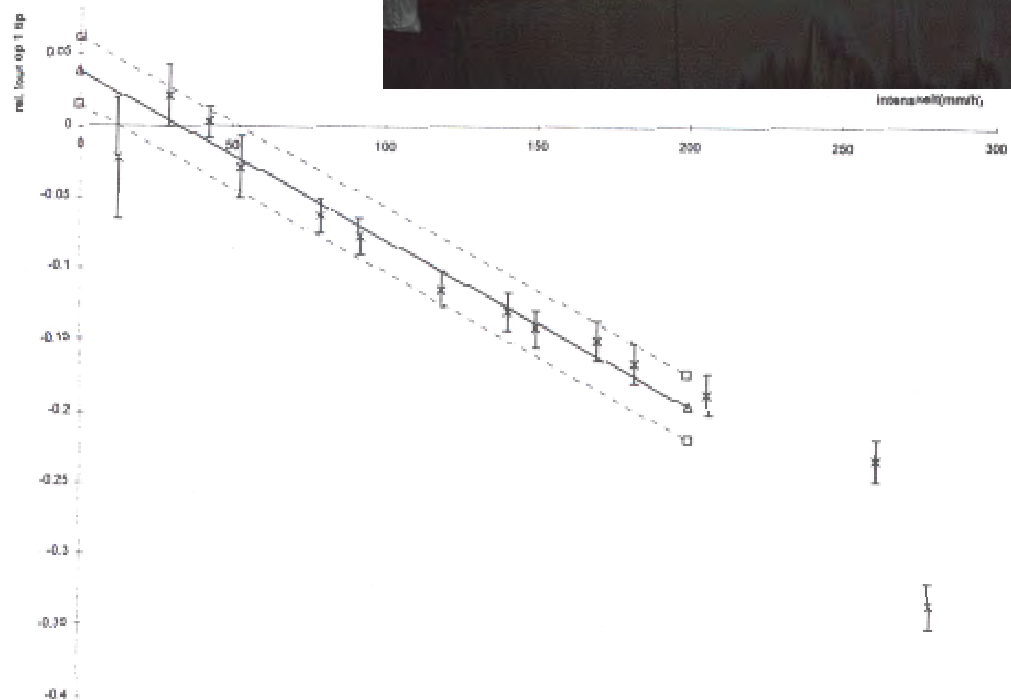
aan gebouw: Politie Stad Antwerpen, STADSPARK, Q. Matsyslei

Lambertcoördinaten: X = 153.428

Y = 211.292



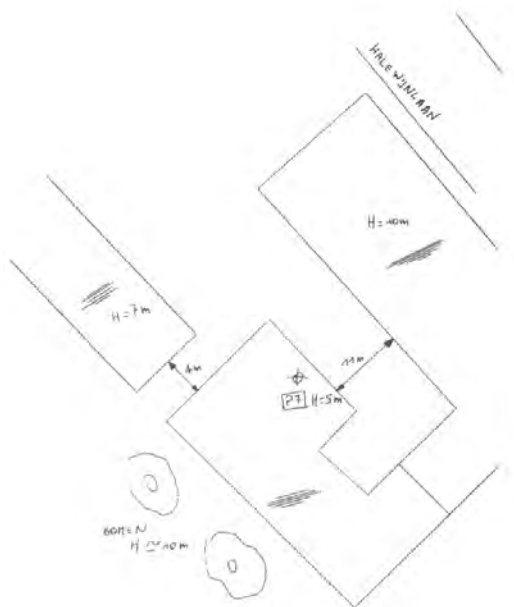
Kalibratiekromme:



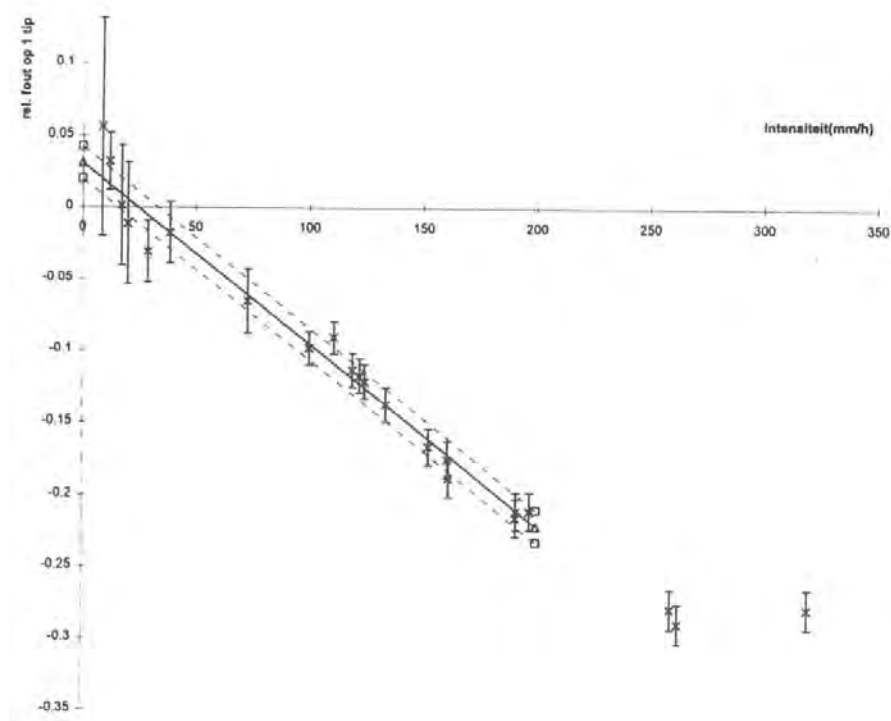
Pluviograaf P7

aan gebouw: Brandweer Stad Antwerpen, LINKEROEVER, Halewijnlaan 88

Lambertcoördinaten: X = 151.180
Y = 212.825



Kalibratiekromme:

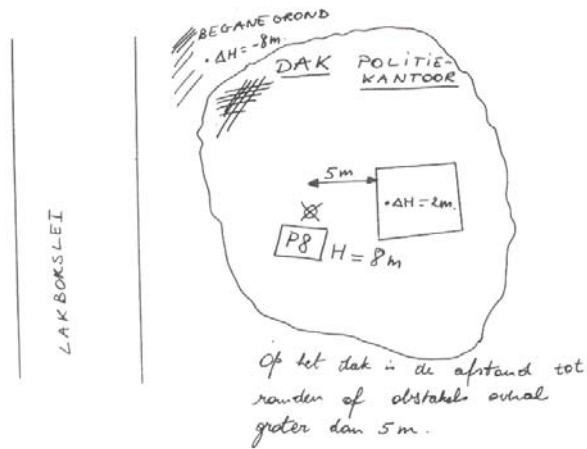


Pluviograaf P8

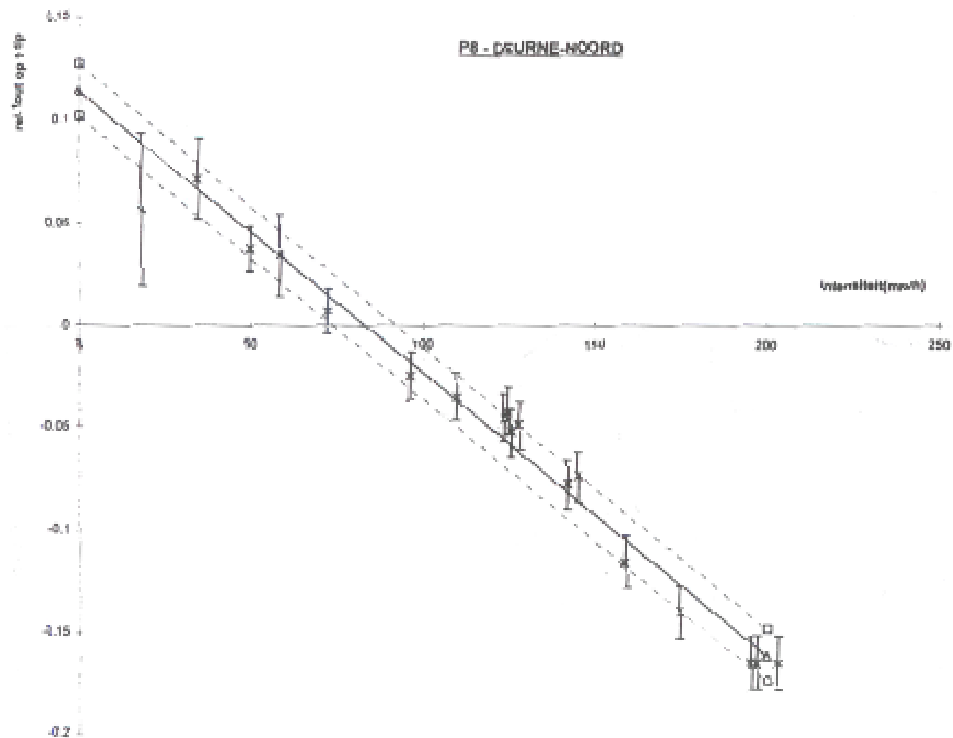
aan gebouw: Wegen Stad Antwerpen, 3 Torekens, Lakborslei 202, DEURNE-NOORD

Lambertcoördinaten: X = 156.073

Y = 213.135



Kalibratiekromme:

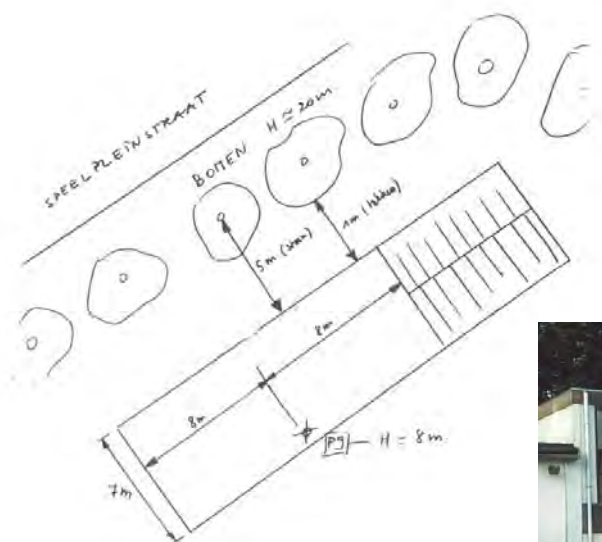


Pluviograaf P9

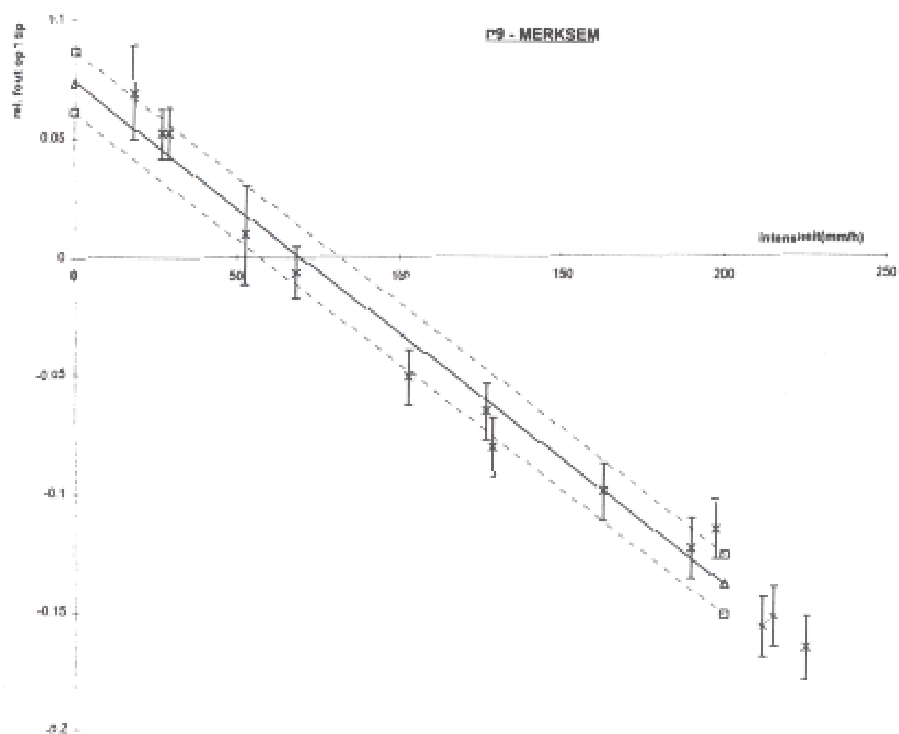
aan gebouw: Groenvoorzieningen Stad Antwerpen, Speelpleinstraat, MERKSEM

Lambertcoördinaten: X = 155.503

Y = 215.582



Kalibratiekromme:

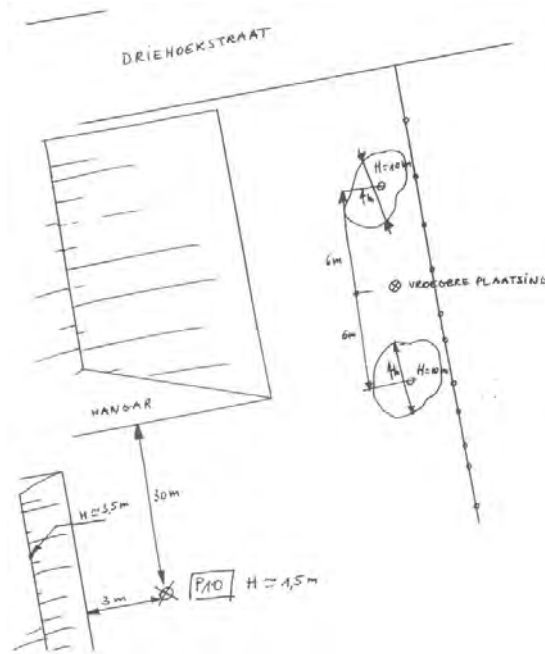


Pluviograaf P10

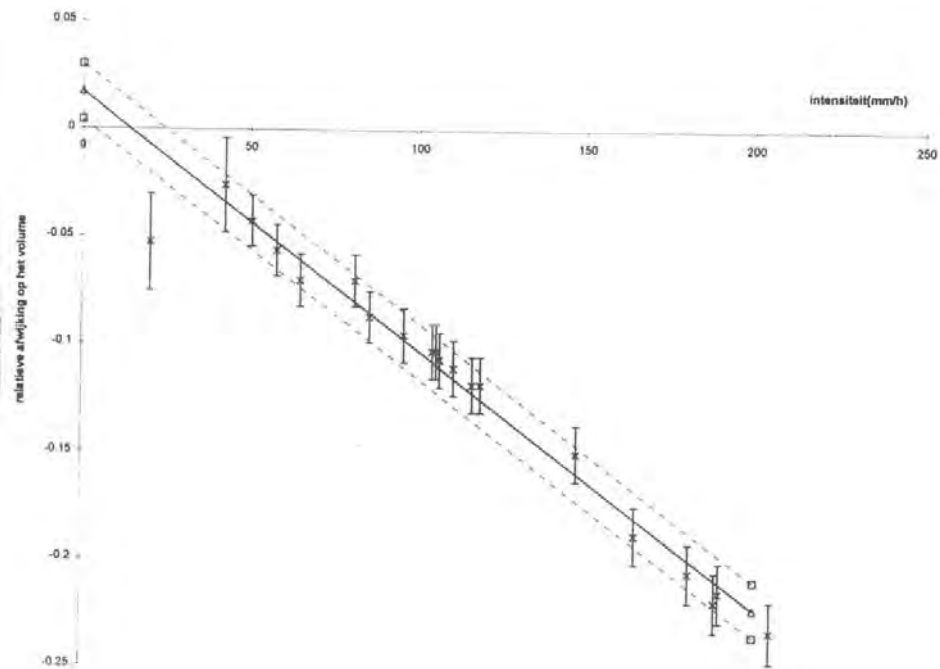
aan gebouw: Wegen Stad Antwerpen, Driehoekstraat, EKEREN

Lambertcoördinaten: X = 154.064

Y = 219.701



Kalibratiekromme:

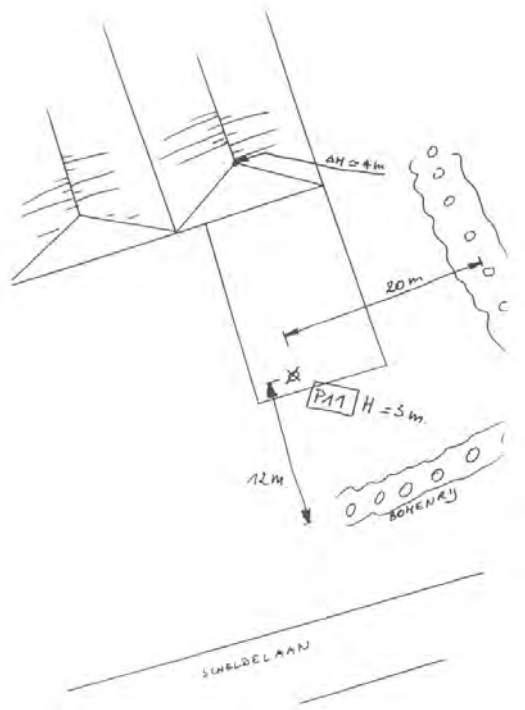


Pluviograaf P11

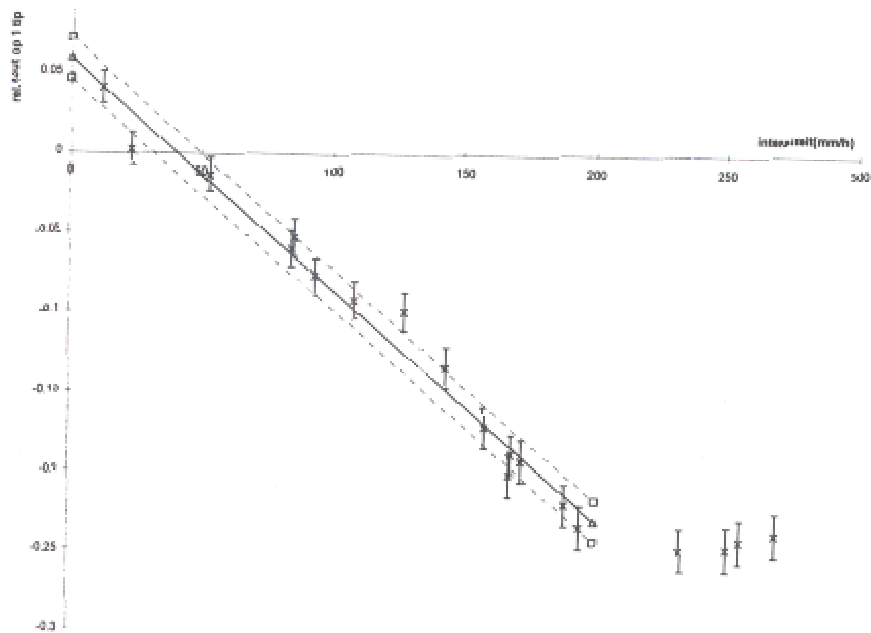
aan gebouw: Haven, VAN CAUWELAERTSLUIS

Lambertcoördinaten: X = 147.359

Y = 218.610



Kalibratiekromme:

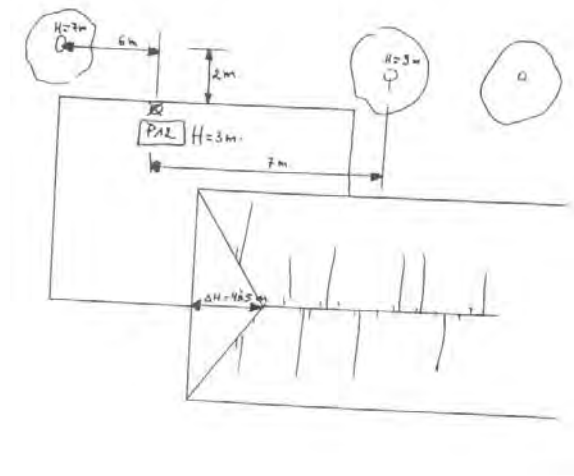


Pluviograaf P12

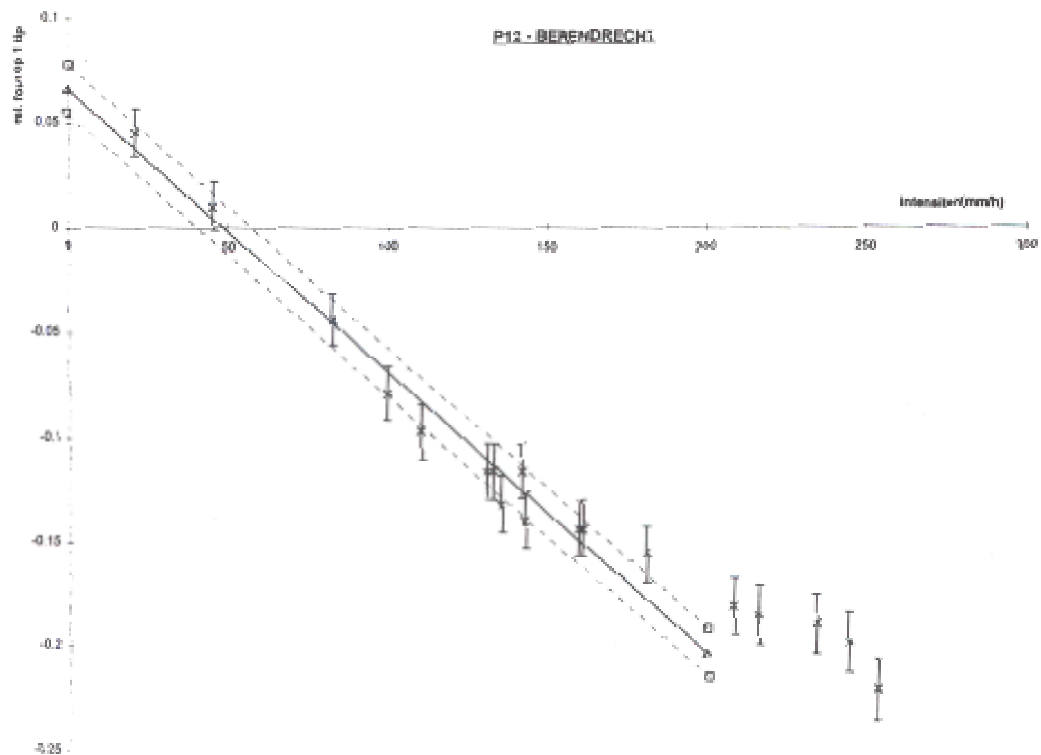
aan gebouw: Wegen Stad Antwerpen, Booswegske, BERENDRECHT

Lambertcoördinaten: X = 147.138

Y = 225.689



Kalibratiekromme:



Bijlage B. Illustraties van enkele recente pluviale overstromingen in de Stad Antwerpen

13-14 september 1998

Locaties: Antwerpen, Merksem,
Hoboken, Ekeren

Neerslag: tot 150 mm/dag

Ongeveer 350 huizen overstroomd

Gemiddelde schade van ongeveer
13.000 Euro

Evacuatie van verschillende wijken





3 november 1998

Locaties: Antwerpen, Merksem

Neerslag: tot 60 mm/uur

Tientallen huizen overstroomd in Merksem

23 juli 2001

Locaties: Merksem, Hoboken, Ekeren

*Verschillende straten en kelders overstroomd
Honderden brandweerinterventies*

24 augustus 2002

Locaties: Deurne, Ekeren, Merksem, Brasschaat

Tientallen straten en huizen overstroomd

Extra pompen geplaatst om bijkomende schade te vermijden

20 juli 2012

Locaties: Ekeren, Merksem and Schoten

Verschillende straten en kelders onder water

Meer dan 50 brandweerooproepen

26 augustus 2012	
Locaties: Wilrijk, Mortsel, Hoboken	
Verskillende straten en kelders overstroomd	
160 brandweerooproepen	
21 juni 2013	
Locatie: Antwerpen	
Ring en andere straten overstroomd, met grote verkeerschaos tot gevolg	
27 juli 2013	
Locatie: Antwerpen	
Neerslag: 30-50 mm/uur	
Meer dan 250 brandweerinterventies	

7 november 2013

Locatie: Bredastraat

Oorzaak; neerslag & verstoppingen

*Ondergrondse parkings en
verschillende kelders en huizen
overstroomd*

50 brandweerooproepen

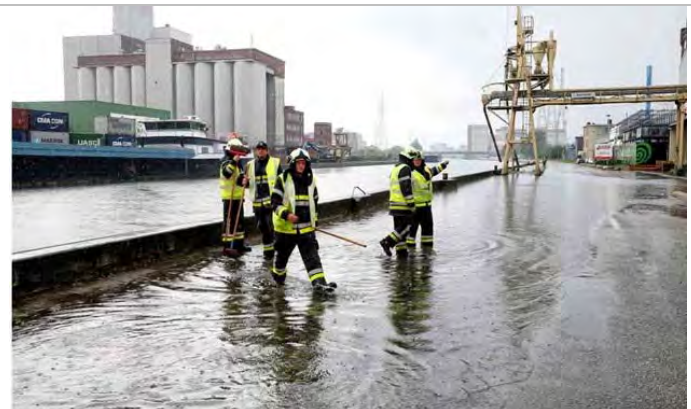


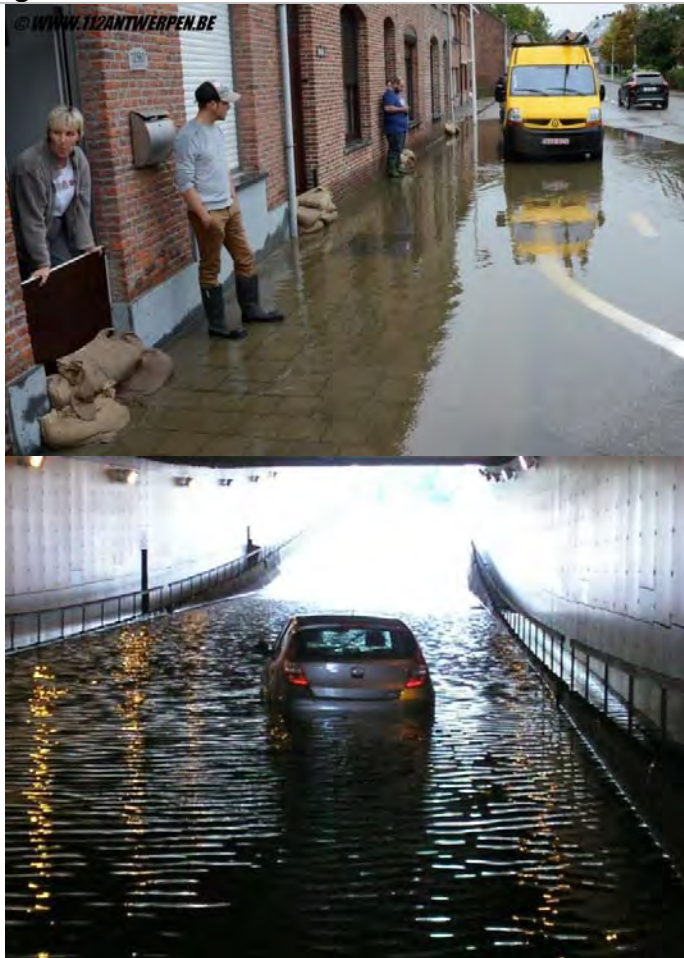
30 juni 2014

*Locaties: Antwerpen, Merksem,
Schoten*

Overstroomde straten en kelders

Ongeveer 50 brandweerooproepen



10 juli 2014	
Locaties: Mortsel, Edegem	
Verschillende straten en kelders onder water	
8 augustus 2014	
Locatie: Antwerpen	
Kennedy tunnel flooded causing traffic jams	
16 augustus 2014	
Locatie: Antwerpen	
Neerslag: 65 mm/dag	
Verschillende straten en kelders overstroomd	
Belangrijke snelwegoverstroming met grote verkeerschaos	

Bijlage C. Aangeleverde neerslagproducten

De volgende neerslagproducten werden aangeleverd in deze studie.

- GIS-kaarten met de ruimtelijke spreiding in neerslagextremen onder huidige en toekomstige (2030, 2050, 2100) klimatologische condities, voor tijdsduren van 15 minuten, 1 uur en 1 dag.
- Excel-tabellen en figuren met de gewijzigde neerslag-, temperatuur- en ETP-statistieken gepresenteerd in Deel 6.
- Neerslagproducten voor de eindgebruikers:
 - o Voor Riolink: Composietbuien met 5-minutelijkse ontwerpneerslag voor 30 deelbekkens, de coördinaten van de centerpunten van deze deelbekkens, voor 3 terugkeerperiodes (2, 5 en 20 jaar), voor de huidige toestand, hoog en midden klimaatscenario's voor 30, 50 en 100 jaar. De bestanden zijn in .csv-formaat, compatibel met de InfoWorks-CS software (rioleringsmodel van Riolink).
 - o Voor Provincie Antwerpen: Uurlijkse neerslagreeksen voor 41 deelbekkens en de 3 klimaatscenario's; uurlijkse/dagelijkse ETP-tijdreeksen voor 41 deelbekkens, voor de huidige toestand, hoog-winter, hoog-zomer, midden en laag klimaatscenario's voor 30, 50 en 100 jaar. De bestanden zijn .txt bestanden.
 - o Voor Waterbouwkundig Laboratorium: Uurlijkse neerslag- en dagelijkse ETP-tijdreeksen voor 3 deelbekkens, periode 1967-2013, voor de huidige toestand, hoog, midden en laag klimaatscenario's voor 30, 50 en 100 jaar. Composietbuien met 5-minutelijkse ontwerpneerslag, voor terugkeerperiodes van 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 en 100 jaar, voor de huidige toestand, hoog en midden klimaatscenario's voor 30, 50 en 100 jaar. De bestanden zijn Excel-bestanden.
 - o Voor Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer: gelijkaardig worden neerslag- en ETP-tijdreeksen aangeleverd voor de verschillende deelstroomgebieden en het rioleringsgebied in het studiegebied van de Benedenvliet en de Struisbeek, en voor het stroomgebied van het Schijn.

Bijlage D. Powerpoint-presentaties

In bijlage bij dit rapport volgen twee Powerpoint-presentaties:

- Een meer technische presentatie, die de resultaten bij deze studie samenvat.
- Een meer algemene presentatie voor beleidsmakers.

KU LEUVEN



Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in Antwerpen

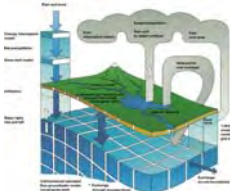
Studie KU Leuven voor Stad Antwerpen

A



KU Leuven – Afdeling hydraulica

Hydrologische en hydraulische modellering & studie van **hydrologische extremen** langs:

- Rivieren:
 

- Rioleringen:
 


Doel van deze studie

Modellering van toekomstige neerslagpatronen in de Antwerpse regio voor berekening van toekomstige wateroverlast t.a.v. neerslag en lokale rivieroverstromingen

KU LEUVEN

Hydrologische extremen

Overstromingen:

- Pluviale overstromingen (extreme neerslag, zomerwederen): rioleringen en beken
- Fluviale overstromingen (grondverzadiging: langdurige winterneerslag): rivieren
- Zeespiegel en stormopzet: overstromingsrisico's Schelde

Droogte, Watertekorten






KU LEUVEN

Focus van deze studie

Extreme neerslag bepalend voor pluviale & fluviale overstromingen: rioleringen en waterlopen

Voor Antwerpse regio:

2 stappen:

- Huidig klimaat
- Toekomstig klimaat (2030, 2050, 2100)



KU LEUVEN

Gebied

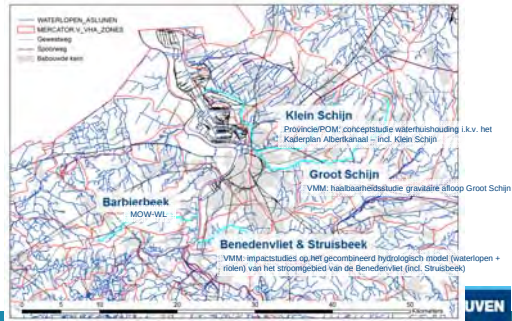
Inclusief: Rioleringsstelsel Stad Antwerpen



KU LEUVEN

Gebied

Inclusief: Stroomgebieden impactstudies waterlopen door Provincie / POM / VMM / MOW-WL:



Gebied

Interactie riolering & waterlopen Struisbeek & Benedenvliet:



Huidig klimaat

KU LEUVEN

12 pluviografen stad Antwerpen:

- 1 min resolutie
- 0.1 mm
- 1994 – 2005 met ontbrekende perioden



KU LEUVEN

Alle pluviografen regio Antwerpen:



- 1-12: Stad Antwerpen
- Kapellen, Melsele, Wilrijk, Stekene: VMM
- Temse, Bornem: WL/HIC
- Deurne (sinds 1965): KMI

KU LEUVEN

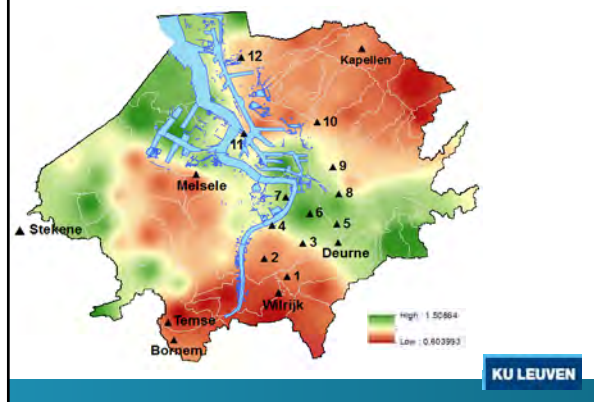
Radardata KMI - VMM:

- Periode 2008 – 2014, 15-min

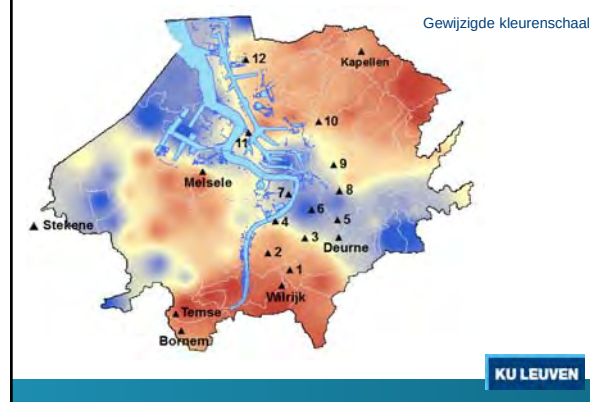


KU LEUVEN

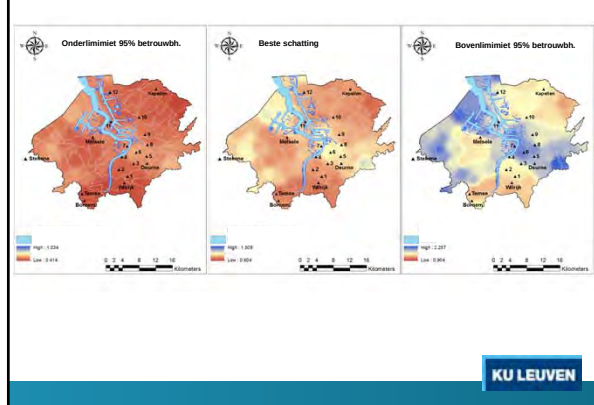
Huidige neerslagvariaties: neerslagextremen (>1jr), 15-min:



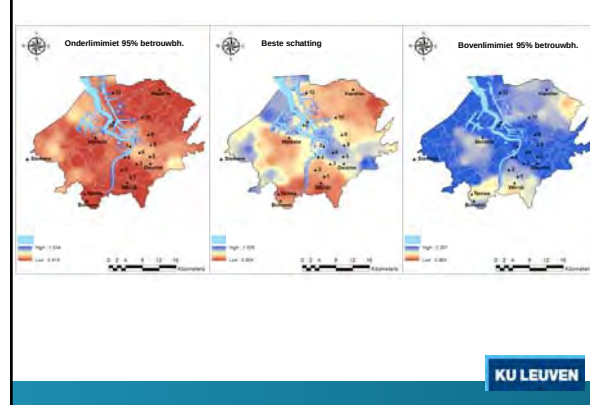
Huidige neerslagvariaties: neerslagextremen (>1jr), 15-min:



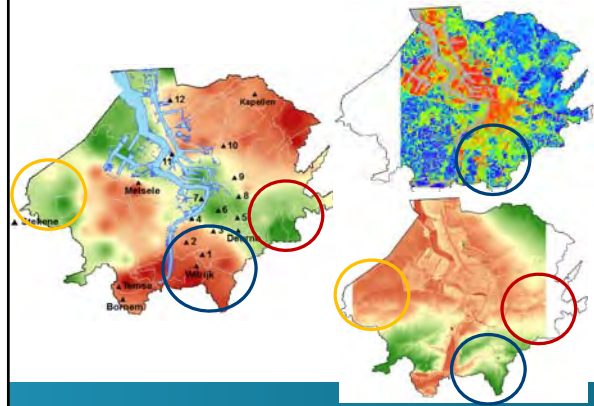
Onzekerheden op neerslagextremen (>1jr), 15-min:



Onzekerheden op neerslagextremen (>1jr), 15-min:



Invloed topografie & aerosolen - stofdeeltjes:

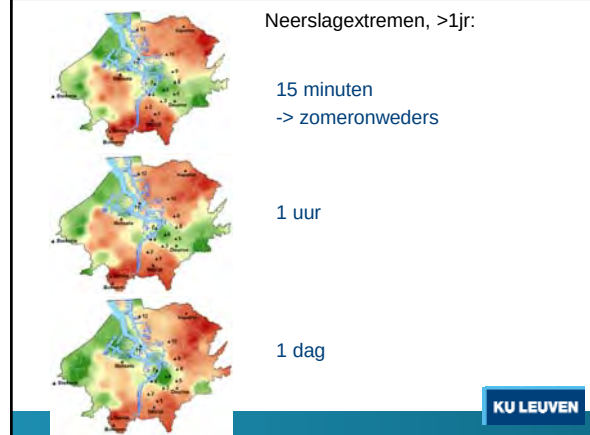


Neerslagextremen, >1jr:

15 minuten
-> zomeronweders

1 uur

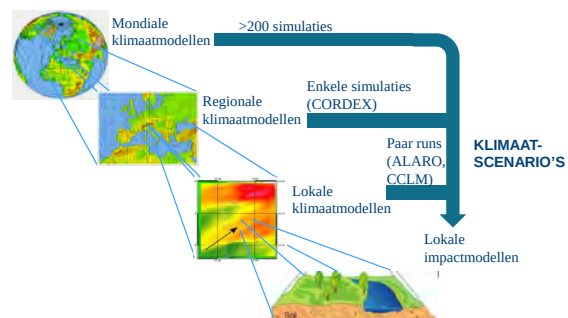
1 dag



Toekomstig klimaat

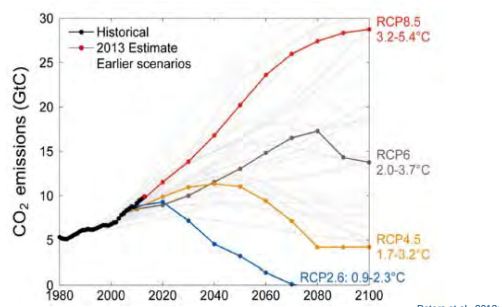
KU LEUVEN

Klimaatmodellen



KU LEUVEN

Broeikasgasscenario's



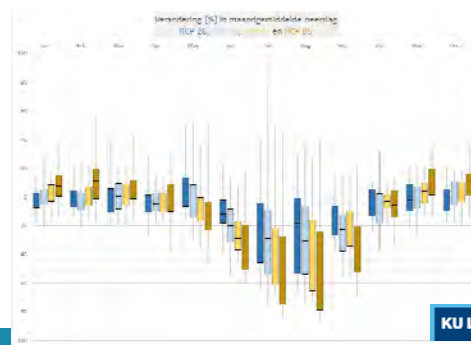
Peters et al., 2013:

RCP8.5	Rising radiative forcing pathway leading to 8.5 W/m ² in 2100
RCP6	Stabilization without overshoot pathway to 6 W/m ² at stabilization after 2100
RCP4.5	Stabilization without overshoot pathway to 4.5 W/m ² at stabilization after 2100
RCP2.6 (RCP2.6)	Peak in radiative forcing at 2.6 W/m ² before 2100 and decline

KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

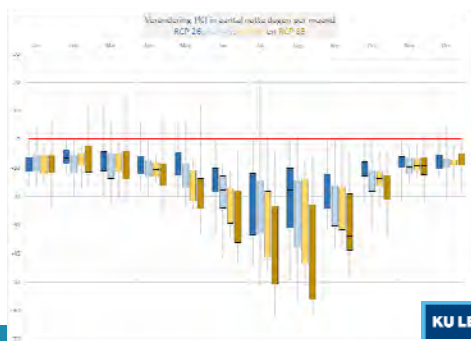
Maandgemiddelde neerslag



KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

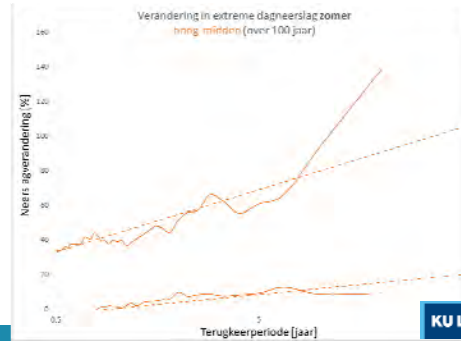
Buifrequentie per maand



KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

Extreme neerslagintensiteiten zomer



KU LEUVEN

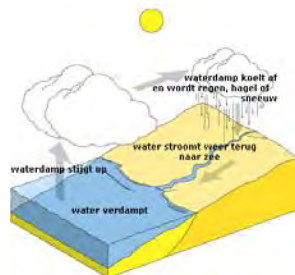
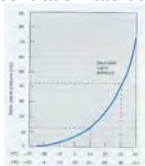
Klimaatveranderingssignaal

Meer tijdsvariatie

Toename broeikasgassen in de atmosfeer

↓
Temperatuurstijging

↓
Toename verzadigings-
concentratie waterdamp



KU LEUVEN



Neerslagextremen, 5 jr, 15-min:

Huidig klimaat

↓
Toekomstig klimaat,
hoog klimaatscenario
2030

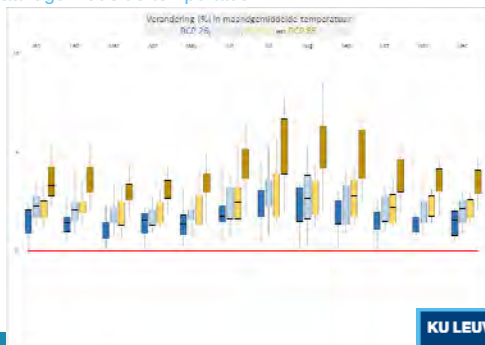
2050

2100

KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

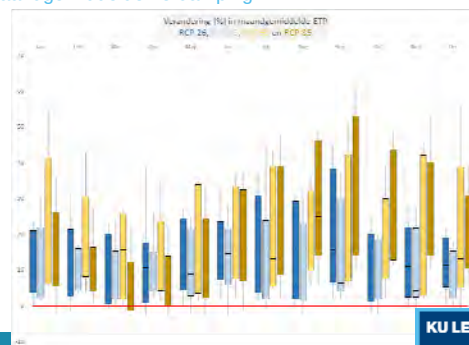
Maandgemiddelde temperatuur



KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

Maandgemiddelde verdamping



KU LEUVEN

Klimaatveranderingssignaal

Aantal hittegolven



KU LEUVEN

Impactanalyse
op overstromingen

KU LEUVEN

Neerslagproducten voor eindgebruikers

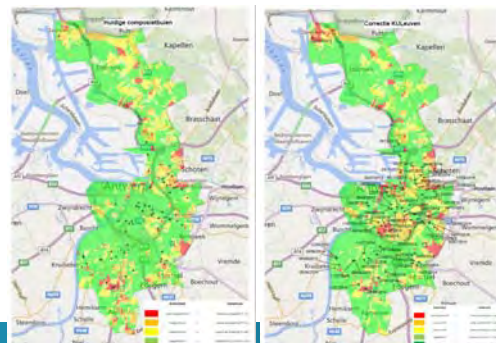
- aan Riolink (riolering Stad Antwerpen): specifieke ontwerpbuilen Antwerpse regio <-> builen o.b.v. Vlaamse Code van Goede praktijk (Ukkel)
- Aan Provincie Antwerpen/POM/VMM: aangepaste tijdreeksen (neerslag, verdamping) voor stroomgebieden van Groot Schijn, Klein Schijn en Benedenvliet-Struisbeek
- Aan MOW-Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout: Barbierbeek

KU LEUVEN

Eerste impactresultaten

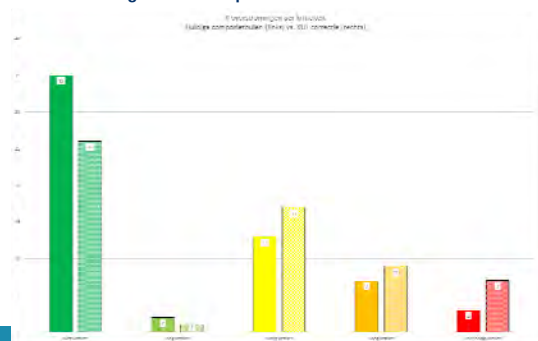


Riolink: Riolering stad Antwerpen: Huidig klimaat

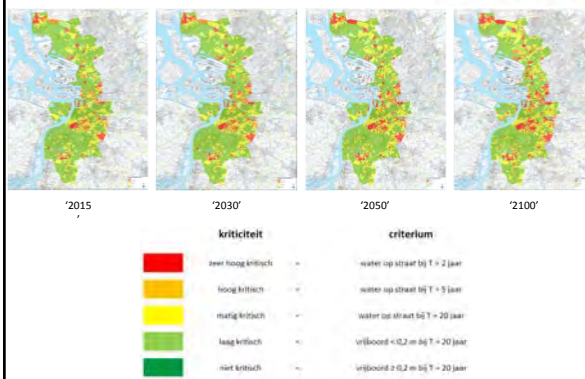


Eerste impactresultaten

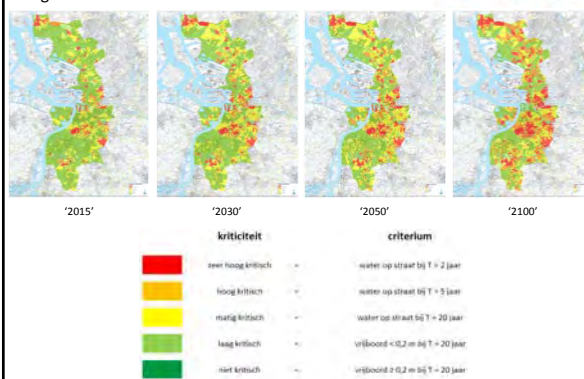
Riolink: Riolering stad Antwerpen



Gemiddeld klimaatscenario



Hoog klimaatscenario



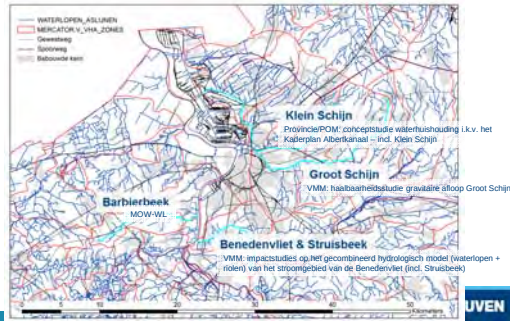
Eerste impactresultaten

Stroomgebied Benedenvliet & Struisbeek: Hoekakker: lopend ...



Andere impactstudies

Impactstudies waterlopen door Provincie / POM / VMM / MOW-WL:



Impact klimaatscenario's Ukkel

Op waterhuishouding:

Periode 1961-1990 tot 2071-2100:

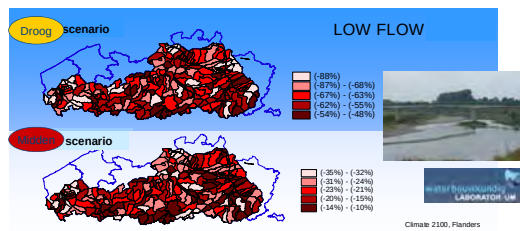
- Winter:
 - ✓ toename neerslag: 0 tot +60%
 - ✓ toename temperatuur en verdamping: +1.5 tot 4°C
- Zomer:
 - ✓ afname neerslagvolumes: 0 tot -70%
 - ✓ aantal natte zomerdagen: 0 tot -50%
 - ✓ toename temperatuur en verdamping: +2 tot 7°C
 - ✓ extreme zomerbuien meer intens:
 - 2-jarige bui: 0 tot +30%
 - 10-jarige bui: 0 tot +50%
- Kust / polders:
 - neerslagverandering 10% hoger
- Zeespiegelstijging Belgische Kust:
 - 20cm tot 2m

Verdroging !!



Impact klimaatscenario's Ukkel

Impact op laagwaterdebieten:

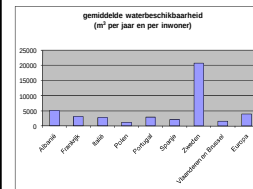


→ Laagwaterdebieten dalen in sterke mate in alle scenario's (laagste zomerdebiet daalt met 20 tot 70%)

→ **Verdroging** / laagwaterproblemen: waterkwaliteit, irrigatienoden, drinkwaterproductie, scheepvaart, vegetatieschaarste, ...

Impact klimaatscenario's

- Vlaanderen is erg kwetsbaar voor drogere zomers
- Gemiddelde waterbeschikbaarheid is in Vlaanderen en Brussel zeer beperkt: 1480 m³/(persoon.jaar)



<-> internationale normen:
 <2000 "zeer weinig"
 <1000 "ernstig watertekort"

Door:

- Hoge bevolkingsdichtheid
- Slechts beperkt gedeelte van beschikbaar oppervlaktewater afkomstig van lokale neerslag; Sterk afhankelijk van de buurregio's (voor instroom Frankrijk/Wallonië, min. doorvoer naar Nederland bij laagwater)

KU LEUVEN

Impact klimaatscenario's

© Het Nieuwsblad / www.nieuwsblad.be.

VLAAMSE MINISTER SCHAULIEGE WIL STRENGERE REGELS VOOR WATERGEBRUIK

Na black-out dreigt nu gebrek aan water

28/01/2015 om 03:00 door Werner Rommels



KU LEUVEN

Beleidsaanbevelingen

KU LEUVEN

Hoe omgaan met grote onzekerheden in beleid?

De grote onzekerheden mogen geen argument zijn om klimaatimpactstudies of klimaatadaptatie uit te stellen

voorbeeld: voor hoog "pessimistisch" klimaatscenario

Risico = Kans * Gevolg
 $\geq$ hoog ? zeer hoog

→ Voorzichtigheidsprincipe:
 Houd rekening met pessimistisch klimaatscenario
 Neem "klimaatverzekering"

KU LEUVEN

Houd rekening met onzekerheden!

Huidige & toekomstige ontwerpen:

Nood aan **flexibele en duurzame oplossingen**

- ✓ die efficiënt zijn voor elk klimaatscenario: "no regret"
 - NIET: grote kostelijke infrastructuurwerken (vb. overdimensionering leidingen, extra pompcapaciteit, extra grote bufferbekkens)
 - WEL: meer bronmaatregelen geïntegreerd met ruimtelijke planning/stadsontwerp/groenbeheer (= ook hittestresbeheer)
 : leiden soms tot ruimtelijke claim, of kunnen geïntegreerd in stadsontwikkelingsprojecten en projecten van openbaar domein (integratie met ruimtelijke planning, waaronder sRSA en Waterplan)
- ✓ houd rekening met mogelijke noodzaak tot toekomstige aanpassingen i.f.v. werkelijke evoluties (flexibiliteit)
 - nu: afronding / ev. extra mits kleine meerkost
 - hypothekeer niet de ev. toekomstig noodzakelijke kosten-efficiënte aanpassingen (vb. bijkomende pompcapaciteit, uitbreiding bufferbekkens)

KU LEUVEN

Duurzaam stedelijk waterbeheer

Naar analogie met afvalbeheer:



In volgorde van afnemend belang:

- Bronmaatregelen: regenwater opwaarts ophouden (gebruiken, infiltreren)
- Bergen (wachtbekkens)
- Vertraagd afvoeren

Voor onvermijdbare overstromingen:

- Waarschuwen, evacueren
- Gevolgen verminderen

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Meer lokale-opwaartse berging en infiltratie

Doorlatende verharding:



Individuele infiltratie:



Regenwater berging en hergebruik:



KU LEUVEN

Groene trambanen: vb. Mercatorstraat Antwerpen



Waterdoorlatende verharding: waterdoorlatende parkeerstroken? Nu nog gecementeerd.

Bouwcode: verplichting tot verharding groene voegen of grasdallen



Duurzaam stedelijk waterbeheer: Meer lokale-opwaartse berging en infiltratie

Betere afstemming tussen ruimtelijke planning / stadsontwerp / groenbeheer & stedelijk waterbeheer:

Meervoudige functies aan open ruimtes in de stad (vb. parken, groenzones):



KU LEUVEN

Wijkontwikkeling Nieuw Zuid, Antwerpen:
Hemelwater volledig bufferen en maximaal infiltreren op de site, enkel overstort bij T20 naar rioolnetwerk



A

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Meer lokale-opwaartse berging en infiltratie

Gevalstudie Stad Turnhout:

22 groenzones als regenwaterberging en infiltratie (totaal 10365 m²):



Opwaartse regenwaterberging en infiltratie in groene zones: 1% afstromingsoppervlakte zorgt voor 30-50% reductie in overstromingsvolume



Duurzaam stedelijk waterbeheer: Meer lokale-opwaartse berging en infiltratie

Gevalstudie Stad Turnhout:

22 groenzones als regenwaterberging en infiltratie (totaal 10365 m²):



KU LEUVEN

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Meer lokale-opwaartse berging en infiltratie

Andere voorbeelden (buitenland):

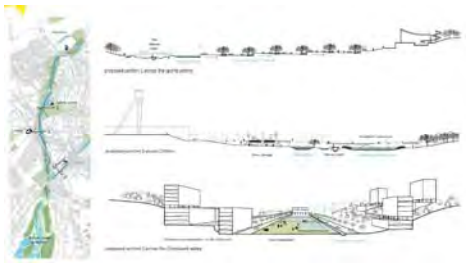


Waterdoorlatende verharding in parkeerstroken:

KU LEUVEN

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Groenblauwe netwerken op macroniveau

Aanpakken gecombineerde waterloop-rioleringsproblemen



KU LEUVEN

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Groenblauwe netwerken op macroniveau

Aanpakken gecombineerde waterloop-rioleringsproblemen



Mill River Park and Greenway by OLIN, Location: Stamford, Connecticut, USA
Will Belcher, RLA, Landscape Architect / OLIN

KU LEUVEN

Maximaal benutten beschikbare berging



Bassin Maurice Audin, Clichy sous Bois [Composante Urbaine, 2000]

KU LEUVEN

Extra berging

Waterpleinen Rotterdam



Duurzaam stedelijk waterbeheer: Verminder overstromingsgevolgen

Houd mensen weg van het water (i.p.v. omgekeerd ...) en ook: Meer doordachte wegeaanleg, lokale drempels, water-robust bouwen



www.nav.be

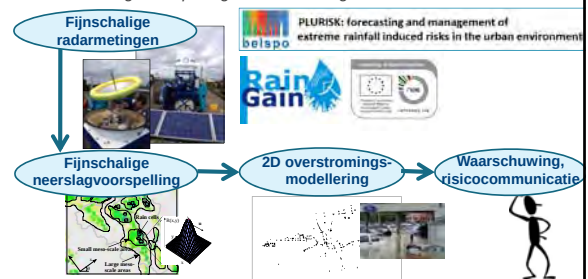
Dry proof buildings:

Water robust doors:

RICNED 2009

Duurzaam stedelijk waterbeheer: Verhoog "preparedness" voor overstromingen

Overstromingsvoorspelling - waarschuwing:

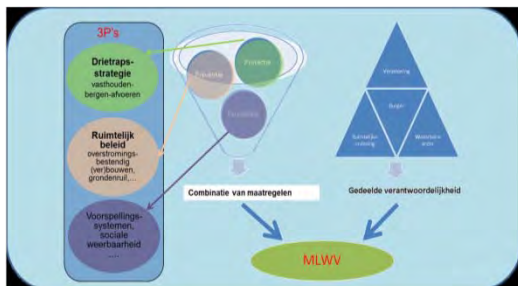


<http://www.raingain.eu>

<http://www.kuleuven.be/hydr/plurisk>

KU LEUVEN

Meerlaagse waterveiligheid



KU LEUVEN

Aanpasbaar beleid!

Geen statisch, maar adaptief ontwerp:

paradigma-verandering in infrastructuurontwerp en waterbeheer

Beslissingsbeheer onder onzekerheid:

no-regret aanpak, rekening houdend met potentiële lange-termijn evoluties + onzekerheid

Meer geleidelijke bijsturing naarmate kennis stijgt

Betrokkenheid

KU LEUVEN

Andere aanbevelingen

Heropstarten pluviografen
Validatie + terugkoppeling/verfijning neerslaginterpolatie
Bijhouden databank overstromingen (wat, hoeveel, waar, ...)

KU LEUVEN

Afstemming

Tussen:

- Waterbeheer
 - Stedelijk - Ruraal
 - Opwaarts - Afwaarts
- Ruimtelijke planning / Stedelijk ontwerp
- Ecologisch beheer / Groenbeheer in de stad
- Landbouw en landbeheer
- Beheer van hittestress (klimaatbuffers)
- Beleving van de publieke ruimte
- ...

KU LEUVEN

Bijlage E. Rapporten impactanalyses eindgebruikers

De volgende eindgebruikers hebben een rapport aangeleverd met de resultaten van hun impactanalyses op basis van de aangeleverde neerslagproducten:

- VITO / University of Newcastle (Ramses-Cities project)
- Waterbouwkundig Laboratorium (gevalstudie Barbierbeek-Wase cuesta-KBR)

Deze rapporten zijn bijgevoegd.

RAMSES: Modelling the impacts of extreme rainfall in Antwerp

This report describes the work undertaken to date on the case study of Antwerp as part of the RAMSES project. In addition, future work in the remaining two years of the project will also be described. This research is mainly being carried-out by Newcastle University, with the assistance of VITO and the University of Leuven and the vital support of Griet Lambrechts of Stad Antwerpen.

Introduction

RAMSES is a European research project which aims to deliver quantified evidence of the impacts of climate change and the costs and benefits of a wide range of adaptation measures, focusing on cities in Europe. The three main case study cities in the project are London, Antwerp, and Bilbao. The project identifies urban characteristics and their inter-linkages to provide the local context for assessment. Risks, vulnerabilities, and damages from climate change are then quantified using top-down (generic approaches using widely-available data across many cities) and bottom-up (city-specific studies using detailed data and sophisticated models) approaches. Associated costs and benefits of adaptation are then estimated to support the design of sustainable transition strategies in urban areas.

Work Package 3 of the project ('Small-scale vulnerability and risk assessment for cities and sectors') is supporting these aims through the development of a suite of city-scale vulnerability and climate risk assessment tools that evaluate climate impacts on priority sectors, and provide a rational basis for testing the effectiveness of adaptation strategies at reducing risk and vulnerability. To this end, the objectives of WP3 are to:

- Identify stakeholder priorities for city-scale risk and vulnerability assessment;
- Extend our existing, state-of-the-art, detailed analysis to include pluvial flooding and air quality risks and vulnerabilities;
- Use our detailed assessment framework to develop and demonstrate new methods to analyse the risks and costs of climate impacts on urban business and supply chains;

- Apply our detailed climate risk assessment framework, previously just applied in London, to two other cities to demonstrate its wider transferability;
- Provide risk information to RAMSES project, disseminate and make widely available to end-users and the Clearinghouse Mechanism;

Integrated assessment of climate risks

Over the last decade, Newcastle University has developed an Urban Integrated Assessment Facility (UIAF), designed to provide quantified focus upon impacts and adaptation with a long-term perspective. The RAMSES project is further advancing the capacity of this facility to realise the full potential of these systems approaches in the analysis of vulnerabilities and risks and the design of adaptation strategies. Whilst fluvial and coastal floods were already analysed in the previous London implementation of the UIAF, pluvial flood risk had not yet been included; it is challenging to model at a city-scale because of the high resolution needed to resolve complex urban features and urban climate. Climate models forecast changes to rainfall intensity and duration, but until recently have been of insufficient resolution to address pluvial flood risk.

To analyse pluvial flood risk within the context of the UIAF we are integrating high - resolution urban climate information from the precipitation modelling work undertaken by Professor Willems at the University of Leuven with the City Catchment Analysis Tool (CityCAT) model. This model provides rapid simulation of urban hydrodynamics and can therefore be used to readily assess adaptation strategies under a wide range of alternative climate scenarios. Prof Willems has made available time-series for design storm events and also for modelled future intensities from different carbon emission scenarios to use as drivers for CityCAT simulations of storms. This will enable the impact of climate and land use changes on surface water flooding to be quantified and the effectiveness of sustainable urban drainage systems to be tested.

The outputs from the CityCAT model are flood surfaces showing water depth and velocity at a number of time-steps over a simulation. CityCAT typically simulates one or two hours of water movement during a rainfall event, thus capturing the build-up of surface-water flooding conditions and the receding of the waters after rainfall has ceased. See Figure 1 for an example of one timestep of a CityCAT simulation showing

water depth across the Antwerp area. These outputs are then used to calculate both direct damages (i.e. flooding of homes, damage to infrastructure, loss of stocks or equipment in commercial and industrial properties) and indirect damages (loss of productivity or trade due to disruption of commuting journeys or supply chains).

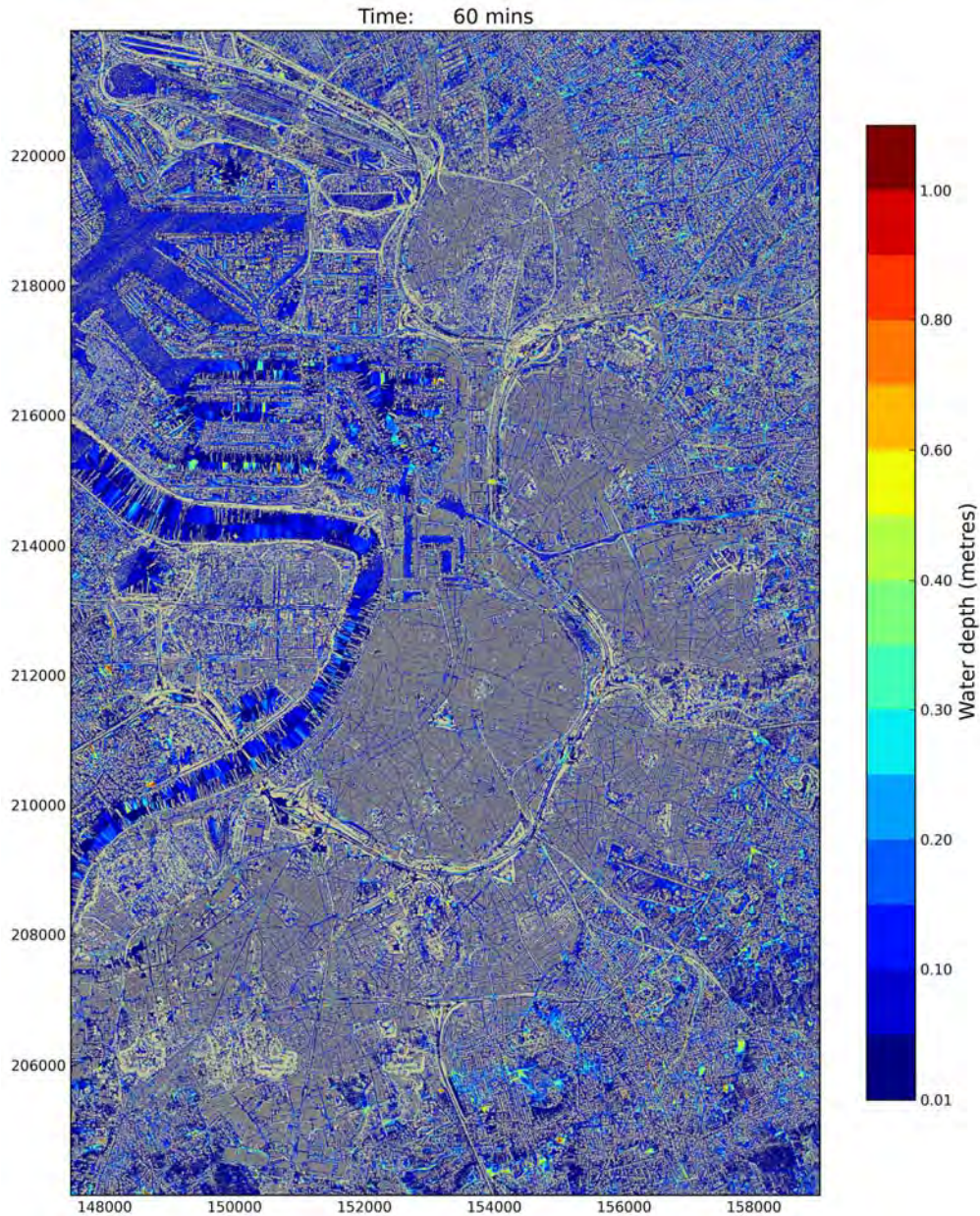


Figure 1: Example of CityCAT output for city of Antwerp (initial results from test runs)

Pluvial flood modelling

The CityCAT model uses mathematical equations to simulate the flow of water over the land surface during a rainfall event. The flow of that water is dependent on a number of factors, including the intensity of the rainfall, the topography of the land

(steepness of slopes), the permeability of the surface (whether or not water can drain naturally into the ground), and the presence of buildings (which make the water flow around them and can concentrate flows). Inputs to the CityCat model are:

- High resolution digital terrain model of urban area
- Time-series of rainfall intensity for storm events of differing magnitudes, ideally with spatial variation across the city
- Information of land-cover types, including areas of permeable and impermeable surfaces, plus different types of green cover (e.g. grass, trees, etc)
- Information on the location of buildings and roof storage
- Location and capacity of gullies
- Network information for sewer locations, connectivity, and capacity.

These data have, in the most part, been obtained for the city of Antwerp and modelling is underway. A 1m-resolution DEM has been obtained for use in the RAMSES project from AGIV. This is of very high detail and depicts the necessary urban features which influence the flow of water over the land surface. Information on building footprints and areas of greenspace have also been obtained with the assistance of VITO. Whilst the characteristics of these features (in terms of water storage or permeability) are not yet known, these attributes can be refined at a later date and scenarios of future adaptation tested (see below). Figure 2 shows the data currently assembled for the Antwerp case study.

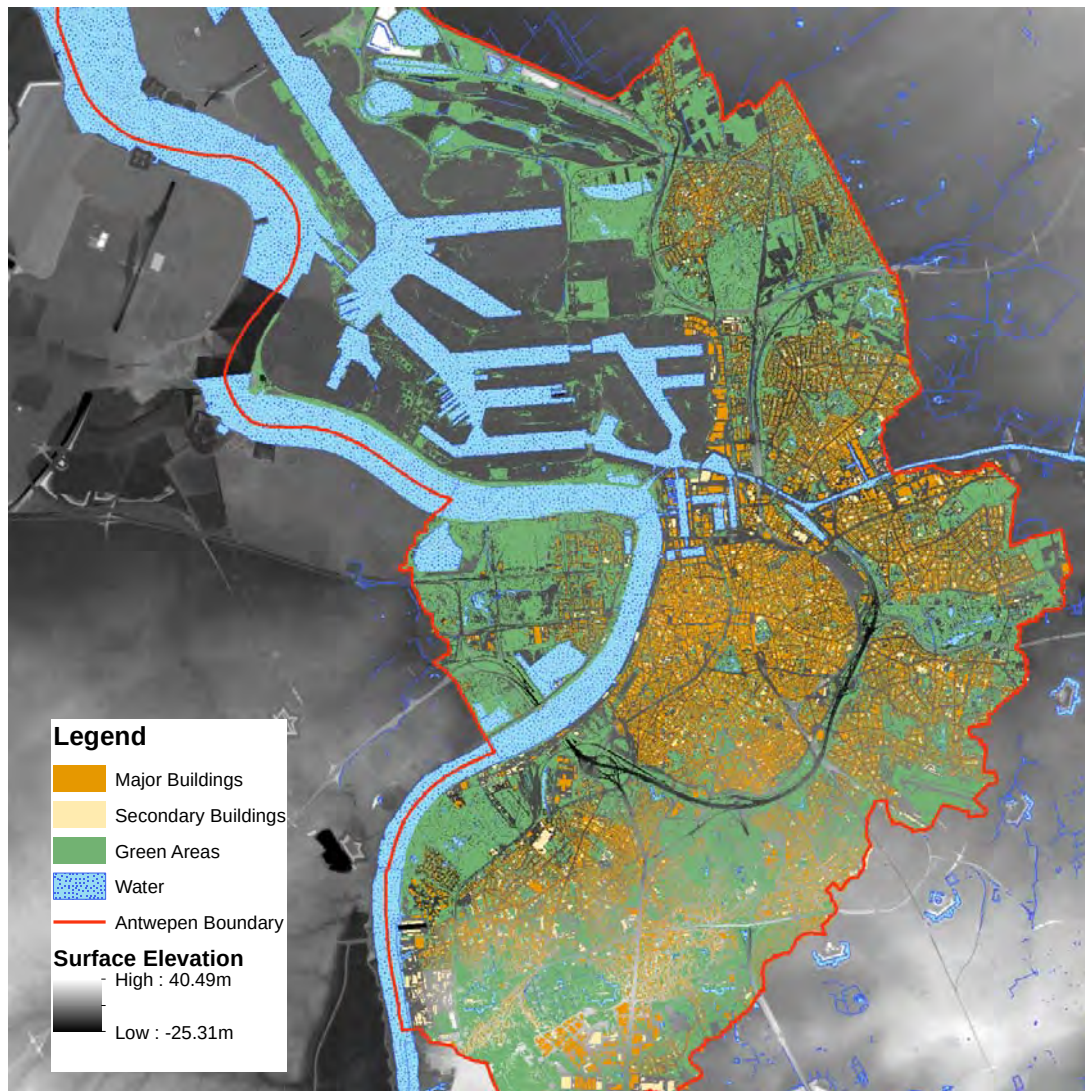


Figure 2: Spatial data assembled for pluvial flood modelling in Antwerp

Initial results and on-going work

Initial trial runs have been conducted with CityCAT for the city of Antwerp in order to assess the quality of the DEM and determine optimum spatial and temporal resolution for modelling. These initial runs give an indication of the outputs that will be produced from CityCAT. Figure 3 shows a zoom-in of the surface water depth in the centre of Antwerp using basic assumptions on surface permeability and building roof storage. Techniques are also being developed to model the impact of these flood outputs on buildings and transport infrastructure, and to link these assessments with the cost modelling work being done in Work Package 5 of RAMSES (led by Graham Floater of Seneca and LSE).

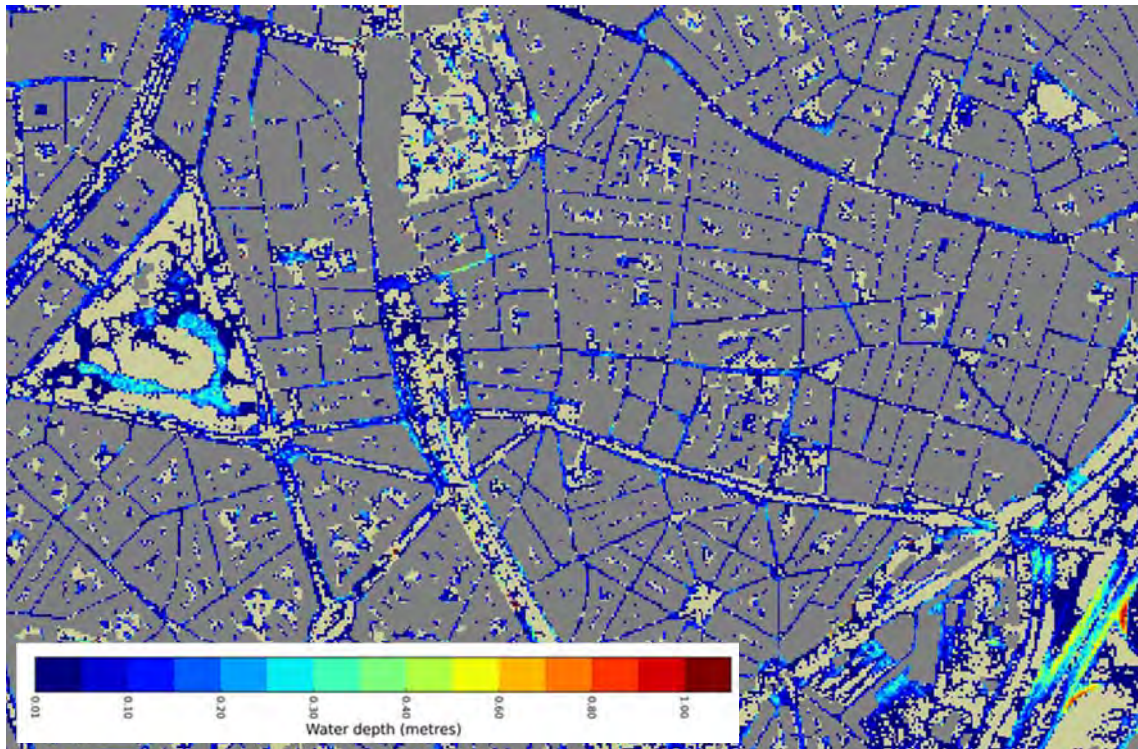


Figure 3: Close-up view of example CityCAT output showing areas of deep water (red colour). Note: this example is using an older 5m DEM not the current 1m dataset.

Work on the RAMSES project is now focussed on a number of avenues:

- Simulating a number of storms at different return periods to understand the impact of varying rainfall intensity on location and severity of pluvial flooding and thus the possible impact of future climate change on urban flood risk
- Identifying areas and infrastructure components most at risk from pluvial flooding under different rainfall scenarios and undertaking initial impact assessment on population at risk
- Integration of Riolink sewerage network model into CityCAT to provide integrated modelling of both surface and subsurface water flow and feedbacks between. This is the first time this has been applied outside of the UK.
- Testing effectiveness of adaptation options on flood conditions. Currently a number of sensitivity tests are being carried out on a number of possible adaptation options: i) green and blue roofs, ii) rainwater storage and sustainable urban drainage systems, iii) improvements to the capacity of the sewerage network, iv) strengthening the defenses of buildings and infrastructure against pluvial flooding.

Following these tests, simulations of policies identified by Stad Antwerpen (e.g. increased infiltration, rainwater tanks, identified green roofs) will be simulated. The resulting changes in flooding impacts (in terms of direct and indirect damages) will be calculated. By working with LSE, comparison the approximate cost of adaptation options and the resulting reduction in damage costs will enable a cost-benefit analysis of adaptations for pluvial flooding to be undertaken. Further adaptation options, such as alternative landuse and spatial planning strategies, including densification and the location of properties and green spaces, may be tested if time allows.

The outputs from the simulations in Work Package 3 of RAMSES and the cost calculations in Work Package 5 will be used to identify appropriate options and develop medium and long-term strategies for climate adaptation at local scale. Since adaptation requires a change of political, economical, cultural and land-use-planning strategies, RAMSES will design tools to define an optimum transition pathways towards urban resilience and sustainability based on the potential of adaptation under economic, urban planning and design, and risk criteria. Work Package 8 of RAMSES will provide local authorities with the tools to identify opportunities and hidden obstacles to short and long-term adaptation, producing a Transition Model to be used by policy-makers and will test this model for case study cities (including Antwerp). The outputs of this work package will also be used to deliver a Transition Handbook.

Acknowledgements

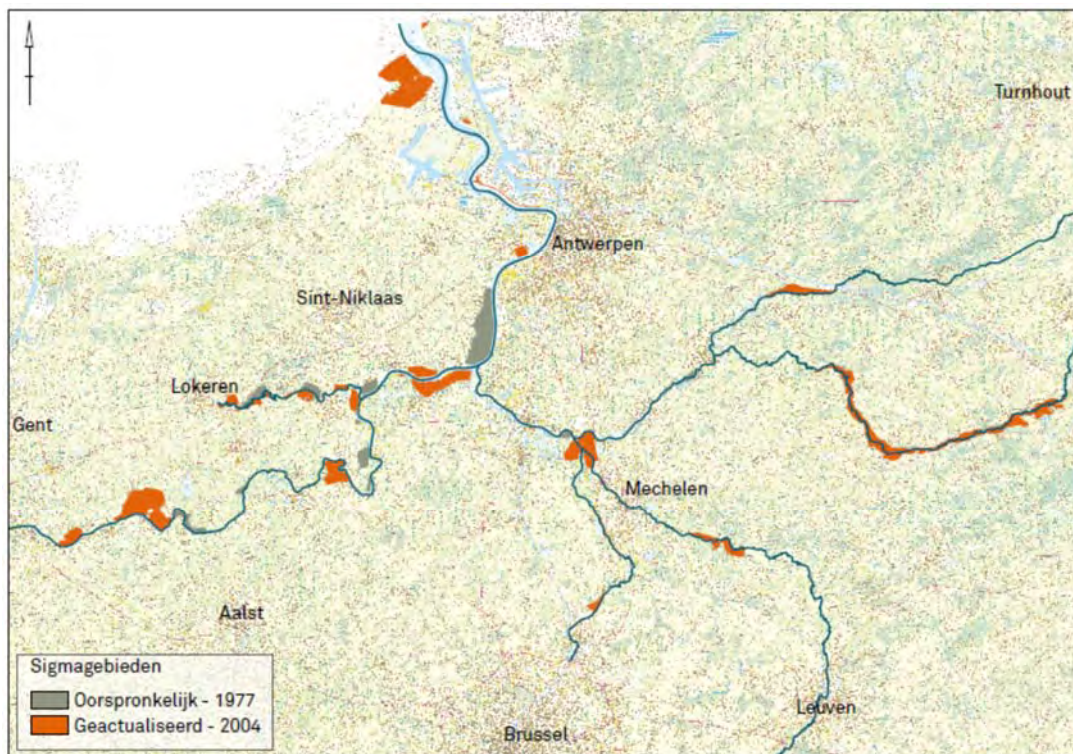
	The work leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme under Grant Agreement No. 308497 (Project RAMSES).	
---	--	---

MEMO

Titel	Neerslagmodellering Antwerpen - gevalstudie Barbierbeek-Wase cuesta-KBR
Datum	7/09/2015
Auteur(s)	Paul Vanderkimpen
Ref.:	WL2015M14_098_2

1. Inleiding

In de polders van Kruibeke, Bazel en Rupelmonde (KBR) legt de afdeling Zeeschelde van Waterwegen en Zeekanaal NV (W&Z) een gecontroleerd overstromingsgebied (GOG) aan, waarvan sommige compartimenten onderhevig zullen zijn aan een gecontroleerd gereduceerd getij (GGG). Het GOG-GGG KBR vormt een onderdeel van het oorspronkelijke Sigmagebied en beslaat een oppervlakte van ongeveer 600 ha. Het zal in het najaar van 2015 in gebruik genomen worden.



Figuur 1: Situering

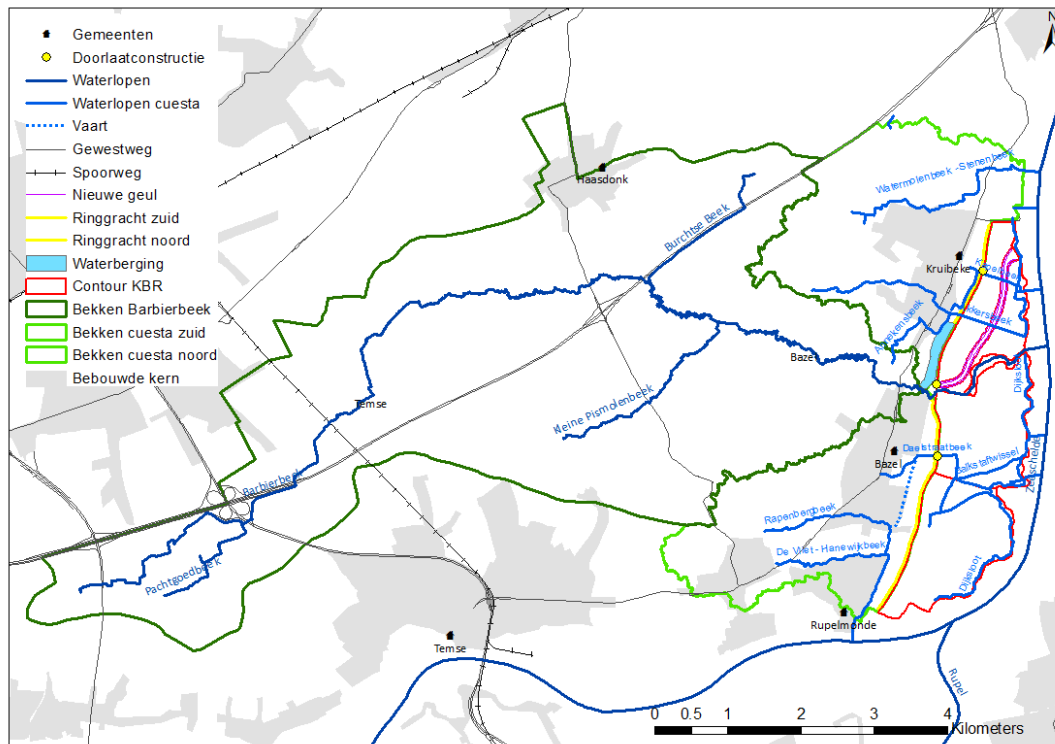
De aanleg van een nieuwe ringdijk rond de polders heeft onvermijdelijk een invloed op de afwatering van de waterlopen die de Wase cuesta ontwateren en de polders doorkruisen. Van deze waterlopen is de Barbierbeek de belangrijkste. Er worden dan ook een aantal maatregelen getroffen (doorlaatconstructies in de ringdijk, ringgrachten en wachtbekkens buiten de ringdijk) om te beletten dat het gelijktijdig optreden van hevige regenval in het Waasland en een stormtij op de Schelde zou leiden tot wateroverlast aan de voet van de cuesta, net buiten de ringdijk.

2. Doelstelling

Deze gevalstudie heeft tot doel na te gaan of een toename van de neerslagintensiteit als gevolg van klimaatwijziging na verloop van tijd bijkomende maatregelen ter preventie van wateroverlast nodig zou kunnen maken.

3. Studiegebied

Het studiegebied omvat vier deelgebieden, die met elkaar interageren: (1) het stroomgebied van de Barbierbeek, (2) de Wase cuesta ten noorden van de Barbierbeek (stroomgebied Watermolenbeek, Kapelbeek, Akkersbeek en Annekensbeek), (3) de Wase cuesta ten zuiden van de Barbierbeek (stroomgebied Daelstraatbeek, Rapenbergbeek, Hanewijkbeek en Vliet) en (4) het GOG-GGG KBR met zijn randvoorzieningen. Op de rand van de Wase cuesta bevinden zich de dorpskernen van Kruikebe, Bazel en Rupelmonde. Het regenwater uit deze verstedelijkte gebieden wordt via het rioleringsstelsel afgevoerd naar de voet van de cuesta en daar overgestort op de polderwaterlopen.



Figuur 2: Studiegebied

4. Modellen

De impact van de klimaatwijziging werd onderzocht aan de hand van hydrologische en hydraulische modellen.

De hydrologische modellen zijn gebiedsgemiddelde conceptuele modellen. Voor de afvoer van de landelijke gebieden werd gebruik gemaakt van het model NAM (DHI). Voor de verstedelijkte zones werd gebruik gemaakt van een tijd-oppervlakte model. Het NAM model werd in eerdere studies afgeijkt op basis van de debietmetingen op de Barbierbeek te Bazel. De tijd-oppervlakte modellen werden opgebouwd op basis van informatie m.b.t. het rioleringsstelsel, aangeleverd door Aquafin.

Het hydraulische model is een quasi-2D hydrodynamisch model. Voor de opbouw werd gebruik gemaakt van het softwarepakket Mike11 (DHI). De opwaartse randvoorwaarden bestaan uit hydrogrammen, opgesteld met behulp van de hydrologische modellen. De afwaartse randvoorwaarden bestaan uit limnigrammen, berekend met een model van het volledige Zeescheldebekken.

De meest kritische situatie doet zich voor wanneer een hoge bovenafvoer samenvalt met een stormtij op de Schelde. De hydrogrammen met een terugkeerperiode van 25 jaar en 50 jaar werden gecombineerd met limnigrammen met een terugkeerperiode van 50 jaar en 100 jaar en een gemiddeld getij tot 6 maatgevende gebeurtenissen, waarvan de exacte terugkeerperiode niet gekend is.

5. Klimaatwijziging

De impact van de klimaatwijziging op de afvoer van de waterlopen en de rioleringsstelsels werd op verschillende wijze in rekening gebracht. Voor waterlopen die gevoed worden door onverharde bekkens is de terugkeerperiode van de afvoer immers niet gelijk aan de terugkeerperiode van de neerslag. Voor rioleringsstelsels die gevoed worden door verharde bekkens kan men veronderstellen dat dit wel ongeveer zo is.

Voor de waterlopen werden de beschikbare 40-jarige reeksen van neerslag en potentiële evaporatie geperturbeerd door het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven, zodat ze de toekomstige situatie weerspiegelen. Vervolgens werd de toekomstige afvoer berekend met het hydrologische NAM model. In een laatste stap werd de 40-jarige afvoerreeks omgerekend tot composiethydrogrammen met gekende terugkeerperioden.

Voor de riolering werden aangepaste composietbuizen met gekende terugkeerperioden aangeleverd door het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven. De varianten van deze buizen weerspiegelen zowel de lokale variatie van het huidige klimaat als de scenario's m.b.t. het toekomstige klimaat. De composietbuizen werden doorgerekend met de hydrologische tijd-oppervlakte modellen. De berekende afvoer werd vervolgens gebruikt als benaderend composiethydrogram.

Er werden twee klimaatscenario's onderzocht: het midden en het hoog scenario, beiden met een tijdshorizon van 100 jaar.

6. Resultaten

De onderstaande tabel toont de verwachte wijziging van de maximale waterstand in de Barbierbeek (nabij het wachtbekken), de noordelijke ringgracht (nabij de uitlaat van de Kapelbeek) en de zuidelijke ringgracht (nabij de uitlaat aan de Lange Gaanweg) t.o.v. het huidige klimaat. De variatie werd berekend voor 2 scenario's en 6 maatgevende gebeurtenissen.

Tabel 1 Wijziging maximale waterstand (in cm t.o.v. huidig klimaat)

	Barbierbeek		Zuidelijke ringgracht		Noordelijke ringgracht	
	100-midden	100-hoog	100-midden	100-hoog	100-midden	100-hoog
H ₁₀₀ Q ₅₀	+1	+34	0	+28	+5	+35
H ₁₀₀ Q ₂₅	0	+15	-1	+23	+2	+29
H ₂₅ Q ₅₀	+1	+8	0	+18	+4	+30
H ₂₅ Q ₂₅	0	+6	-1	+21	+2	+25
H _{gem} Q ₅₀	+2	+55	+1	+12	+3	+17
H _{gem} Q ₂₅	+1	+40	0	+11	+2	+13

Bij gebruik van het midden scenario is de invloed van de klimaatwijziging zeer beperkt (enkele cm). Bij toepassing van het hoog scenario (het meest geschikt voor dit type evaluaties) stijgen de piekwaterstanden voor de meest extreme gebeurtenis (H₁₀₀ Q₅₀) met 25 à 35 cm. Deze stijging is volledig toe te schrijven aan de toename van de bovenafvoer (Q₅₀). Het waterpeil op de Schelde (H₁₀₀) is ongewijzigd gebleven. Er werd immers geen rekening gehouden met de verwachte zeespiegelstijging.

7. Conclusie en aanbeveling

In de verre toekomst zal een verhoging van de extreme neerslag de kans op wateroverlast aan de voet van de Wase cuesta waarschijnlijk doen toenemen. Aangezien de uitgevoerde analyse betrekking heeft op een situatie die pas over 100 jaar zal optreden, blijft er wel meer dan voldoende tijd om aanvullende maatregelen uit te werken en te implementeren.

De meest kritische situatie doet zich voor wanneer een hoge bovenafvoer samenvalt met een stormtij op de Schelde. Om de totale impact van de klimaatwijziging te kunnen inschatten, is het dan ook noodzakelijk om ook de invloed van de zeespiegelstijging op de waterstanden in de Schelde in rekening te brengen.

12 Referenties

Ban, N., Schmidli, J., Schaer, C., 2014. Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(13), 7889-7907.

Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., Ntegeka, V., 2010. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium, *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 273-286.

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.

Broekx, S., Smets, S., Liekens, I., Bulckaen, D., De Nocker, L., 2011. Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach. *Natural Hazards*: 57(2), 245-266.

Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G., 1983. Estimation de l'évapotranspiration potentielle en Belgique. Publications/publicaties série/serie A, No/Nr 112, Institut Royal Météorologique de Belgique - Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, 28 p.

CIW, 2012. Code van goede praktijk voor rioleringssystemen - Deel 5 – Ontwerpneerslag: <http://www.integraalwaterbeleid.be/nl/publicaties/code-goede-praktijk-rioleringssystemen>, Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, Aalst.

CIW, 2015. Aanpak wateroverlastproblematiek - Transitie naar meerlaagse waterveiligheid (MLWV), Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, Aalst.

Dams, J., Salvatore, E., Van Daele, T., Ntegeka, V., Willems, P. & Batelaan, O. 2012. Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. *Hydrology and Earth System Sciences*: 16(5), 1517-1531.

De Nocker, L., Broekx, S., Liekens, J., Bulckaen, D., Smets, S., Gauderis, J., Dauwe, W., 2006. Cost-benefit analysis to select the optimal flood protection strategy along the Scheldt. *Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*, Transaction: Ecology and the Environment, 91, Eds. V. Popov, C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK.

De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Willems, P., 2012. Vergelijking van buffering open afwaarts langs de riolering en waterloop. Een kwantitatieve studie voor Turnhout. *WT-Afvalwater*, jaargang 12, nr.5, 346-359.

De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Nolf, C., Wolfs, V., De Meulder, B., Shannon, K., Willems, P., 2014. Green - blue water in the city: quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods. *Water Science and Technology*, 70.11, 1825-1837.

IPCC, 2013 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. and Yiou, P., 2013. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research Regional Environmental Change, Springer Berlin Heidelberg, 2013, 1-16.

Kendon, E.J., Roberts, N.M., Senior, C.A., Roberts, M.J., 2012. Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model. Journal of Climate, 25(17), 5791-5806.

Martens, B., Cabus P., De Jongh, I., Verhoest, N.E.C., 2013. Merging weather radar observations with ground-based measurements of rainfall using an adaptive multiquadric surface fitting algorithm. Journal of Hydrology, 500, 84-96.

Meyvis, L., Graré, W. & Dauwe, W., 2003. Actualisatie van het SIGMAPLAN. Tijdschrift Water, september 2003, 11 p.

Moore, R.J., May B.C., Jones D.A., Black K.B., 1994. Local calibration of weather radar over London. In: Almeida-Teixeira M., Fantechi, R., Moore, R., Silva, V. (Eds.), Advances in Radar Hydrology, Report EUR 14334 EN, European Commission, 186-195.

MIRA, 2015. MIRA Klimaatrapport 2015 (Brouwers et al.), VMM-MIRA.

Nolf, C., Putseys, I., De Meulder, B., Shannon, K., Devisch, O., Willems, P., 2012a. Water in de stad: Betere verwevenheid van stedenbouw en waterbeheer. Vakblad Riolering, Jaargang 18, maart 2012, 22-24.

Nolf, C., Putseys, I., De Meulder, B., Shannon, K., Willems, P., Devisch, O., 2012b. Ruimte voor water in de stad: naar een meer geïntegreerde steden- en waterbouwkundige benadering', WT-Afvalwater, jaargang 12, nr.1, 3-15.

Nolf, C., De Meulder, B., Shannon, K., Willems, P., 2012c. Turnhout als (regen)water lab. Vakblad Riolering, jaargang 18, maart 2012, 18-20.

Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., 2014. Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. Journal of Hydrology, 508C, 307-321.

Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Quéré, C. Le, Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2°C. Nature Clim. Change, 3, 4-6.

Poelmans, L., Van Rompaey, A., Ntegeka, V., Willems, P., 2011. The relative impact of climate change and urban expansion on river flows: a case study in central Belgium. *Hydrological Processes*, 25(18), 2846-2858.

Prein, A.F., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N.K., Keuler, K., Georgievski, G., 2013. Added value of convection permitting seasonal simulations. *Climate Dynamics*, 41, 2655-2677.

RA, 2005. Social cost-benefit analysis of the Sigmaplan (in Dutch: Actualisatie van het Sigmaplan: maatschappelijke KostenBatenAnalyse), Final reports [CD-ROM], Project consortium MKBA Sigmaplan, lead: Resource Analysis, Antwerp.

Tabari, H., Taye, M.T., Willems, P., 2014a. Bijsturing van de Vlaamse klimaatscenario's voor hydrologische en hydrodynamische impactanalyse inclusief hydrologische extremen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA 2014, door KU Leuven – Afdeling Hydraulica, november 2014, 106 p.

Sunyer, M.A., Hundeche, Y., Lawrence, D., Madsen, H., Willems, P., Martinkova, M., Vermoor, K., Bürger, G., Hanel, M., Kriaučiūnienė, J., Loukas, A., Osuch, M., Yücel, I., 2015. Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 1827-1847.

Tabari, H., Taye, M.T., Willems, P., 2014b. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen – Technische Appendix 2: Nieuwe modelprojecties voor Ukkel op basis van globale klimaatmodellen (CMIP5). Studie uitgevoerd in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA, KU Leuven, november 2014, 104 p.

Van Lipzig, N., Willems, P., 2014. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, KU Leuven i.s.m. KMI, november 2014.

VITO, 2013. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen (D. Lauwaet, B. Maiheu, J. Aertsens, K. De Ridder). Eindrapport VITO voor Stad Antwerpen.

Vansteenkiste, Th., Tavakoli, M., Ntegeka, V., Willems, P., De Smedt, F., Batelaan, O., 2013. Climate change impact on river flows and catchment hydrology: a comparison of two spatially distributed models. *Hydrological Processes*, 27(25), 3649-3662.

Vansteenkiste, Th., Tavakoli, M., Ntegeka, V., De Smedt, F., Batelaan, O., Pereira, F., Willems, P., 2014. Intercomparison of hydrological model structures and calibration approaches in climate scenario impact projections. *Journal of Hydrology*, 519, 743-755.

Wang, L-P., Ochoa-Rodriguez, S., Onof, C., Willems, P., 2015a. Singularity-sensitive gauge-based radar rainfall adjustment methods for urban hydrological applications. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12, 1855–1900.

Wang, L-P., Ochoa-Rodriguez, S., Van Assel, J., Pina, R.D., Kroll, S., Pessemier, M., Willems, P., Onof, C., 2015b. Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. *Journal of Hydrology*, in druk.

Willems, P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types. *Journal of Hydrology*, 233, 189 – 205

Willems, P., 2001a. A spatial rainfall generator for small spatial scales. *Journal of Hydrology*, 252, 126-144.

Willems, P., 2001b. Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15, 132-152.

Willems, P., 2009. Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen. Eindrapport voor VMM-Afdeling Operationeel Waterbeheer, september 2009, 79 p.

Willems, P., 2011. Evaluatie en actualisatie van de IDF-neerslagstatistieken te Ukkel'. Aanvulling bij de studie "Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen (K.U.Leuven voor VMM, sept. 2009)", oktober 2011, 14 p.

Willems, P., 2013a. Waterloopmodellering. Acco Leuven & Den Haag, 268 p., ISBN 978-90-334-9296-9, D/2013/0543/132, NUR 955.

Willems, P., 2013b. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, 496, 166–177.

Willems, P., Vrac, M., 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, 402, 193-205.

Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., 2013. Climate change as a driver for urban drainage paradigm change. *Water21*, February 2013, 23-24.

Willems, P., Guillou, A., Beirlant, J., 2007. Bias correction in hydrologic GPD based extreme value analysis by means of a slowly varying . *Journal of Hydrology*, 338, 221-236.

Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., Nguyen, V.T.V., 2012a. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 103, 106-118.

Willems, P., Olsson, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H., Nguyen, V-T-V., 2012b. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage. IWA Publishing, 252p., Paperback Print ISBN 9781780401256; Ebook ISBN 9781780401263

AFDELING HYDRAULICA
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
3001 HEVERLEE (LEUVEN), BELGIË
tel. + 32 16 32 16 58
tel. secr. +32 16 32 14 74
fax + 32 16 32 19 89
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be
bwk.kuleuven.be/hydr

