

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

samenvatting en beleidsaanbevelingen

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 Ongkowidjojo (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)

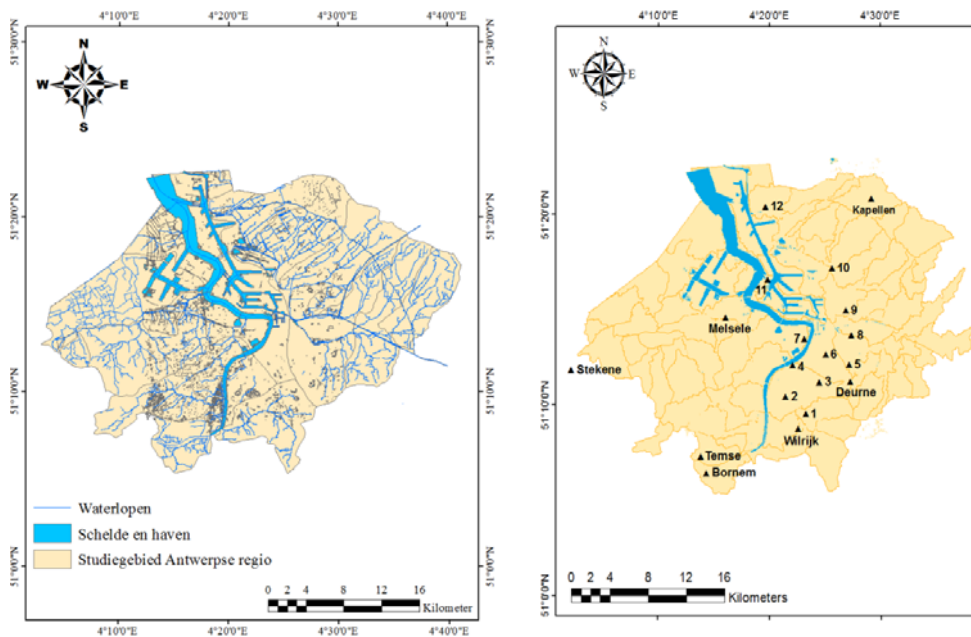
Jiri Nossent (Waterbouwkundig Laboratorium)

Dirk Lauwaet (VITO)

1 Samenvatting

1.1 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). Figuur 1 toont het studiegebied en het netwerk van beschikbare pluviografen (Stad Antwerpen, VMM, HIC en KMI).

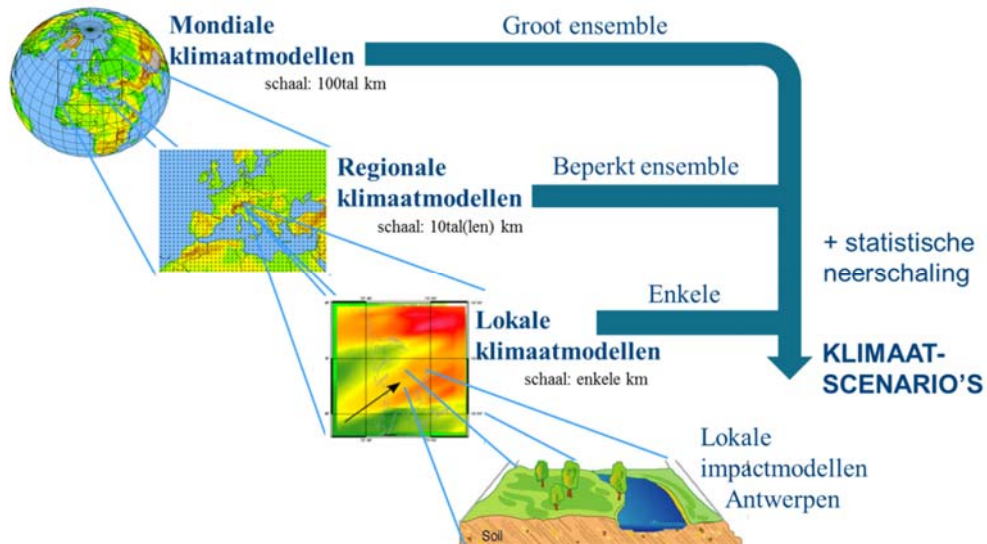


Figuur 1: Voorstelling studiegebied en locaties pluviometers

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.

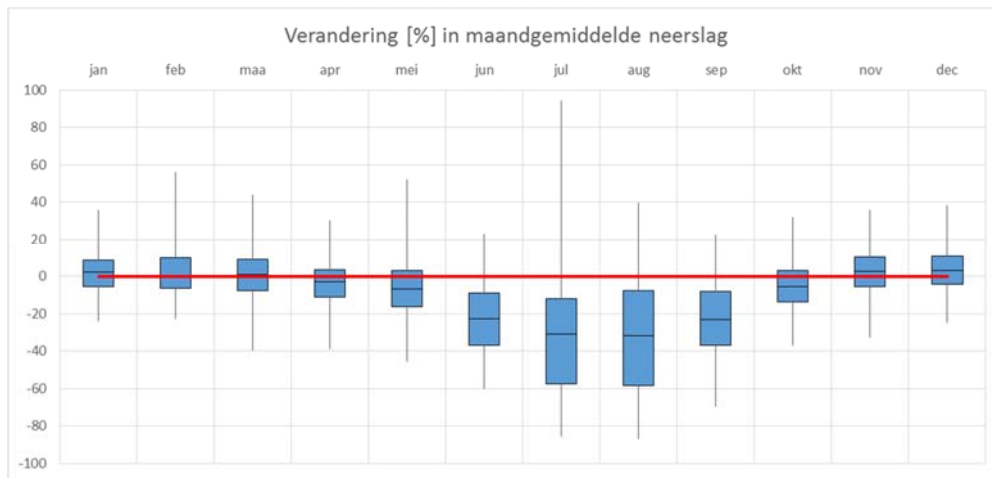
Het klimaatveranderingssignaal werd afgeleid door statistische analyse en combinatie van alle klimaatmodellen met beschikbare resultaten voor de regio Antwerpen: deze bestaan uit mondiale, regionale en lokale klimaatmodellen (Figuur 2). De simulatieresultaten van de verschillende klimaatmodellen werden gecombineerd met statistische neerschaling om te komen tot specifieke klimaatscenario's voor het studiegebied van de Antwerpse regio.



Figuur 2: Simulatieresultaten van de verschillende klimaatmodellen gecombineerd met statistische neerschaling om te komen tot specifieke klimaatscenario's voor het studiegebied van de Antwerpse regio

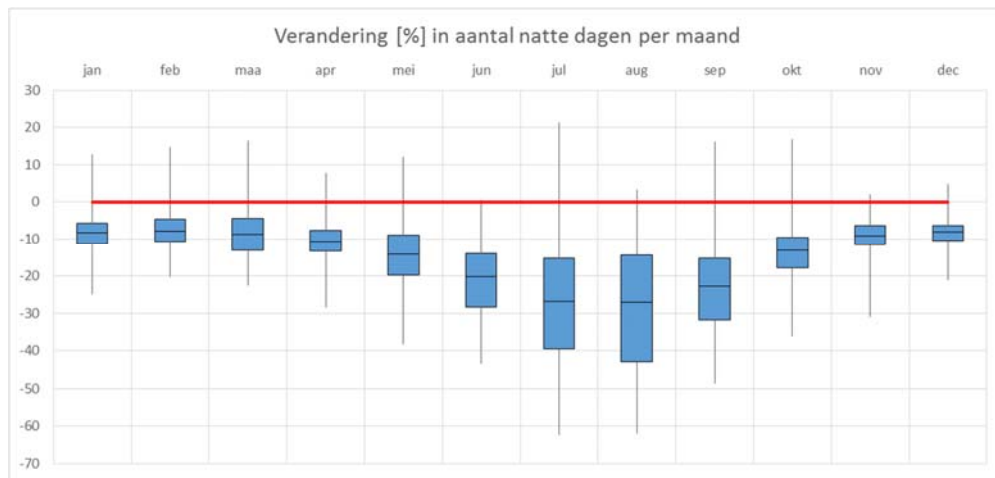
1.2 Gemodelleerde klimaatveranderingssignalen

Hierna worden de belangrijkste bevindingen m.b.t. deze “meteorologische” klimaatveranderingen samengevat (zie Deel 6 van het rapport bij deze studie 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.



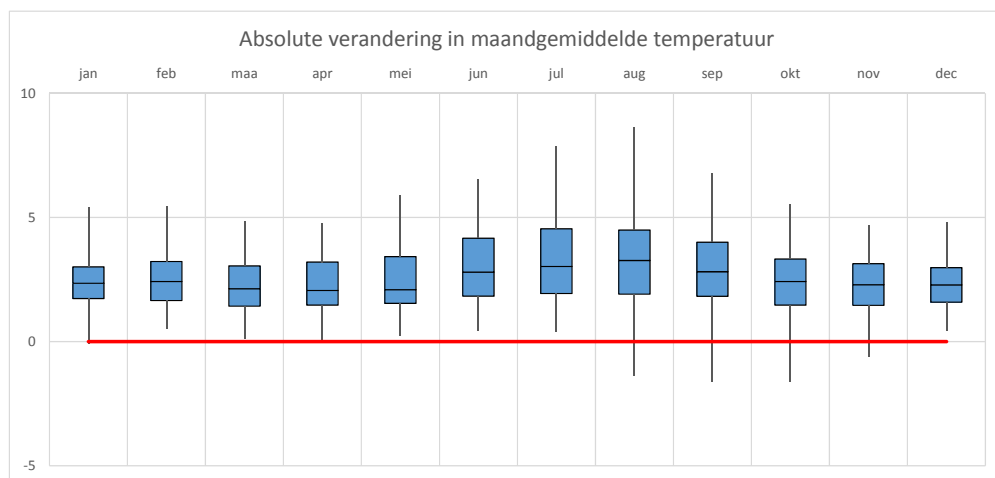
Figuur 3: Verandering in maandgemiddelde neerslag

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) (Figuur 3). 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 (Figuur 4). 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).



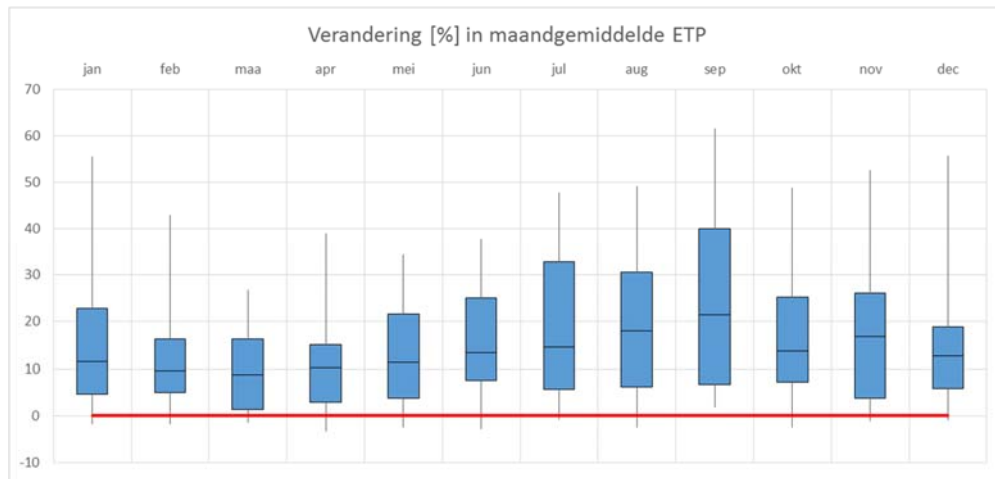
Figuur 4: Verandering van het aantal natte dagen per maand

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 (Figuur 5): 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.



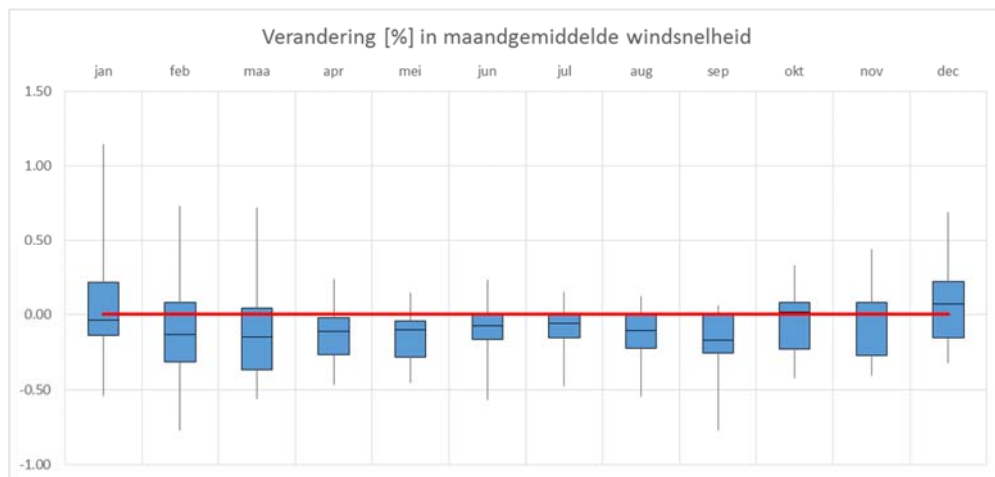
Figuur 5: Absolute verandering in maandgemiddelde temperatuur

Voor de potentiële evapotranspiratie wordt een gemiddelde relatieve stijging van 10% tot 15% gevonden (Figuur 6), 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 (maar nog steeds een stijging).



Figuur 6: Verandering in maandgemiddelde ETP

De verandering in windsnelheid is daarentegen eerder beperkt, met veranderingen tussen -1% en +1.5% (Figuur 7). De klimaatprojecties kunnen geen uitsluitel 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.

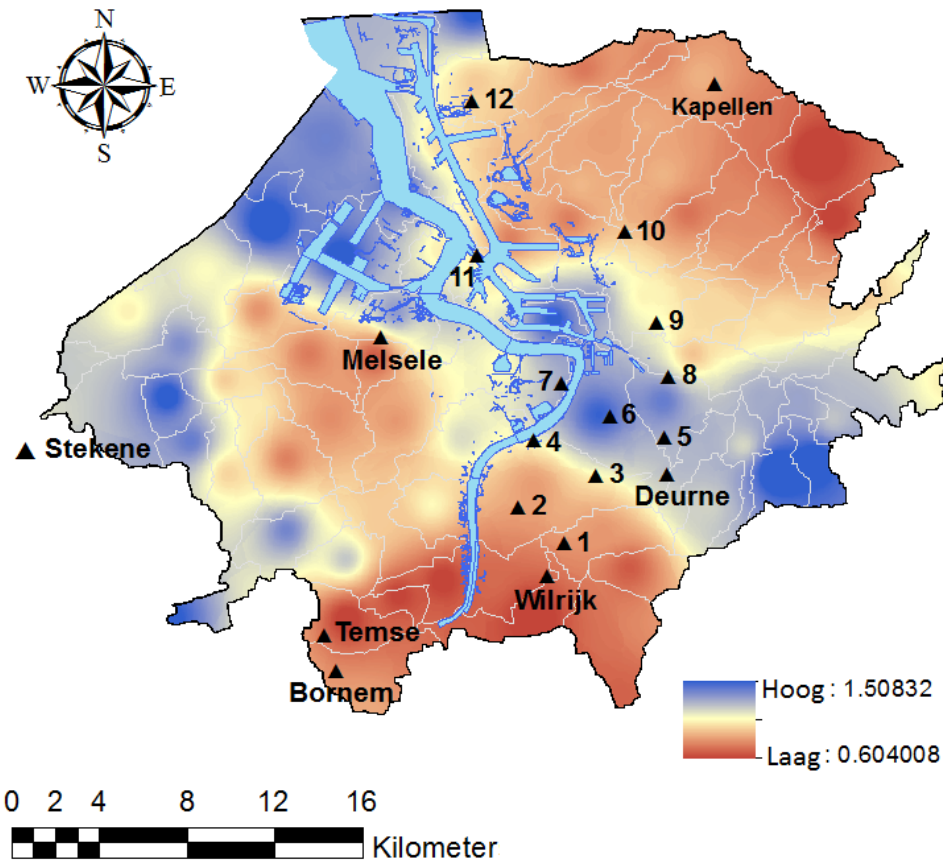


Figuur 7: Verandering in maandgemiddelde windsnelheid

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.

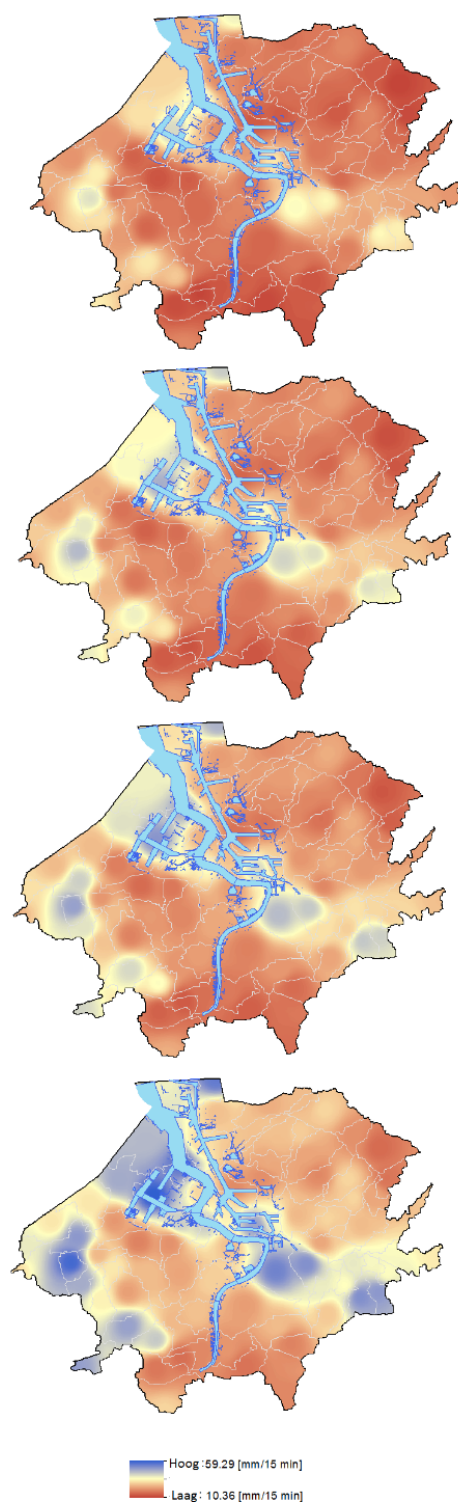
1.3 Ruimtelijke variaties in extreme regenval

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 (Figuur 8). Dit heeft te maken met de sterke ruimtelijke verschillen in verstedelijking / hitte-eiland effect in combinatie met topografische hoogteverschillen.



Figuur 8: Huidige ruimtelijke variabiliteit in neerslagextremen (terugkeerperioden groter dan 1 jaar, 15-minuten neerslagintensiteiten)

Figuur 9 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.



Figuur 9: Ruimtelijke variabiliteit van neerslagextremen, voor een terugkeerperiode van 5 jaar en 15-minuten neerslagintensiteiten (van boven tot onder: Huidig klimaat, 2030, 2050 en 2100)

1.4 Impactanalyse van de klimaatwijziging op riolering- en waterloopoverstromingen

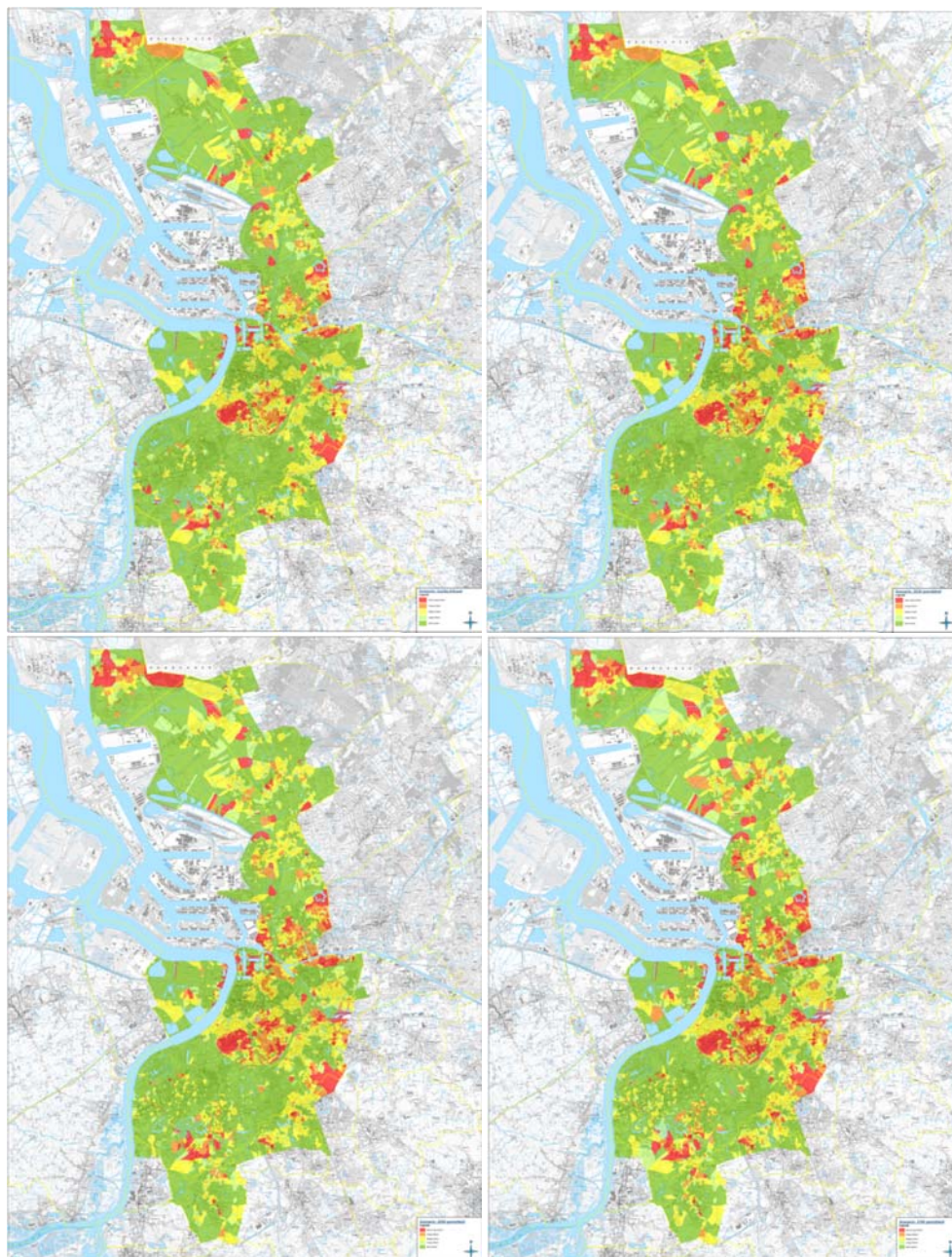
De ruimtelijke wijziging in neerslagextremen en kaarten zoals Figuur 8 en Figuur 9 geven een algemeen beeld van de invloed van de klimaatwijziging op lokale meteorologische condities, maar zijn niet rechtstreeks bruikbaar voor impactanalyse op riolering- en waterloopoverstromingen. De klimaatwijzigingen 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 van het Klein Schijn), het Waterbouwkundig Laboratorium (waterlopenmodel gebied Barbierbeek - Wase cuesta - KBR) en de Vlaamse Milieumaatschappij (geïntegreerd waterlopen-rioleringsmodel van de 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 (Figuur 10, Figuur 11), 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 in het deel "Beleidsaanbevelingen" hierna verder toegelicht (zie "no-regret" aanpak).

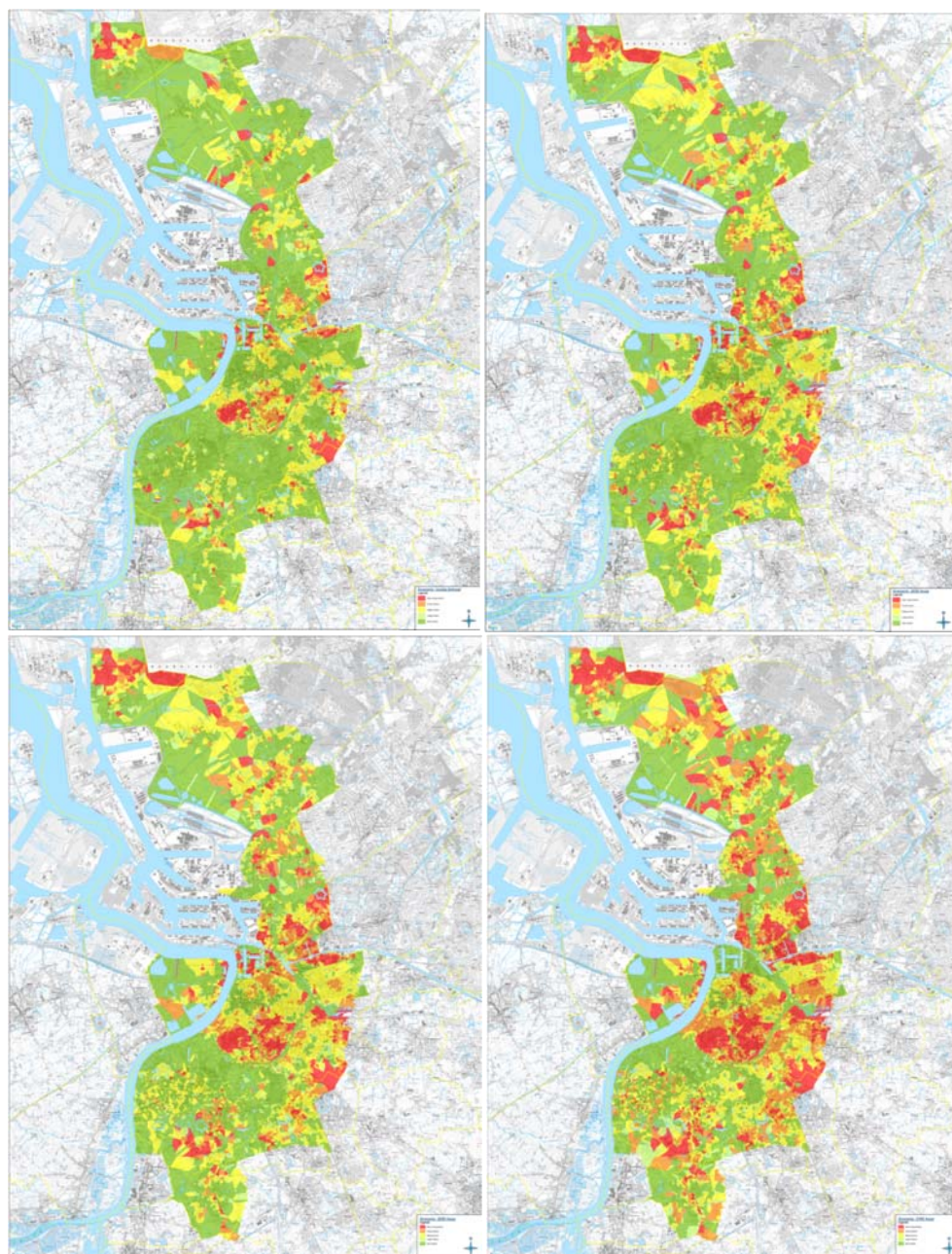
Voor de gevalstudie Barbierbeek - Wase cuesta - KBR berekende het Waterbouwkundig Laboratorium dat de toename in extreme neerslag als gevolg van de klimaatwijziging voor een toename zorgt van de bovendebieten en daardoor van de piekwaterstanden met meerdere tientallen cm. Door de zeespiegelstijging kan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



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

Figuur 10: 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 midden klimaatscenario



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

Figuur 11: 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

2 Beleidsaanbevelingen

2.1 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 langs zowel rioleringen als waterlopen, wijzen studies op verminderde waterbeschikbaarheid in droge zomerperiodes (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 klimaatrends 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 geëxtrapoléerd 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.

2.2 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.

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:

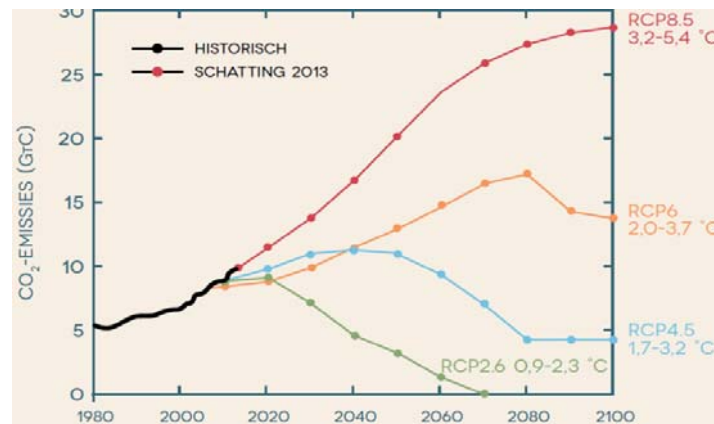
$$\text{Risico} = \text{Kans op voorkomen} * \text{Gevolgen}$$

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; zie ook Figuur 12.



Figuur 12: Wereldwijde CO₂ uitstoot per RCP-scenario, samen met de historische waarden tot 2013 (bron: Peters et al., 2013)

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 neerslagscenario'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 klimaatevoluties 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 13).



Figuur 13: 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 14: Ladder van stappen voor een meest duurzaam stedelijk waterbeheer

Voorbeelden van duurzame maatregelen zijn deze die hoogst staan in de ladder zoals in Figuur 14 geschetst en dit naar analogie met het afvalbeheer. Hoogst in deze ladder staan de bronmaatregelen, zoals opwaartse bergings- en infiltratievoorzieningen; zie voorbeelden in Figuur 15, Figuur 16 en Figuur 17. 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).

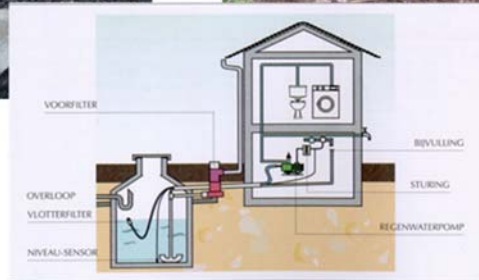
Doorlatende verharding:



Individuele infiltratie:



Regenwater
berging en
hergebruik:



Figuur 15: Voorbeelden van lokale-opwaartse berging en infiltratiemogelijkheden als bronmaatregelen en kernelementen in duurzaam stedelijk waterbeheer

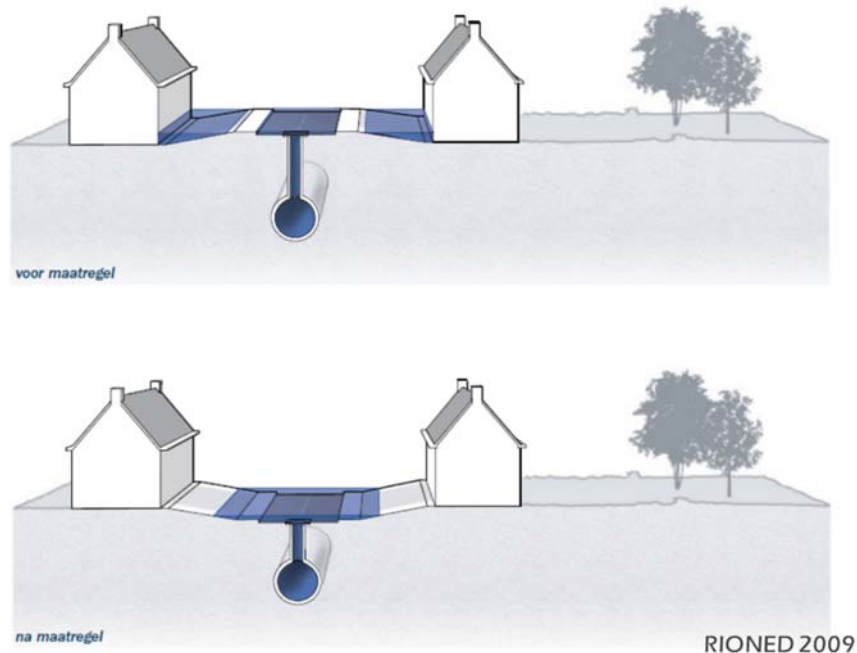


Figuur 16: Groene trambanen in de Mercatorstraat te Antwerpen, als voorbeeld van bronmaatregel



Figuur 17: Waterdoorlatende parkeerstroken (nu nog vaak gecementeerd) en groene voegen of grasdallen als mogelijkheden voor waterdoorlatende verharding

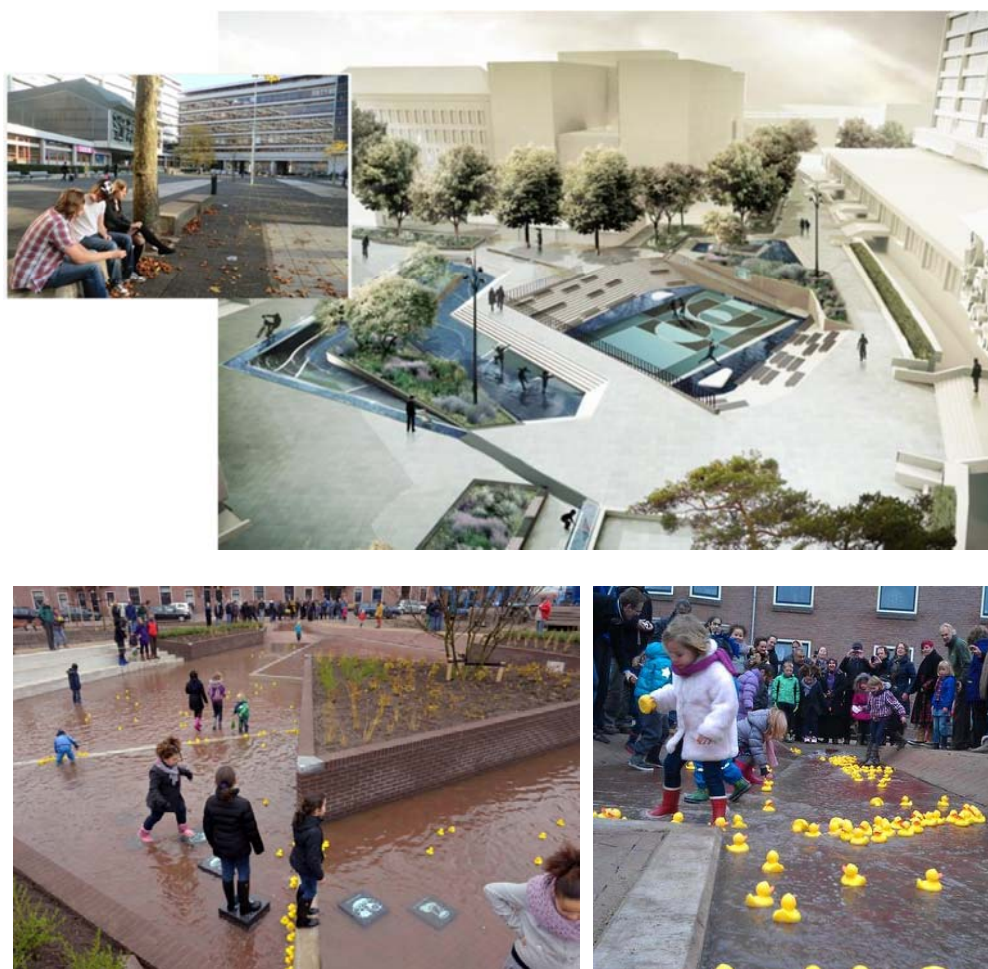
Verder zal het belang van lokale maatregelen toenemen, zoals verhoogde stoepranden en verdieping van de straat (voorbeelden in Figuur 18) of het doordacht aanleggen van lokale depressies in het openbaar domein. Dit laatste kan aan pleinen, sport- of andere verharde terreinen in de stad (voorbeelden in Figuur 19 en Figuur 20) of nog beter – omdat naast waterberging ook infiltratie gerealiseerd wordt – in parken of andere groengebieden (voorbeeld Figuur 21), onverharde sportterreinen en speeltuinen. Ook individuele afkoppeling/infiltratie van regenwater op privéterrein, waar mogelijk, is essentieel. Dergelijke lokale en individuele maatregelen (andere voorbeelden in Figuur 22 en Figuur 23) kunnen overstromingsschade beperken en cumulatief (wanneer op grote schaal uitgevoerd) meest efficiënt wateroverlast en verdroging hand-in-hand tegengaan.



Figuur 18: 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 19: Regenwaterberging in verlaagde sportterreinen



Figuur 20: Regenwaterberging in stadspleinen: de waterpleinen in Rotterdam



Figuur 21: 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 22: Wijkontwikkeling Nieuw Zuid, Antwerpen: Hemelwater volledig bufferen en maximaal infiltreren op de site



Figuur 23: Andere voorbeelden van lokale opwaartse berging en infiltratie uit andere landen

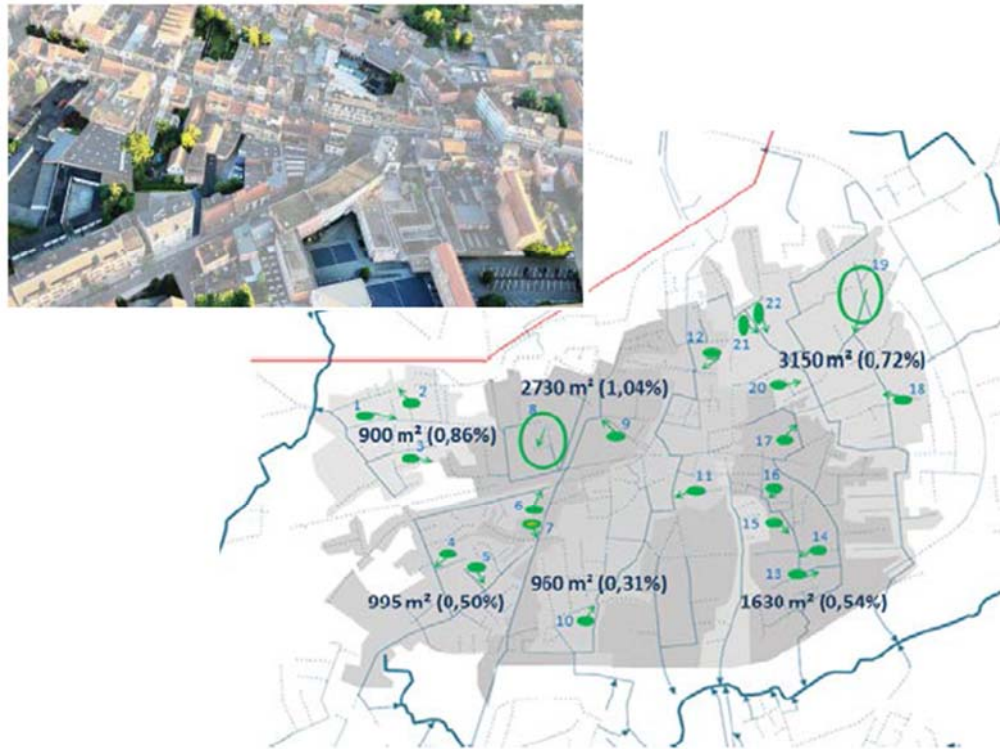
2.3 Een geïntegreerde benadering van ruimtelijke planning, stadsontwerp en stedelijk waterbeheer

Berging en infiltratie in de stedelijke omgeving via het doordacht aanleggen van lokale depressies, zoals in parken of andere groengebieden of open ruimtes in de stad, zoals recreatie-, sport- en speelgebieden (zie voorbeelden in foto's hiervoor), heeft naast de berging van het hemelwater het voordeel dat het geborgen water na de regenperiode infiltreert in de ondergrond, en alzo rechtstreeks bijdraagt tot het tegengaan van de verdroging. Het vereist echter een betere afstemming tussen stedelijke ruimtelijke planning, stadsontwerp en stedelijk waterbeheer (Nolf et al., 2012a). Dergelijke afstemming wordt reeds geruime tijd als ondermaats bestempeld; zie o.a. conclusies van het internationaal congres over “Water & Urban Development Paradigms” aan de KU Leuven op 15-17 september 2008. Dit vraagt structurele aanpassingen, zoals grondige herziening van de stedenbouwkundige wetgeving, betere afstemming tussen stedelijk waterbeheer en ruimtelijke ordening, stadsplanning, landbeheer, landbouw, groenbeheer, recreatiebeheer, beheer van de sportinfrastructuur, enz. Het vraagt ook een mentaliteitswijziging bij de bevolking (of financiële stimulansen, zoals een hemelwaterheffing), door regenwater niet langer via een goot of leiding snel af te voeren naar de riolering, maar het maximaal op eigen terrein natuurlijk te laten indringen in de ondergrond.

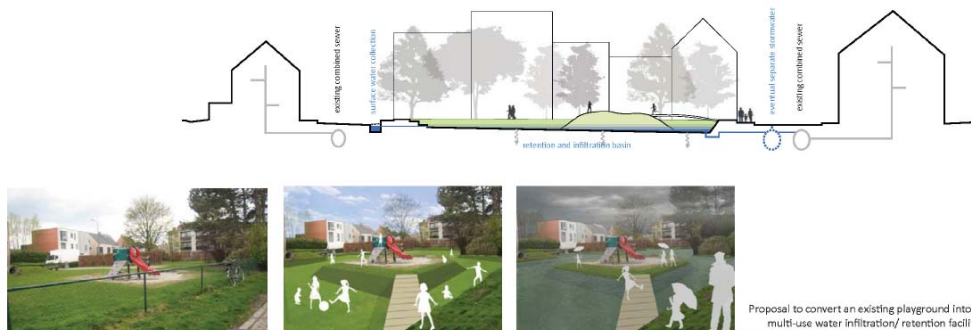
Verder vereist het infiltreren van stedelijk regenwater in de ondergrond dat men naast het waterkwantiteitsaspect ook rekening houdt met de waterkwaliteit. Andere aspecten die moeten bekeken worden zijn de invloed op de verkeersveiligheid, de verantwoordelijkheid van de wegbeheerder, maar ook de specifieke verantwoordelijkheden van de water- en rioolbeheerders, andere openbare domeinbeheerders, de individuele burgers (privéterreinen), de landbouw, enz.

In een concrete gevalstudie voor de stad Turnhout werd recent onderzocht welke concrete voordelen opwaartse buffering in de stad hebben op de vermindering van overstromingsrisico's langs zowel de riolering als de afwaartse waterloop (De Vleeschauwer et al., 2012, 2015; Nolf et al., 2012). De locaties in de stad waar lokale buffering mogelijk is in combinatie met andere ruimtelijke functies werden geïdentificeerd

na een interdisciplinaire samenwerking tussen waterbouwkundigen en stedelijke ontwerpers (Figuur 24, Figuur 25). 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-systeem haalbaar te maken, werden vereenvoudigd conceptuele modellen geïdentificeerd en gekalibreerd aan de gedetailleerde volledig hydrodynamische modellen.



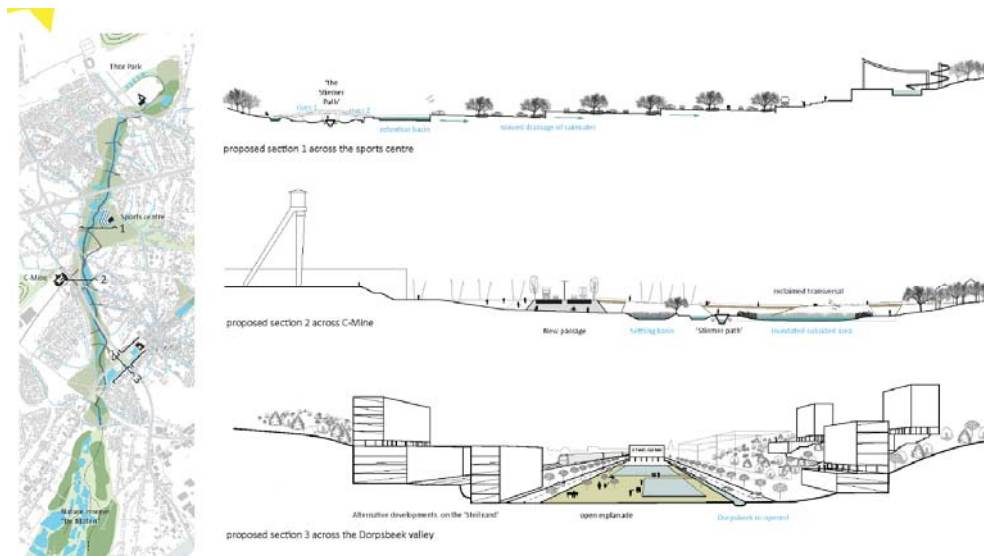
Figuur 24: Identificatie van groene zones in de stad die in aanmerking komen voor regenwaterberging en –infiltratie; voorbeeld Stad Turnhout (Nolf et al., 2012; De Vleeschauwer et al., 2012, 2015)



Figuur 25: 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 26, Figuur 27). 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 26: Voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een riviervallei in een hoog urbaan gebied



Red Ribbon Tanghe River Park, Qinhuangdao, China

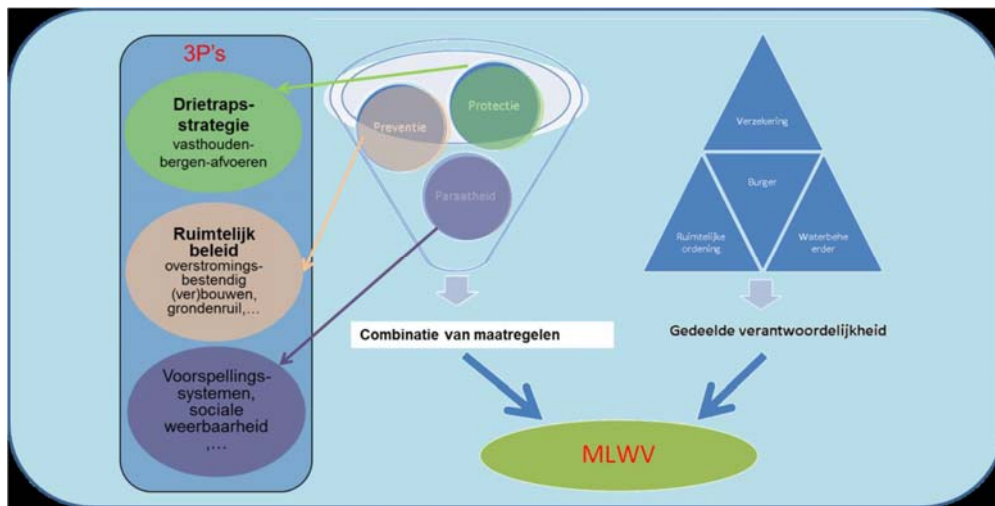


Environmental restoration of the Besòs River, Barcelona

Figuur 27: Andere voorbeelden van blauwgroene netwerken op macroniveau langs een riviervallei in een hoog urbaan gebied

2.4 Inzetten op een meerlaagse veiligheid

Zoals de ladder in Figuur 14 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 28: 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 28), 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 overstromingskans 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.



Overstromingen te Antwerpen, Merksem, Hoboken en Ekeren, 13-14 september 1998



Overstromingen te Antwerpen op 21 juni en 27 juli 2013



Overstromingen te Antwerpen op 16 augustus 2014

Figuur 29: Voorbeelden van recente overstromingen in Antwerpen

2.5 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 transitie 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 klimaattevoeluties 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).

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 rioleringsystemen - Deel 5 – Ontwerpneerslag: <http://www.integraalwaterbeleid.be/nl/publicaties/code-goede-praktijk-rioleringsystemen>, 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

