

Impact van de klimaatverandering op stedelijke overstromingen

Céline Van Havere

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor:

Prof. dr. ir. Patrick Willems

Assessoren:

Prof. dr. ir. Jean Berlamont

Prof. dr. ir. Jaak Monbaliu

Begeleiders:

ir. Andres Alfonso Gonzalez Iniguez

dr. ir. Vincent Wolfs

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Eén van de eerste zinnen die u hier leest, is tevens één van de laatste zinnen die ik in deze masterproef schrijf. Het ideale moment om een aantal mensen uitvoerig te bedanken, die bewust of onbewust bijgedragen hebben tot het voltooien van deze masterproef en mijn opleiding als Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor prof. dr. ir. Patrick Willems bedanken om mij de kans te geven dit onderwerp verder uit te diepen. Daarnaast wil ik hem bedanken om me te helpen mijn onderzoek in de juiste richting te sturen en om steeds een antwoord te bieden op al mijn prangende vragen. Vervolgens zou ik graag dr. ir. Vincent Wolfs en ir. Andres Alfonso Gonzalez Iniguez bedanken voor de begeleiding van dit onderzoek. Gedurende het hele jaar kon ik op elke moment bij hen terecht om vragen te stellen, mijn ideeën te bespreken of om raad te vragen. Bovendien zou ik dr. ir. Vincent Wolfs ook willen bedanken om mijn masterproef na te lezen en me te voorzien van de nodige feedback.

Studeren doe je niet alleen en daarom zou ik graag al mijn vrienden willen bedanken die bijgedragen hebben tot een zeer fijne tijd zowel aan de faculteit als in centrum Leuven. Ik wil hen bedanken voor alle steun die ik kreeg tijdens deze masterproef en mijn gehele opleiding maar ook voor de mooie momenten die we samen beleefden wanneer er niet gestudeerd werd. Vrienden voor het leven waarmee ik hopelijk nog vele leuke momenten kan beleven. Mijn speciale dank gaat uit naar Linde, Inge en Elien met wie ik vele groepswerken tot een goed einde heb gebracht en ervoor zorgden dat ik elke dag met een lach op mijn gezicht naar bouwkunde kwam.

Tot slot wil ik ook graag mijn gezin bedanken. Mijn ouders zou ik graag bedanken omdat ze me de kans gegeven hebben om deze studie aan te vangen. Ook wil ik hen bedanken voor de steun die ze me steeds geven en het geloof in mijn kunnen. Zonder hun steun was ik hier nooit geraakt. Daarnaast een welgemeende dankjewel aan mijn broer Henri. Hij staat altijd voor me klaar en zorgde voor de nodige afleiding tussen het studeren en het schrijven van deze mastproef door. Als laatste zou ik ook mijn vriend Matthias willen bedanken. Hij is mijn steun en toeverlaat en zorgde voor een aantal ingevingen voor de aanpak van deze masterproef door simpelweg te luisteren naar wat ik probeerde te verwezenlijken.

Céline Van Havere

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	v
Lijst van figuren en tabellen	vi
Lijst van afkortingen en symbolen	xiv
1 Inleiding	1
1.1 Situering van de studie	1
1.2 Doelstellingen en methodologie	3
2 Literatuurstudie	7
2.1 Invloed op steden ten gevolge van de klimaatverandering	7
2.2 Internationale studies	9
2.2.1 Australië	9
2.2.2 Europese steden	11
2.2.3 Londen	15
2.3 Kwetsbaarheidsanalyse bij wateroverlast in Gent	19
2.3.1 Wateroverlast vanuit rioleringen	19
2.3.2 Kwantificering van de schade	21
2.3.3 Besluit	22
2.4 Neerslagsstudie van Antwerpen	22
2.4.1 Resultaten	23
2.5 Voorbeeld van visualisatiemethode (CREST-project)	29
2.6 Besluit	31
3 Case Study	33
3.1 Het studiegebied	33
3.1.1 Demografische gegevens en ruimtegebruik	34
3.1.2 Klimaat en $C0_2$ -uitstoot	35
3.2 Beschikbare neerslagdata	37
3.2.1 Pluviograafgegevens	37
3.2.2 Radargegevens	39
3.2.3 Composietbuien van Ukkel	39
3.2.4 Composietbuien van Antwerpen	40
3.2.5 Gebruikte neerslaggegevens	40
3.3 Recentelijke overstromingen en kwetsbare gebieden	41

3.4	Beschikbare rioleringsmodel in InfoWorks ICM	44
3.4.1	Eigenschappen van het rioleringsmodel	45
3.5	Simulaties in InfoWorks ICM	47
3.5.1	Simulaties met behulp van flood cones	47
3.5.2	Simulaties met behulp van 2D mesh	48
3.5.3	Randvoorwaarden	49
3.5.4	Validatie van het netwerk	52
3.6	Besluit	53
4	Representatieve neerslagdata voor alle klimaatscenario's	55
4.1	Climate Perturbation Tool	55
4.1.1	Achtergrondinformatie	55
4.1.2	Toepassing van de Climate Perturbation Tool op de Deurnereeks	58
4.2	Statistische verwerking van de neerslagdata	58
4.2.1	Opstellen van IDF-curves van de geperturbeerde neerslagreeksen	59
4.2.2	Relatie tussen IDF-curves en composietbuien	61
4.2.3	Vergelijking van de neerslagdata	63
4.3	Resultaten	64
4.3.1	Grafische vergelijking van de IDF-curves	64
4.3.2	Grafische vergelijking op basis van neerslagkwantielen	68
4.3.3	Statistische vergelijking	70
4.3.4	Verklaring van de verschillen en besluit	72
4.4	Gebruikte neerslag in InfoWorks ICM en bijkomende validatie . . .	73
4.4.1	Uitgevoerde simulaties met de flood cones	74
4.4.2	Uitgevoerde simulaties met de 2D mesh	74
4.4.3	Bijkomende validatie	74
5	Visualisatiemethodes	79
5.1	1D-visualisatie: Frequentieverschuiving	80
5.1.1	Methodologie van de visualisatie van de frequentieverschuiving	80
5.1.2	Methodologie van visualisatie van de frequentieverschuiving met heatmaps	82
5.1.3	Resultaten	83
5.1.4	Koppeling van de frequentieverschuivingen aan de ontwerpregels van rioleringen en besluit	97
5.2	2D-Overstromingskaarten	98
5.2.1	1D naar 2D-visualisatiemethode: Uitspreidingsalgoritme . . .	98
5.2.2	2D-visualisatie op basis van een 2D mesh	104
5.2.3	Resultaten	106
5.2.4	Vergelijking van de 1D naar 2D-visualisatiemethode en de 2D-visualisatiemethode	118
5.2.5	Aanbevelingen ter verbetering en uitbreiding van het uitspreidingsalgoritme	126
5.3	Vergelijking van de methodes en besluit	128
6	Impact van hitte eiland effect op wateroverlast	130

6.1	Vergelijking van de composietbuien van Ukkel en Antwerpen	130
6.2	Vergelijking van de volumes water in de flood cones	133
6.3	1D naar 2D-visualisatiemethode op basis van het uitspreidingsalgoritme	136
6.4	Besluit	141
7	Communicatie naar externen en beleidsmakers	142
7.1	WebGIS	142
7.1.1	Methodologie	142
7.1.2	Resultaten	143
7.1.3	Toegang tot de WebGIS	144
7.2	Besluit	145
8	Besluit en aanbevelingen voor de toekomst	146
8.1	Besluit	146
8.2	Aanbevelingen voor de toekomst	148
A	IDF-curves van Ukkel en Deurne	153
A.1	IDF-Curves van Ukkel	153
A.2	IDF-Curves van Deurne	155
B	Neerslagdata Deurne en Ukkel	157
B.1	Vergelijkende data voor het huidige klimaat	157
B.2	Vergelijkende data voor het Midden Scenario	157
B.3	Vergelijkende data voor het Hoog Zomer Scenario	158
C	Visualisatie van de frequentieverschuiving	159
C.1	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden scenario .	159
C.2	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer scenario	166
D	Voorbeeld van een Matlab-file voor het opstellen van de heatmaps	176
E	1D naar 2D-visualisatiemethode: Overstromingskaarten per klimaatscenario en terugkeerperiode	180
F	2D-visualisatiemethode: Overstromingskaarten per klimaatscenario en terugkeerperiode	193
G	Voorbeeld van het uitspreidingsalgoritme met in rekening name van het ponding effect	206
H	Hitte eiland effect	208
	Bibliografie	218

Samenvatting

Klimaatverandering is niet meer te ontkennen. Meer en meer wordt de impact van klimaatverandering zichtbaar door de toenemende temperatuur op aarde en de toename in extreme neerslaggebeurtenissen. In het kader daarvan maakt deze masterproef een inschatting van de impact van de klimaatverandering op stedelijke overstromingen specifiek voor de stad Antwerpen. Representatieve neerslag wordt bepaald voor het gebied voor zowel het huidige klimaat als de toekomstige klimaatscenario's. Twee klimaatscenario's worden beschouwd in deze analyse: Het Midden scenario en het Hoog Zomer scenario voor de situatie in 2100.

Drie visualisatiemethodes worden uitgevoerd om de impact van klimaatverandering na te gaan. De eerste methode is een 1D-visualisatie die de verandering in terugkeerperiode van een neerslaggebeurtenis aangeeft waarvoor overstroming optreedt. Op deze manier wordt duidelijk wat de frequentieverschuiving is tussen het huidige klimaat en de scenario's. Het blijkt dat in het Midden scenario deze neerslaggebeurtenissen ongeveer 4 tot 5 keer sneller voorkomen, in het Hoog Zomer scenario loopt dit op tot factor 10. Vervolgens zijn 2D-overstromingskaarten opgesteld door gebruik te maken van twee verschillende methodes: Een 1D naar 2D-visualisatiemethode en een 2D-visualisatiemethode die beiden gebruik maken van simulaties in InfoWorks ICM. Deze overstromingskaarten tonen dat er vandaag al drie kwetsbare gebieden zijn: De Brederodewijk in Antwerpen-Zuid, het gebied rechts onder het Eilandje ter hoogte van Park Spoor Noord in Antwerpen-Noord en het gebied rechts van het stadspark. Onder invloed van het Midden scenario blijven dezelfde gebieden kwetsbaar en kennen de overstromingen er dezelfde uitgestrektheid zoals ook vandaag het geval is. Wel nemen de waterdieptes van de overstromingen toe met ongeveer 20 cm. In het geval van het Hoog Zomer scenario zullen de huidige kwetsbare gebieden zich verder uitspreiden doorheen de stad. In vergelijking met het huidige klimaat is er een toename van de waterdieptes van bijna een halve meter.

Tot slot is ook het hitte eiland effect in de stad gekwantificeerd. Een neerslaggebeurtenis die gemiddeld gezien in Vlaanderen om de 20 jaar voorkomt zal in Antwerpen gemiddeld gezien om de ongeveer 5 jaar voorkomen. Het hitte eiland effect heeft een grote impact op de wateroverlast in de stad. Algemeen kan een bijkomende wateroverlast van 20 tot 30 cm verwacht worden bovenop de waterdieptes die bereikt zouden worden indien een gemiddelde Vlaamse neerslaggebeurtenis zich voordoet.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

1.1	Methodologie en opbouw van deze masterproef	5
2.1	Resultaten van de verschillende klimaatscenario's voor de gebieden nabij Sydney	10
2.2	Verandering in frequentie van de terugkeerperiodes op basis van de stochastische weergenerator voor de drie beschouwde studiezones nabij Sydney	11
2.3	Change Factors tussen de intensiteiten van het huidige klimaat en de beschouwde klimaatscenario's (RCP4.5 en RCP8.5) voor de vier beschouwde Europese steden voor de periode 2081-2100	13
2.4	IDF-curves van de verschillende klimaatscenario's voor de vier Europese steden ter vergelijking van de neerslagintensiteiten	14
2.5	Voorbeelden van overstromingskaarten voor de stad Odense voor terugkeerperiode 10, 20, 50 en 100 jaar onder klimaatscenario RCP8.5 voor een periode van 2081-2100	15
2.6	Het aantal natte dagen per jaar met een neerslaghoeveelheid groter dan 12,5 mm voor zowel de zomer als de winter onder de beschouwde klimaatscenario's (rood: midden tot hoge emissies, blauw: midden tot lage emissies)	17
2.7	Toename in temperatuur op een warme zomerdag voor de stad Londen .	18
2.8	1D-visualisatie van knooppunten met mogelijke overstromingen voor een terugkeerperiode van 100 jaar voor het huidige klimaat in "The City of London"	19
2.9	Ruimtelijke spreiding op de neerslaggegevens in Antwerpen ($T > 1j$) [1] .	24
2.10	Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 2 jaar	25
2.11	Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 5 jaar	25

2.12	Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 20 jaar	26
2.13	Verandering van de maandgemiddelde hoeveelheid neerslag in Antwerpen	27
2.14	Verandering in natte dagen per maand in Antwerpen	27
2.15	Verandering in extreme dagneerslag in de zomer in Antwerpen	27
2.16	Kleurencode voor criticiteit van overstromingsrisico's	28
2.17	Vergelijking van kwetsbaarheid voor overstromingen in Antwerpen in het huidige klimaat bij gebruik van de composietbuizen van Ukkel (links) en de composietbuizen van Antwerpen (rechts)	29
2.18	Kwetsbaarheid voor overstromingen in Antwerpen onder het huidig klimaat (links boven), hoog klimaatscenario in 2030 (rechts boven), hoog klimaatscenario in 2050 (links onder) en hoog klimaatscenario in 2100 (rechts onder)	30
3.1	Stad Antwerpen en studiegebied	33
3.2	Aandeel van de verschillende sectoren in de CO_2 -uitstoot in stad Antwerpen	36
3.3	Weergave van de maandelijkse gemiddelde temperaturen en de maandelijkse gemiddelde neerslag in de stad Antwerpen	37
3.4	Pluviografen in regio Antwerpen	38
3.5	Radargebiedjes in Antwerpen	39
3.6	Plaatsen met wateroverlast door hevige regenbui op 30/5/2016	42
3.7	Wateroverlast in de Kennedytunnel op 10/8/2014 [2]	43
3.8	Overstroming van de Bredastraat op 21 juni 2013 [2]	43
3.9	Een selectie van een aantal plaatsen met wateroverlast tussen 2012 en 2016	44
3.10	InfoWorks ICM model van het studiegebied	45
3.11	Principe van flood cones	47
3.12	Impact van beschouwen van springtij op het rioleringsnetwerk: Vergelijking voor terugkeerperiode 2 jaar met links de situatie met springtij en rechts de situatie van vrije overstorting zonder springtij . .	50
3.13	Impact van beschouwen van springtij op het rioleringsnetwerk: Vergelijking voor terugkeerperiode 100 jaar met links de situatie met springtij en rechts de situatie van vrije overstorting zonder springtij . .	51
4.1	Climate Perturbation Tool	56
4.2	Input van de "Tailored climate scenario's for hydrological impact analysis in Belgium" voor perturbatie naar 2100	57
4.3	Schematische voorstelling van de Climate Perturbation Tool	58
4.4	Principe van bewegend venster [3]	59
4.5	Principe van IDF-curves	61
4.6	Voorstelling van opbouw van composietbuizen [4]	62
4.7	Voorbeeld van een composietbui [4]	63
4.8	Vergelijking van de IDF-curves voor het huidige klimaat voor een terugkeerperiode van 2 jaar	65

4.9	Vergelijking van de IDF-curves voor het huidige klimaat voor een terugkeerperiode van 10 jaar	66
4.10	Vergelijking van de IDF-curves voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 2 jaar	66
4.11	Vergelijking van de IDF-curves voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 10 jaar	67
4.12	Vergelijking van de IDF-curves voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 2 jaar	67
4.13	Vergelijking van de IDF-curves voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 10 jaar	68
4.14	Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het huidige klimaat voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u	69
4.15	Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u	69
4.16	Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u	70
4.17	Validatie van het InfoWorks ICM model op basis van de data tussen 2012 en 2016	77
4.18	Validatie van het InfoWorks ICM model op basis van de data voor 30 mei 2016	77
5.1	Aanduiding van zones in het studiegebied voor bespreking van de visualisatieresultaten	80
5.2	Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in een knooppunt voor het huidige klimaat op basis van de Ukkeldata	85
5.3	Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in een knooppunt voor het Midden klimaatscenario in 2100 op basis van de Ukkeldata	86
5.4	Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in een knooppunt voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 op basis van de Ukkeldata	87
5.5	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata	91
5.6	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata	92
5.7	Heatmap van de frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata	95
5.8	Heatmap van de frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata	96
5.9	Principe van het uitspreidingsalgoritme (1D naar 2D-visualisatie)	99
5.10	Pseudocode van het algoritme van Shapiro en Westervelt	99
5.11	Interface van het uitspreidingsalgoritme	100
5.12	Voorbeeld van resultaat van de 2D-simulaties in InfoWorks ICM onder de vorm van shapefiles	105

5.13	Voorbeeld van raster met de resultaten van de 2D-simulaties in InfoWorks ICM	106
5.14	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het huidige klimaat op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode	108
5.15	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Midden klimaatscenario in 2100 op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode	109
5.16	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode	110
5.17	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het huidige klimaat op basis van de 2D-visualisatiemethode	111
5.18	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Midden klimaatscenario in 2100 op basis van de 2D-visualisatiemethode	112
5.19	Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 op basis van de 2D-visualisatiemethode	113
5.20	Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het huidig klimaat . . .	120
5.21	Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het Midden scenario in 2100	122
5.22	Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het Hoog Zomer scenario in 2100	124
6.1	Vergelijking tussen de composietbuizen van Antwerpen en deze van Ukkel voor het huidige klimaat	131
6.2	Vergelijking tussen de composietbuizen van Antwerpen en deze van Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100	132
6.3	Vergelijking tussen de composietbuizen van Antwerpen en deze van Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100	132
6.4	Verschil van de overstromingsvolumes zoals gevonden voor de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen	135
6.5	Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het huidige klimaat	137
6.6	Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het Midden klimaatscenario in 2100	138
6.7	Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100	139
7.1	WebGIS op server van KULeuven	143

7.2	Voorbeeld van de WebGIS voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode . . .	144
7.3	Voorbeeld van de WebGIS voor de 2D-visualisatiemethode met aanduiding van tramlijnen	145
A.1	IDF-curves voor Ukkel voor het Huidige klimaat voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar	153
A.2	IDF-curves voor Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar	154
A.3	IDF-curves voor Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar	154
A.4	IDF-curves voor Deurne voor het huidige klimaat voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar	155
A.5	IDF-curves voor Deurne voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar	156
A.6	IDF-curves voor Deurne voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar	156
C.1	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Geen verandering in terugkeerperiode	160
C.2	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T25 naar T10	161
C.3	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T25	162
C.4	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T10 naar T2	163
C.5	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T10	164
C.6	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Geen overstroming in huidige klimaat, T100 in Midden scenario	165
C.7	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Geen verandering in terugkeerperiode	167
C.8	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Van T25 naar T10	168
C.9	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T25	169
C.10	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Van T10 naar T2	170
C.11	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T10	171
C.12	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Van T25 naar T2	172
C.13	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100: Geen overstroming in huidige klimaat, T100 in Hoog Zomer scenario	173

C.14	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100: Geen overstroming in huidige klimaat, T25 in Hoog Zomer scenario	174
C.15	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100: Geen overstroming in huidige klimaat, T10 in Hoog Zomer scenario	175
E.1	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat	181
E.2	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het huidige klimaat	182
E.3	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het huidige klimaat	183
E.4	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het huidige klimaat	184
E.5	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	185
E.6	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	186
E.7	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	187
E.8	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	188
E.9	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	189
E.10	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	190
E.11	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	191
E.12	1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	192
F.1	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat	194
F.2	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het huidige klimaat	195
F.3	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het huidige klimaat	196
F.4	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het huidige klimaat	197
F.5	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	198
F.6	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	199
F.7	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	200
F.8	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Midden klimaatsscenario in 2100	201

F.9	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	202
F.10	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	203
F.11	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	204
F.12	2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	205
G.1	Voorbeeld van het uitspreidingalgoritme met in rekening name van het ponding effect (10 mm) voor het huidige klimaat onder een terugkeerperiode van 100 jaar	207
H.1	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat	209
H.2	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het huidige klimaat	210
H.3	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het huidige klimaat	211
H.4	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden scenario in 2100	212
H.5	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het Midden scenario in 2100	213
H.6	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het Midden scenario in 2100	214
H.7	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100	215
H.8	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100	216
H.9	Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100	217

Lijst van tabellen

2.1	Samenvattend overzicht van de gebruikte methodes van de beschouwde studies	32
3.1	Aantal inwoners en de bevolkingsdichtheid per beschouwde deelgebied .	34
3.2	Aandeel in woongebied en type woning	34
3.3	Bebouwde oppervlakte en aandeel in bebouwde oppervlakte	35
3.4	Soorten knopen en aantallen in het rioleringsmodel	45
3.5	Soorten leidingen en aantallen in het rioleringsmodel	46
4.1	Procentuele verschillen tussen de neerslagdata van Deurne en Ussel voor alle klimaatsscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar	71

4.2	RMSE voor neerslagdata van Deurne en Ussel voor alle klimaatsscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar	71
4.3	NSE voor neerslagdata van Deurne en Ussel voor alle klimaatsscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar	72
4.4	Neerslagintensiteiten voor de verschillende historische neerslaggebeurtenissen en de duur van elke neerslaggebeurtenis	75
4.5	Terugkeerperiodes van de verschillende historische gebeurtenissen op basis van de IDF-curves van Ussel	76
4.6	Vergelijking model en werkelijkheid op basis van een selectie aan plaatsen waar overstromingen gemeld zijn aan de brandweer	76
5.1	Overzicht van de verschillende visualisatiemethodes gebruikt in deze masterproef	79
5.2	Gewichten toegekend aan de knopen met een bepaalde frequentieverschuiving voor de opmaak van heatmaps	83
5.3	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatsscenario in 2100	89
5.4	Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100	89
5.5	Overzicht van de behaalde rekentijden voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode door gebruik te maken van een rekencomputer, een gridcelgrootte van 1 m op 1 m en een tolerantiegrens van 1 cm	104
6.1	Vergelijking van de piekintensiteiten tussen de composietbuien van Ussel en de composietbuien van Antwerpen	133
6.2	Vergelijking van de volumes overstromingswater in de flood cones tussen de composietbuien van Ussel en de composietbuien van Antwerpen	134
B.1	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het huidige klimaat voor terugkeerperiode 2 jaar	157
B.2	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het huidige klimaat voor terugkeerperiode 10 jaar	157
B.3	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het Midden klimaatsscenario in 2100 voor terugkeerperiode 2 jaar	158
B.4	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het Midden klimaatsscenario in 2100 voor terugkeerperiode 10 jaar	158
B.5	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100 voor terugkeerperiode 2 jaar	158
B.6	Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100 voor terugkeerperiode 10 jaar	158

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Representative Concentration Pathway
GCM	General Circulation Model
RCM	Regional Climate Model
CF	Change Factor
PDS	Partial Duration Series
DHI	Danish Hydrological Insitute
DHMOV	Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen
GRB	Grootschalig Referentiebestand
LIDAR	Light Detection and Ranging
ETP	Potentiële evapotranspiratie
CREST	Climate Resilience Coast
WMS	Web Mapping Service
DHM	Digitaal Hoogtemodel
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
HIC	Hydrologisch Informatiecentrum
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
POT	Peak - Over - Threshold
IDF	Intensiteit-Duur-Frequentie
RMSE	Root Mean Square Error
NSE	Nash Sutcliff Model Efficiency
RWZI	Riool- en Waterzuiveringsinstallatie
WDPM	Wetland DEM Ponding Model
FTP	File Transfer Protocol

Symbolen

T	Terugkeerperiode
-----	------------------

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering van de studie

Dat het huidige klimaat veranderingen ondergaat, is vandaag de dag niet meer te ontkennen. Onder invloed van de toenemende broeikasgassen in de atmosfeer, kende de gemiddelde temperatuur op de aarde een stijging van ongeveer $0,85^{\circ}\text{C}$ tegenover eind 19e eeuw [5].

De toename of afname van de broeikasgassen in de toekomst hangt af van verschillende factoren en kan dus nog alle kanten uit. Modelleren van het toekomstige klimaat bevat bijgevolg een grote onzekerheid. Om hieraan tegemoet te komen en om globaal met dezelfde scenario's te werken, werden RCP's of Representative Concentration Pathways opgesteld in opdracht van en gepubliceerd door IPCC [6]. De RCP's worden gedefinieerd door de concentraties van de broeikasgassen en bijhorende zonnestralingskracht in 2100 zodanig te selecteren dat ze een hele range aan scenario's omvatten. Op basis daarvan zijn volgende 4 toekomstige scenario's opgesteld: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6. De getallen 8.5, 6.0, 4.5 en 2.6, allen in W/m^2 , wijzen op de stralingskracht die bereikt zal worden tegen 2100. Het scenario met stralingskracht tot $8.5 \text{ W}/\text{m}^2$ geeft de toestand aan die bereikt wordt in 2100 als er geen maatregelen genomen worden. Het is het meest pessimistische scenario met de hoogste toekomstige emissies. Het scenario met $2.6 \text{ W}/\text{m}^2$ geeft het scenario aan waarbij erg veel milderende maatregelen genomen zijn zodat de globale temperatuurstijging tegen 2100 kleiner is dan 2°C . De overige twee scenario's geven de stralingskrachten weer wanneer een aantal milderende maatregelen genomen worden. Alle scenario's dienen met een gelijke kans op voorkomen behandeld te worden [7]. Deze RCP scenario's kunnen gebruikt worden om klimaatmodellen voor toekomstige scenario's op te stellen en om de impact van de veranderingen te bestuderen in bijvoorbeeld stedelijke context.

Mondiale klimaatmodellen, de zogenaamde GCM's (General Circulation Models), nemen de invloed van de klimaatverandering in rekening. Deze modellen bevatten allerlei globale fysische processen en laten toe om op grote schaal (100-500 km) de impact van de verandering van de hoeveelheid broeikasgassen op het klimaat te

bepalen [8].

Om de invloed van klimaatwijzigingen op meer regionale schaal (20-50 km) te kennen, wordt gebruik gemaakt van statistische en dynamische neerschaling. Op deze manier worden mondiale klimaatmodellen omgezet naar regionale klimaatmodellen en nog specifiek naar steden en omgevingen [9]. De dynamische neerschalingen laten toe om de informatie van GCM's op kleinere schaal beschikbaar te stellen door de schaal van de gridcellen te verfijnen en de informatie van de GCM te projecteren naar de kleinere schaal. In het geval van statistische neerschaling wordt er gebruik gemaakt van empirische relaties tussen historische data en de huidige klimaatgegevens. Na het opstellen van de relaties kan de informatie van de GCM geprojecteerd worden naar toekomstige klimaatgegevens. Vaak worden beide methodes gecombineerd om de informatie te verzamelen voor de RCM (Regional Climate Model) [9].

Voor Europa betekent de verandering van het klimaat momenteel al een temperatuurstijging van 1,3 °C tegenover de pre-industriële periode. Verdere neerschaling naar België en meer bepaald Ukkel geeft nog een slechter resultaat, namelijk een toename van 2,4 °C tegenover dezelfde referentieperiode [10]. De impact van de klimaatverandering zal dus in België zeker een merkbare invloed hebben.

Uitgaande van de klimaatmodellen en de RCP's werden verschillende studies uitgevoerd om de impact van de toenemende broeikasgassen op het klimaat te kennen. Een voorbeeld is een studie van H. Tabari et Al. [7] waarin de RCP's gebruikt zijn om de huidige neerslagreeksen van België om te zetten naar neerslagreeksen voor een "hoog", "midden" en "laag" klimaatscenario. Op basis van onder meer deze studie volgde dat de zomermaanden in de toekomst droger zullen worden met mogelijk een tekort aan water. Echter zal er wel een toename zijn in de neerslagintensiteiten bij eventuele zomeronweders. De wintermaanden daarentegen zullen natter worden dan het huidige klimaat. Beide evoluties zullen zorgen voor een mogelijke toename in het aantal of de intensiteit van overstromingen.

De verklaring voor deze toenemende neerslagintensiteiten is terug te vinden in de stijgende temperaturen ten gevolge van de klimaatverandering door een toename van de verzadigingsconcentratie van waterdamp in de atmosfeer. Dit komt er concreet op neer dat door de temperatuurstijging meer waterdamp wordt opgeslagen in de lucht alvorens de verzadigingsdampdruk wordt bereikt en de waterdamp omgezet wordt in neerslag. Langere periodes van droogte zullen dus afgewisseld worden met neerslagperiodes met grotere neerslagintensiteiten en mogelijk overstromingen [11].

Het klimaat in België zal dus conform de klimaatverandering op mondiaal vlak grote wijzigingen kennen door de verandering in broeikasgassen waardoor steden kwetsbaarder worden voor overstromingen. Er zijn eveneens een aantal andere factoren die zorgen voor een bijkomende kwetsbaarheid van de steden voor overstromingen. Een voorbeeld hiervan is de toenemende verharding. Vooral Vlaanderen zal hiervan de grootste invloed ondervinden wegens de grote toename in verharding in het Vlaamse landschap [12]. Waar Vlaanderen in 1976 slechts 2 á 3 % verhard was, is vandaag de dag ongeveer 12% verhard. Deze toenemende verharding zorgt dat neerslag minder goed kan infiltreren in de grond en er bijgevolg een grotere

en snellere neerslagafstroming is. Al het neerslagwater moet zo afgevoerd worden via de rioleringen wat een verhoging van de piekdebieten en een verhoogde kans op overstromingen met zich meebrengt [13]. De grootste toename van de verharding in Vlaanderen situeert zich in Antwerpen [12]. Dit verklaart de kwetsbaarheid van de stad voor overstromingen en geeft onder meer aan waarom de stad Antwerpen onderwerp is van deze masterproef. Om deze sterke toename van de verharding tegen te gaan, is het beleid omtrent de betonstop tot stand gekomen. Deze betonstop stelt dat er tegen 2040 geen extra verharding meer mag bijkomen [14].

Een bijkomende invloed van de verharding is het zogenaamde hitte eiland effect[10]. De verharding zorgt voor een opslag van de warmte. Hierdoor neemt de temperatuur in stedelijke omgeving toe bovenop de temperatuuroptename door de klimaatverandering. Wederom verhoogt de verzadigingsdampdruk en krijgt de stad te maken met verhoogde neerslagintensiteiten [10].

De stad Antwerpen krijgt dus te maken met twee problemen, enerzijds verhoogt het risico op overstromingen en anderzijds zal het zeer hoge temperaturen kennen en bijgevolg mogelijks problemen met een tekort aan grondwater bij lange droge periodes en gezondheidsproblemen voor de mensen in de stad. De leefbaarheid in de stad gaat hierdoor waarschijnlijk achteruit. Maatregelen zijn nodig om de stad te beschermen tegen de gevolgen van de klimaatproblematiek. Beleidsmakers moeten bewust worden van deze problemen en moeten actie ondernemen om de leefbaarheid in de stad te behouden en het welzijn van mens en natuur te beschermen.

1.2 Doelstellingen en methodologie

Naar aanleiding van de klimaatveranderingsproblematiek zal deze studie dieper ingaan op de kwetsbaarheid van Antwerpen. De impact van de klimaatverandering op een eventuele toename aan overstromingen in het centrum van de stad zal beschouwd worden. Deze studie zal zich enkel richten op de invloed van de klimaatverandering op neerslagintensiteiten.

De **hoofddoelstelling** van deze masterproef is het nagaan van de impact van klimaatverandering op stedelijke overstroming en meer specifiek de impact van de klimaatverandering op overstromingen in de stad Antwerpen. Er wordt nagegaan wat de toename is in overstromingen onder de verschillende klimaatscenario's en wat de kwetsbare gebieden zijn binnen de stad. Deze hoofddoelstelling kan opgesplitst worden in 3 subdoelstellingen:

1. Verzamelen en analyseren van de gegevens: Bepalen van de representatieve neerslag voor zowel huidige als toekomstige klimaat.
2. Kwantificeren van de impact van klimaatverandering op overstromingen.
3. Visualiseren en communiceren van de resultaten door middel van overstromingskaarten.

De opbouw van deze masterproef en de verdere detaillering van deze subdoelstellingen kan meteen uitgelegd worden en gekoppeld worden aan de methodologie van deze masterproef. De methodologie is schematisch weergegeven in onderstaande figuur 1.1.

De eerste stap in deze masterproef omvat een overzicht in hoofdstuk 2 van eerder uitgevoerde studies in verband met dit onderwerp. Verschillende internationale voorbeelden worden aangehaald. Er wordt voornamelijk gefocust op de methodes gebruikt in deze studies inzake de kwantificering van de klimaatimpact. Meer informatie omtrent het studiegebied van deze mastproef wordt gegeven in hoofdstuk 3.

Vervolgens worden de verschillende doelstellingen uitgewerkt. De eerste subdoelstelling is het verzamelen en analyseren van de gegevens. Dit omvat de bepaling van de representatieve neerslag om de impact van de klimaatverandering te onderzoeken. Uitgaande van de verschillende beschikbare neerslagdata, zal aangetoond worden dat de neerslagreeks van Deurne gebruikt wordt in de analyse. Deze neerslagreeks dient geperturbeerd te worden zodanig dat de reeks representatief is voor de verschillende klimaatscenario's door middel van de Climate Perturbation tool.

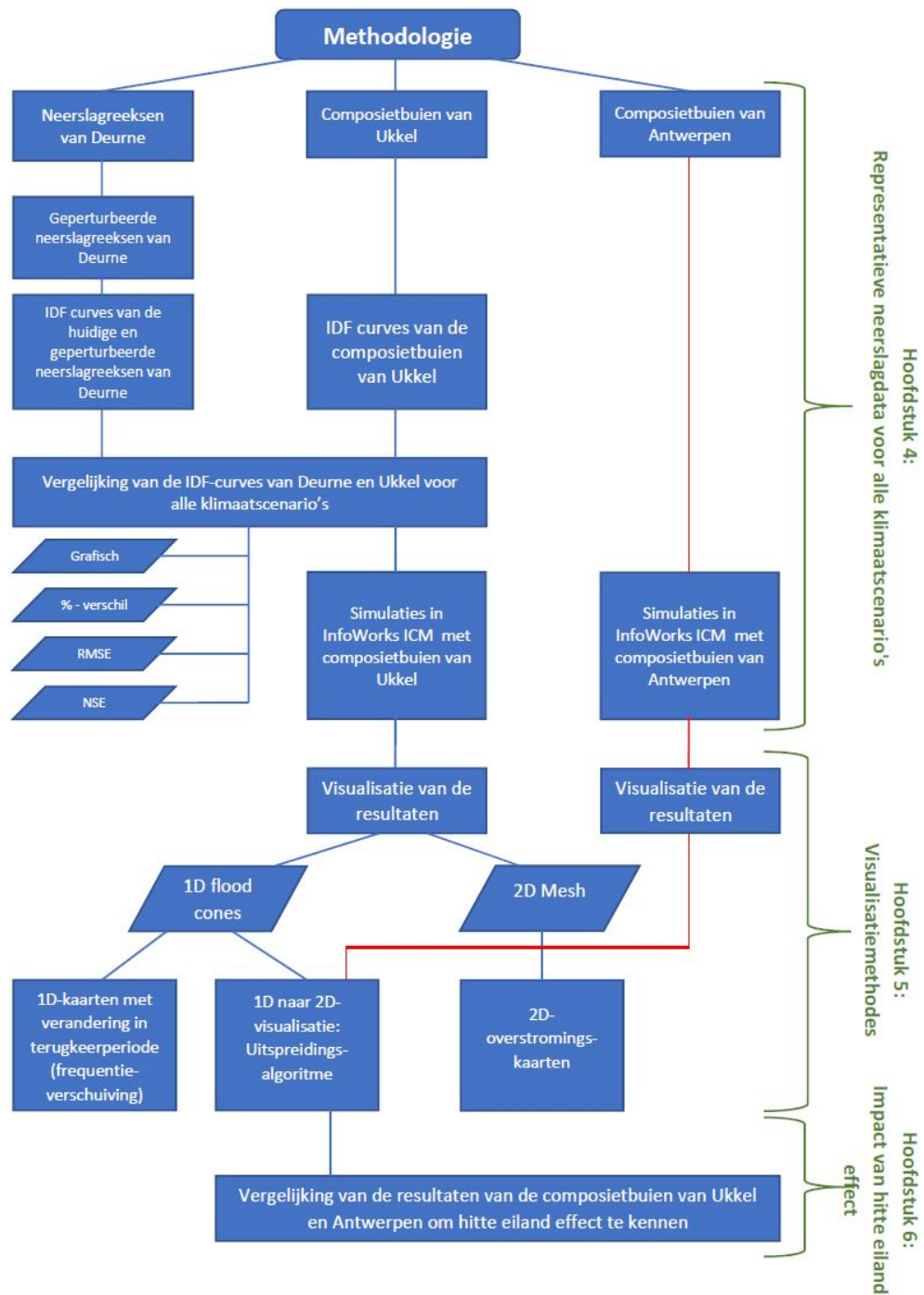
De Deurnereeks is een neerslagreeks met een lengte van 30 jaar waardoor simulaties in Infoworks ICM erg veel tijd zouden kosten. Om deze rekentijd te reduceren kunnen composietbuien opgesteld worden van de neerslagreeksen van Deurne of kunnen bestaande composietbuien gebruikt worden die overeenkomen met de neerslagreeksen van Deurne in alle klimaatscenario's. De composietbuien van Ussel zijn hiervoor geschikt. De vergelijking van de Ussel- en Deurnedata wordt gedaan door IDF-curves op te stellen voor beide neerslagdata. De IDF-curves worden dan zowel grafisch, met behulp van neerslagkwantielen, als statistisch met behulp van het procentueel verschil, de RMSE en de NSE vergeleken.

De uitwerking van deze subdoelstelling is terug te vinden in hoofdstuk 4 van deze masterproef.

Na vergelijking van de neerslagdata worden de simulaties in Infoworks ICM uitgevoerd. Dit valt onder de tweede subdoelstelling: Kwantificeren van de impact van klimaatverandering op overstromingen. De simulatie kan gebeuren met enerzijds flood cones en anderzijds een 2D mesh. De flood cones zijn omgekeerde kegels aan elk knooppunt in het model waarin het overstromingswater opgeslagen wordt in plaats van dat het water gesimuleerd wordt in de straat zoals in het geval van een 2D mesh. De achterliggende informatie over het rioleringsnetwerk is terug te vinden in hoofdstuk 3 van deze masterproef. De uitgevoerde simulaties worden meegegeven in hoofdstuk 4.

Van zodra de simulaties uitgevoerd zijn kunnen de simulatieresultaten gevisualiseerd worden om de impact van de klimaatverandering aan te tonen. Dit omvat de derde subdoelstelling van deze masterproef: Visualiseren en communiceren. Drie visualisatiemethodes zullen aan bod komen in deze masterproef.

Een eerste methode baseert zich op de flood cones en geeft op kaarten de verandering in terugkeerperiode aan van de neerslaggebeurtenissen waarvoor een knooppunt in



Figuur 1.1: Methodologie en opbouw van deze masterproef

het model overstroomt. Hiermee wordt een eerste idee gevormd van de impact van de klimaatwijziging.

Een tweede methode, eveneens gebaseerd op de flood cones, omvat een 1D naar 2D-visualisatie. Het water in de flood cones zal via een uitspreidingsalgoritme op straat gebracht worden om zo een 2D-beeld te krijgen van de overstromingen die zich voordoen.

De derde methode baseert zich op de 2D mesh. Hierbij wordt reeds het water op de straat gesimuleerd. Door deze simulatieresultaten te exporteren naar een GIS-programma kunnen eenvoudig 2D-overstromingskaarten gemaakt worden.

De hele methodologie en resultaten van deze drie visualisatiemethodes is terug te vinden in hoofdstuk 5.

Ook kunnen de composietbuien van Antwerpen gebruikt worden om de impact van het hitte eiland effect te kwantificeren. Hoofdstuk 6 zal starten met een vergelijking van de composietbuien van Ukkel en de composietbuien van Antwerpen om te bepalen wat het verschil is in neerslagintensiteiten ten gevolge van het hitte eiland effect. Vervolgens zal er nagegaan worden hoeveel extra water er op straat komt te staan bij een eventuele overstromingen. Tot slot zal de 1D naar 2D-visualisatiemethode uitgevoerd worden op de simulatieresultaten van de composietbuien van Antwerpen om de overstromingsgebieden na te gaan als gevolg van het hitte eiland effect.

Doorheen de masterproef wordt getracht alles op een duidelijk manier te visualiseren en te communiceren zodat beleidsmakers bewust worden van deze problematiek en deze resultaten kunnen gebruiken in eventuele investeringsprojecten. Hoofdstuk 7 gaat hier specifiek op in en toont een WebGIS die toelaat aan beleidsmakers om op interactieve wijze na te gaan wat de kritische gebieden zijn binnen de stad Antwerpen.

Tot slot worden de belangrijkste besluiten en aanbevelingen voor de toekomst in hoofdstuk 8 meegegeven.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

Aangezien klimaatverandering een topic is dat een grote interesse kent op internationaal vlak, zijn er erg veel studies terug te vinden rond impact van klimaatverandering in steden. De meeste van deze studies focussen echter op de impact van de zeespiegelstijging ten gevolge van de klimaatverandering op steden gelegen in kustgebieden. Meer inlandse steden die weinig tot geen invloed kennen van de zeespiegelstijging, maar kwetsbaarder worden ten gevolge van de toenemende neerslagintensiteiten, zijn minder onderwerp van klimaatimpactstudies. Toch zijn een aantal voorbeelden gevonden in de literatuur die in dit hoofdstuk kort overlopen zullen worden. Al deze voorbeelden tonen aan dat verschillende manieren mogelijk zijn om huidige neerslag om te zetten naar neerslag representatief voor het toekomstige klimaat maar dat de resultaten die volgen uit al deze studies min of meer overeenkomen: Zomers kennen langere droge periodes maar de neerslagintensiteiten nemen toe waardoor meer overstromingen verwacht worden [7].

Het eerste deel van dit hoofdstuk bespreekt algemeen wat er precies verandert in steden ten gevolge van de klimaatwijziging en wat de invloed daarvan is op de verschillende aspecten van het stadsgebeuren (bevolking, leefbaarheid, economie, etc.). Nadien worden een aantal internationale voorbeelden gegeven van studies die de impact beschouwen van de klimaatverandering in stedelijke context. Vervolgens wordt overgegaan naar studies die in Vlaanderen reeds uitgevoerd zijn om de impact van de klimaatverandering te kwantificeren. Een kwetsbaarheidsstudie voor de stad Gent wordt besproken en een reeds bestaande studie van Antwerpen wordt ook meegegeven.

2.1 Invloed op steden ten gevolge van de klimaatverandering

Algemeen geldt dat onder invloed van de klimaatverandering en de bijhorende toename in temperatuur op de aarde, het in de wintermaanden natter zal worden. In de zomer echter zullen er langere droge periodes zijn die afgewisseld zullen worden met neerslagperiodes met een verhoogde neerslagintensiteit tegenover het huidige klimaat.

Voornamelijk deze zomeroverstromingen zorgen voor een grotere kwetsbaarheid van steden [7, 15, 16]. Bijgevolg komt de kwaliteit van de leefomgeving onder druk te staan en leidt dit tot materiële en economische schade maar ook tot schade aan de gezondheid van de inwoners van steden [15]. Ongeveer de helft van de wereldbevolking woont in steden, een aantal dat in de toekomst alleen nog maar zal stijgen [17]. Een integrale aanpak is nodig om de impact van de klimaatverandering te beperken. Zoals gesteld in [15] geldt er dat: “Het aanpassen aan het veranderend klimaat is een geleidelijk proces waarbij elke ingreep in de openbare ruimte kan worden aangewend om de klimaatbestendigheid te vergroten.” De belangrijkste invloeden op stedelijke inlandse omgevingen zoals beschreven in de literatuur [17] worden hier kort meegegeven. Een verdere detaillering van deze invloeden zijn terug te vinden in verscheidene internationale studies zoals aangegeven in [17].

- *Overstromingen zorgen voor schade aan gebouwen en infrastructuur*
Deze schade zorgt voor grote economische kosten en kosten voor herstellingen die uitgevoerd moeten worden of omwille van het tot onbruik komen van het gebouw waardoor afbraak en wederopbouw nodig is. Daarnaast kan het ook leiden tot het verlies van woningen met alle gevolgen van dien voor de inwoners.
- *Hitte eiland effect*
Ten gevolge van de temperatuurstijging zullen steden meer warmte opslaan en wordt bijgevolg de temperatuur in steden nog hoger dan enkel de toename van de klimaatverandering. Dit brengt met zich mee dat er grotere neerslagintensiteiten te verwachten zijn en dat de leefbaarheid in de stad achteruitgaat omwille van de hoge temperaturen.
- *Verandering in het energieverbruik*
Ten gevolge van de klimaatverandering zal er in de zomer een hogere energievraag zijn voor airco-systemen. Dit heeft economisch een grote impact maar verhoogt bovendien de druk op het milieu ten gevolge van de hogere energievraag.
- *Impact op de gezondheid van de inwoners van de stad*
Klimaatverandering heeft een directe en indirecte impact op de gezondheid van de mensen door de stijgende temperaturen. De directe impact houdt in dat voornamelijk erg jonge kinderen en ouderen kwetsbaar zijn voor hoge temperaturen en langdurige hitte. Ten gevolge van de hogere temperaturen wordt ook een hogere graad van verspreiding van virussen en ziektes bereikt. Een voorbeeld van zo een indirecte impact is Salmonella dat potentieel meer kan voorkomen ten gevolge van de temperatuurstijging. Een andere indirecte impact zijn gewonden en in zeer uiterste gevallen doden die vallen ten gevolge van de overstromingen die frequenter en groter worden onder invloed van de klimaatverandering.
- *Invloed op beschikbaarheid van drinkbaar water*
Onder invloed van de stijgende temperaturen kent het water op aarde een

snellere verdamping en zal er bovendien een grotere vraag zijn naar drinkbaar water. Daarnaast zorgt verharding voor minder infiltratie van regenwater in de grond en kan langdurige droogte ervoor zorgen dat de watervoorzieningen niet aangevuld worden. In vele gevallen zal de grotere vraag naar drinkwater niet gecompenseerd worden door een groter aanbod van drinkbaar water waardoor er een risico is op waterschaarste.

- *Impact op biodiversiteit en ecosystemen*

2.2 Internationale studies

2.2.1 Australië

In deze studie [18], uitgevoerd door S.YU. Schreider et al., wordt een inschatting gemaakt van de mogelijke schade die aangericht wordt ten gevolge van een toename in overstromingen door de verandering van het klimaat. Er wordt gekeken naar de toename in frequentie en grootte van de overstromingen en de bijhorende neerslagintensiteiten. Uitgaande van deze resultaten wordt de mogelijke schade ten gevolge van de overstromingen bepaald. Het studiegebied waarvoor dit onderzoek is ingesteld zijn drie gebieden in Australië, gelegen nabij Sydney [18].

De studie focust zich niet op overstromingen in stedelijke context ten gevolge van het bereiken van de capaciteit van de riolering. Toch is deze studie interessant aangezien twee methodes besproken worden om de huidige beschikbare neerslagdata om te zetten naar neerslag representatief voor de toekomstige klimaatsituaties. Enerzijds wordt er gewerkt met een benadering op basis van klimaatscenario's. Anderzijds wordt er uitgegaan van een stochastische weergenerator. Beide methodes zoals besproken in deze studie worden hier kort samengevat. Eveneens worden de resultaten van de studie aangegeven.

De benadering met de klimaatscenario's baseert zich op resultaten van vijf GCM's beschikbaar gesteld voor Australië, die een range aan veranderingen in temperatuur en neerslag bevatten. Historische neerslagreeksen zijn lineair getransformeerd naar de klimaatscenario's waaruit twee extreme situaties volgen: 'Meest nat' en 'meest droog' scenario. De klimaatscenario's zijn opgesteld voor 2030 en 2070 [18].

Resultaten van deze klimaatscenario's gebaseerd op de GCM's zijn te zien in onderstaande figuur 2.1 overgenomen uit [18].

De tabel toont aan wat de verandering is in temperatuur per scenario en wat de verandering is in neerslag in de zomer en de winter onder de twee klimaatscenario's en voor beide tijdshorizonten. Door de huidige dagelijkse temperaturen te verhogen met de te verwachten temperatuurstijgingen per scenario en deze verandering te koppelen aan het aanpassen van de bijhorende neerslag voor de natte dagen in het huidige klimaat, wordt de neerslagdata gevonden voor de toekomstige klimaatscenario's [18]. In de tabel is te zien dat er wel degelijk een verandering zal zijn in de neerslagintensiteiten. "Het 'meest droog' scenario geeft de toestand aan waarbij de temperatuur

Scenario	Warming (°C)	Changes in precipitation (summer)	Changes in precipitation (winter)
'most dry' 2030	1.3	0%	-4%
'most wet' 2030	0.6	8%	0%
'most dry' 2070	3.4	0%	-10%
'most wet' 2070	1.7	20%	0%

Figuur 2.1: Resultaten van de verschillende klimaatscenario's voor de gebieden nabij Sydney

een maximale toename kent en de neerslag een maximale afname kent. Het 'meest natte' scenario omvat de toestand waarbij de neerslag een maximale toename kent en de temperatuur de kleinste stijging kent die overeenkomt met de toename in neerslag" (omwille van het verband tussen temperatuur en neerslag zoals uitgelegd in de inleiding) [18].

Er moet wel genuanceerd worden dat de GCM's die gebruikt zijn in deze studie dateren uit 1996 terwijl de impact van de klimaatverandering ondertussen al verder gevorderd is. Daarnaast zijn de gebruikte neerslagreeksen niet erg lang waardoor de impact van de klimaatverandering moeilijk te achterhalen is voor neerslaggebeurtenissen met een terugkeerperiode groter dan 20 jaar [18].

Een alternatief voor het aanpassen van de huidige neerslagreeksen naar het toekomstige klimaat is voorgesteld in deze studie en maakt gebruik van een stochastische weergenerator. Op deze manier kunnen lange neerslagreeksen gevormd worden voor een bepaalde locatie gebaseerd op statistische karakteristieken van het weer op die locatie [19]. Grotere terugkeerperiodes dan 20 jaar kunnen hierdoor geanalyseerd worden.

Een neerslagreeks van 1000 jaar is opgesteld voor de verschillende locaties waarbij ervan uitgegaan is dat de $C0_2$ -hoeveelheid in de atmosfeer in de toekomst verdubbelt tegenover de huidige situatie. Wanneer de verdubbeling van de $C0_2$ -hoeveelheid zich voordoet is omwille van een grote aantal onzekerheden moeilijk te bepalen. De parameters die deze verdubbeling beschrijven, zijn afgeleid uit één van de vijf gebruikte GCM's voor de bepaling van de klimaatscenario's. Wanneer de resultaten van de stochastische weergenerator dan vergeleken worden met de resultaten van het klimaatscenario 'meest droog' voor 2070, volgt uit deze studie dat de stochastische weergenerator een grotere toename kent in temperatuur en gemiddelde jaarlijkse neerslag tot wel 50% [18].

Een nadeel van de stochastische neerslaggenerator is wel dat de lengte van de datareeks waarop de 1000-jarige reeks gebaseerd is, ook relatief kort is waardoor fouten kunnen voorkomen ten gevolge van de extrapolatie van de neerslagreeks. Daarnaast baseert de methode zich ook slechts op één GCM in tegenstelling tot de methode met de klimaatscenario's die vijf GCM's beschouwt en bijgevolg een aantal onzekerheden kan verkleinen. De studie geeft toch de voorkeur aan de stochastische

neerslaggenerator als methode voor het bepalen van de verandering in de neerslag [18].

Na het bepalen van de neerslagreeksen voor zowel het huidige klimaat als neerslagreeksen voor de toekomstige klimaatscenario's wordt alles ingeladen in het conceptuele 'rainfall-runoff' model IHACRES. Het model heeft als doel om uitgaande van de input van temperatuur en neerslag te voorspellen wat de afstroming is van het regenwater en wat bijgevolg plaatsen zijn waar overstroming optreedt [20]. Deze methode valt buiten het bestek van deze masterproef en wordt daarom ook niet verder besproken. Uitgaande van deze modellering kan dan bepaald worden met welke frequentie de overstromingen sneller zullen voorkomen voor de drie beschouwde gebieden van deze studie. De resultaten zijn te zien in onderstaande figuur 2.2 overgenomen uit [18]. ARI in de figuur geeft de terugkeerperiode aan. De factoren tussen de terugkeerperiodes liggen voor het eerste en het derde gebied rond 2,5 tot 3, voor het tweede gebied lopen deze factoren zelfs op tot een factor 5 tot 10 [18].

ARI (years)	The Upper Parramatta catchment		The Queanbeyan catchment		The Hawkesbury-Nepean corridor	
	Discharge value for the present, cumecs	Change in frequency (ARI under $2 \times \text{CO}_2$) for the flow events of this magnitude (years)	Discharge value for the present, cumecs	Change in frequency (ARI under $2 \times \text{CO}_2$) for the flow events of this magnitude (years)	Discharge value for the present, cumecs	Change in frequency (ARI under $2 \times \text{CO}_2$) for the flow events of this magnitude (years)
5	86.2	2	83.4	1	16.9	1.7
10	118.2	3.3	104.8	1.8	n/a	n/a
20	n/a	n/a	n/a	n/a	23.9	3.2
50	252	17	158.2	5.8	n/a	n/a
100	362	44	182.2	9.4	68.3	35.7
1000	1134	400	361.4	100	242.3	500

Figuur 2.2: Verandering in frequentie van de terugkeerperiodes op basis van de stochastische weergenerator voor de drie beschouwde studiezones nabij Sydney

2.2.2 Europese steden

Zoals reeds verklaard in de inleiding van deze masterproef, zullen steden meer kwetsbaar worden voor overstromingen ten gevolge van klimaatverandering en zal deze kwetsbaarheid versterkt worden door de toename van verharding die de stedelijke ontwikkeling met zich meebrengt. Een interessante studie uit 2017 [16], uitgevoerd aan de Technische Universiteit van Denemarken (DTU), focust op deze invloed van klimaatverandering en de stedelijk ontwikkeling op overstromingen in stedelijk omgeving. Vier steden worden in deze studie geanalyseerd: Nice, Wenen, Straatsburg en Odense. Deze vier steden zijn gekozen omdat ze verschillende klimatologische condities kennen en omdat ze ook een verschil kennen in topografie en ondergrond [16].

Om het verschil in landgebruik aan te tonen is de toestand tussen 1984 en 2014 beschouwd door middel van satellietdata en is een schatting gemaakt voor de toekomst hoe het landgebruik verder zal evolueren. De impact van de verandering is

vooral van belang voor matige neerslaggebeurtenissen. De reden hiervoor is dat doorlatende grond onder invloed van een erg hevige regenbui zeer snel verzadigd geraakt en bijgevolg het water afstroomt alsof het een verhard oppervlak zou zijn. Bij minder hevige regenbuien is die verzadiging trager en is er bijgevolg minder afstroming. Wanneer het oppervlak dan verhard wordt, geeft dit in verhouding een grotere afstroming voor een matige bui dan in het geval van een hevige regenbui. Alle vier de steden kenden een toename van 7 tot 12 % verharding gedurende de afgelopen 30 jaar [16].

De methodologie van deze studie kan samengevat worden in drie stappen [16]:

1. Nagaan wat de veranderingen zijn ten gevolge van de stedelijke ontwikkeling
2. Overstromingsmodellering
3. Kwantificeren van de invloed van klimaatverandering en stedelijke ontwikkeling op overstromingsrisico's

Overstromingskaarten zijn gegenereerd met de grootte en diepte van de overstroming voor verschillende combinaties van landgebruik, neerslagintensiteiten en klimaatscenario's. De beschouwde terugkeerperiodes zijn 10, 20, 50 en 100 jaar. In totaal zijn 84 verschillende combinaties opgesteld en vergeleken voor elke stad om na te gaan wat de invloed is op overstromingen in stedelijke context. Er zijn 12 combinaties toegepast op historische niveaus van verharding (1984) en 72 combinaties zijn toegepast op de huidige mate van verharding in de stad [16]. De modellering van hoe de verandering van verharding in kaart wordt gebracht is uitgebreid beschreven in deze studie maar is voor deze masterproef niet van belang en wordt bijgevolg achterwege gelaten.

Om de impact van klimaatverandering in rekening te brengen in de intensiteit van de neerslag, is in deze studie van DTU gebruik gemaakt van een zogenaamde "Change Factor" of kortweg CF. Deze factor geeft de inschatting van de verandering in neerslagintensiteiten tussen het huidige klimaat en de toekomstige klimaatscenario's [16]. De klimaatscenario's die beschouwd worden in deze studies baseren zich op RCP4.5 en RCP8.5 [16].

Een extreme-waarden-analyse is uitgevoerd voor zowel het huidige klimaat, voorgesteld door de periode van 1986 tot 2005, en voor het toekomstige klimaat, voorgesteld door de periode 2081 tot 2100, om de terugkeerperiodes van de verschillende extremen in de neerslagreeksen te bepalen. De extreme waarden uit de neerslagreeksen zijn bepaald door gebruik te maken van de Partial Duration Series (PDS). Nadat de extreme waarden zijn bepaald, is een Pareto-verdeling gebruikt om een inschatting te maken van de intensiteiten die horen bij de verschillende terugkeerperiodes [16]. Een ensemble van 10 regionale klimaatmodellen is gebruikt om de CF's te bepalen voor elke terugkeerperiode en voor alle beschouwde steden van deze studie. Drie CF's zijn dan telkens te onderscheiden voor elke stad en elk scenario: een CF voor het gemiddelde, een CF met het 90%-percentiel en een CF met het 10%-percentiel. De CF's zijn toegepast op de huidige neerslagreeksen om toekomstige neerslagdata te

verkrijgen. De resultaten van de extreme-waarden-analyse tonen een toename in de intensiteiten van de neerslag onder beide klimaatscenario's (RCP4.5 en RCP8.5)[16]. De verschillende change factors tussen de intensiteiten van het huidige klimaat en de beschouwde klimaatscenario's zijn te zien in onderstaande figuur 2.3 overgenomen uit [16].

Parameter	Return period	France Strasbourg		Austria Vienna		Denmark Odense		France Nice	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
90th percentile	RP 10	1.22	1.33	1.25	1.37	1.18	1.28	1.30	1.37
	RP 20	1.24	1.38	1.29	1.39	1.20	1.32	1.39	1.42
	RP 50	1.32	1.46	1.40	1.43	1.26	1.39	1.53	1.51
	RP 100	1.39	1.54	1.51	1.46	1.34	1.45	1.63	1.59
Average	RP 10	1.13	1.26	1.12	1.25	1.07	1.17	1.18	1.19
	RP 20	1.15	1.28	1.13	1.27	1.08	1.17	1.22	1.21
	RP 50	1.17	1.32	1.15	1.30	1.10	1.18	1.27	1.25
	RP 100	1.20	1.35	1.18	1.33	1.12	1.20	1.32	1.29
10th percentile	RP 10	1.06	1.14	1.01	1.17	1.01	1.09	1.06	1.02
	RP 20	1.04	1.12	1.00	1.14	0.98	1.08	1.03	1.00
	RP 50	1.02	1.09	0.98	1.12	0.97	1.04	1.05	1.00
	RP 100	1.00	1.08	0.96	1.13	0.96	1.00	1.07	1.01

Figuur 2.3: Change Factors tussen de intensiteiten van het huidige klimaat en de beschouwde klimaatscenario's (RCP4.5 en RCP8.5) voor de vier beschouwde Europese steden voor de periode 2081-2100

Van de verschillende neerslagreeksen voor alle klimaatscenario's zijn eveneens IDF-curves opgesteld om de verschillen in intensiteiten tussen de scenario's aan te tonen. Deze zijn te zien op figuur 2.4 die in de studie is weergegeven [16]. Uitgaande van zowel de CF's als van deze IDF-curves is duidelijk te zien dat beide klimaatscenario's (RCP4.5 en RCP8.5) een toename kennen in de neerslagintensiteiten. De mate van toename is verschillend voor de vier steden aangezien deze allen verschillend zijn in zowel klimatologische omstandigheden als in topografie [16].

Eenmaal de neerslagreeksen gekend zijn voor de verschillende klimaatscenario's, kunnen simulaties uitgevoerd worden om in te schatten wat de mate van overstromingen zullen zijn. Een overstroming ontstaat wanneer ofwel het rioleringsstelsel zijn capaciteit bereikt ofwel wanneer de grond verzadigd geraakt en bijgevolg geen opslagcapaciteit meer heeft [16].

Het gebruikte model om deze overstromingen ten gevolge van de hoge neerslagintensiteiten te bepalen is Mike 21 ontwikkeld door DHI. Dit model berekent de 2D-stroming van het overstromingswater gebaseerd op de input van de neerslagreeksen van de verschillende klimaatscenario's en de infiltratiemogelijkheid van de grond. Het model bevat geen modellering van het rioleringsstelsel. Het rioleringsstelsel is in rekening gebracht door neerslagintensiteit aan te passen over de volledige stedelijke omgeving naar een algemene maximale rioleringscapaciteit. Er wordt aangenomen dat de riolering een capaciteit heeft voor neerslag met een terugkeerperiode van 5 jaar. Hogere terugkeerperiodes zullen dus zorgen voor overstromingen. Uiteraard houdt deze benadering van het model zonder een werkelijke modellering van het rioleringsstelsel

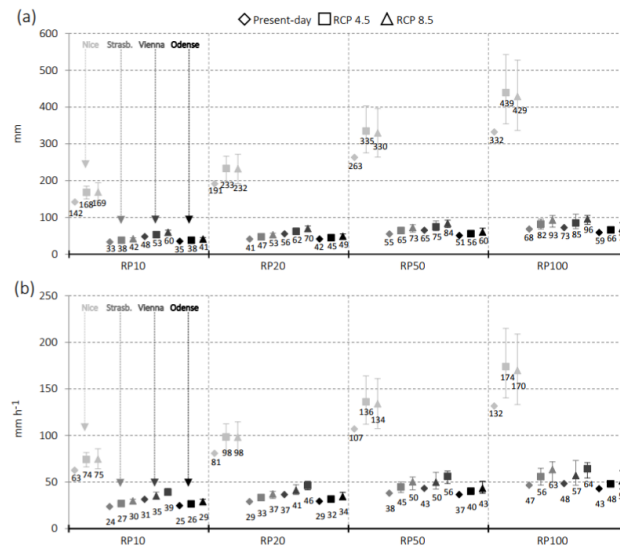


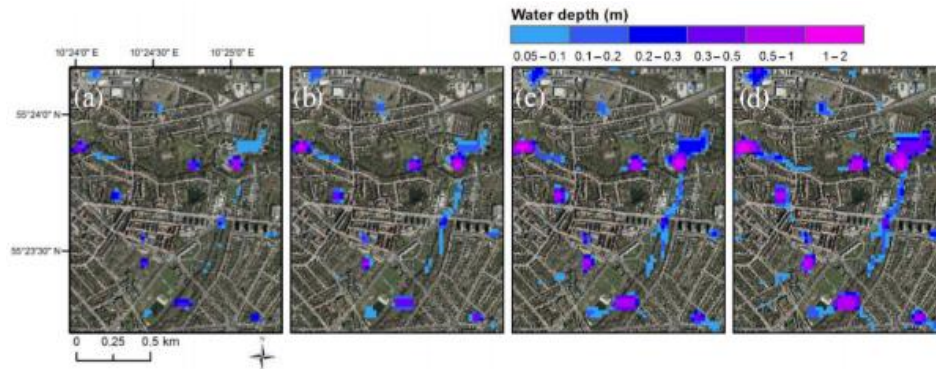
Figure 4. (a) Total precipitation and (b) maximum 1 h precipitation intensities during the individual design events for Nice, Strasbourg, Vienna and Odense. Total precipitation duration is 4 h. Error bars for the RCP 4.5 and RCP 8.5 represent low/high climate factors (CFs) respectively (low CF is in the 10th percentile and high CF is in the 90th percentile).

Figuur 2.4: IDF-curves van de verschillende klimaatscenario's voor de vier Europese steden ter vergelijking van de neerslagintensiteiten

wel een aantal onnauwkeurigheden in die leiden tot fouten in de grootte en locatie van overstromingen. Voor zeer extreme neerslagdata is wel aangenomen in de studie dat deze fouten reduceren en dat het model voor deze neerslaggebeurtenissen wel voldoende correct is [16].

De impact van deze klimaatverandering is onderzocht door uitgaande van deze 2D-modellering overstromingskaarten op te stellen met de maximale overstromingsdieptes. Een overstroming in deze studie is gedefinieerd wanneer het oppervlaktewater een diepte heeft groter dan 10 cm aangezien dit meestal de diepte is vanaf wanneer schade zich begint voor te doen. Een voorbeeld van een overstromingskaart is te zien op onderstaand figuur 2.5 voor de stad Odense overgenomen uit [16]. De vier figuren zijn representatief voor de vier beschouwde terugkeerperiodes voor klimaatscenario RCP8.5 voor de periode 2081 tot 2100. Het is duidelijk dat de stad problemen zal ondervinden met overstromingen. Zelfs voor terugkeerperiode 10 jaar zijn er een aantal plaatsen in de stad die hinder ondervinden met waterdieptes die oplopen tot 0,5 m. Voor een terugkeerperiode van 100 jaar zijn er zelfs verscheidene plaatsen die waterstanden kennen tot meer dan 1 m hoog [16].

Uitgaande van de analyse van de zowel de toename van intensiteiten en stedelijke ontwikkeling volgde dat een toename van 1% van verharding kan leiden tot een toename in overstromingen tot wel 10%. Het is dus duidelijk dat verharding een negatieve rol speelt bij de klimaatverandering. Daarnaast concludeert de studie ook dat een uitbreiding van de capaciteit van het rioleringsstelsel alleen niet volstaan



Figuur 2.5: Voorbeelden van overstromingskaarten voor de stad Odense voor terugkeerperiode 10, 20, 50 en 100 jaar onder klimaatscenario RCP8.5 voor een periode van 2081-2100

om weerstand te bieden aan de verhoging van de neerslagintensiteiten voor grote terugkeerperiodes onder de veranderende klimaatscenario's [16]. Andere oplossingen zijn bijgevolg nodig maar vallen buiten het bestek van deze masterproef.

2.2.3 Londen

Londen is niet alleen de hoofdstad van het Verenigd Koninkrijk maar is internationaal gezien ook een erg belangrijke stad met een groot aantal inwoners, toeristen en zakenmensen. Om na te gaan wat de invloed is van de klimaatverandering op de stad Londen is een studie uitgevoerd in opdracht van 'The London Climate Change Partnership' [21]. Deze studie omvat minder methodologische aspecten maar toont goed aan wat de mogelijke impact is ten gevolge van de klimaatverandering en kijkt ook naar de rol van de Theems in de stad die ook voor extra overstromingen kan zorgen, hoewel dit voornamelijk in de winter het geval is.

De klimaatscenario's die gebruikt zijn in deze studie, zijn gebaseerd op de SRES scenario's van het IPCC (A1F1 Hoge emissie, A2 Medium-hoge emissie, B1 lage emissie, B2 Medium-lage emissie) [21]. Deze scenario's zijn de voorlopers van de RCP's en dateren uit 2001. Specifiek voor deze studie is gebruik gemaakt van de UKCIP02 scenario's die de veranderingen in het klimaat in het Verenigd Koninkrijk beschrijven voor de 21e eeuw. De scenario's voor "Hoge emissie" en "Lage emissie" zijn bestudeerd in deze studie. Drie scenarioperiodes zijn beschouwd: 2020 (periode van 2011 tot 2040), 2050 (periode van 2041 tot 2070) en 2080 (periode van 2071 tot 2100). De periode die het huidige klimaat beschrijft is de periode van 1961 tot 1990 [21].

De verandering in temperatuur die de scenario's met zich meebrengen voor de periode 2071 tot 2100 bedraagt $2,2^{\circ}\text{C}$ voor het geval van de Lage emissies en ongeveer $4,2^{\circ}\text{C}$ voor het geval van de Hoge Emissies. De grootste temperatuursverandering doet zich voor in de zomermaanden. De neerslag in de winter voor scenarioperiode 2071 tot

2100 zal voor het scenario van de Lage emissies toenemen met 10 tot 20% terwijl het scenario met Hoge emissies een toename kent van 25 tot 35%. In de zomer echter zal er een daling zijn in de hoeveelheid neerslag, meer bepaald 30% in het Lage emissie scenario en 50% in het Hoge emissie scenario. Al zullen er wel meer extreme neerslaggebeurtenissen voorkomen in de zomermaanden [21].

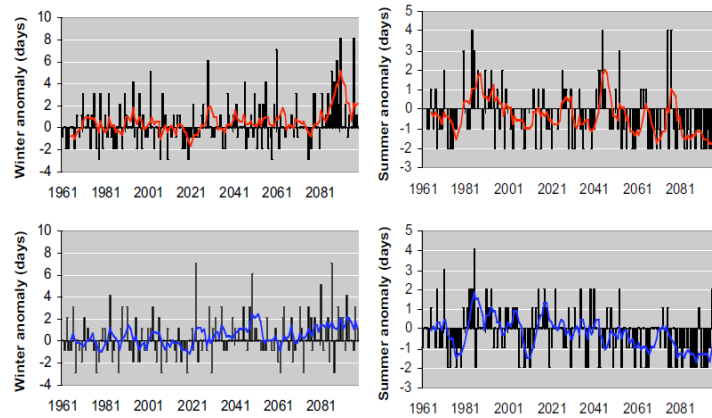
Statistische neerschaling is toegepast in deze studie om de veranderingen in het klimaat op een kleinere schaal te kennen. De eerste stap in deze methode is om statistische relaties te bepalen tussen de parameter die vereist is (bijvoorbeeld temperatuur) en de regionale weersomstandigheden van het huidige klimaat. De tweede stap is dan om de statistische relaties te gebruiken om een inschatting te maken van het toekomstige klimaat [21].

Daarnaast is in de studie ook gebruik gemaakt van een “Klimaatveranderingsanalogie” om een vergelijking te maken van de veranderingen in het klimaat tegenover historische data. Het klimaat ondergaat immers ook een aantal natuurlijke wijzigingen naast de veranderingen onder invloed van broeikasgassen in de atmosfeer. De kans op voorkomen van een aantal extremen in het toekomstige klimaat kan bepaald worden door te kijken naar hun terugkeerperiode in vergelijking met de terugkeerperiode van gelijkaardige gebeurtenissen in het huidige klimaat. De klimaatveranderingsanalogie is dan beschreven door extremen te definiëren die typisch zouden kunnen zijn voor het toekomstige klimaat [21].

Een voorbeeld uit de studie is het volgende [21]: Er wordt uitgegaan van een erg warme zomer in 1995 en een natte winter in 1994/1995. Deze twee seizoenen geven analogieën die van toepassing zijn in het klimaat voor de periode van 2041 tot 2070. Voor deze toekomstige periode zou deze soort zomer en winter een terugkeerperiode kennen van 5 jaar, tegen 2080 zou deze terugkeerperiode zelfs gereduceerd zijn naar 1,5 jaar ofwel 2 keer elke 3 jaar. Niet alleen voor temperatuur maar ook voor neerslag kan deze methode toegepast worden om de verandering in terugkeerperiode van een bepaalde gebeurtenis na te gaan [21].

Het overstromingsrisico in London zal de komende jaren toenemen. Het risico bepalen binnen Londen is erg gecompliceerd omwille van de grote omvang van het rioleringsstelsel, een aantal open waterlopen die overbouwd zijn door bijvoorbeeld wegen en vervangen zijn door duikers en door de capaciteit van de rioleringen die al dan niet overschreden zal worden. Daarnaast moet ook nog rekening gehouden worden met mogelijke overstromingen vanuit de Theems en de veranderingen in de waterstanden ten gevolge van de klimaatverandering [21]. De overstromingsrisico's worden dus bepaald door drie zaken: het overstromingsrisico van de rivier, het rioleringsstelsel en de zeespiegelstijging.

Om de impact na te gaan op het rioleringsstelsel wordt er gekeken naar de toename in neerslagintensiteiten. Onderstaande figuur 2.6 uit [21] toont voor beide scenario's het aantal natte dagen per jaar met een neerslaghoeveelheid groter dan 12,5 mm voor zowel de zomer als de winter [21]. Uit deze figuur volgt hetgeen dat al een aantal keer herhaald is in deze masterproef: Winters worden natter terwijl zomers droger worden met een grotere voorkomingskans van extreme neerslaggebeurtenissen.



Figuur 2.6: Het aantal natte dagen per jaar met een neerslaghoeveelheid groter dan 12,5 mm voor zowel de zomer als de winter onder de beschouwde klimaatscenario's (rood: midden tot hoge emissies, blauw: midden tot lage emissies)

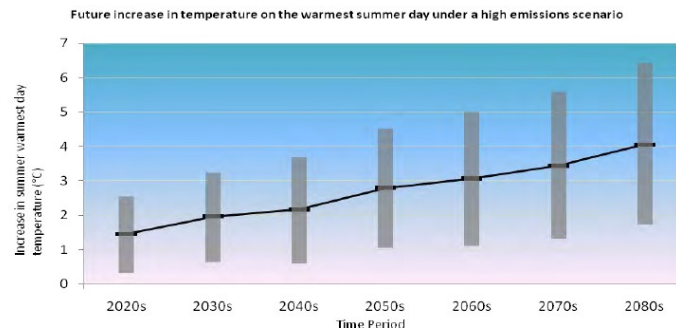
Uitgaande van deze resultaten en de impact van zowel de Theems als de verhoogde neerslagintensiteiten die afgevoerd moeten worden door het rioleringsstelsel, moet een inschatting gemaakt worden van de kwetsbaarheid van Londen. Deze studie [21] gaat niet verder in op deze kwetsbaarheid voor overstromingen aangezien het onderzoek hiernaar toen nog lopende was (2001). De methode gehanteerd in deze studie om data ter beschikking te hebben voor de toekomstige scenario's maakte geen gebruik van bijvoorbeeld een change factor of andere tools zoals gezien in voorgaande studies. Er wordt enkel gekeken naar de beschikbare klimaatmodellen en de huidige gebeurtenissen worden geprojecteerd naar de toekomst na aanpassing van de terugkeerperiode op basis van de klimaatveranderingsanalogie.

Om een meer recentelijk beeld te krijgen van de impact van de klimaatverandering is een tweede studie van Londen beschouwd van 2010 [22]. In deze studie wordt gebruik gemaakt van meer recentelijke klimaatmodellen: UKCP09. Deze studie bouwt wel verder op de methodologie zoals beschreven in de studie [21] zoals samengevat hierboven en omvat een klimaatadaptatiestrategie voor de stad. In deze studie wordt er ingezoomd op het stadsdeel "The City of London".

In tegenstelling tot de voorgaande studie, geeft het klimaatmodel UKCP09 een probabilistische projectie van de klimaatverandering gebaseerd op kwantificering van de bekende bronnen van onzekerheden binnen de klimaatverandering. Met behulp van deze projecties kunnen inschattingen gemaakt worden van veranderingen van klimaatvariabelen zoals temperatuur en neerslag [22].

Uitgaande van historische data tussen 1961 en 2006 is in de studie een temperatuurstijging van 1,7 °C afgeleid. De neerslag in de zomermaanden kende voor deze periode een daling van 16%, de neerslag in de winter kende een stijging van 22%. Meer extreme neerslaggebeurtenissen zijn geregistreerd voor deze periode. Voor het

toekomstige klimaat valt af te leiden uit de klimaatmodellen en de probabilistische projectie dat deze trend zich verder doorzet. Analoog aan de voorgaande studie zijn twee klimaatscenario's beschouwd: Hoge emissie en Lage emissie. De studie concludeert dat tot 2040 het klimaat getekend is door de huidige broeikasgassen in de atmosfeer. De veranderingen na 2050 zullen afhangen van de hoeveelheid emissies die onder de huidige toestand uitgestoten worden. Een opmerkelijk resultaat dat volgt uit deze studie is de toename in meer extreme gebeurtenissen. Onderstaande figuur 2.7 uit [22] toont de toename in temperatuur van een warme zomerdag. Het blijkt dat de temperatuur tegen 2020 op een warme zomerdag 0,3 tot 2,6 °C hoger ligt en dat tegen 2050 een warme zomerdag 1 tot 4,5 °C warmer is, afhankelijk van welk klimaatscenario is beschouwd en de bijhorende onzekerheden in rekening genomen zijn [22].



Figuur 2.7: Toename in temperatuur op een warme zomerdag voor de stad Londen

Dat uitgaande van deze sterke verhoging van de temperatuur extreme neerslag zich voordoet, hoeft niet te verwonderen. Het rioleringsstelsel in de stad is niet optimaal om aan deze hoge neerslagintensiteiten weerstand te bieden. Er zijn verschillende problemen opgemerkt in het rioleringsstelsel waardoor overstromingsrisico's reëel zijn [23].

Het bestaande rioleringsstelsel van Londen dateert uit de 19e eeuw is een gemengd systeem dat zowel regenwater als afvalwater afvoert. Het rioleringssysteem heeft uitstromen in de rivier de Theems om overtollig regenwater rechtstreeks af te voeren via duikers naar de rivier. Het rioleringssysteem heeft capaciteit voor een neerslaggebeurtenis tot terugkeerperiode van 10 jaar. Een aantal nieuwe delen zijn toegevoegd aan dit oude rioleringsstelsel die een capaciteit aankunnen tot een terugkeerperiode van 30 jaar. Onder invloed van grote extreme neerslaggebeurtenissen kent Londen bijgevolg een te kort aan capaciteit van de riolering en mogelijks overstromingen. Deze overstromingen zijn meestal beperkt tot een uitstroom van water over de straten. Onder invloed van de klimaatverandering komen de extreme neerslagintensiteiten meer voor met gevolg dat het huidige rioleringsstelsel niet meer voldoet [23].

Onderstaande figuur 2.8 uit [23] toont een 1D-visualisatie van punten waar overstromingen optreden onder invloed van een terugkeerperiode van 100 jaar in het

huidige klimaat. Hierbij zijn de rode punten de mangaten waar de overstromingsdiepte groter is dan 0 en de groene punten de mangaten waar geen overstroming optreedt [23]. De situatie zoals weergegeven op de figuur zal zich in de toekomst vaker voordoen.



Figuur 2.8: 1D-visualisatie van knooppunten met mogelijke overstromingen voor een terugkeerperiode van 100 jaar voor het huidige klimaat in “The City of London”

2.3 Kwetsbaarheidsanalyse bij wateroverlast in Gent

Ook binnen Vlaanderen zijn er voorbeelden te vinden van studies in verband met de impact van klimaatverandering op de stedelijke context. Een voorbeeld van zo een studie is een “Kwetsbaarheidsanalyse bij wateroverlast in Gent” [15], uitgevoerd door Arcadis in samenwerking met UGent en KULeuven. Deze studie bepaalt eerst waar overstromingen zich voordoen en hoe groot deze overstromingen zijn voor een aantal terugkeerperiodes zowel in het huidige klimaat als voor 2050. Er wordt uitgegaan van zowel wateroverlast door overbelaste rioleringen als door waterlopen in de stad. Uitgaande van deze simulatieresultaten focust de studie zich op de kwetsbaarheid van gebouwen, personen, etc. en gaat het na wat mogelijke maatregelen zijn om de risico’s en impact van de overstromingen te reduceren.

De methode zoals toegepast in deze studie voor de 2D-modellering van de overstromingen werd eerder getest in het kader van het PLURISK-project [24]. Een uitgebreide beschrijving van de methodologie kan dan ook in [24] teruggevonden worden.

2.3.1 Wateroverlast vanuit rioleringen

Om de kwetsbaarheid voor overstromen ten gevolge van rioleringen te beschouwen worden simulaties uitgevoerd in InfoWorks ICM. De gebruikt neerslag in de studie voor de simulaties zijn composietbuien van Ukkel, opgesteld door KULeuven

met terugkeerperiodes van 20 jaar en 100 jaar. Er zijn zowel composietbuizen ter beschikking gesteld voor het huidige klimaat met een terugkeerperiode van 20 jaar en 100 jaar en voor het hoog klimaatscenario voor 2050 met een terugkeerperiode van 20 jaar [15]. De methode die gebruikt is om de composietbuizen om te zetten naar neerslag representatief voor 2050 is dezelfde methode als ook gebruikt in deze masterproef, de zogenaamde Climate Perturbation Tool. Deze methode wordt in een verder hoofdstuk uitgelegd.

Het rioleringsstelsel in deze studie van Gent bestaat uit 7 deelgebieden: Drongen-Noord, Drongen-Zuid, Mariakerke-Wondelgem, Oostakker-Sint-Amandsberg, Gentbrugge, Sint-Denijs-Westrem en Gent-centrum. De 7 modellen worden omgezet naar een 2D-oppervlakte-afstromingsmodel. Deze modellen laten toe om het water uit te spreiden en af te stromen over de straat indien de waterhoogtes in de rioleringen boven op maaiveld uitkomen [15]. De simulaties die uitgevoerd zijn met InfoWorks ICM omvatten simulaties in een model dat de huidige toestand weergeeft (situatie van 2014), simulaties in een model dat geldt voor 2020 en simulaties in een model dat een langetermijn visie bevat en geldig is voor 2050. De simulaties zijn uitgevoerd zowel met een 1D- (op basis van flood cones) als met een 2D-simulatie (op basis van een 2D mesh). De 1D-modellering laat geen water toe op straat aangezien het water in dat geval opgeslagen is in de flood cones, de 2D-modellering spreidt dit water wel uit over straat [15].

Een 2D-mesh is opgemaakt in InfoWorks ICM die volgende data in acht neemt: Digitaal hoogtemodel (DHMV II) en de grootschalige referentiebestanden GRB-shape gebouwen en GBR-shape wegen. De GBR-data laat toe om rekening te houden met de hoogteverschillen tussen weg en voetpad. De 2D-zones in het model zijn plaatsen waar oppervlakteafstroming mogelijk is. De mesh bevat driehoekige elementjes die variëren in oppervlakte van 5 tot 75 m^2 . Elke driehoek heeft eveneens een hoogte die volgt uit het DHMV II [15].

De resultaten van de simulaties zijn weergegeven op een 2D-overstromingskaart die de maximale waterpeilen aangeeft. De relevante info voor de verdere studie op deze kaarten zijn de waterdieptes, waterhoogtes en de stroomsnelheid en -richting. De 1D-simulatieresultaten zijn gebruikt om het model te valideren. Er werd nagegaan of de overstroomde plaatsen in het model in werkelijkheid ook overstromingen kenden op basis van gegevens beschikbaar gesteld door de brandweer van Gent [15]. De berekening van de waterdiepte van de overstromingsgevoelige gebieden is in de studie gebeurd door middel van LIDAR-data. Dit is een “optische sensing techniek die gebruik maakt van een laser om de oppervlakte van de aarde te sampelen en daarbij accurate x,y,z-meetresultaten geeft” [25]. Uitgaande van deze LIDAR-data kan dan voor alle gridcellen de gemiddelde hoogte bepaald worden van het overstromingsgevoelige gebied, wat de referentiehoogte is. De waterdiepte die dan uit deze data volgt kan gedefinieerd worden als [15]:

$$h_{waterdiepte} = h_{ref} - h_{Lidar}$$

Wat opgemerkt werd in de studie is dat de 1D-modellering veel meer over-

stromingslocaties bevat dan de 2D-modellering. Ook zijn de simulaties voor een terugkeerperiode van 20 jaar voor 2020 en de simulaties voor een terugkeerperiode van 20 jaar voor 2050 vergeleken: daaruit volgde dat de terugkeerperiode T20 in 2050 ongeveer overeenkomt met wat vandaag een terugkeerperiode van 100 jaar zou zijn [15]. Naast de invloed van de wateroverlast ten gevolge van rioleringen is ook nagegaan wat de invloed is van de waterlopen in Gent op de wateroverlast in de stad. Dit valt echter buiten het bestek van deze masterproef en wordt hier ook verder niet besproken.

2.3.2 Kwantificering van de schade

Eenmaal een inschatting is verkregen van de kwetsbare gebieden in de stad voor overstromingen kan dan nagegaan worden wat de eventuele risico's en schade zijn die gepaard gaan met deze overstromingen. Een onderscheid wordt gemaakt tussen economische schade en socio-economische schade. De methodologie voor de kwantificering van de schade wordt hier gegeven.

Economische schade

Met behulp van de simulatieresultaten van de overstromingen, kan het risico bepaald worden voor eventuele schade aan bijvoorbeeld gebouwen, wegen, inboedel, industrie, etc. en kan de te verwachten schade uitgedrukt worden in euro/ m^2 . Het risico wordt gedefinieerd als het product van kans en gevolg [15].

De economische schade die kan optreden wordt uitgedrukt met volgende formule [15]:

$$S_w = \sum \alpha * n_i * S_{max}$$

Met S_w de werkelijke schade, S_{max} de maximale schade, α de schadefactor in functie van de waterdiepte en n_i het aantal eenheden (aantal, oppervlakte, etc).

Socio-economische impact

De socio-economische impact bevat bijvoorbeeld hoeveel slachtoffers er zullen vallen bij een bepaalde overstromingsgebeurtenis. De voornaamste parameter voor de bepaling van de socio-economische impact is de overstromingsdiepte. Matige wateroverlast wordt beschouwd wanneer de waterdieptes van de overstroming beperkt blijven tot 15 cm. Ernstige wateroverlast is de situatie waarbij de waterdieptes groter zijn dan 15 cm [15].

Om te bepalen hoeveel slachtoffers er zullen vallen ten gevolge van een overstroming kan volgende formule gebruikt worden [15]:

$$N = \alpha_d * \alpha_w * A$$

Met N het aantal slachtoffers, α_d de coëfficiënt in functie van de waterdiepte en α_w de coëfficiënt in functie van de stijgsnelheid, A is het aantal personen in het gebied. Het bevolkingsaantal is van belang voor deze analyse. Al deze resultaten kunnen

uitgezet worden op een kaart. Op deze manier kan nagegaan worden welk deel van inwoners het meest kwetsbaar is [15].

2.3.3 Besluit

Uitgaande van deze analyse wordt een beeld verkregen van de kwetsbare gebieden binnen de stad Gent, de mogelijk schade aan gebouwen en de mogelijk schade aan personen. De risicoanalyse omvat deze vier criteria [15]:

1. Waterdiepte
2. Kwetsbare functies en infrastructuur
3. Werkelijke economische schade
4. Werkelijke sociale schade

De waterdieptes worden bepaald uitgaande van de simulaties met de 2D-modellering in InfoWorks ICM. De andere 3 stappen volgen uit de stappen zoals beschreven onder de kwantificering van de schade. Vier categorieën zijn uiteindelijk te onderscheiden uitgaande van de hele analyse: hoge, matige, gering of lage kwetsbaarheid. Op deze manier weten beslissingsnemers en politieke leiders welke delen van de stad maatregelen nodig hebben om niet alleen de mensen maar ook de infrastructuur te beschermen. Eventuele infrastructuurwerken of de evolutie in landgebruik kan nog in rekening gebracht worden in de analyse om ook de risico's te kennen voor de toekomst [15].

2.4 Neerslagsstudie van Antwerpen

Voor Antwerpen zelf is reeds een neerslagstudie [1] uitgevoerd in 2015 door KU-Leuven in opdracht van de stad Antwerpen. In deze studie wordt nagegaan wat de impact is van de klimaatverandering op de hoeveelheid neerslag in het gebied en wat bijgevolg de verandering is in extremen. Niet alleen de verandering in neerslag wordt beschouwd, ook de verandering in temperatuur en verdamping en de verandering in windsnelheden worden meegenomen in deze analyse.

Het klimaatveranderingssignaal in deze studie werd bepaald door statistische analyse en combinatie van de mondiale, regionale en lokale klimaatmodellen. De belangrijkste bevindingen in verband met neerslag en kwetsbaarheid van de regio Antwerpen worden hier overlopen.

Het gebied dat beschouwd is in deze studie is de hele stad Antwerpen, het stroomgebied van het Klein Schijn en Groot schijn, het stroomgebied van de Benedenvliet en de gevalstudie Barbierbeek. De neerslaggegevens die representatief zijn voor de studie zijn pluviograaf- en radargegevens [1]. Dezelfde neerslaggegevens worden ook gebruikt in deze masterproef, een detaillering van deze neerslaggegevens is daarom terug te vinden in hoofdstuk 3 van deze masterproef.

De studie baseert zich op de CMIP5-mondiale klimaatmodelruns. Meer dan 200 simulaties met 34 verschillende klimaatmodellen zijn gebruikt. Daarnaast maakt de studie ook gebruik van een 11 regionale Europese klimaatmodelsimulaties. Bovendien zijn er ook nog een aantal fjnschalige klimaatmodelruns voor België gebruikt [1]. Uitgaande van al deze resultaten werd informatie verzameld over neerslag, temperatuur, luchtdruk, zonnestraling, windsnelheid en relatieve vochtigheid. Ook de veranderingen in verdamping is meegenomen, de potentiële evapotranspiratie (ETP). Deze ETP-gegevens zijn berekend op basis van luchtdruk, zonnestraling, luchttemperatuur, windsnelheid en relatieve vochtigheid. De tijdshorizon waarvoor de klimaatruns zijn toegepast is 2100 [1]. De methodologie die toegepast is gaat uit van volgende stappen [1]:

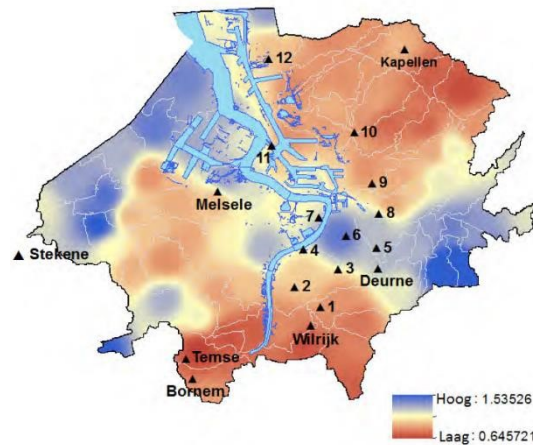
1. Analyse van ruimtelijke neerslagpatronen op basis van de pluviograaf- en radardata.
2. Analyse van het klimaatveranderingssignaal door vergelijking van de toekomstprojecties via scenario- en controleruns.
3. Statistische neerschaling om statistieken te verkrijgen met procentuele verandering in neerslag bij verschillende tijds- en ruimteschalen voor de verschillende RCP-scenario's en voor de tijdshorizonten 2030, 2050 en 2100.
4. Opstellen van Klimaatscenario's: Het 95% betrouwbaarheidsinterval wordt genomen van alle klimaatmodelruns. Hiervan wordt vervolgens de bovengrens, mediaan en ondergrens genomen waaruit respectievelijk het Hoog, Midden en Laag scenario volgt. Bovendien is er een onderscheid in neerslag tussen de verschillende seizoenen waardoor er een onderscheid gemaakt kan worden tussen het Hoog-Zomer en Hoog-Winter scenario.
5. Neerslagproducten voor eindgebruikers: Composietbuizen zijn gebruikt voor de impactberekening van het rioleringsstelsel, langdurige neerslagreeksen met een tijdstap van 15 min of 1u voor impactberekeningen van waterlopen.

2.4.1 Resultaten

Ruimtelijke neerslagpatronen

Uitgaande van neerslagkwantielen is nagegaan wat de ruimtelijke spreiding is op de neerslaggegevens in de regio Antwerpen. Het blijkt dat er een grote ruimtelijke spreiding zichtbaar is, zeker voor grotere terugkeerperiodes [1]. De spreiding is weergegeven als een factor verschil tegenover de gemiddelde neerslagintensiteit. Onderstaande figuur 2.9 uit [1] toont voor de regio Antwerpen de gevonden factoren.

Een factor 1 geeft de gebiedsgemiddelde neerslag aan, een factor groter dan 1 geeft hogere extreme neerslagintensiteiten aan en een factor kleiner dan 1 geeft lagere extreme neerslagintensiteiten aan [1]. De stad Antwerpen zelf is terug te vinden aan de pluviografen 3, 4, 6 en 7. Het is duidelijk zichtbaar dat dit gebied bovengemiddelde neerslagintensiteit kent. Een verklaring hiervoor is terug te vinden in het hitte eiland



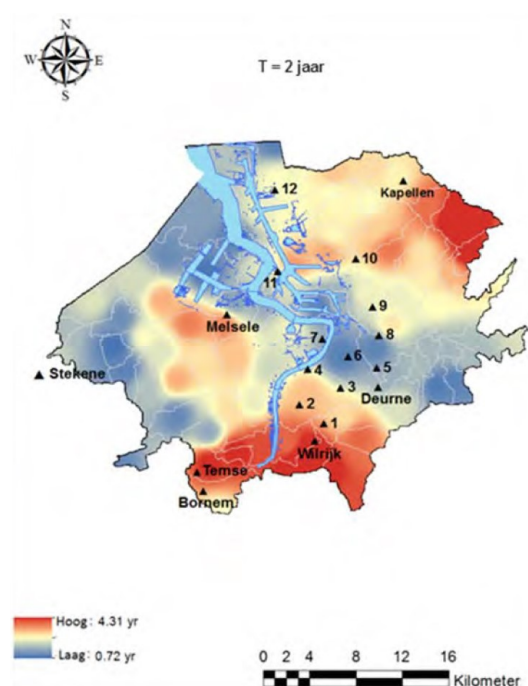
Figuur 2.9: Ruimtelijke spreiding op de neerslaggegevens in Antwerpen ($T > 1j$) [1]

effect.

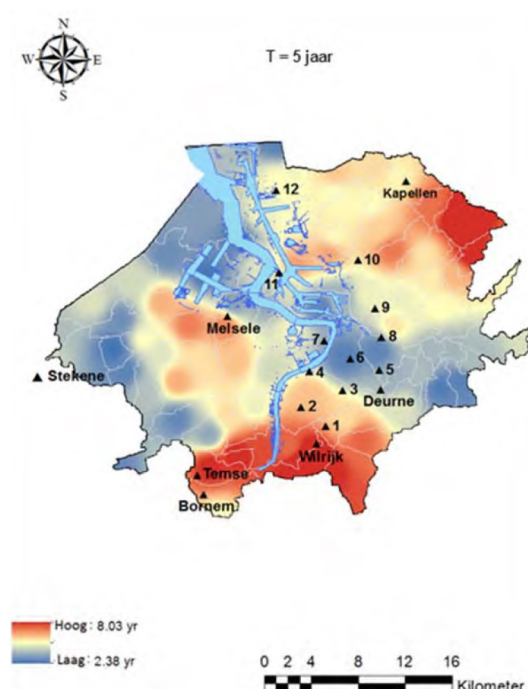
Daarnaast wordt nagegaan wat de verschillen zijn met de beschikbare neerslaggegevens en de neerslaggegevens van Ukkel. De neerslagreeks van Ukkel is gemiddeld gezien representatief voor Vlaanderen en wordt gebruikt in het ontwerp van het rioleringsstelsel. Uit de studie volgt dat de neerslagdata van de regio Antwerpen gemiddeld gezien overeenkomt met de neerslagdata van Ukkel. Plaatselijk zijn er wel afwijkingen terug te vinden. Doordat Antwerpen een aantal gebieden kent met een hogere of lagere neerslagintensiteit dan gemiddeld zorgt dit voor een onder-of overdimensionering van het rioleringsstelsel aangezien Ukkel gebruikt is als maatgevende neerslag in de dimensionering [1].

De mate van over- en onderdimensionering zijn aangegeven in de studie door per gebied aan te geven wat de overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenis is in vergelijking met de terugkeerperiode die beschouwd wordt in het geval van de Ukkeldata in het ontwerp van rioleringen. De verschillen zijn te zien in onderstaande figuren 2.10, 2.11 en 2.12 uit [1].

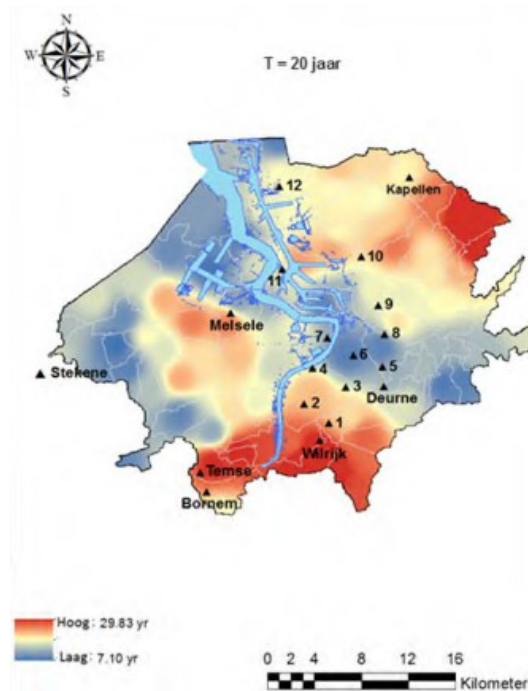
Op deze figuren is te zien dat de stad Antwerpen sneller een bepaalde neerslaggebeurtenis kent dan gemiddeld in Vlaanderen. Voor een gemiddelde terugkeerperiode van 2 jaar, komt dit in de stad Antwerpen overeen met een terugkeerperiode kleiner dan 1 jaar, voor een gemiddelde terugkeerperiode van 5 jaar kent de stad Antwerpen een terugkeerperiode van ongeveer 2,5 jaar en voor een gemiddelde terugkeerperiode van 20 jaar kent de stad een terugkeerperiode van 7 jaar [1]. Er zitten wel een aantal onzekerheden op deze resultaten waardoor ze niet als exact beschouwd mogen worden. Het geeft wel een indicatie van het sneller voorkomen van extremen in de stad.



Figuur 2.10: Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 2 jaar



Figuur 2.11: Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 5 jaar



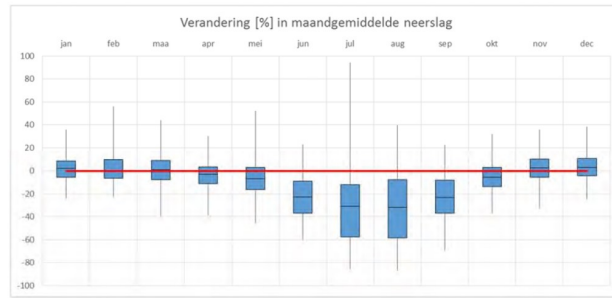
Figuur 2.12: Overeenkomstige terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenissen in Antwerpen tegenover neerslagdata van Ukkel met een terugkeerperiode van 20 jaar

Klimaatveranderingssignaal

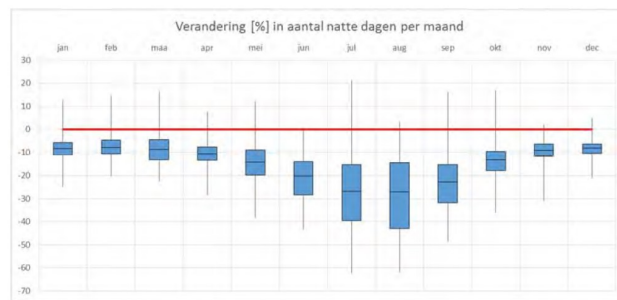
Op basis van de klimaatmodelsimulaties kan een inzicht verkregen worden in wat er verandert in de toekomst op vlak van neerslag, temperatuur, verdamping, etc. in Antwerpen. Een overzicht wordt gegeven van de belangrijkste resultaten die volgen uit de studie.

Voor neerslag wordt er besloten dat de wintermaanden natter worden en dat de zomermaanden een reductie kennen in de hoeveelheid neerslag tot 30% in de maanden juli en augustus [1]. Een overzicht is te zien in onderstaande figuren. Enerzijds wordt de verandering in maandgemiddelde neerslag getoond op figuur 2.13, anderzijds wordt de verandering in natte dagen getoond op figuur 2.14, beiden overgenomen uit [1]. Een natte dag wordt beschouwd als een dag waar er meer dan 0,1 mm neerslag valt. Uitgaande van de figuren valt op dat voornamelijk juli en augustus de grootste verandering kennen in het aantal natte dagen. De verandering in de extreme dagneerslag in de zomer in Antwerpen is te zien in figuur 2.15 uit [1]. Ten slotte valt ook op te merken dat de duur van de extreme periodes verandert. Een gemiddelde droge periode zal in de toekomst 25% langer duren ongeacht de terugkeerperiode [1].

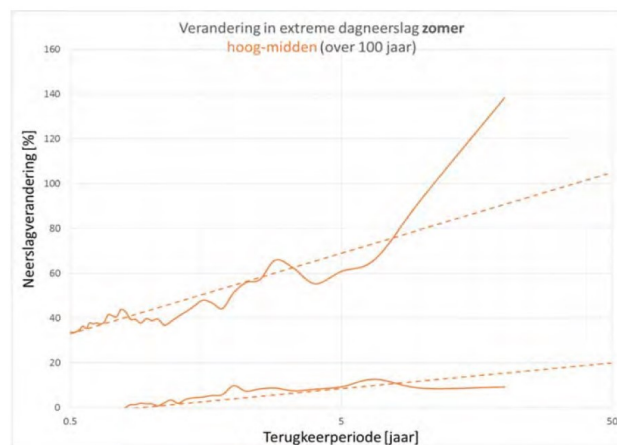
De maandgemiddelde temperatuur kent tegen 2100 een gemiddelde stijging van 2 tot 3 °C, in het meest extreme scenario van RCP8.5 kan er zelfs een temperatuurstij-



Figuur 2.13: Verandering van de maandgemiddelde hoeveelheid neerslag in Antwerpen



Figuur 2.14: Verandering in natte dagen per maand in Antwerpen



Figuur 2.15: Verandering in extreme dagneerslag in de zomer in Antwerpen

ging optreden van 9°C in de maand augustus. Onder invloed van deze wijzigingen worden meer hittegolven verwacht. Een hittegolf wordt gedefinieerd als een periode van minstens 3 dagen waarop de temperatuur hoger is dan 30°C . Het huidige klimaat kent gemiddelde 1 hittegolf per zomer. Tegen 2100 wordt verwacht dat er gemiddeld 2 tot 3 hittegolven zullen voorkomen. Deze temperatuurstijging hangt eveneens samen met het hitte eiland effect waarmee de stad Antwerpen te maken krijgt en reeds vandaag al invloed van merkbaar is [1].

Impactanalyse op overstromingen langs rioleringen

Uitgaande van de klimaatveranderingen zijn nieuwe geperturbeerde composietbuizen opgesteld voor de verschillende klimaatscenario's. De composietbuizen zijn opgesteld voor 2 jaar, 5 jaar, 10 jaar en 20 jaar. Perturbatiefactoren zijn bepaald om de verschillende klimaatscenario's in rekening te brengen. Met behulp van deze composietbuizen representatief voor de verschillende klimaatscenario's stelde Rio-Link de overstromingskansen op van het rioleringsstelsel in Antwerpen [1]. Volgende kleurencode in figuur 2.16 is gebruikt [1].

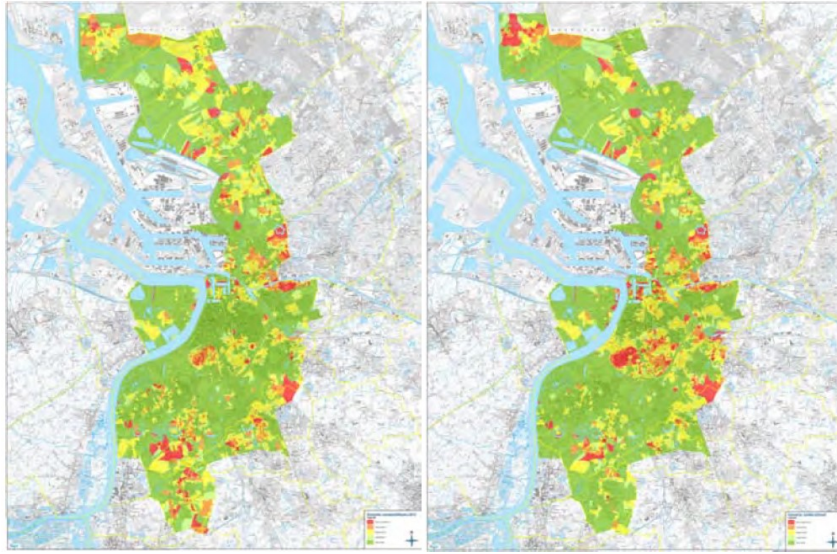
kriticiteit		criterium
	zeer hoog kritisch	= water op straat bij T = 2 jaar
	hoog kritisch	= water op straat bij T = 5 jaar
	matig kritisch	= water op straat bij T = 20 jaar
	laag kritisch	= vrijboord < 0,2 m bij T = 20 jaar
	niet kritisch	= vrijboord ≥ 0,2 m bij T = 20 jaar

Figuur 2.16: Kleurencode voor kriticiteit van overstromingsrisico's

Zowel de composietbuizen van Ukkel als de composietbuizen van Antwerpen zijn gebruikt. Een vergelijking van de kwetsbare gebieden zijn te zien in figuur 2.17 dat zowel de resultaten van de composietbuizen van Ukkel als deze van Antwerpen bevat [1]. Op deze figuren is duidelijk te zien dat onder invloed van de composietbuizen van Antwerpen het gebied veel meer rood kleurt dan in het geval van de composietbuizen van Ukkel. Dit kan verklaard worden enerzijds door de ruimtelijke spreiding die op de neerslagresultaten zit zoals eerder beschreven en anderzijds door het hitte eiland effect.

Wanneer dan gekeken wordt naar de situaties die zich zullen voordoen onder het Hoog klimaatscenario voor 2030, 2050 en 2100 in figuur 2.18, is duidelijk te zien dat het volledige gebied erg kwetsbaar wordt [1]. Veel meer gebieden kleuren rood wat wil zeggen dat er water op straat zal komen voor een terugkeerperiode van 2 jaar. Het huidige rioleringsstelsel is ontworpen om een terugkeerperiode van 20 jaar te bergen [3]. Uiteraard zijn er onzekerheden die meespelen in de modellering en op de klimaatscenario's waardoor de situatie in werkelijkheid kan afwijken van hetgeen volgt uit de modellen. Toch geven deze resultaten een goed beeld van wat er zal veranderen in de regio Antwerpen.

In de studie wordt besloten dat de impact op het stadsgedeelte van Antwerpen binnen de ring in de toekomst zal toenemen met meer overstromingen tot gevolg [1]. Deze masterproef focust op dit deel van de stad Antwerpen om na te gaan wat kritische gebieden zijn en wat de mate in veranderingen is van de overstromingen in de toekomst.

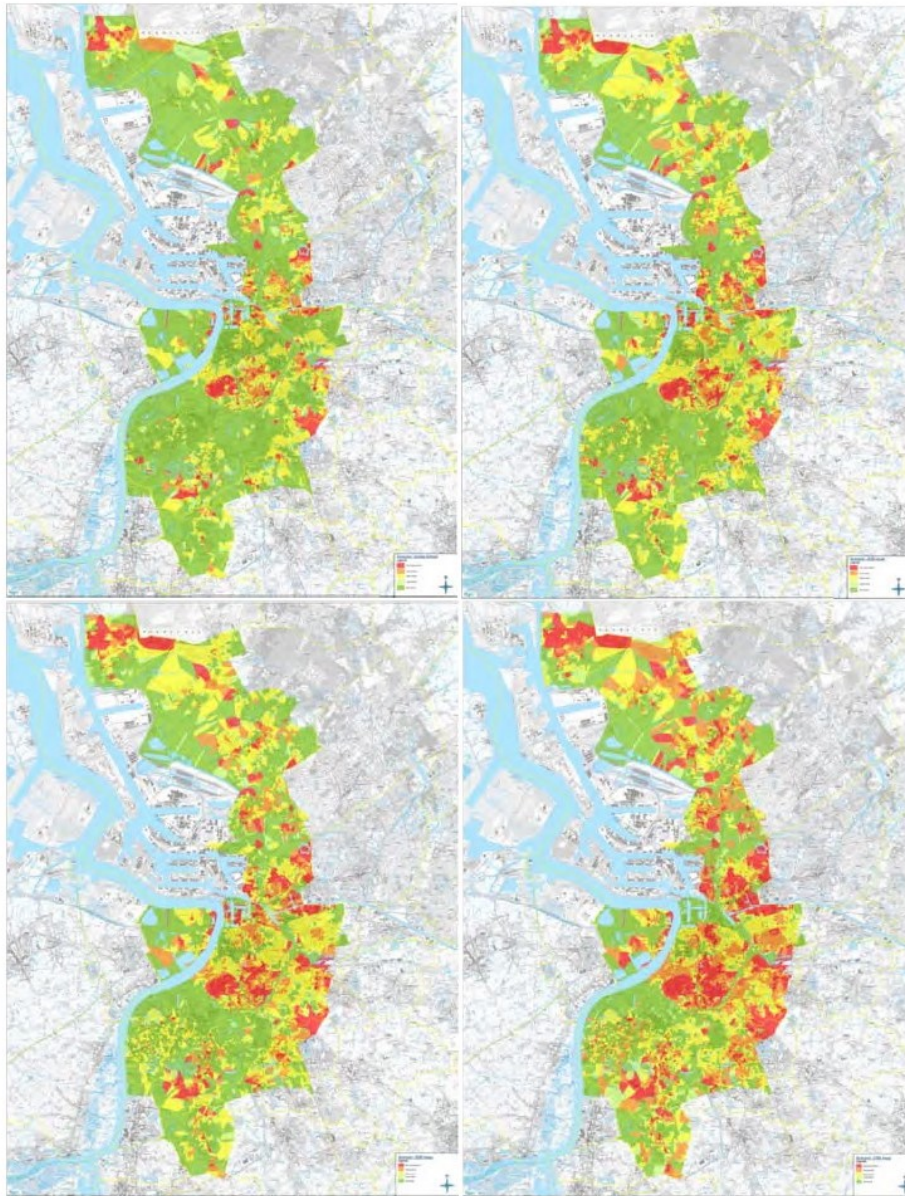


Figuur 2.17: Vergelijking van kwetsbaarheid voor overstromingen in Antwerpen in het huidige klimaat bij gebruik van de composietbuizen van Ukkel (links) en de composietbuizen van Antwerpen (rechts)

2.5 Voorbeeld van visualisatiemethode (CREST-project)

Naast de methodes om huidige neerslag om te zetten naar neerslag representatief voor de beschouwde klimaatscenario's en het modelleren van de overstromingen die zich hierdoor voordoen, wordt in deze masterproef getracht de modelleringsresultaten op een duidelijke manier te visualiseren. Een voorbeeld van een visualisatiemethode wordt daarom besproken. Een duidelijke visualisatie is immers van belang om beleidsmakers op een overzichtelijke manier aan te geven wat de invloeden zullen zijn van klimaatverandering en om er voor te zorgen dat ze overtuigd zijn van deze invloed en de bijhorende maatregelen treffen.

De visualisatiemethode die besproken wordt in deze sectie beschrijft de ontwikkeling van een 4D-overstromingsvisualisatie in WebGIS toegepast op een overstromingsmodellering voor de Vlaamse kuststad Oostende. De studie kadert in het onderzoeksproject CREST (Climate Resilience coaST) en is uitgevoerd door onder andere Samuel Van Ackere verbonden aan UGent [26],[27]. Het CREST-project focust op een overstromingsbeoordelingsmethode om mensen duidelijk te maken dat maatregelen nodig zijn voor de klimaatverandering. Hiervoor wordt er gesteld dat meer nodig is dan enkel een 2D-visualisatie. Een 3D-visualisatiemethode van het landschap wordt daarom toegevoegd aan de overstromingskaart om een beter beeld te krijgen van de gevolgen en om meer details te kennen van de overstroming [26],[27]. Deze 3D-visualisatiemethode heeft verschillende voordelen tegenover een 2D-visualisatie (zoals overgenomen uit [26],[27]):



Figuur 2.18: Kwetsbaarheid voor overstromingen in Antwerpen onder het huidig klimaat (links boven), hoog klimaatscenario in 2030 (rechts boven), hoog klimaatscenario in 2050 (links onder) en hoog klimaatscenario in 2100 (rechts onder)

- Een duidelijk inzicht in de gevolgen van de overstroming
- Realistischer en gedetailleerder
- Meer begrijpbaar hoe groot de impact van de overstroming is
- Geeft beter de gevolgen voor de omgeving aan

De 2D-overstromingskaarten kunnen echter niet vervangen worden door de 3D-visualisaties aangezien beiden voor- en nadelen hebben. Het is daarom aangewezen om zowel een 2D- als een 3D-visualisatie te beschouwen.

In de studie wordt gebruik gemaakt van tijdsafhankelijke WMS-lagen (Web Mapping Service). Op deze manier is het mogelijk om de intensiteit of de snelheid van een overstroming en de stijgsnelheid van het water te visualiseren op een specifieke locatie. Daarnaast kan ook nagegaan worden hoe lang het duurt alvorens een specifiek gebied overstroomt. De output van simulatiesoftware zoals bijvoorbeeld MikeFlood, TELEMAC, etc. kunnen hierdoor in een WebGIS-omgeving gevisualiseerd worden [26],[27].

De 4D-tool is dan gecreëerd door gebruik te maken van Ol3-Cesium Openlayers (geschreven in Javascript) dat toelaat om de 3D-visualisaties beschikbaar te stellen op een webpagina. In de Ol3-Cesium tool worden gebouwen en tools geïmplementeerd die toelaten om in te schatten wat de overstromingsdiepte is, wat de schadeweerstand is die kan optreden aan gebouwen, wat de beschikbare evacuatie tijd is, wat verbeteringen zijn die aangebracht kunnen worden, etc. Al deze informatie wordt beschikbaar gesteld voor de gebruiker door een eenvoudige klik op de locatie waarover informatie gewenst is [26],[27]. Door een tijdlijn toe te voegen aan deze visualisatie wordt het 4D-aspect bereikt. De gebruiker kan op deze manier kiezen voor welke tijdshorizon informatie zichtbaar gemaakt moet worden [26],[27].

De 4D-visualisatiemethode laat toe aan de gebruiker om de evolutie van klimaatverandering doorheen de tijd te bestuderen en om te bestuderen welke maatregelen reeds genomen zijn en wat de invloed daarvan is [26],[27].

2.6 Besluit

Uitgaande van al deze studies is een duidelijk consensus zichtbaar dat de wintermaanden natter worden en dat de zomermaanden droger worden maar dat er meer extreme neerslaggebeurtenissen zullen voordoen met meer overstromingen tot gevolg. Deze problematiek strekt zich wereldwijd uit met het gevolg dat wereldwijd maatregelen nodig zijn om steden, inwoners en gebouwen te beschermen tegen gevolgen van overstromingen. Verschillende methodologieën kunnen gebruikt worden om de klimaatscenario's op te stellen, met al hun voor- en nadelen maar globaal gezien bereiken alle methodes min of meer dezelfde resultaten. Dit mede doordat de methodes gebaseerd zijn op dezelfde broeikasgasscenario's van IPCC. Een samenvattend overzicht van de methodes voor de verschillende beschouwde studies is terug te vinden

in tabel 2.1.

Tabel 2.1: Samenvattend overzicht van de gebruikte methodes van de beschouwde studies

Studie	Bepaling van representatieve neerslagdata	Gebruikte klimaatscenario's	Overstromingsmodel
Gebieden nabij Sydney (Australië)	GCM's en stochastische neerslaggenerator	'Meest nat' en 'meest droog' voor 2030 en 2070	Rainfall runoff IHACRES
Nice, Straatsburg, Wenen en Odense	Change Factor	RCP4.5 en RCP8.5 voor periode 1981 tot 2100	Mike 21
Londen	Statistische neerschaling en klimaatveranderingsanalogie	'Hoge Emissie' en 'Lage emissie' voor 2020, 2050 en 2080	/
Gent	Climate Perturbation Tool	Hoog klimaatscenario voor 2050	Infoworks ICM
Antwerpen	Climate Perturbation Tool	Hoog Zomer, Hoog Winter, Midden en Laag scenario voor 2030, 2050 en 2100	/

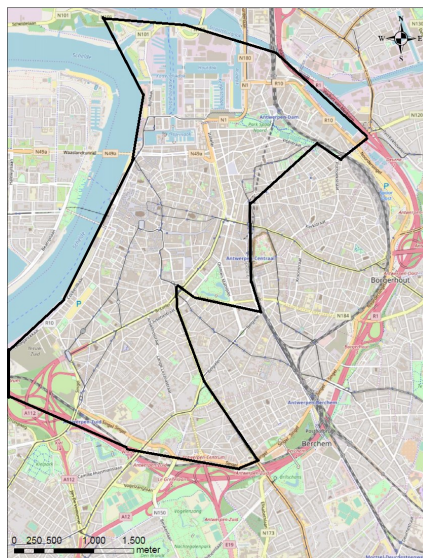
Uitgaande van de studie van Antwerpen volgt wat de veranderingen zijn in neerslag, temperatuur, verdamping en wind. De studie toont duidelijk aan dat de hele regio Antwerpen beïnvloed wordt door de klimaatverandering. In deze masterproef wordt er ingezoomd op het stadsdeel binnen de ring van Antwerpen en wordt er meer in detail bekeken voor dit gebied hoeveel sneller overstromingen zullen voorkomen en welke gebieden hiervan hinder zullen ondervinden.

Hoofdstuk 3

Case Study

3.1 Het studiegebied

Zoals beschreven handelt deze studie over de impact van de klimaatveranderingen op overstromingen in de stad Antwerpen. Het beoogde studiegebied in deze masterproef zal zich focussen op het deel van Antwerpen binnen de ring rond Antwerpen en meer bepaald Antwerpen-Noord, een deel van Antwerpen-Zuid en het historische centrum van de stad. Overstromingen in dit gebied hebben immers niet alleen een grote impact op de leefbaarheid en het comfort van de inwoners, maar ook op het behoud van de historische waarde van de binnenstad. De volledige stad Antwerpen en een ruwe afbakening van het studiegebied zijn te zien op onderstaande figuur 3.1.



Figuur 3.1: Stad Antwerpen en studiegebied

3.1.1 Demografische gegevens en ruimtegebruik

Het studiegebied bestrijkt de delen van Antwerpen-Centrum (postcode 2000), Antwerpen-Noord (postcode 2060) en het grootste deel van Antwerpen-Zuid (postcode 2018). Een aantal gegevens (gebaseerd op [28]) voor deze delen van Antwerpen worden hier opgelijst.

De stad kent een groot bevolkingsaantal. In 2017 telt de stad Antwerpen binnen deze drie beschouwde gebieden alleen al 141 887 mensen. Onderstaande tabel 3.1 geeft het aantal inwoners per deelgebied evenals de bevolkingsdichtheid.

Tabel 3.1: Aantal inwoners en de bevolkingsdichtheid per beschouwde deelgebied

Deelgebied	Aantal inwoners	Aantal personen per km^2
Antwerpen-Centrum	36 080	5 931
Antwerpen-Noord	61 247	11 754
Antwerpen-Zuid	44 560	13 449

Het ruimtegebruik in de stad is afhankelijk van dit aantal inwoners. Een totale oppervlakte van $14,6 km^2$ of 1460 ha is beschikbaar in het studiegebied van deze masterproef. Wanneer gekeken wordt naar de oppervlakte groen dat beschikbaar is voor elke inwoner in het gebied kom dit neer op een gemiddelde beschikbare oppervlakte van $22,67 m^2$ per inwoner. Meer specifiek is voor elke inwoner van Antwerpen-Centrum $35 m^2$, voor Antwerpen-Noord $10 m^2$ en voor Antwerpen-Zuid $23 m^2$ groen beschikbaar [28]. Antwerpen-Noord heeft de grootste bevolkingsdichtheid van de drie gebieden wat verklaart waarom de inwoners daar de kleinste oppervlakte groen ter beschikking hebben.

Wanneer dan gekeken wordt naar het percentage woongebied in elk stadsdeel volgt uit [28] dat Antwerpen-Centrum, Antwerpen-Noord en Antwerpen-Zuid respectievelijk 70,7 %, 70,4 % en 80,5 % woongebied hebben. Het grootste deel van het beschouwde studiegebied kent bijgevolg een residentiële functie. Het merendeel van de woningen zijn appartementen. Onderstaande tabel 3.2 geeft een overzicht van het aandeel woongebied en het woontype per deelgebied.

Tabel 3.2: Aandeel in woongebied en type woning

Deelgebied	Percentage woongebied (%)	Appartementen (%)	Huizen (%)
Antwerpen-Centrum	70,7	90,8	9,1
Antwerpen-Noord	70,4	81,7	18,2
Antwerpen-Zuid	80,5	79,4	20,5

Naast de residentiële functie zijn er uiteraard nog andere functies die gebouwen

vereisen zoals diensten, winkels, bedrijven, etc. Het aandeel van de totale bebouwde oppervlakte voor al deze functies wordt gedefinieerd als “de verhouding van de totale oppervlakte ingenomen door gebouwen op de totale oppervlakte van het deelgebied” [28]. De bebouwde oppervlakte omvat dus enkel gebouwen en geen pleinen, wegen, etc. De resultaten zijn te zien in onderstaande tabel 3.3.

Tabel 3.3: Bebouwde oppervlakte en aandeel in bebouwde oppervlakte

Deelgebied	Bebouwde oppervlakte (m^2)	Aandeel bebouwde oppervlakte (%)
Antwerpen-Centrum	1 959 873	32,2
Antwerpen-Noord	1 939 678	42,1
Antwerpen-Zuid	2 112 296	40,5

Uitgaande van al deze gegevens kan besloten worden dat Antwerpen-Noord niet alleen het meest dichtbevolkte maar ook het meest bebouwde deelgebied is. Dit is logische aangezien beide aspecten hand in hand gaan met elkaar. Antwerpen-Zuid kent een bijna even groot aandeel in bebouwde oppervlakte, de reden hiervoor is dat dit gebied het grootste aantal inwoners kent van de drie beschouwde deelgebied, al ligt de bevolkingsdichtheid daar iets lager. De modernisering van dit gebied de laatste jaren ligt aan de basis van deze hoge graad van inwoners en bebouwing. Antwerpen-Centrum, met het historische deel van de stad, kent de laagste hoeveelheid inwoners wat eveneens logisch is aangezien dit deel van de stad vele winkels, musea en andere dienstverleningen bevat.

3.1.2 Klimaat en CO_2 -uitstoot

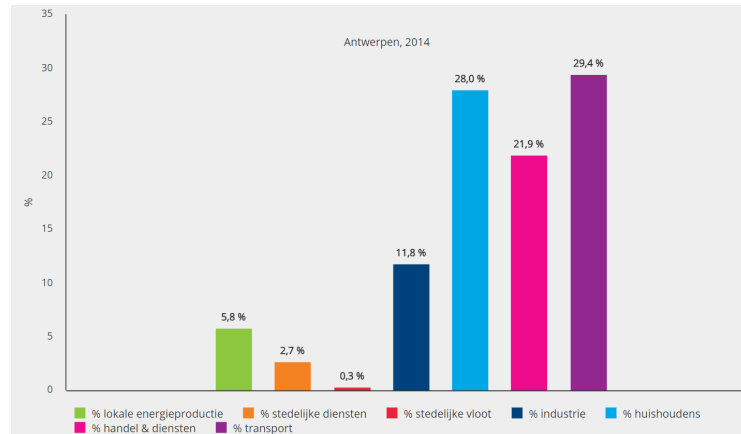
Klimaat en CO_2 -uitstoot hangen onvermijdelijk samen met elkaar. Om een beeld te krijgen van het huidige klimaat en de huidige CO_2 -uitstoot binnen de stad Antwerpen worden de gegevens, beschikbaar gesteld door de stad Antwerpen in [28], hier voorgesteld.

Om de totale hoeveelheid emissies in de volledige stad te kunnen bepalen wordt er rekening gehouden met emissies van CO_2 , CH_4 en N_2O . De aandelen van de drie emissiebronnen worden omgezet tot CO_2 -equivalenten. Uitgaande van deze berekening volgt dat in 2014 de stad een emissie van 3153,3 kTon kende [28]. Dit getal geeft de “emissies weer door direct verbruik van brandstoffen en lokale procesemissies en indirect verbruik van elektriciteit” [28]. Verschillende oorzaken zorgen voor deze emissies [28]:

- Transport : 29,4 %
- Handel en diensten: 21,9 %
- Industrie: 11,8%

- Huishoudens: 28%
- Lokale energieproductie, stedelijke vloot en stedelijke diensten: 8,9 %

Dezelfde resultaten zijn visueel voorgesteld in onderstaande figuur 3.2 uit [28].



Figuur 3.2: Aandeel van de verschillende sectoren in de CO_2 -uitstoot in stad Antwerpen

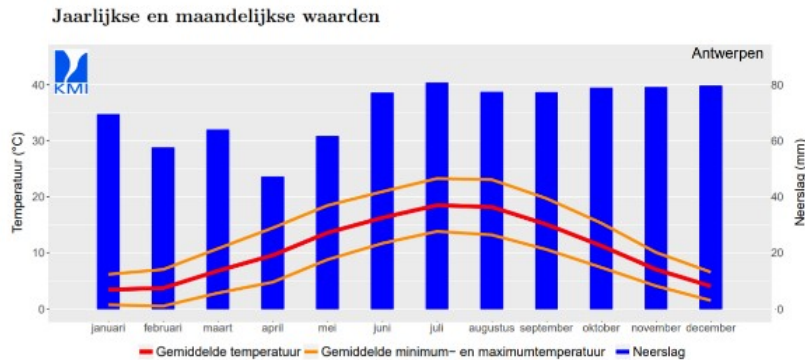
De informatie over het klimaat in Antwerpen is beschikbaar op de website van het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België of kortweg KMI. Voor elke Belgische gemeente is de gemiddelde neerslag, zonnestraling, temperatuur, onweers- en sneeuwdagen beschikbaar gesteld. Zoals beschreven in [29] zijn alle statistische waarden bepaald door “waarnemingen afkomstig van stations in een regelmatig raster met een resolutie van 1 km ruimtelijk te interpoleren. De waarden voor elke gemeente zijn dan de gemiddelde van de waarden die berekend werden voor elk rasterpunt dat zich boven het gemeentelijk grondgebied bevindt.” De periode waarover de statistieken berekend zijn, gaat van 1981 tot 2010.

De stad Antwerpen kent een gemiddelde jaarlijkse temperatuur van $10,6^{\circ}C$ met een minimale gemiddelde temperatuur in januari van $3,4^{\circ}C$ en een gemiddelde minimumtemperatuur van $0,7^{\circ}C$ in dezelfde maand. De maximale gemiddelde temperatuur is terug te vinden in de maand juli en bedraagt $18,5^{\circ}C$, voor deze maand is de gemiddelde maximumtemperatuur $23,2^{\circ}C$ [30].

De jaarlijkse gemiddelde neerslag in de stad Antwerpen bedraagt 848,4 mm. De maand juli kent de grootste gemiddelde hoeveelheid neerslag, namelijk 80,6 mm. In april valt er het minste neerslag, dan is de gemiddelde hoeveelheid neerslag gelijk aan 47,1 mm. Het gemiddeld aantal neerslagdagen met minstens 1 mm neerslag/dag bedraagt 132,7 dagen. Vooral de maand november kent het grootste aantal natte dagen. Het aantal dagen met minstens 10 mm neerslag bedraagt 23,7 dagen. Vooral de maanden juli en augustus kennen het meeste aantal dagen met minstens 10 mm [30]. Dit is vooral te wijten aan de hevige zomeronweders tijdens deze periode. Door

de hogere temperaturen in deze periode is er meer verdamping en hebben bijgevolg de regenbuien die dan voorkomen een hogere neerslagintensiteit.

Een algemeen overzicht van al deze cijfers is te zien in onderstaand klimatogram (figuur 3.3 uit [30]) van het KMI. Deze figuur geeft de jaarlijkse cyclus weer van het gemiddelde klimaat in de stad Antwerpen [30].



Figuur 3.3: Weergave van de maandelijkse gemiddelde temperaturen en de maandelijkse gemiddelde neerslag in de stad Antwerpen

Op dit klimatogram is te zien dat zowel de temperatuur als de neerslaghoeveelheden het grootst zijn in de zomermaanden. Dit toont aan waarom de zomeronweders zorgen voor de kwetsbaarheid voor overstromingen van de stad. Door de hogere temperaturen blijft het langer droog waardoor de regenintensiteiten die daarna optreden hoger zijn en bijgevolg sneller voor overstromingen zullen zorgen.

3.2 Beschikbare neerslagdata

Verschillende neerslaggegevens zijn beschikbaar voor het gebied Antwerpen die mogelijks gebruikt kunnen worden in deze studie. Over het volledige gebied van Antwerpen zijn pluviograafgegevens en radargegevens beschikbaar. Onderstaande secties bespreken de verschillende beschikbare neerslagdata.

3.2.1 Pluviograafgegevens

Over de volledige regio Antwerpen zijn er metingen beschikbaar van 12 pluviografen beheerd door de stad zelf. Deze pluviografen bevatten meetgegevens voor de periode van 1994 tot 2005 met een tijdsresolutie van 1 minuut. Echter wel bevatten de neerslagreeksen een aantal ontbrekende data. Daarnaast zijn de tijdsreeksen van korte duur wat nadelig is voor een langetermijnanalyse. Na 2005 zijn er weinig of geen gegevens meer bekend van de pluviografen. Hierdoor zijn analyses na 2005 op basis van de 12 pluviografen niet meer mogelijk [1].

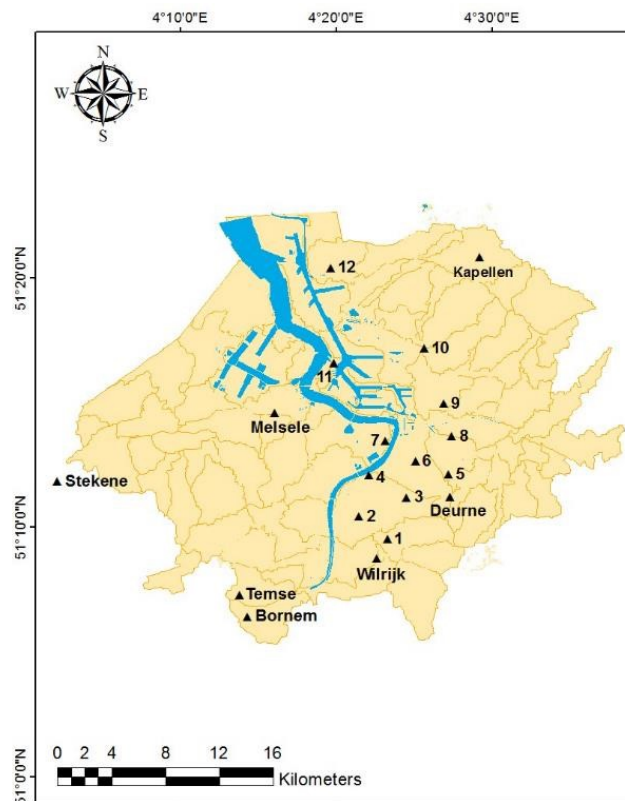
Naast deze 12 pluviografen zijn er bovendien ook vier andere pluviografen ter beschikking rondom de regio Antwerpen. Deze vier pluviografen zijn terug te vinden in Kapellen, Melsele, Wilrijk en Stekene en worden beheerd door VMM [1]. Deze

pluviografen hebben gezorgd voor neerslagreeksen over de periode van 2004 tot 2014 en hebben een tijdsresolutie van 15 min [1].

Vervolgens zijn er pluviograafgegevens beschikbaar voor de gebieden Temse en Bornem. Deze twee pluviografen bevinden zich op de rand van de provincie Oost-Vlaanderen met de provincie Antwerpen en worden beheerd door het Hydrologische Informatiecentrum (HIC) van de Vlaamse Overheid [1]. De pluviograaf in Temse leverde gegevens voor een periode van 2007 tot 2012 met een tijdsresolutie van 1 uur. De neerslagreeks van de pluviograaf in Bornem is slechts van korte duur, van 2013 tot 2014 met een tijdsresolutie van 15 min. Ook hier weer zijn er ontbrekende data terug te vinden in beide neerslagreeksen [1].

Tot slot is er nog een pluviograaf beschikbaar in Deurne die beheerd wordt door het KMI [1]. De neerslagreeks die verkregen wordt door de pluviograafmetingen, bestrijkt een periode van 1976 tot 2006 en heeft een tijdsresolutie van 1 uur. In tegenstelling tot de voorgaande pluviograafgegevens, kent de pluviograafmeting van Deurne een zeer volledige datareeks [1]. De Deurnereeks is erg handig en volledig in gebruik.

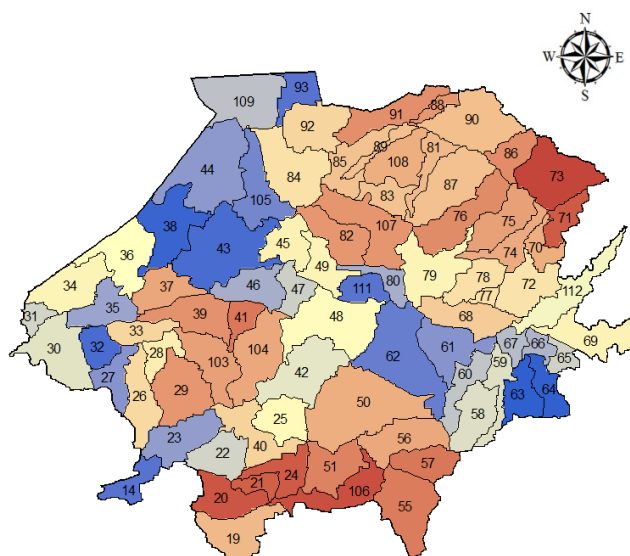
Alle beschreven pluviografen zijn terug te vinden op onderstaande figuur 3.4 overgenomen uit [1]. Het studiegebied dat in deze masterproef beschouwd wordt, is gelegen aan pluviografen 3, 4, 6 en 7.



Figuur 3.4: Pluviografen in regio Antwerpen

3.2.2 Radargegevens

Naast de pluviograafgegevens zijn er ook radargegevens beschikbaar voor de volledige regio van Antwerpen. Deze radargegevens bevatten data voor een periode van 2008 tot 2014 en hebben een tijdsresolutie van 15 min. De gegevens voor Antwerpen zijn gebaseerd op de radargegevens van de C-band radars in Zaventem, Jabbeke en Wideumont. De drie radars worden allen beheerd door het VMM [1]. De radargegevens beschrijven gebiedsgemiddelde neerslag voor een groot gebied. Om deze data toe te kunnen passen op het gebied Antwerpen, zijn statistische en dynamische kalibratiemethodes gebruikt. Deze vallen echter buiten het bestek van deze studie. Het resultaat van de kalibratie is te zien in figuur 3.5. De radardata is omgezet naar neerslagegevens specifiek voor verschillende deelgebiedjes binnen Antwerpen. Het studiegebied dat deze masterproef beschrijft, bevindt zich in het gebied 62 op figuur 3.5 overgenomen uit [1].



Figuur 3.5: Radargebiedjes in Antwerpen

3.2.3 Composietbuien van Ukkel

Naast de pluviograafdata en radardata voor de stad Antwerpen zijn ook composietbuien, gebaseerd op de Ukkelreeks, beschikbaar. De Ukkelreeks bevat neerslagdata sinds 1898 met een tijdsresolutie van 10 min. Deze reeks is bijzonder volledig en kan gebruikt worden voor langetermijnanalyses. Daarnaast is de Ukkelreeks bij benadering bruikbaar als gemiddelde voor Vlaanderen. De Ukkelreeks wordt gebruikt voor ontwerp van nieuwe rioleringen (volgens de Code van Goede praktijk) wat eveneens een argument is voor het gebruik van de reeks in deze masterproef [3].

De composietbuien zijn bovendien erg handig in de modelleringen aangezien dit kunstmatig samengestelde buien zijn die alle soorten (korte en lange duur) buien

met eenzelfde terugkeerperiode bevatten [4]. Met beperkte rekentijd kan zo een hele reeks van neerslaggebeurtenissen doorgerekend worden.

3.2.4 Composietbuien van Antwerpen

Tot slot zijn er composietbuien beschikbaar voor het gebied Antwerpen. Deze composietbuien zijn gebaseerd op de radardata zoals hoger beschreven. Voor elke gebied uit figuur 3.5, werd aan de afdeling Hydraulica van de KULeuven alle beschikbare radardata samengevoegd, gekalibreerd aan de beschikbare pluviografen en statistisch verwerkt om representatieve composietbuien te hebben voor elke deelgebied [31]. De composietbuien die van toepassing zijn in deze studie zijn de composietbuien voor het deelgebied 62.

3.2.5 Gebruikte neerslaggegevens

De pluviograafdata geven allen puntneerslag. Het studiegebied omvat pluviografen 3, 4, 6 en 7. Om de gebiedsgemiddelde neerslag te kennen over het beschouwde studiegebied zou een methode nodig zijn zoals bijvoorbeeld de Thiessen-polygoon methode om de neerslag van de vier beschouwde pluviografen uit te middelen over het gebied. Door het ontbreken van verschillende gegevens in de neerslagreeksen moet er gezocht worden naar een tijdsperiode waarin alle vier de reeksen een volledige dataset bevatten. Hierdoor wordt de beschikbare periode erg kort waardoor een grondige langetermijnanalyse moeilijk wordt. Het klimaat kent immers niet alleen verandering door de opwarming van de aarde maar kent ook natuurlijke schommelingen. De schommelingen strekken zich uit over een periode van ongeveer 30 jaar alvorens de natuurlijke cycli zich herhaalt. Om deze reden is het beter een langere datareeks te beschouwen waarbij zowel de natuurlijke schommeling van het klimaat als de klimaatsverandering ten gevolge van de opwarming van de aarde in vervat zitten. Door beide fenomenen mee te nemen wordt vermeden dat de neerslagintensiteit onderschat wordt [4].

De radardata voor deelgebied 62 bevat een complete dataset. Echter is deze reeks ook slechts 6 jaar lang waardoor hier eveneens het probleem optreedt dat dit voor een langetermijnanalyse te kort is.

De Deurnereeks daarentegen is wel volledig en voor een voldoende lange tijdspanne (30 jaar) beschikbaar waardoor deze reeks de meest geschikte is en ook nog dicht aanleunt bij het beschouwde studiegebied. Deze reeks zal daarom gebruikt worden voor de analyse van deze masterproef. De radardata kan eventueel wel gebruikt worden om te valideren dat de Deurnereeks effectief ook van toepassing is op het beschouwde studiegebied.

Om de rekentijd in InfoWorks ICM te minimaliseren kan er best gewerkt worden met composietbuien in plaats van met lange neerslagreeksen. De composietbuien van Ukkel zijn hiervoor zeer geschikt.

De composietbuien van Antwerpen zullen in eerste instantie niet gebruikt worden in de analyse maar zullen in een latere fase van deze masterproef wel gebruikt

worden om de impact van het hitte eiland effect na te gaan. Deze buien geven systematisch hogere overstromingsvolumes dan bijvoorbeeld de composietbuien van Ukkel. Dit kan verklaard worden doordat in de composietbuien van Antwerpen het hitte eiland effect ingerekend is. Zoals aangegeven in de inleiding is dit effect vooral merkbaar in de stad Antwerpen door de hoge graad van verharding in de stad. De composietbuien van Ukkel kennen dit fenomeen niet en zijn daardoor eerder representatief, gemiddeld gezien, voor heel Vlaanderen. De beschikbare composietbuien van Antwerpen omvatten enkel de terugkeerperiodes 2, 5 en 20 jaar. Ze zijn dus nuttig als vergelijkende tool maar volstaan niet als enige neerslagbron voor deze studie omwille van de lage terugkeerperiode. In het geval van zomeronweders kunnen er immers makkelijk veel hogere terugkeerperiodes bereikt worden dan 20 jaar.

3.3 Recentelijke overstromingen en kwetsbare gebieden

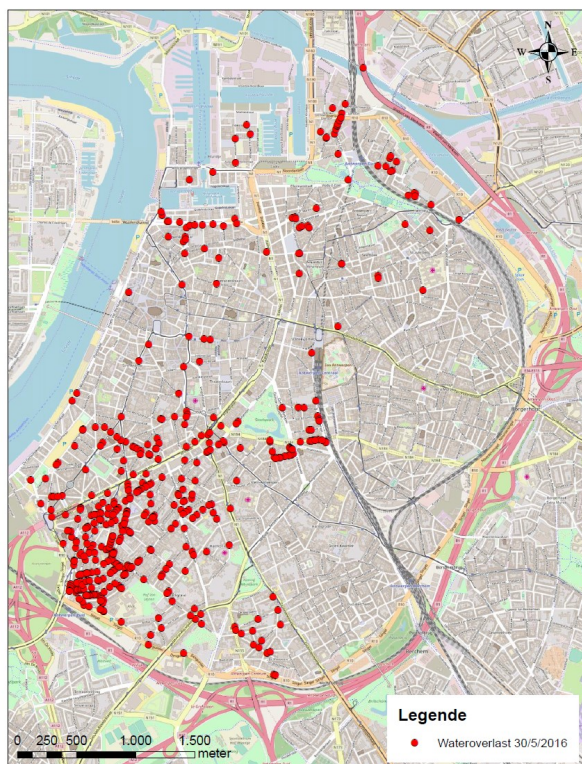
Vandaag al heeft Antwerpen reeds te maken met overstromingen onder invloed van hoge neerslagintensiteiten. Daarom wordt in dit deel een overzicht gegeven van een aantal recentelijke overstromingen om te kaderen wat reeds nu al kwetsbare gebieden zijn binnen het beschouwde studiegebied. Uitgaande van de analyse van de klimaatverandering kan dan nagegaan worden of deze gebieden nog steeds de meeste kwetsbare zijn en/of er andere gebieden eveneens extra aandacht zullen vragen.

- 30/5/2016:

Hevige regenval van lange duur boven de stad Antwerpen leidde tot grote overstromingen in de binnenstad. De maand mei in 2016 kende een aantal zonnige dagen met zomerse temperaturen. Als gevolg daarvan kreeg België te maken met hevige regenbuien. Op sommige plaatsen in Vlaanderen liepen de neerslaghoeveelheden op tot 90 mm. De gemeten neerslaghoeveelheden in Antwerpen liepen plaatselijk op tot 70 mm met volgens het KMI een gemiddelde van 57 mm voor de hele stad. Hierdoor kreeg de brandweer van Antwerpen tot 1500 oproepen binnen in verband met wateroverlast.

de Paleisstraat en de Balansstraat kregen te maken met wateroverlast tot 0,5 m hoog. Deze straten zijn terug te vinden in het gebied links van gebied 'Harmonie', ter hoogte van de Brederodewijk [32, 33, 34]. Een overzicht van alle meldingen van wateroverlast binnen het studiegebied is te zien op figuur 3.6.

Plaatsen met wateroverlast door hevige regenval op 30/5/2016



Figuur 3.6: Plaatsen met wateroverlast door hevige regenbui op 30/5/2016

- 10/8/2014:
Op deze dag kende Vlaanderen een toestand van noodweer met hevige rukwinden en neerslag ten gevolge van tropische cycloon Bertha. Het KMI gaf code Oranje op voor de weersomstandigheden toen. Neerslaghoeveelheden werden gemeten in de pluviograaf te Kapellen van 25 mm. De pluviograaf in Bornem mat een neerslaghoeveelheid van 29 mm [35]. Lokale wateroverlast werd daardoor waargenomen in de stad Antwerpen. Onder meer wateroverlast in de Catharina Beersmansstraat, de Balansstraat, de Coebergstraat en de Ijzerlaan werden gemeld bij de brandweer [36]. De blauwe bolletjes op figuur 3.9 duiden deze straten aan. Ook Zwijndrecht en de Kennedytunnel kende wateroverlast op deze dag [36]. Dit is te zien op onderstaande foto 3.7.
- 8/11/2013:
Wateroverlast werd waargenomen ter hoogte van de Brederodestraat in Antwerpen-Zuid (het groene bolletje op figuur 3.9). Een rioolputje in de straat werkte niet waardoor onder invloed van hevige regenval het regenwater niet goed afgevoerd kon worden naar de rioleringsbuizen. Een ander rioolputje was niet toegankelijk



Figuur 3.7: Wateroverlast in de Kennedytunnel op 10/8/2014 [2]

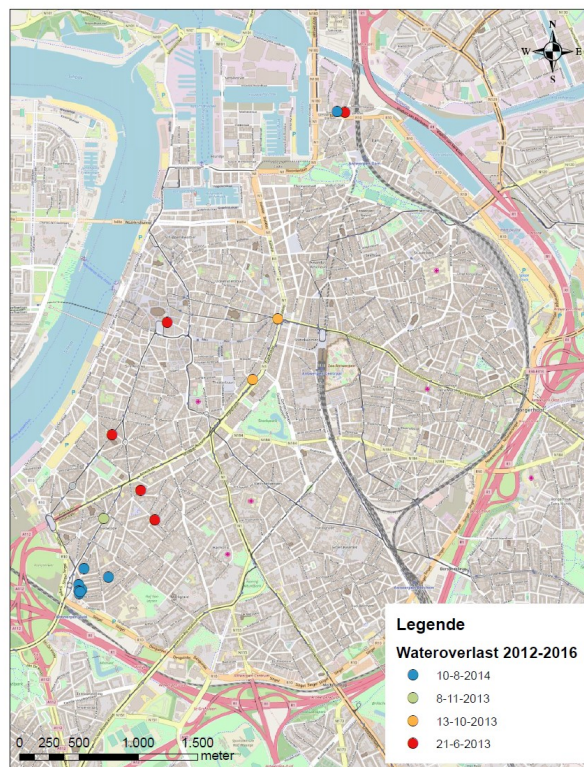
voor het water doordat er een wagen op geparkeerd stond. Het water in de straat kwam tot aan het voetpad waardoor kelders onder water kwamen te staan [36].

- 13/10/2013:
Hevige regenval tot plaatselijk 40 mm viel neer op 13 oktober 2013 in Vlaanderen [37]. De pluviografen in Melsele mat 43,65 mm, de pluviograaf in Wilrijk telde 34,15 mm op deze dag. Erg veel wateroverlast werd niet veroorzaakt door deze neerslag. Wel is er melding gemaakt bij de brandweer van wateroverlast in de Frankrijklei [36]. Deze punten zijn aangeduid op figuur 3.9 met de oranje bolletjes.
- 21/6/2013:
Ten gevolge van een aantal warme zomerdagen in de maand juni kreeg België op 21 juni 2013 te maken met een aantal hevige onweersbuien met wateroverlast tot gevolg. De pluviografen in Melsele en Wilrijk kende respectievelijk een hoeveelheid neerslag van 17,34 mm en 36,1 mm. De straten die het zwaarst getroffen werden door de wateroverlast waren de Havanastraat, de Noorderlaan, de Bredastraat, de Volkstraat, de Boudewijnsstraat en de Paleisstraat [36]. Al deze straten zijn aangegeven met de rode bolletjes op figuur 3.9. De overstroming van de Bredastraat is te zien op onderstaande figuur 3.8.



Figuur 3.8: Overstroming van de Bredastraat op 21 juni 2013 [2]

Selectie van een aantal plaatsen met wateroverlast door hevige regenval tussen 2012 en 2016



Figuur 3.9: Een selectie van een aantal plaatsen met wateroverlast tussen 2012 en 2016

3.4 Beschikbare rioleringsmodel in InfoWorks ICM

Om de invloed van de neerslag op het studiegebied te modelleren wordt gebruik gemaakt van het programma InfoWorks ICM. Er is reeds een model beschikbaar voor het beschouwde studiegebied, opgesteld door Rio-Link. Dit model is te zien in figuur 3.10. Het model bevat het volledige rioleringsnetwerk van het historische centrum van Antwerpen, Antwerpen-Zuid en Antwerpen-Noord. Simulaties in het rioleringsmodel kunnen enerzijds uitgevoerd worden met flood cones en anderzijds met een 2D mesh. Het principe van de flood cones en de 2D mesh wordt verder in dit hoofdstuk uitgelegd.

Een validatie van het model is nodig om na te gaan of de resultaten die volgen uit de simulaties representatief zijn voor de werkelijkheid. Ook dit komt verder in dit hoofdstuk aan bod.



Figuur 3.10: InfoWorks ICM model van het studiegebied

3.4.1 Eigenschappen van het rioleringsmodel

Het gemodelleerde rioleringsnetwerk bedekt een overstroombare oppervlakte van 1051,26 ha. Het netwerk bevat 8547 knopen, deze kunnen onderverdeeld worden in mangaten, opslagknopen en uitlaten. De volgende tabel 3.4 geeft deze opsplitsing weer met het bijhorende aantal knopen.

Tabel 3.4: Soorten knopen en aantallen in het rioleringsmodel

Soort knoop	Aantal
Mangaten	8547
Uitlaat	53
Opslagknoop	4
Totaal	8547

Het aantal leidingen in het netwerk bedraagt 9875, goed voor samen een totale lengte van 347,11 km. Verschillende soorten doorsnedes van leidingen zijn in het netwerk terug te vinden. Onder meer cirkelvormige, rechthoekige, ovaalvormige en eivormige doorsnedes zijn gebruikt. De diameters van deze leidingen variëren tussen de 70 mm en 12 000 mm. De leidingen kunnen onderverdeeld worden in gemengde rioleringsbuizen en gescheiden rioleringsbuizen die ofwel regenwater ofwel afvalwater afvoeren. Onderstaande tabel 3.5 geeft de onderverdeling van de soorten leidingen.

Hieruit is af te leiden dat het grootste deel van het netwerk is opgebouwd met een gemengd rioleringsstelsel.

Tabel 3.5: Soorten leidingen en aantallen in het rioleringsmodel

Soort leiding	Aantal
Gemengde leiding	5592
Regenwaterafvoer	3839
Afvalwaterafvoer	406
Andere	38
Totaal	9875

Andere elementen die terug te vinden zijn in het netwerken zijn pompen, terugslagkleppen en overstortschuiven. De overstortschuiven zijn voornamelijk terug te vinden langs de kant van de Schelde. Zij laten toe om bij een grote belasting van het netwerk, een deel van het regenwater rechtstreeks af te voeren naar de Schelde om zo de impact op het stelsel te doen afnemen [38].

Het netwerk kent een aantal randvoorwaarden die in rekening genomen moeten worden om de simulaties op een correcte manier te interpreteren. Ten eerste moet de “Real Time Control” beschouwd worden. Het netwerk kent twee scenario’s, het basis scenario en het scenario dat rekening houdt met een real time controle van de pompen en overstorten. De real time controle regelt de werking van de pompen en overstorten op basis van de toestand in het netwerk. Een andere en belangrijkere randvoorwaarde die in rekening genomen moet worden, is de oplegging van de waterniveaus in de Schelde. Drie verschillende situaties omtrent de waterniveaus in de Schelde kunnen zich voor doen:

1. *Geen waterniveaus opleggen in de Schelde*

In deze situatie zijn er geen randvoorwaarden voor de overstorten langs de Schelde. Het water dat langs deze knopen passeert zal dan altijd uitstromen langs deze overstorten in de rivier.

2. *Modellering van eb en vloed*

Wanneer gekozen wordt om de waterstanden in de Schelde wel op te leggen, zullen de overstortschuiven afhankelijk van deze waterniveaus openen of sluiten.

3. *Springtij*

De waterniveaus die beschouwd zijn in dit netwerk gaan uit van springtij in de Schelde [38]. Daardoor zullen de overstortschuiven steeds gesloten zijn en kan er geen overtollig regenwater afgevoerd worden naar de Schelde waardoor de impact op het rioleringsstelsel verhoogd. De impact van het in rekening nemen van de toestand van springtij wordt verder onderzocht in deel 3.5.3 van deze masterproef.

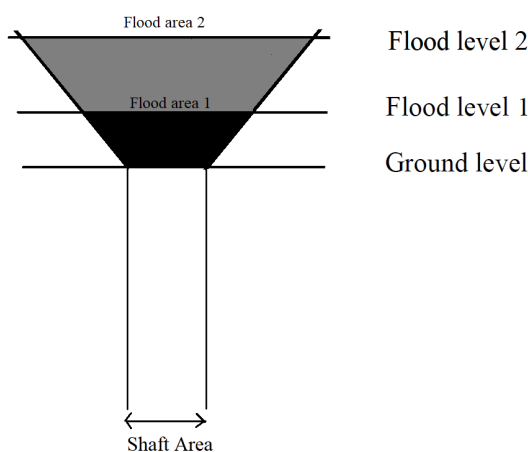
3.5 Simulaties in InfoWorks ICM

InfoWorks ICM laat toe om simulaties uit te voeren op twee verschillende manieren, die beiden toegepast zullen worden in deze masterproef. Enerzijds zullen de simulaties uitgevoerd worden met een 1D-model gebaseerd op flood cones. Anderzijds zal een gedetailleerdere simulatie gebeuren op basis van een 2D mesh. Beide methodes zullen in dit hoofdstuk uitgelegd en besproken worden.

3.5.1 Simulaties met behulp van flood cones

De eerste methode die beschouwd wordt is de simulatie van de neerslaggebeurtenissen met behulp van flood cones.

In plaats van het overstromingswater te laten uitstromen over de straat, wordt bij deze methode voor elke knoop in het model, het overstromingsvolume verzamelt in een omgekeerde kegel, de zogenaamde flood cone. Het principe van de modellering met behulp van de flood cones is te zien op figuur 3.11.



Figuur 3.11: Principe van flood cones

Als eerste wordt het ground level gedefinieerd, dit is het niveau dat de overgang aangeeft tussen de mangatschacht en de onderkant van de kegel. Dit niveau komt met andere woorden overeen met het maaiveldniveau. Vervolgens kunnen de flood levels gedefinieerd worden. Deze overstromingsniveaus geven de dieptes aan waarop het overstromingswater zich verspreidt over de overstromingsoppervlaktes (flood area 1 en 2). De overstromingsoppervlakte tenslotte geeft het procentuele deel aan van de overstroombare oppervlakte ter hoogte van het beschouwde overstromingsniveau [39].

In het gebruikte model wordt overstromingsniveau 1 gelijk gesteld aan 1 m. De bijhorende overstromingsoppervlakte bij deze hoogte bedraagt 10% van de overstroombare oppervlakte. Bijgevolg is in dit geval 10% van de kegel gevuld. Het overstromingsniveau 2 ligt op 99 m hoog en kent een overstromingsoppervlakte gelijk aan 100% van de overstroombare oppervlakte. In dit geval is de kegel volledig gevuld. De shaft area geeft de oppervlakte aan van de sectie van de schacht van het mangat en bedraagt in dit model telkens $1,1 \text{ m}^2$.

Deze methode heeft als voordelen dat ze snelle rekentijden kent en dat weinig data voor handen moet zijn om de simulatie te kunnen uitvoeren in tegenstelling tot een 2D-modellering. Het nadeel is wel dat deze methode veel minder nauwkeurig is dan de methode met de 2D mesh [40]. Deze methode geeft immers minder realistische resultaten qua overstromingsvolumes aangezien de omgekeerde kegels niet gekalibreerd zijn. In principe moet het volume water in de kegel overeenkomen met het volume water dat op straat terecht komt, dit is echter nooit het geval. Per knoop is er een aparte flood cone gedefinieerd die een bepaald overstromingsvolume kent. Hierdoor is er geen interactie mogelijk tussen de volumes wat in werkelijkheid wel zo is. In werkelijkheid stroomt het overstromingswater immers op straat en vermengt het zich met water van de andere overstroomde mangaten. De totale hoeveelheid overstromingswater stroomt dan af naar een afwaarts gelegen punt. De simulatie met de flood cones kan dit systeem niet weergegeven. Bijgevolg is deze methode goed om als eerste schatting een beeld te krijgen van kwetsbare deelgebieden in het gehele studiegebied en om inschatting te krijgen in de mate van overstroming voor de verschillende knopen maar kan er geen volledig vertrouwen gelegd worden in de exacte waarden van de overstromingsvolumes in de kegels. Om hieraan tegemoet te komen zal ook gebruik gemaakt worden van de 2D mesh, deze laat wel toe om het water op de straat te laten stromen en een interactie weer te geven tussen dit overstromingswater van alle knopen.

3.5.2 Simulaties met behulp van 2D mesh

Naast de simulaties met de flood cones, is het ook mogelijk om meer gedetailleerde simulaties uit te voeren op basis van een 2D mesh. Dit laat toe om rechtstreeks water op straat te simuleren.

Om over te gaan van het 1D-netwerk naar het 2D-netwerk, zijn een paar aanpassingen nodig aan het model. Het 2D-model is opgesteld in het kader van het doctoraatsonderzoek van ir. A. A. Gonzalez Iniguez en is eveneens gebruikt voor deze masterproef [41]. De belangrijkste aspecten voor de opmaak van het 2D-model zullen kort overlopen worden zonder uitgebreid in detail te gaan.

Om een 2D mesh te definiëren in InfoWorks ICM zijn een aantal objecten vereist: Een 2D-zone, gebouwen (voids), infiltratiezones en ruwheidszones [41]. De 2D-zone omvat alle nodige informatie voor de opmaak van de mesh-elementen. Het omvat onder andere informatie over de resolutie van de mesh (de fijnheid), de

oppervlakteruwheid voorgesteld door een Manningscoëfficiënt en infiltratiekarakteristieken van de grond wat weergegeven kan worden door middel van bijvoorbeeld een runoff-coëfficiënt. De grootte van de driehoekige mesh-elementen in het model gebruikt voor deze masterproef bedragen $1,5 \text{ m}^2$ tot 30 m^2 . De Manningscoëfficiënt die van toepassing is in de 2D-zone, is gelijk aan 0,0125 [41].

Naast de opmaak van deze 2D mesh, dient ook het zogenaamde “flood type” van de knopen aangepast te worden van “Flooded” naar “2D” om te garanderen dat InfoWorks de juiste achterliggende berekeningen en vergelijkingen oplost [41].

Vervolgens is het nodige om zogenaamde ‘Voids’ te definiëren. Dit zijn zones waar geen mesh-elementen gedefinieerd worden. De voids worden gegenereerd op locaties waar gebouwen terug te vinden zijn om ervoor te zorgen dat het water rond gebouwen stroomt en bijgevolg alleen op straat of open vlaktes stroomt. Door een DHM met gebouwen toe te voegen (zie ook hoofdstuk 5) kunnen de locaties van deze gebouwen vastgelegd worden [41].

Een volgend aspect dat aangeduid dient te worden zijn infiltratiezones zodanig dat rekening gehouden kan worden met regenwater dat infiltreert in de grond en dus niet meer afstroomt op de straat. In het model voor Antwerpen wordt hiermee rekening gehouden door permeabele gebieden aan te duiden die een runoff-coëfficiënt hebben gelijk aan 0,05 en impermeabele gebieden met een runoff-coëfficiënt van 0,9. Voor deze permeabele gebieden dient ook de Manningscoëfficiënt aangepast te worden: 0,045 wordt toegepast voor de permeabele gebieden in plaats van de eerdere gedefinieerde 0,0125 (voor impermeabele gebieden) [41].

De fijnheid van de mesh-elementen kan aangepast worden naargelang meer of minder detaillering nodig is. Zo heeft een infiltratiezone zoals een stadspark minder kans op overstromen waardoor daar de mesh-elementen ruwer kunnen zijn dan gebieden waar wel overstroming te verwachten is.

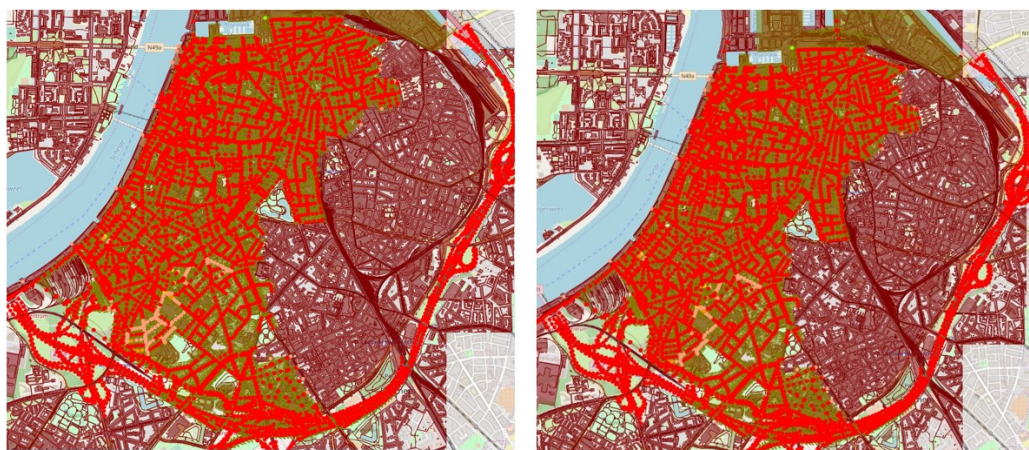
3.5.3 Randvoorwaarden

Zoals beschreven in deel 3.4.1 zijn er verschillende randvoorwaarden mogelijk in het rioleringsmodel van de stad Antwerpen. Aangezien het model uitgaat van waterstanden die zich voordoen in de situatie van springtij, wordt in deze sectie nagegaan wat de invloed is van deze randvoorwaarde en of dit van toepassing is voor deze studie. In de situatie van springtij, wordt ervan uitgegaan in het model dat het hoogste waterpeil zich voordoet op het moment dat ook de storm de hoogste intensiteit bereikt. Dit komt er concreet op neer dat enkele uren voor de piek van de storm alle overstortschuiven, die overtollig water van het rioleringsstelsel naar de Schelde brengen, dicht gaan. De schuiven openen terug enkele uren na de storm [38]. Omwille van het sluiten van de schuiven kan er geen regenwater rechtstreeks afgevoerd worden naar de Schelde, wordt het rioleringsnetwerk zwaarder belast en stijgt de kans op overstromingen.

Deze aanname van springtij in combinatie met het sluiten van de schuiven op het moment van de piek van de bui is een erg negatieve aanname, de situatie van springtij waarbij het moment van de hoogste waterstanden overeenkomt met de piek van de storm kent een terugkeerperiode die groter is dan 20 jaar [38]. Riolerings worden

ontworpen om weerstand te kunnen bieden aan regenbuien met een terugkeerperiode van 20 jaar. Voor deze terugkeerperiode stelt de Code van Goede praktijk dat er geen water op straat mag komen [3]. De situatie van springtijd is veel uitzonderlijker dan deze eis waardoor in die situatie wel aanvaard wordt dat er wateroverlast zal voorkomen.

Om te bepalen welke situatie van toepassing is op deze masterproef, is een vergelijking nodig van de simulatieresultaten. Enerzijds worden de simulaties beschouwd waarbij er geen waterstanden opgelegd worden en dus vrije overstorting in de Schelde mogelijk is. Anderzijds wordt de situatie beschouwd waarbij er wel waterstanden opgelegd worden aan de Schelde waardoor het model uitgaat van springtij en de overstortschuiven gesloten worden. In het geval dat de toestand van springtij zich voordoet, wordt de Real Time controle in acht genomen die de pompen en overstortschuiven aansturen. Wanneer geen waterstanden opgelegd worden is de toestand in het netwerk met of zonder de Real Time Controle volledig gelijk. Simulaties zijn uitgevoerd met behulp van de composietbuizen van Ukkel voor terugkeerperiodes van 2, 10, 25 en 100 jaar. De twee uiterste situaties met terugkeerperiode 2 jaar en 100 jaar worden besproken en zijn terug te vinden in onderstaande figuren 3.12 en 3.13. De terugkeerperiodes 10 en 25 jaar zijn tussenliggende situaties. De linkerfiguren omvatten de situatie van springtij (dus waterstanden opgelegd in de simulatie), de rechtse figuren geven de situatie van vrije overstorting indien er geen waterstanden opgelegd worden.



Figuur 3.12: Impact van beschouwen van springtij op het rioleringsnetwerk: Vergelijking voor terugkeerperiode 2 jaar met links de situatie met springtij en rechts de situatie van vrije overstorting zonder springtij

Zoals te zien op deze figuren komt inderdaad tot uiting dat de situatie van springtij een grotere impact heeft op het netwerk. De rode knopen zijn de flood cones die geen overstrooming kennen. De andere kleuren variëren van oranje tot donkerblauw



Figuur 3.13: Impact van beschouwen van springtij op het rioleringsnetwerk: Vergelijking voor terugkeerperiode 100 jaar met links de situatie met springtij en rechts de situatie van vrije overstorting zonder springtij

waarbij de oranje punten een overstromingsvolume in de flood cone hebben tussen 0 en 2 m^3 en de donkerblauwe punten een overstromingsvolume groter dan 100 m^3 . De andere kleuren hebben tussenliggende waarden. De variatie van oranje naar geel naar groen en naar blauw geeft de stijgende trend van de hoeveelheid water in de flood cones aan.

Voor een terugkeerperiode van 2 jaar is er amper verschil te zien in de situatie met en zonder springtij. Dit is logisch aangezien bij een terugkeerperiode van 2 jaar het netwerk geen of slechts zeer minimale overstroming kent en er in principe geen overstorting nodig is. Voor een terugkeerperiode van 100 jaar zijn er veel meer overstromingen in het geval van springtij, die zich nu ook uitstrekken tot aan de Schelde zelf. De riolering van het gebied aan Brederodewijk (zone A) is vol waardoor het water zich meer verspreidt doorheen het stelsel. Aangezien het water niet kan uitstromen naar de Schelde zullen er zich ook overstromingen voordoen ter hoogte van de zone naast de rivier. Het gebied rechts onder het Eilandje (zone B) kent ook iets meer overstroming in het geval van springtij, al zijn daar de verschillen klein. Algemeen kan gesteld worden dat de situatie waarin uitgegaan wordt van springtij voornamelijk van invloed is op het gebied aan de Brederodewijk. Dit gebied is het kwetsbaarste gebied voor overstromingen aangezien het geografisch lager ligt dan de rest van Antwerpen. Wanneer het rioleringsnetwerk dan zwaarder belast wordt ten gevolge van het sluiten van de overstortschuiven, is het logisch dat voornamelijk dit gebied een invloed ondervindt. Daarnaast kan ook besloten worden dat de impact van het sluiten van de overstortschuiven ook pas belangrijk wordt vanaf de grotere terugkeerperiodes.

Voor de verdere studie zal gebruik gemaakt worden van de situatie zonder springtij. De situatie van springtij waarbij de waterhoogtes en de piek van de bui op een gelijktijdig moment een hoogtepunt kennen is zeer uitzonderlijk.

Wanneer deze gebruikt zou worden voor de verdere analyse zou bijgevolg een overschatting gemaakt worden van de meest frequent voorkomende situaties. Daarnaast is het voornaamste doel van deze masterproef om een algemeen beeld te krijgen van de impact van de klimaatverandering op Antwerpen, waardoor het volstaat om naar de meest voorkomende toestand te kijken. Uiteraard kan het wel nuttig zijn om de methodologie zoals beschreven in deze masterproef ook toe te passen voor het geval met springtij om de impact daarvan onder veranderend klimaat te beschouwen.

3.5.4 Validatie van het netwerk

Alvorens de resultaten, die volgen uit het netwerk, geanalyseerd kunnen worden, dient het netwerk gevalideerd te worden om zeker te zijn dat de simulatieresultaten in voldoende mate de werkelijkheid beschrijven. De validatie van het netwerk is uitgevoerd in de masterproef van D. Bertels en L. Janssen [42]. De gedetailleerde methodologie en uitwerking van de validatie van het studiegebied kan geraadpleegd worden in [42], hier zal kort ingegaan worden op de belangrijkste besluiten die volgen uit de validatie.

De validatie is uitgevoerd in twee stappen. Enerzijds is er gekeken naar eventuele inconsistenties van het model. Op deze manier kan nagegaan worden of het netwerk een goede weergave is van het werkelijke rioleringsstelsel. Er wordt nagegaan of er leidingen zijn die plots stoppen, of de leidingen voldoende grote diameters hebben, of alle leidingen voldoende gronddekking hebben, onder een correcte helling liggen, etc. Anderzijds worden historische buien doorgerekend en worden de simulatieresultaten vergeleken met foto's en gegevens van de brandweer. Op deze manier kan achterhaald worden of het model op dezelfde plaatsen overstroming kent als in werkelijkheid gebeurde en kan bepaald worden of het model voldoende nauwkeurig is.

De resultaten van de inconsistenties van het netwerk zijn (zoals overgenomen uit [42]):

- Het blijkt dat niet alle delen van het netwerk volledig verbonden zijn met elkaar. Een aantal losstaande deelnetwerken kunnen gedefinieerd worden. In totaal kent het netwerk 8604 knopen. Het grootste deelnetwerk daarvan bestaat uit 7907 knopen en stelt de riolering voor van het studiegebied van deze masterproef. Ondanks dat er dus verschillende knopen niet verbonden zijn, doet dit probleem zich niet voor in het gedeelte van het studiegebied. De deelnetwerkjes die niet verbonden zijn, kennen geen bijdrage in de simulaties aangezien deze knopen en leidingen geen water afvoeren.
- Het netwerk kent 1628 knopen die opwaarts een grotere leidingsdiameter hebben dan afwaarts. Dit is vooral te wijten aan de grote variatie van doorsnedes (cirkelvormig, rechthoekig, eivormig, etc.) van de leidingen in het netwerk.
- 1 knooppunt (iets onder het Willemdok) kent een overstromingspeil dat niet overeenkomt met het maaiveldpeil. Deze knoop zal dus steeds overstromen.
- 15 leidingen komen met de kruin boven het maaiveld uit. De minimumdekking is hier niet gerespecteerd.

- 755 leidingen liggen onder een negatieve helling. Op een aantal plaatsen is dit gerechtvaardigd, bijvoorbeeld aan het Eilandje waar de leidingen onder de dokken moeten lopen. Op andere plaatsen wijst dit echter op fouten in het netwerk.

De gebruikte historische regenbuien voor het tweede deel van de validatie zijn gebaseerd op de pluviograafdata van Wilrijk en Melsele. De resultaten die geformuleerd werden in [42] in verband met het doorrekenen van de historische buien zijn de volgende:

- Vaak worden er geen overstromingen gesimuleerd die er in werkelijkheid wel waren of worden er juist wel overstromingen gesimuleerd waarvan geen melding gemaakt is bij de brandweer. De gebieden die wel vaak terugkomen als overstroomd zijn terug te vinden aan het gebied onder het Eilandje en het gebied rond de Brederodewijk en meer bepaald de Bredastraat.
- Het model lijkt systematisch de overstromingsvolumes te overschatten.

Een mogelijke verklaring voor de overstromingen die niet gesimuleerd worden kan gevonden worden in het feit dat de neerslaggegevens afkomstig zijn van pluviografen die veraf liggen van het beschouwde studiegebied waardoor deze niet helemaal representatief zijn als zomeronweder in de stad zelf. Een mogelijke verklaring voor de gesimuleerde overstromingen die zich niet voordoen in realiteit kan zijn dat niet bij elke overstroming een oproep is gedaan bij de brandweer. Anderzijds zouden beiden fenomenen ook gewoon om fouten kunnen gaan in het netwerk [42]. De systematische overschatting van het netwerk zou te wijten kunnen zijn aan het gebruik van de flood cones die zoals eerder vermeld geen volledig realistische weergave geven van de overstromingsvolumes.

Er kan dus besloten worden dat de validatie van het netwerk geen al te optimistische resultaten oplevert. Een aantal inconsistenties worden gevonden in het netwerk en niet alle simulaties geven resultaten die goed overeenkomen met de werkelijkheid. Er moet echter wel gesteld worden dat de validatie niet erg optimaal uitgevoerd is. Het kan zijn dat de buien niet helemaal representatief zijn voor de binnenstad van Antwerpen. Daarnaast is de validatie ook gebeurd door gebruik te maken van de flood cones die een mindere nauwkeurigheid kennen. De combinatie van al deze factoren kunnen leiden tot de afwijking tussen simulatieresultaten en werkelijkheid.

3.6 Besluit

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van het studiegebied van deze masterproef en is ingegaan op de simulaties en bijhorende randvoorwaarden in InfoWorks ICM. Indien waterniveaus opgelegd worden in het model, wordt een situatie van springtij beschouwd waardoor er een grotere druk op het netwerk te zien is ter hoogte van de Brederodewijk. De situatie van springtij wordt echter niet meegenomen in deze masterproef aangezien de aangenomen situatie waarbij de waterhoogtes en de piek

van de bui gelijktijdig een hoogtepunt kennen, zeer uitzonderlijk is.

Om de correctheid van het model in te schatten is een validatie uitgevoerd die niet al te beste resultaten opleverde. Een aantal inconsistenties zijn terug te vinden en daarnaast komen historische data niet altijd overeen met de resultaten in het model. De validatie is echter niet optimaal uitgevoerd waardoor deze niet helemaal betrouwbaar is. Ondanks de tegenvallende resultaten van de validatie, wordt het model verder gebruikt voor deze masterproef omdat het voldoende nauwkeurig is voor het beoogde doel: Inzicht krijgen in de kwetsbare gebieden van de stad, de mate van mogelijke overstromingen en de uitgestrektheid van de overstromingen.

Hoofdstuk 4

Representatieve neerslagdata voor alle klimaatscenario's

4.1 Climate Perturbation Tool

4.1.1 Achtergrondinformatie

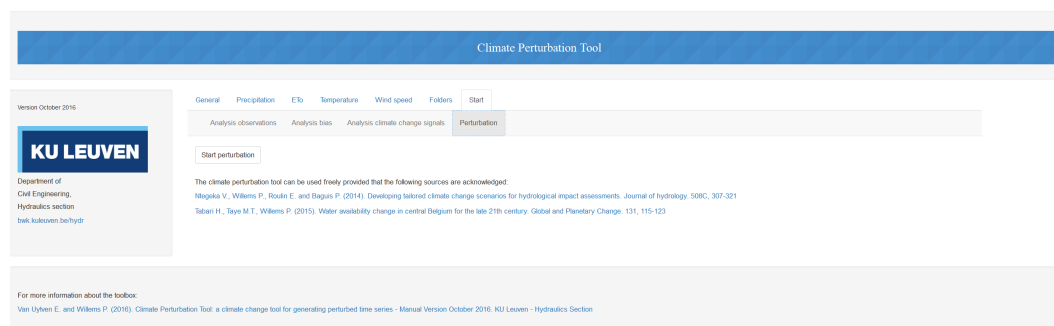
De beschikbare neerslagreeksen geven allen het huidige klimaat weer. De studie van de impact van de klimaatscenario's vraagt neerslagreeksen die de verschillende toekomstige klimaatscenario's beschrijven. Om de huidige reeksen te perturberen naar toekomstige neerslagreeksen, ontwikkelde KU Leuven de zogenaamde Climate Perturbation Tool [43]. Deze tool is gebaseerd op de klimaatscenario's zoals beschreven in het 5e klimaatsrapport van IPCC [5]. De RCP's, uitgelegd in de inleiding, worden gebruikt in deze tool om rekening te houden met de mogelijke verandering van de broeikasgassen in de verschillende scenario's. Historische data zoals neerslag, verdamping, temperatuur en windsnelheid kunnen met behulp van deze tool omgezet worden naar representatieve data voor een bepaalde tijdshorizon binnen een bepaald klimaatscenario [43].

Specifiek voor neerslag zal de tool kijken naar de veranderingen in het aantal natte of droge dagen ("wet-day frequency perturbation") en naar de verandering in neerslagintensiteit ("wet-day quantile perturbation"). Een controleperiode wordt beschouwd die de tijdsperiode van 1961 tot 1990 bevat. Daarnaast wordt een scenarioperiode beschouwd die zich uitstrekt van 2071 tot 2100. Klimaatsignalen worden opgesteld, uitgaande van klimaatmodelsimulaties, die toegepast worden op de controleperiode om zo data te vormen voor de scenarioperiode [44].

De perturbatie of verandering van het aantal natte dagen wordt beschreven als de verhouding van het aantal natte dagen voor een bepaalde maand uit de scenarioperiode op het aantal natte dagen voor een bepaalde maand uit de controleperiode. Het getal dat verkregen wordt uit deze verhouding wordt de perturbatiefactor genoemd. Uit [44] volgt dat de perturbatiefactor in de winter groter is dan 1 wat wijst op een toename in natte dagen. In de zomer is er echter een afname in het aantal natte dagen wat een perturbatiefactor kleiner dan 1 geeft.

De perturbatie of verandering in neerslagintensiteiten tussen beide periodes kan eveneens uitgedrukt worden met een perturbatiefactor door de verhouding te nemen van de neerslagkwantielen van de scenarioperiode op de neerslagkwantielen van de controleperiode. Er dient opgemerkt te worden dat voor deze analyse enkel de natte dagen uit de controle- en scenarioperiode meegenomen worden. De beschouwde neerslagkwantielen bevatten dus een dagschaal en bevatten enkel “natte dagen” (neerslagintensiteit > 0.1 mm)[43]. Wel is de vergelijking in dit geval iets complexer dan in het geval van de perturbatie van het aantal natte dagen. Het aantal natte dagen in beide reeksen verschilt waardoor het aangewezen is te werken met overschrijdingskansen om de juiste vergelijking te kunnen maken tussen controle- en scenarioperiode. De intensiteitsperturbatie kan dan uitgedrukt worden als het neerslagkwantiel van de scenarioperiode op het neerslagkwantiel van de controleperiode voor eenzelfde overschrijdingskans [44].

Door neerslagreeksen in de tool (figuur 4.1) in te laden, worden de perturbatiefactoren voor het aantal natte dagen en de neerslagintensiteit toegepast ter vorming van een geperturbeerde reeks voor een bepaalde tijdshorizon. Als eerste zal de tool natte dagen toevoegen of verwijderen. Daarna zal de tool intensiteiten aanpassen van de overblijvende natte dagen in de reeks. Om dit te kunnen doen wordt de overschrijdingskans bepaald van de natte dagen uit de ingeladen controlereeks. De intensiteit van de geselecteerde dagen met een bepaalde overschrijdingskans wordt daarna vermenigvuldigd met de perturbatiefactor om de neerslag te bepalen voor de overeenkomstige natte dag in de scenarioperiode [44].



Figuur 4.1: Climate Perturbation Tool

Binnen de tool zijn twee benaderingen mogelijk. Enerzijds kan gekozen worden voor de “Tailored climate scenario’s for hydrological impact analysis in Belgium” [43] en anderzijds voor de optie “Perturbed series for each climate model run” [43] (figuur 4.2). De eerste optie beschrijft de methode uitgelegd in dit hoofdstuk. De tweede optie laat toe om bovenop de beschreven methode nog een aantal andere statistische neerschalingsmethodes toe te passen en geeft als resultaat 30 klimaatmodelruns [43]. Deze zijn echter te vergaand voor het beoogde doel van deze masterproef. Meer informatie over deze optie kan gevonden worden in de literatuur.

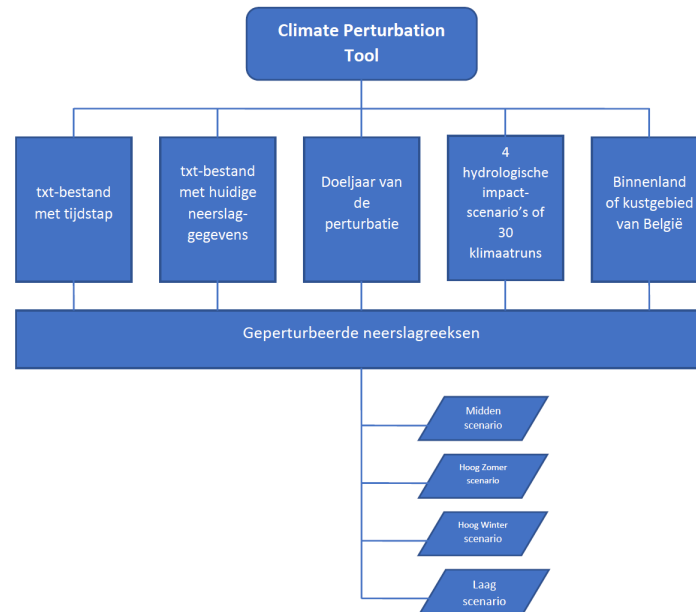
The screenshot shows the 'Climate Perturbation Tool' web interface. At the top is a blue header with the tool's name. Below it is a navigation bar with tabs: 'General', 'Precipitation', 'ETo', 'Temperature', 'Wind speed', 'Folders', and 'Start'. The 'General' tab is active. On the left, there is a sidebar with the 'KU LEUVEN' logo and contact information for the Department of Civil Engineering, Hydraulics section. The main content area contains an 'Output' section with a dropdown menu set to 'Hydrological impact scenarios for Belgium'. Below this is a 'Region' dropdown menu set to 'Belgium - inland region'. At the bottom, there is a 'Target scenario year' dropdown menu set to '2100'. A footer section provides additional information about the tool, including the version (October 2016) and the authors (Van Uytendaele E. and Willems P. (2016)).

Figuur 4.2: Input van de “Tailored climate scenario’s for hydrological impact analysis in Belgium” voor perturbatie naar 2100

De “Tailored climate scenario’s for hydrological impact analysis in Belgium” bevatten 4 hydrologische impactscenario’s. Uitgaande van alle resultaten van de klimaatsimulatie runs kan het 95%-betrouwbaarheidsinterval genomen worden en kan hiervan de bovengrens, de mediaan en de ondergrens genomen worden [1]. Dit vat alle simulatie runs samen in respectievelijk het Hoog, Midden en Laag klimaatscenario. Het Hoog klimaatscenario wordt opgesplitst in het Hoog Zomer scenario en het Hoog Winter scenario. Dit om rekening te houden met de verschillen in neerslagintensiteiten en natte dagen tussen beide seizoenen. Winters worden immers natter terwijl zomers droger zullen worden maar wel hogere neerslagintensiteiten zullen kennen [7]. Het Hoog Winter scenario geeft de impact weer van hoge piekafvoeren in de winter. Analooeg geeft het Hoog Zomer scenario de impact weer van hoge piekafvoeren ten gevolge van zomeropwarming. Het Midden scenario geeft de gemiddelde impact van zowel piekafvoeren als laagwaterafvoeren. Het Laag scenario geeft de impact weer van een verdroging van het klimaat en dus de impact van laagwaterafvoeren [1]. De reeksen die volgen uit de tool bij toepassing van de Tailored climate scenario’s laten toe een eenvoudig maar toch volledig beeld te krijgen van de verandering in neerslag voor de verschillende klimaatscenario’s omdat slechts 4 neerslagreeksen beschouwd moeten worden per ingeladen controlereeks.

De tool is schematisch samengevat in onderstaande figuur 4.3.

Wat nog opgemerkt dient te worden is dat in deze studie enkel de neerslaggegevens als vereenvoudiging meegenomen worden en dat de perturbatie van verdamping, temperatuur en windsnelheid verwaarloosd kunnen worden. De verwaarlozing van temperatuur en windsnelheid voor deze studie spreken voor zich. De verwaarlozing van de verdamping vraagt enige uitleg: overstromingen doen zich meestal voor onder invloed van hevige buien van korte duur aangezien dan het rioleringsnetwerk op korte tijd enorm onder druk komt te staan en niet al het water tijdig kan afvoeren. Op deze korte, hevige buien heeft verdamping weinig tot geen effect, verdamping kan immers pas een rol spelen indien de bui zich uitstrekt over een langere tijdsduur [45].



Figuur 4.3: Schematische voorstelling van de Climate Perturbation Tool

4.1.2 Toepassing van de Climate Perturbation Tool op de Deurnereeks

Zoals aangegeven in hoofdstuk 3 is de Deurnereeks de langste en meest volledige beschikbare neerslagreeks voor het studiegebied van deze masterproef waardoor deze reeks gebruikt wordt voor de analyse. De Deurnereeks dient geperturbeerd te worden om representatieve neerslag te hebben voor de verschillende klimaatscenario's. De beschikbare reeks van 1976 tot 2006 met een tijdsresolutie van 1u wordt ingeladen en wordt volgens de methode zoals beschreven in deel 4.1.1 geperturbeerd naar de toestand die zich zou voordoen in 2100 voor de 4 hydrologische impactscenario's voor België. Na het kiezen van de juiste opties in de tool worden vier neerslagreeksen verkregen eveneens met een lengte van 30 jaar en een tijdsresolutie van 1u: Hoog Zomer voor 2100, Hoog Winter voor 2100, Midden voor 2100 en Laag voor 2100.

4.2 Statistische verwerking van de neerslagdata

De huidige en geperturbeerde neerslagreeksen van Deurne kennen een lengte van 30 jaar waardoor simulaties in InfoWorks ICM erg veel tijd zullen vragen. Om hieraan tegemoet te komen kan er best gebruik gemaakt worden van composietbuien om de rekentijd te reduceren. Ofwel moeten de reeksen van Deurne omgezet worden tot composietbuien, ofwel kunnen reeds beschikbare composietbuien gebruikt worden indien deze overeenkomen met de neerslagreeksen van Deurne. De composietbuien van Ukkel zijn representatief als gemiddelde voor Vlaanderen en vormen een goed alternatief voor het gebruik van de data van Deurne. Een statistische verwerking is

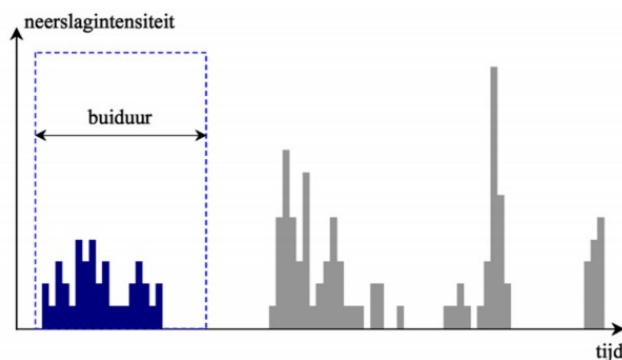
nodig om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de huidige en geperturbeerde neerslagreeksen van Deurne en de huidige en geperturbeerde composietbuien van Ussel om de overeenkomst tussen de data aan te tonen.

De composietbuien van Ussel zijn zowel beschikbaar voor het huidige klimaat als voor de klimaatscenario's. Het is van belang dat niet alleen het huidige klimaat wordt vergeleken maar dat ook een vergelijking wordt gemaakt tussen neerslagreeksen voor de klimaatscenario's. De composietbuien van Ussel zijn al geperturbeerd beschikbaar gesteld waardoor het moeilijk te achterhalen is of de perturbatie op dezelfde manier is gebeurd als de perturbatie van Deurne. Door de klimaatscenario's onderling te vergelijken kan verzekerd worden dat de Usseldata ook representatief is voor de verschillende klimaatscenario's.

De eenvoudigste manier om beide neerslagdata te vergelijken is met behulp van IDF-curves. Deze curves geven het verband weer tussen de Intensiteit, Duur en Frequentie van een neerslagevent op een logaritmische schaal. In wat volgt zal ingegaan worden op de opstelling van de IDF-curves voor beide neerslagdata. Vervolgens zal ingegaan worden op de wijze van vergelijking van de IDF-curves.

4.2.1 Opstellen van IDF-curves van de geperturbeerde neerslagreeksen

De eerste stap in het opstellen van de IDF-curves is het bepalen van de aggregatieniveaus. De aggregatieniveaus geven de duur aan waarover een neerslaggebeurtenis wordt uitgemiddeld. Dit gebeurt door middel van een bewegend venster over de tijdsreeks. Door het bewegende venster te beschouwen, wordt er verzekerd dat alle pieken uit de neerslagreeks meegenomen worden. Dit is niet het geval wanneer een vast tijdstip wordt beschouwd om de neerslaggegevens uit te middelen over deze tijdstap. Een piek die op de rand van twee tijdstappen valt kan op die manier verloren gaan waardoor de bui bijgevolg onderschat wordt. Door middel van het bewegende venster wordt dit probleem vermeden [4]. Door de breedte van het bewegend venster te variëren worden verschillende buiduren of aggregatieniveaus beschouwd. Het principe van het bewegende venster kan gezien worden in figuur 4.4.



Figuur 4.4: Principe van bewegend venster [3]

De volgende stap in het opstellen van de IDF-curves, is het selecteren van de onafhankelijke extreme-waarden voor elk aggregatieniveau ($1u, 2u, \dots$). De onafhankelijkheid is nodig om te garanderen dat de extremen die geselecteerd worden van verschillende neerslaggebeurtenissen afkomstig zijn. Daarom wordt gesproken van een onafhankelijke gebeurtenis wanneer er minstens $12u$ tussen 2 buien zit. Wanneer de tussentijd kleiner is dan $12u$ wordt er gesproken van afhankelijke buien en wordt enkel de hoogste piek van de hele gebeurtenis meegenomen [4].

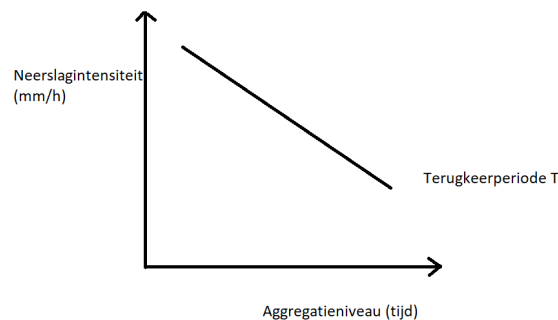
De selectie van de extreme-waarden kan gebeuren op twee manieren, ofwel wordt er gebruik gemaakt van de Jaarlijkse maxima, ofwel wordt er gewerkt met de Peak-Over-Threshold -waarden of kortweg POT-waarden. In het geval van de methode van de Jaarlijkse maxima wordt per jaar de meeste extreme gebeurtenis geselecteerd. Dit levert een beperkt aantal aan extreme-waarden en bijgevolg een niet erg nauwkeurige analyse van de data aangezien bepaalde pieken die wel interessant zijn niet meegenomen worden in de analyse. Het voordeel is wel dat de Jaarlijkse maxima sowieso onafhankelijk zijn van elkaar. De POT-methode daarentegen kijkt naar alle pieken die boven een bepaalde drempelintensiteit komen. Ook hier weer moet wel gekeken worden naar het onafhankelijkheidscriterium. Wanneer meerdere pieken binnen de 12 uur de drempelintensiteit overschrijden, wordt enkel de hoogste piek meegenomen [4].

In deze studie wordt er gebruik gemaakt van de POT-methode in plaats van de methode van de Jaarlijkse maxima aangezien deze methode toelaat om meer extreme-waarden mee te nemen in de analyse. Een ander probleem van de Jaarlijkse maxima is dat eventuele gelijkaardige onafhankelijke pieken die voorkomen binnen 1 jaar niet allen meegenomen kunnen worden, slechts 1 piek wordt geselecteerd bij de Jaarlijkse maxima [4]. De POT-methode laat bijgevolg een meer uitgebreide analyse toe dan de methode van de Jaarlijkse maxima. De drempelwaarde van de POT-waarden wordt in dit geval op $0,1$ mm gelegd. Op deze manier worden alle (onafhankelijke) natte dagen meegenomen in de analyse.

Na het bepalen van de POT-waarden worden al deze extreme-waarden geordend van groot naar klein en worden ze gekoppeld aan overschrijdingskansen. De grootste extreme-waarde heeft de kleinste kans op herhaling of met andere woorden de grootste terugkeerperiode. Deze terugkeerperiode geeft de gemiddelde herhalingstijd weer tussen 2 overschrijdingen. Hoe lager de intensiteit van de neerslag, hoe kleiner de terugkeerperiode dus hoe vaker dergelijk soort bui zich voordoet. Om de terugkeerperiode te bepalen wordt voor de Deurnereeks gebruik gemaakt van de empirische terugkeerperiode. Deze wordt gedefinieerd als: $T = n/i$, met T de terugkeerperiode, n de lengte van de tijdsreeks en i het volgnummer van de extreme-waarden [4]. De hoogste extreme-waarde heeft op basis van deze definitie een terugkeerperiode gelijk aan de lengte van de reeks, de tweede hoogste extreme-waarde heeft een terugkeerperiode gelijk aan de helft van de reeks, etc. Op deze manier wordt aan elke extreme-waarde voor een bepaald aggregatieniveau een terugkeerperiode gekoppeld. De empirische terugkeerperiode wordt hier gebruikt in plaats van de terugkeerperiode bepaald op basis van de extreme-waarden-verdeling. De empirische terugkeerperiode geeft vaak wel een onder- of overschatting van de werkelijke terugkeerperiode. Het wil

immers niet zeggen dat de meest intense bui die zich voordoet in een tijdsreeks van 30 jaar effectief een terugkeerperiode van 30 jaar heeft. Deze bui zou een werkelijke terugkeerperiode van 100 jaar kunnen hebben, maar door toeval zich voordoen binnen de beschouwde tijdsreeks. Voor ontwerp van rioleringen is het daarom aangewezen om te werken met de terugkeerperiodes gedefinieerd volgens extreme-waarden-verdelingen om een goede inschatting te hebben van de voorkomingskans van de bui [3]. Voor de toepassing in deze thesis worden de IDF-curves opgesteld ter vergelijking met andere neerslagreeksen, de empirische terugkeerperiode volstaat.

De drie eigenschappen van de IDF-curves zijn nu bekend waardoor de curves geplot kunnen worden. Voor een bepaalde terugkeerperiode worden alle neerslagintensiteiten horende bij de gekozen aggregatieniveaus geplot. Wegens het beperkt aantal punten wordt een vloeiend verloop gecreëerd met behulp van een trendlijn. Op deze manier worden dalende curves verkregen zoals te zien in figuur 4.5. Op te merken valt dat deze logaritmische curves steeds een dalend verloop hebben. Korte duur pieken kennen immers een hogere neerslagintensiteit dan langere duur pieken aangezien deze over een langere tijd uitgemiddeld zijn. De piek van de langdurige neerslaggebeurtenis wordt dus uitgespreid over het beschouwde aggregatieniveau met als gevolg dat deze neerslagintensiteit lager is dan de uitspreiding van de intensiteiten over een kleiner aggregatieniveau [4].

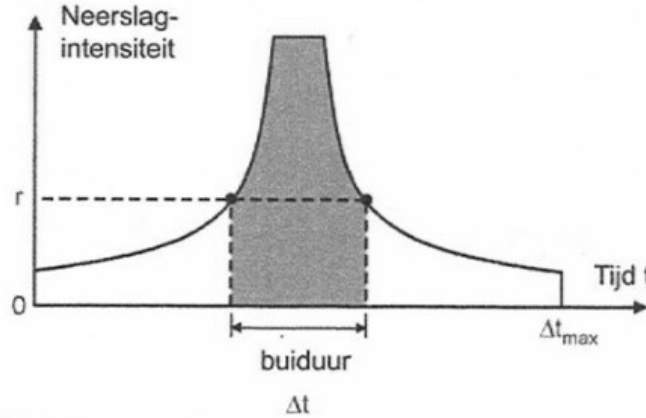


Figuur 4.5: Principe van IDF-curves

4.2.2 Relatie tussen IDF-curves en composietbuien

Uitgaande van IDF-relaties is het mogelijk om zogenaamde composietbuien op te stellen. Het principe om de composietbuien voor een bepaalde terugkeerperiode op te stellen is te zien in figuur 4.6.

Zoals beschreven in [46] wordt het composietdiagram opgebouwd door trapje per trapje de neerslagintensiteiten uit het composietdiagram te laten overeenkomen met de intensiteiten uit de IDF-relaties voor een bepaald aggregatieniveau. Stel dat het kleinste aggregatieniveau Δt gelijk is aan 1u. De neerslagintensiteit uit de IDF-curve voor 1u wordt dan uitgezet in het composietdiagram centraal rond het midden van de composietbui (tussen -0,5u en 0,5u). Vervolgens wordt overgegaan naar de volgende



Figuur 4.6: Voorstelling van opbouw van composietbuien [4]

aggregatiestap (stel $2u$) en wordt de intensiteit in het composietdiagram bepaald zodanig dat de gemiddelde neerslagintensiteit voor de beschouwde buiduur overeenkomt met de neerslagintensiteit uit de IDF-curves. De neerslagintensiteit wordt dus uitgespreid over het deel van het composietdiagram tussen $-1u$ en $1u$. Deze methode wordt toegepast tot de hele IDF-relatie vervat zit in het composietdiagram. Algemeen kan de relatie voor de vorming van het composietdiagram als volgt beschreven worden [46]:

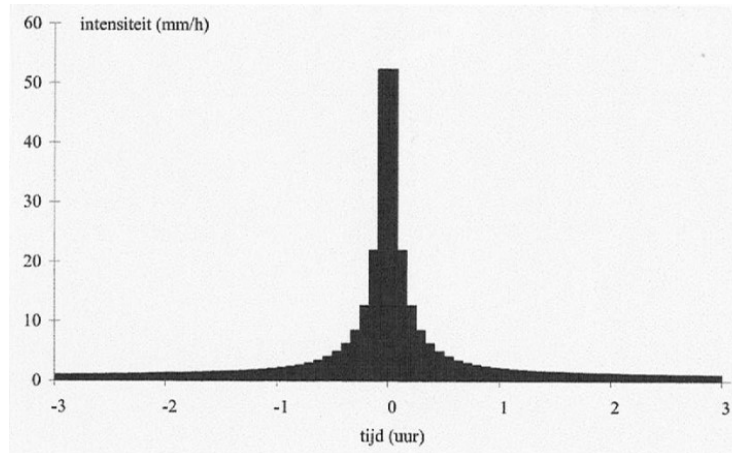
$$I_{comp}(D - \Delta t, T) * 2\Delta t = I_{IDF}(D, T)D - I_{IDF}(D - 2\Delta t, T) * (D - 2\Delta t)$$

Het toepassen van deze methode levert een composietbui zoals gezien kan worden in figuur 4.7. De composietbuien laten een snelle en eenvoudige analyse van een rioleringsstelsel toe aangezien ze door middel van 1 bui het gehele stelsel kunnen betrekken doordat zowel korte als lange duur buien vervat zitten in dit diagram [3].

Echter, in het geval van deze masterproef, zijn er reeds composietbuien voor Ukkel beschikbaar. Om de vergelijking tussen de Deurnereeks en de data van Ukkel eenvoudig te kunnen uitvoeren met IDF-curves, moeten deze beschikbare composietbuien terug omgezet worden. De volledige analyse voor de opmaak van composietbuien uitgaande van IDF-curves wordt daarom omgedraaid. De vergelijking die hier dan algemeen geldt, is:

$$I_{IDF}(D, T) = \frac{I_{comp}(D - \Delta t, T) * 2\Delta t + I_{IDF}(D - 2\Delta t, T) * (D - 2\Delta t)}{D}$$

Na toepassing van deze vergelijking en het plotten van de verkregen neerslagintensiteiten op de bijhorende aggregatieniveaus worden terug IDF-relaties gevonden.



Figuur 4.7: Voorbeeld van een composietbui [4]

4.2.3 Vergelijking van de neerslagdata

Eens voor alle neerslagdata IDF-curves beschikbaar zijn, kunnen deze vergeleken worden. Er zijn verschillende mogelijkheden om tot een goede vergelijking te komen. Een korte oplistting van de mogelijke methodes wordt hieronder gegeven, verdere informatie zal gegeven worden bij de analyse van de resultaten in deel 3 van dit hoofdstuk.

- Grafische vergelijking van de IDF-curves:
Door de IDF-curves samen te plotten kan eenvoudig inzicht verkregen worden in de gelijkenissen of verschillen van de curves.
- Grafische vergelijking op basis van neerslagkwantielen:
Door voor een bepaald aggregatieniveau de neerslagintensiteiten van alle IDF-curves te plotten op de terugkeerperiode (in logaritmische schaal) wordt een goed beeld verkregen van de gelijkenissen van de data voor de verschillende buiduren. Korte duur pieken en lange duur pieken kunnen op deze manier goed vergeleken worden.
- Procentueel verschil in neerslagintensiteiten:
Het procentueel verschil in neerslagintensiteiten tussen de volledige neerslaggegevens X en Y met lengte n kan uitgedrukt worden als:

$$\% - verschil = \frac{100}{n} * \frac{\sum_{i=1}^n (X - Y)}{X}$$

- Root Mean Square Error (RMSE):
De Root Mean Square Error van neerslagdata X en Y kan weergegeven worden met volgende formule:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

De RMSE wordt vaak gebruikt voor regressie-analyse en geeft aan hoever modelresultaten afwijken van experimentele resultaten. Hoe dichterbij 0, hoe beter de gelijkenis [46]. Ook in deze toepassing kan de RMSE gebruikt worden om de mate van overeenkomst te bepalen tussen de neerslagdata.

- Nash Sutcliffe model Efficiency (NSE):
Volgende formule geeft de NSE-factor aan voor neerslagdata X en Y:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

De NSE wordt in hydrologische toepassingen vaak gebruikt om de mate van nauwkeurigheid te bepalen van een model of om de gelijkenis aan te tonen tussen verschillende datasets. Een goede gelijkenis kent een NSE van ongeveer 0,7. Een NSE van 1 wordt praktisch nooit bereikt door de onzekerheid die steeds te vinden is op neerslaggegevens. [46].

4.3 Resultaten

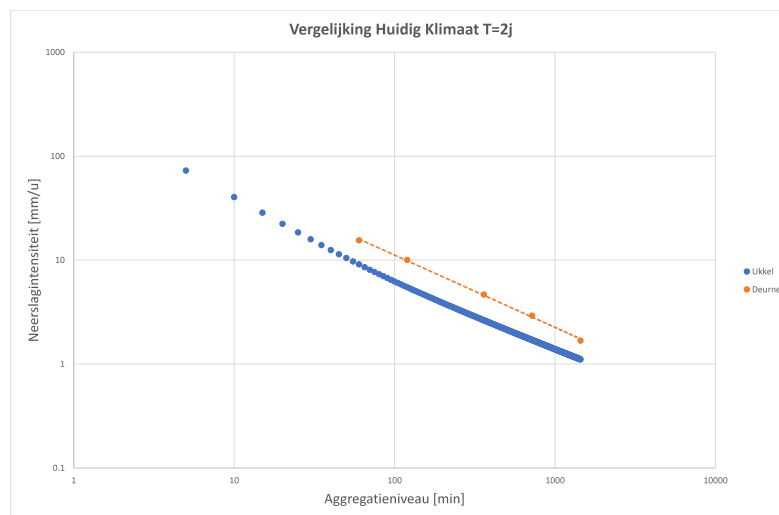
De resultaten van de methodologie beschreven in deel 4.1 en 4.2 worden in dit deel van het hoofdstuk besproken. Na het gebruik van de Climate Perturbation Tool op de neerslagreeks van Deurne zijn er drie neerslagreeksen die beschouwd worden in deze analyse: de neerslagreeks van het huidige klimaat, de neerslagreeks die het klimaatscenario ‘Hoog Zomer’ omvat en de neerslagreeks van het ‘Midden’ scenario. Het ‘Laag’ klimaatscenario wordt hier niet meegenomen aangezien het beoogde doel van deze masterproef handelt over overstromingen terwijl het ‘Laag’ scenario zich bezig houdt met een verdroging van het klimaat. Ook het ‘Hoog Winter’ scenario is niet van toepassing voor deze masterproef. Het bestrijkt een ander soort neerslagevent met minder hoge neerslagintensiteiten dan in het ‘Hoog Zomer’ scenario. Vooral de zomeropwekkers zullen in de toekomst problematischer worden in de stedelijke context dus het is voornamelijk van belang om de invloed daarvan te kunnen inschatten.

IDF-curves zijn opgesteld uitgaande van de Deurnereeks voor deze klimaatscenario's. Dezelfde klimaatscenario's zijn beschouwd bij de composietbuien van Ussel. Analooch hiervoor werden de IDF-curves opgesteld zoals beschreven in deel 4.2.2. De composietbuien van Ussel zijn beschikbaar voor terugkeerperiodes van 2, 10, 25 en 100 jaar. De Deurnereeks is 30 jaar lang en kent een maximale empirische terugkeerperiode van 30 jaar. Daarnaast worden ook nog terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10 en 15 jaar beschouwd. De opgestelde IDF-curves voor Deurne en Ussel voor de verschillende klimaatscenario's met projectie naar 2100 zijn allen terug te vinden in Bijlage A.

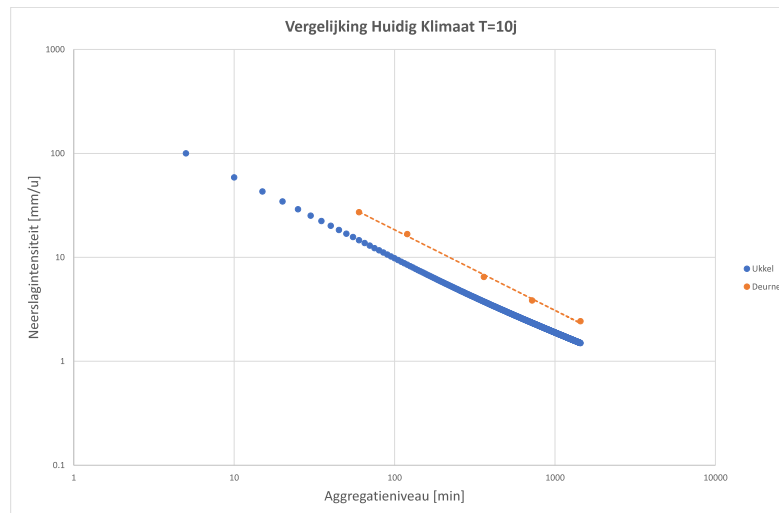
4.3.1 Grafische vergelijking van de IDF-curves

De meest eenvoudige vergelijking van de IDF-curves is een grafische vergelijking door de IDF-curves van beide neerslagdata in dezelfde grafiek te plotten. Onderstaande

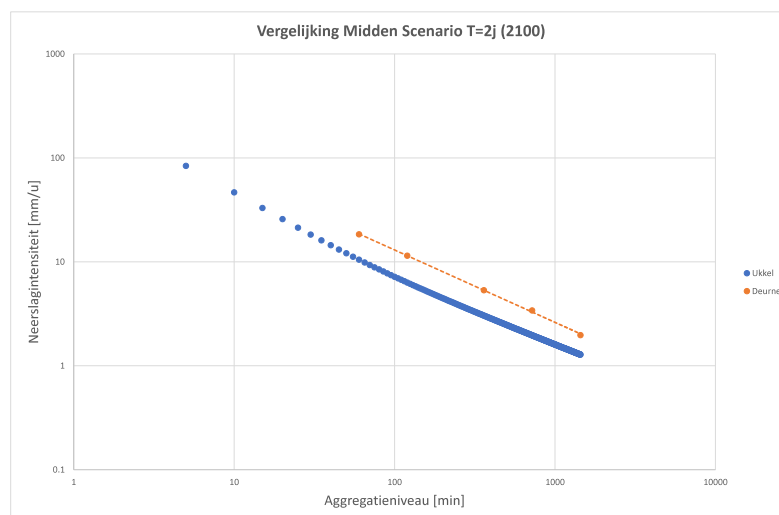
figuren 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 en 4.13 tonen de vergelijking van de IDF-curves voor de drie klimaatscenario's voor terugkeerperiodes 2 en 10 jaar. Op deze figuren is te zien dat alle klimaatscenario's beperkte verschillen hebben tussen de data van Deurne en de data van Ukkel. Zowel in het huidige klimaat als in het Midden Scenario en het Hoog Zomer scenario ligt de curve van Deurne iets hoger dan deze van Ukkel. Een verklaring voor de verschillen in IDF-curves wordt verder in dit hoofdstuk uitgelegd. Het gebruik van de empirische terugkeerperiode, het hitte eiland effect en een mogelijke afwijkende definitie in de Climate Perturbation Tool liggen aan de basis van deze verschillen. Toch kan op basis van deze resultaten al gezien worden dat de overeenkomst tussen Deurne en Ukkel redelijk goed is.



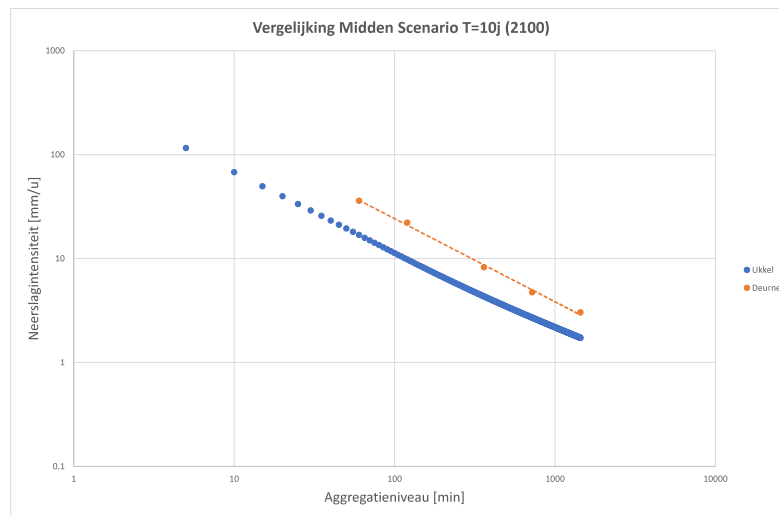
Figuur 4.8: Vergelijking van de IDF-curves voor het huidige klimaat voor een terugkeerperiode van 2 jaar



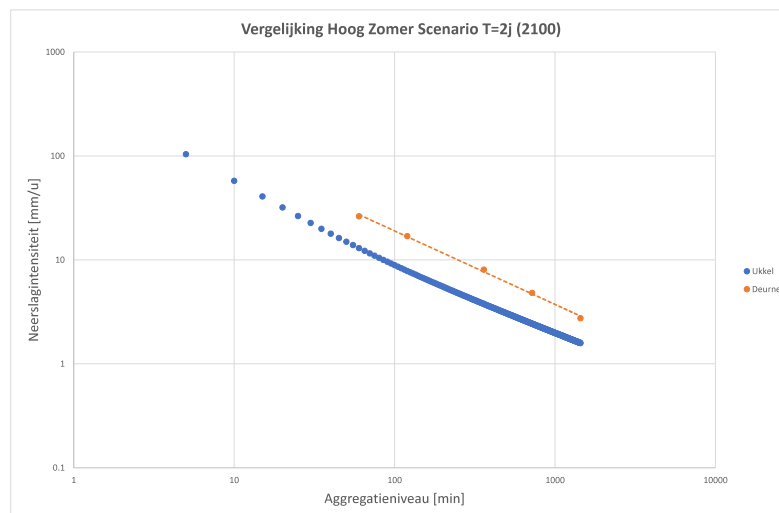
Figuur 4.9: Vergelijking van de IDF-curves voor het huidige klimaat voor een terugkeerperiode van 10 jaar



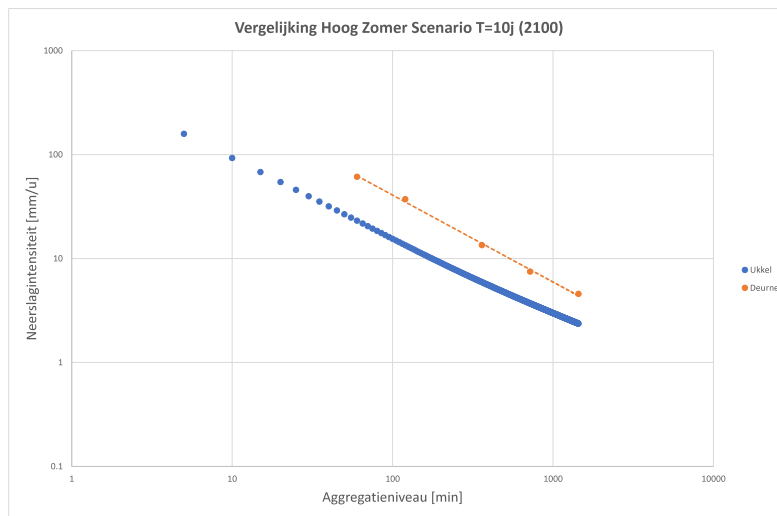
Figuur 4.10: Vergelijking van de IDF-curves voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 2 jaar



Figuur 4.11: Vergelijking van de IDF-curves voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 10 jaar



Figuur 4.12: Vergelijking van de IDF-curves voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 2 jaar



Figuur 4.13: Vergelijking van de IDF-curves voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor een terugkeerperiode van 10 jaar

4.3.2 Grafische vergelijking op basis van neerslagkwantielen

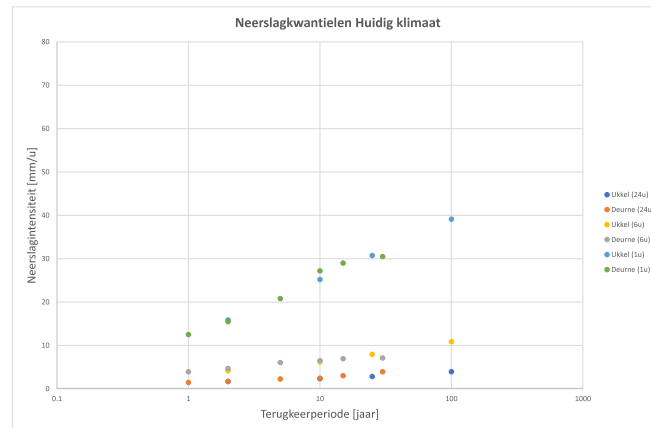
De logaritmische schaal van de IDF-curves laat inschatting van het verschil in neerslagintensiteit tussen de twee neerslagreeksen minder goed toe. De logaritmische schaal doet uitschijnen dat de verschillen tussen de neerslagintensiteiten groot zijn, hoewel de neerslagdata redelijk goed overeenkomen (zie bijlage B). Om daaraan tegemoet te komen, kan er gebruik gemaakt worden van neerslagkwantielen. Deze plots tonen voor een bepaald aggregatieniveau de terugkeerperiode in logaritmische schaal op de neerslagintensiteit in lineaire schaal. De neerslagkwantielen voor alle klimaatscenario's voor een aggregatieniveau van 1u, 6u en 24u zijn te zien in onderstaande figuren 4.14, 4.15 en 4.16..

Ook hier weer is te zien dat er goede overeenkomsten zijn tussen de data. Zeker op basis van het huidige klimaat kan afgeleid worden dat de data van Deurne en Ussel goed overeenkomen. Voor de drie aggregatieniveaus van het huidige klimaatscenario vallen de neerslagkwantielen van Ussel en Deurne zo goed als samen. Slechts kleine verschillen kunnen onderscheiden worden.

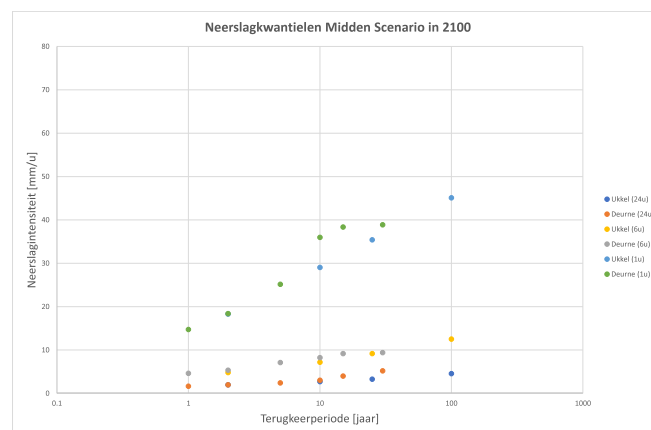
In het geval van het Midden scenario is voor de drie verschillende aggregatieniveaus een goede overeenkomst te vinden. Enige afwijking is terug te vinden voor het aggregatieniveau 1u maar deze is eerder beperkt. Voor het Hoog Zomer klimaatscenario zijn er voor het kleinste aggregatieniveau van 1u een aantal punten te zien die een grote afwijking kennen. Voor de grotere aggregatieniveaus verdwijnt dit verschil als gevolg van de uitmiddeling van de data over een langere tijdsperiode.

Als besluit kan gesteld worden dat globaal gezien kleine verschillen waarneembaar

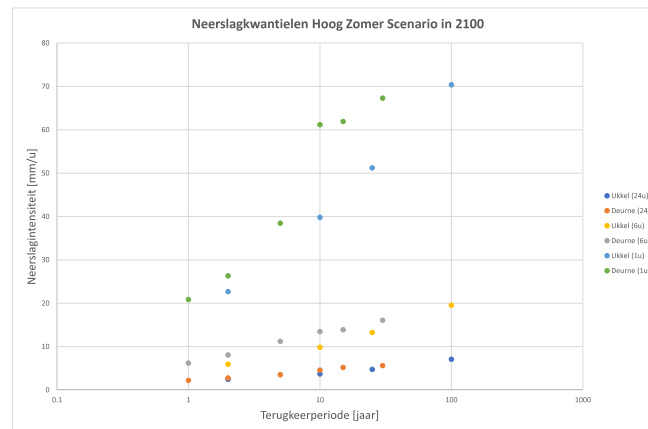
zijn in het aggregatieniveau van 1u maar opnieuw kunnen deze verklaard worden door drie fenomenen: Het gebruik van de empirische terugkeerperiode, het hitte eiland effect en een mogelijke afwijkende definitie in de Climate Perturbation Tool (zie deel 4.3.4).



Figuur 4.14: Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het huidige klimaat voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u



Figuur 4.15: Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u



Figuur 4.16: Vergelijking van de neerslagkwantielen voor het Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100 voor aggregatieniveau 1u, 6u en 24u

4.3.3 Statistische vergelijking

Naast de grafische vergelijking kan er, zoals in deel 4.2.3 beschreven, ook gebruik gemaakt worden van meer statistische vergelijkingen. De formules van het procentueel verschil, de RMSE en de NSE worden in de volgende paragrafen concreet ingevuld en de waarden van deze parameters worden vergeleken. Aangezien de IDF-curves van Deurne opgesteld werden met een beperkt aantal punten, wordt de overeenkomstige data geselecteerd uit de gegevensreeks van Ussel om de statistische analyse te maken. De gebruikte datapunten en een vergelijking van de getalwaarden van de neerslagintensiteiten zijn terug te vinden in bijlage B.

Vergelijking op basis van het procentueel verschil

Het procentueel verschil tussen de dataset van Deurne en Ussel van de volledige neerslagreeksen wordt berekend met de formule:

$$\% - verschil = \frac{100}{n} * \frac{\sum_{i=1}^n (y_{Deurne} - y_{Ussel})}{y_{Deurne}}$$

De datareeksen die vergeleken worden per terugkeerperiode hebben een lengte van 5 punten: namelijk de data horende bij aggregatieniveaus 1u, 2u, 6u, 12u en 24u.

De procentuele verschillen tussen Deurne en Ussel voor terugkeerperiodes 2 en 10 jaar voor de verschillende klimaatscenario's zijn te zien in tabel 4.1.

Voor het huidige klimaat zijn de procentuele verschillen beperkt tot ongeveer 6%. Dit verschil is dus erg klein en toont aan dat de data van Ussel en Deurne voor het huidige klimaat een goede overeenkomst tonen. Het Midden klimaatscenario kent voor een terugkeerperiode van 2 jaar een goede overeenkomst. Ook voor een terugkeerperiode van 10 jaar wordt een goede overeenkomst verkregen, het

Tabel 4.1: Procentuele verschillen tussen de neerslagdata van Deurne en Ussel voor alle klimaatscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar

Klimaatscenario	T = 2j	T=10j
Huidig Klimaat	6,78 %	6,02 %
Midden	6,08%	15,77 %
Hoog Zomer	19,37 %	27,9 %

procentueel verschilt ligt wel iets hoger. Het Hoog Zomer kent grotere afwijkingen. Nochtans, wanneer de neerslagdata vergeleken wordt (zie bijlage B), kan gezien worden dat deze redelijk gelijkaardig zijn. De formule van het procentuele verschil is berekend op de totale datasets. Wanneer 1 neerslagpunt van een neerslagreeks een groot verschil kent met het overeenkomstige punt uit de andere neerslagreeks wordt deze afwijking enorm uitvergroot in de uitmiddeling om het procentueel verschil te bepalen. De verschillen die er zijn tussen de data van Deurne en Ussel worden op die manier uitvergroot. De afwijkingen op de resultaten worden veroorzaakt doordat de intensiteiten horende bij de pluviograaf van Deurne in vele gevallen net iets hoger liggen dan de neerslagintensiteiten van Ussel.

Vergelijking op basis van RMSE

De RMSE drukt de afwijking van beide neerslagreeksen tegenover elkaar uit. Toegepast voor de datasets van Ussel en Deurne wordt deze vergelijking:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Deurne} - Y_{Ussel})^2}{n}}$$

In onderstaande tabel 4.2 zijn de resultaten van de RMSE te zien voor terugkeerperiodes 2 en 10 jaar.

Tabel 4.2: RMSE voor neerslagdata van Deurne en Ussel voor alle klimaatscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar

Klimaatscenario	T = 2j	T=10j
Huidig Klimaat	0,53	1,31
Midden	0,53	3,93
Hoog Zomer	2,63	11,59

De resultaten die verkregen worden uit de berekening van de RMSE zijn erg goed. De RMSE-waarden blijven allen beperkt wat wederom een goede overeenkomst aantoont. Wel kan opgemerkt worden dat een grotere afwijking verkregen wordt voor het Hoog Zomer klimaatscenario, voornamelijk voor de hogere terugkeerperiode. De verklaring voor de afwijkingen is dezelfde als bij de visuele vergelijking en wordt besproken in deel 4.3.4 van dit hoofdstuk.

Vergelijking op basis van NSE

Tenslotte wordt nog de resultaten van de vergelijking op basis van de NSE meegegeven. Vergelijking op basis van de NSE gebeurde eveneens voor terugkeerperiodes 2 en 10 jaar.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Deurne} - Y_{Ukkel})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{Ukkel} - Y_{Deurne})^2}$$

Tabel 4.3: NSE voor neerslagdata van Deurne en Ukkel voor alle klimaatscenario's en voor terugkeerperiodes 2 jaar en 10 jaar

Klimaatscenario	T = 2j	T=10j
Huidig Klimaat	0,9899	0,9765
Midden	0,9923	0,8397
Hoog Zomer	0,8768	0,2593

Ook in dit geval kan gezien worden dat een goede overeenkomst tussen de data gevonden wordt. Een NSE van 1 geeft aan dat de data perfect overeenkomen. Het huidige klimaat kent NSE-waarden die erg nauw aanleunen bij 1. Ook het Midden scenario kent zeer hoge NSE-waarden. Het Hoog Zomer scenario kent lagere NSE-waarden, voor een terugkeerperiode van 2 jaar is deze gelijk aan 0,8769. Deze waarde geeft nog steeds een goede overeenkomst aan. Voor de terugkeerperiode van 10 jaar kent de NSE-waarden een grotere afwijking van 1. Dit is het gevolg van de grote afwijking tussen enkele punten uit de neerslagreeksen van dit scenario. De oorzaak van deze afwijking wordt beschreven in deel 4.3.4. Toch kan besloten worden dat de NSE-waarden eveneens aanduiden dat de Deurnereeks en Ukkelseeks een goede overeenkomst kennen voor alle klimaatscenario's.

4.3.4 Verklaring van de verschillen en besluit

Uit de analyse van de IDF-curves, neerslagkwantielen en statistische data valt af te leiden dat de data van Ukkel en Deurne een goede overeenkomst vertonen, zeker in het huidige klimaat, maar dat de ander klimaatscenario's toch een aantal kleine afwijkingen kennen. Deze verschillen kunnen als volgt verklaard worden: De terugkeerperiodes van de Deurne-data zijn berekend op basis van de empirische terugkeerperiode. Dit heeft als gevolg dat het goed mogelijk is dat de data eigenlijk horen bij een meer extreme regenbui dan dat de empirische terugkeerperiode doet vermoeden. Een regenbui die in dit geval een terugkeerperiode van 20 jaar kreeg, zou in werkelijkheid een terugkeerperiode kunnen hebben die hoger of lager ligt. De Ukkelseeks daarentegen heeft terugkeerperiodes die berekend zijn op de extreme-waarden-analyse waardoor deze terugkeerperiode meer aanleunt bij de werkelijke terugkeerperiode. Om effectief na te gaan of het verschil te wijten is aan het gebruik van de empirische terugkeerperiode kan een extreme-waarden-verdeling opgesteld worden van de Deurnereeks om deze te vergelijken met extreme-waarden-verdeling van de Ukkelseeks. Dit ligt echter buiten het bestek van deze masterproef.

Een bijkomende verklaring voor de kleine afwijking van de resultaten is het gebruik van de Climate Perturbation Tool, de bijhorende onzekerheidsintervallen en de gebruikte periode van de Ukkelreeks. De gebruikte tool voor de perturbatie van de Deurnereeks baseert zich op het 95%-betrouwbaarheidsinterval. De verkregen composietbuien van de Ukkelreeks waren reeds geperturbeerd. Het gebruik van de tool met bijvoorbeeld een lichtelijk andere definitie van de onzekerheidsintervallen zorgt ervoor dat de neerslagreeks op een andere manier geperturbeerd wordt naar de klimaatscenario's. Algemeen kan gesteld worden dat een ander gebruik of een andere definitie van een randvoorwaarde in de tool die afwijkt tussen beide datasets een verklaring kan zijn voor de verschillen tussen Ukkel en Deurne. Ook afwijkingen in de periode genomen uit de tijdsreeks van Ukkel die gebruikt is tegenover de beschikbare Deurnereeks kunnen zorgen voor deze kleine verschillen. De laatste mogelijke verklaring voor de afwijking van de neerslagdata is het hitte eiland effect. Zoals aangegeven in de inleiding doet dit fenomeen zich voor in stedelijke context en zou het dus kunnen dat de neerslagreeks van Deurne dit fenomeen bevat. De composietbuien van Ukkel gelden als gemiddelde voor Vlaanderen [3] waardoor het hitte eiland in deze composietbuien niet ingerekend is en bijgevolg lagere neerslagintensiteiten kent dan de Deurnereeks.

Uitgaande van de voorgaande vergelijkingen kan echter wel gesteld worden dat de Ukkelreeks zeker gebruikt kan worden voor de impact van overstromingen in Antwerpen. Aangezien de reeksen voor het huidige klimaat goed overeenkomen, wordt er verwacht dat deze reeksen ook voor toekomstige scenario's zullen blijven overeenkomen. De verschillen die toch waargenomen zijn bij de analyse van beide data is beperkt waardoor dit slechts een kleine invloed zal hebben op de simulatieresultaten. De composietbuien van Ukkel kunnen dus gebruikt worden als input voor het InfoWorks ICM model. De voordelen van het gebruik van deze composietbuien van Ukkel zijn dat enerzijds de rekentijd in InfoWorks ICM gereduceerd zal worden ten opzichte van de Deurnereeks en anderzijds dat zo tot terugkeerperiodes van 100 jaar gesimuleerd kan worden terwijl de maximale terugkeerperiode berekend in het geval van de Deurnedata slechts gelijk is aan 30 jaar.

In hoofdstuk 6 van deze masterproef zal echter wel nog gebruik gemaakt worden van de composietbuien van Antwerpen zodat inzicht verkregen wordt in het hitte eiland effect en zodat nagegaan kan worden wat het verschil in impact is tussen beide soorten composietbuien.

4.4 Gebruikte neerslag in InfoWorks ICM en bijkomende validatie

Na de bepaling van de representatieve neerslag, kunnen de simulaties in Infoworks ICM uitgevoerd worden met zowel de flood cones en de 2D mesh zoals beschreven in hoofdstuk 3. Bovendien kan op basis van de IDF-curves die opgesteld zijn in dit hoofdstuk een bijkomende validatie uitgevoerd worden.

4.4.1 Uitgevoerde simulaties met de flood cones

De simulaties die uitgevoerd zijn met de flood cones zijn zowel simulaties van de neerslaggegevens van Ukkel als simulaties van de neerslaggegevens van Antwerpen. De relevante neerslaggegevens voor de simulaties zijn deze van het huidige klimaat, het Midden scenario in 2100 en het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100. De terugkeerperiodes die beschouwd worden voor de composietbuien van Ukkel voor de globale analyse van deze masterproef zijn 2, 10, 25 en 100 jaar. De terugkeerperiodes van de composietbuien van Antwerpen zijn 2 jaar, 5 jaar en 20 jaar. Om een vergelijking te kunnen maken in hoofdstuk 6 tussen de composietbuien van Ukkel en Antwerpen worden daarom ook de composietbuien van Ukkel voor 5 jaar en 20 jaar bijkomend gesimuleerd. Alle simulaties zijn uitgevoerd voor een duur van 48 uur. Dit om zo de volledige composietbui in rekening te kunnen brengen (duurt 48 uur) en om ook de tijd voor en na de piek van de bui mee te kunnen nemen aangezien deze ook van invloed is op het netwerk. De tijdstap van de simulatie bedraagt 60 sec. Op deze manier zijn de resultaten nauwkeurig genoeg en blijft de rekentijd beperkt. De verwerking van de resultaten van deze simulaties wordt behandeld in de volgende hoofdstukken van deze masterproef.

4.4.2 Uitgevoerde simulaties met de 2D mesh

De simulaties die uitgevoerd zijn met behulp van de 2D mesh zijn simulaties enkel van de composietbuien van Ukkel. De simulaties zijn uitgevoerd voor de situaties onder het huidige klimaat, Midden scenario in 2100 en Hoog Zomer scenario in 2100, allen voor de terugkeerperiodes 2 jaar, 10 jaar, 25 jaar en 100 jaar. De duur van de neerslaggebeurtenis die gesimuleerd is, bedraagt, net zoals in het geval van de flood cones, 48 uur.

De randvoorwaarden die vastgelegd zijn voor dit model, zijn dezelfde als in het geval van de flood cones om vergelijking van de resultaten mogelijk te maken. De simulaties met de 2D mesh gaan dus ook uit van een vrije overstortingsmogelijkheid in de Schelde en een situatie zonder springtij.

4.4.3 Bijkomende validatie

Nu een aantal statistieken gekend zijn van de composietbuien van Ukkel, en nu eveneens IDF-curves beschikbaar zijn van de composietbuien van Ukkel, kan de validatie zoals uitgevoerd in [42] aangevuld worden met een bijkomende validatie. Een zeer eenvoudige extra validatie is uitgevoerd van het model om een beeld te krijgen van de mate van afwijking tussen werkelijkheid en modellering die volgt uit de validatie van [42].

Er is uitgegaan van een aantal historische gebeurtenissen. Op basis van de neerslaghoeveelheden die tijdens de specifieke gebeurtenis voorkwamen, kan in de opgestelde IDF-curves van Ukkel (zie deel 4.3) nagegaan worden wat de terugkeerperiode is van dit neerslagevent. Door te vergelijken of de plaatsen die overstroming kenden in werkelijkheid ook overstromen in het model voor dezelfde terugkeerperiode, kan er

gecontroleerd worden of het model representatief is voor de werkelijkheid.

De historische gebeurtenissen die beschouwd worden, zijn deze voorgesteld in hoofdstuk 2. De neerslagdata die gebruikt wordt ter bepaling van de terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenis, is in tegenstelling tot de validatie uitgevoerd in [42] enkel de data van de pluviograaf van Wilrijk. Deze pluviograaf ligt enige afstand van het studiegebied maar wanneer de Thiessen-polygoon methode toegepast wordt (uitgevoerd door ir. A. A. Gonzalez Iniguez) blijkt deze pluviograaf het best het studiegebied te bedekken [47]. Volgens de Thiessen-polygoon methode valt het invloedsgebied van de pluviograaf van Melsele buiten het studiegebied van deze masterproef [47]. De gebruikte neerslaggegevens voor de neerslaggebeurtenis van 30/5/2016 zijn afkomstig van het KMI [34].

Onderstaande tabel 4.4 toont voor de verschillende historische neerslaggebeurtenissen de overeenkomstige neerslagintensiteit. Enkel de piek van de neerslaggebeurtenis is meegenomen, dit zijn de opeenvolgende uren die een neerslaghoeveelheid groter dan 1 mm kennen. Wanneer meerdere korte neerslaggebeurtenissen zich voordeden op een bepaalde dag is de meeste kritische (met de grootste terugkeerperiode) meegenomen in de analyse.

Tabel 4.4: Neerslagintensiteiten voor de verschillende historische neerslaggebeurtenissen en de duur van elke neerslaggebeurtenis

Datum	Neerslagintensiteit [mm]	Duur [u]
21/6/2013	32,36	2
13/10/2013	32,55	15
8/11/2013	12,91	1
10/8/2014	12,61	3
30/5/2016	57	12

Uitgaande van deze gegevens kan bepaald worden wat de input is om de terugkeerperiode van de gebeurtenissen te bepalen. De volgende tabel 4.5 toont de drie aspecten van de IDF-curves: Intensiteit, Duur en bijhorende terugkeerperiode bepaald met de IDF-curves van Ukkel. De IDF-curves gaan uit van een neerslagintensiteit in mm/u voor een bepaald aggregatieniveau. Deze neerslagintensiteit wordt gevonden door de intensiteiten uit tabel 4.4 te delen door de duur van de neerslaggebeurtenis zodanig dat de gemiddeld intensiteit per uur verkregen wordt. De terugkeerperiodes aangegeven in de tabel zijn benaderingen van de werkelijke terugkeerperiodes.

Deze gegevens kunnen vervolgens vergeleken worden met de resultaten die verkregen worden in het model. Onderstaande tabel 4.6 lijst de gelijkenissen en verschillen tussen model en werkelijkheid op voor een selectie van plaatsen met overstromingen die gemeld zijn aan de brandweer van Antwerpen. Daarnaast wordt ook grafisch aangegeven wat de verschillen zijn tussen model en werkelijkheid. De linkerfiguur

Tabel 4.5: Terugkeerperiodes van de verschillende historische gebeurtenissen op basis van de IDF-curves van Ukkel

Datum	Neerslagintensiteit [mm/u]	Duur [u]	Terugkeerperiode [jaar]
21/6/2013	15,87	2	5
13/10/2013	2,28	15	2
8/11/2013	12,91	1	<2
10/8/2014	4,20	3	<2
30/5/2016	4,75	12	>25

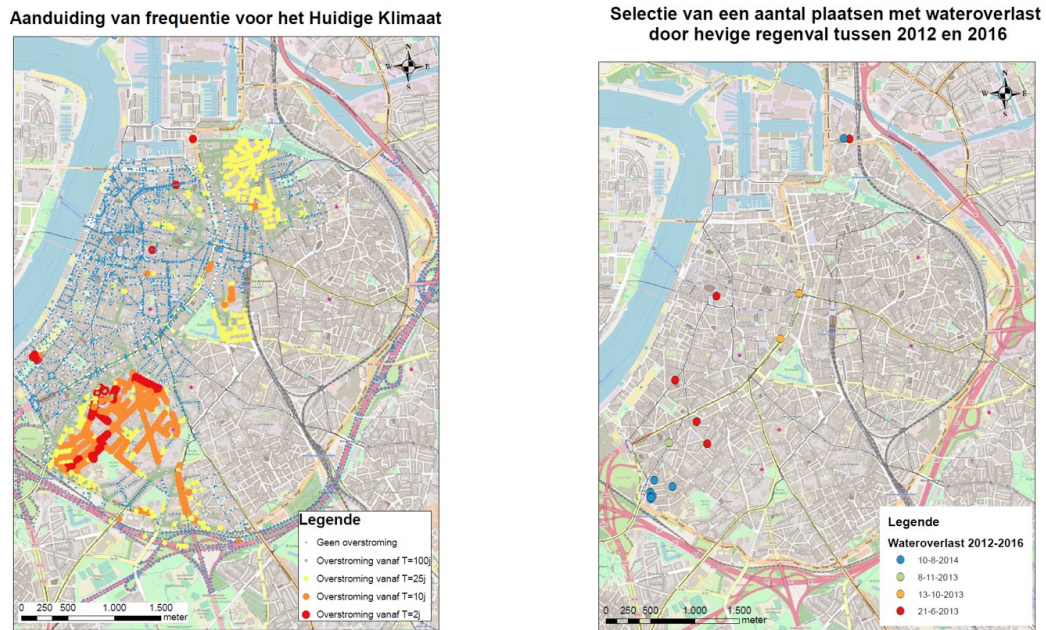
van de grafische vergelijking geeft de kleinste terugkeerperiode aan waarvoor een bepaalde knoop overstroomt in het netwerk. De rechterfiguur toont de plaatsen met wateroverlast tijdens een bepaalde historische gebeurtenis.

Tabel 4.6: Vergelijking model en werkelijkheid op basis van een selectie aan plaatsen waar overstromingen gemeld zijn aan de brandweer

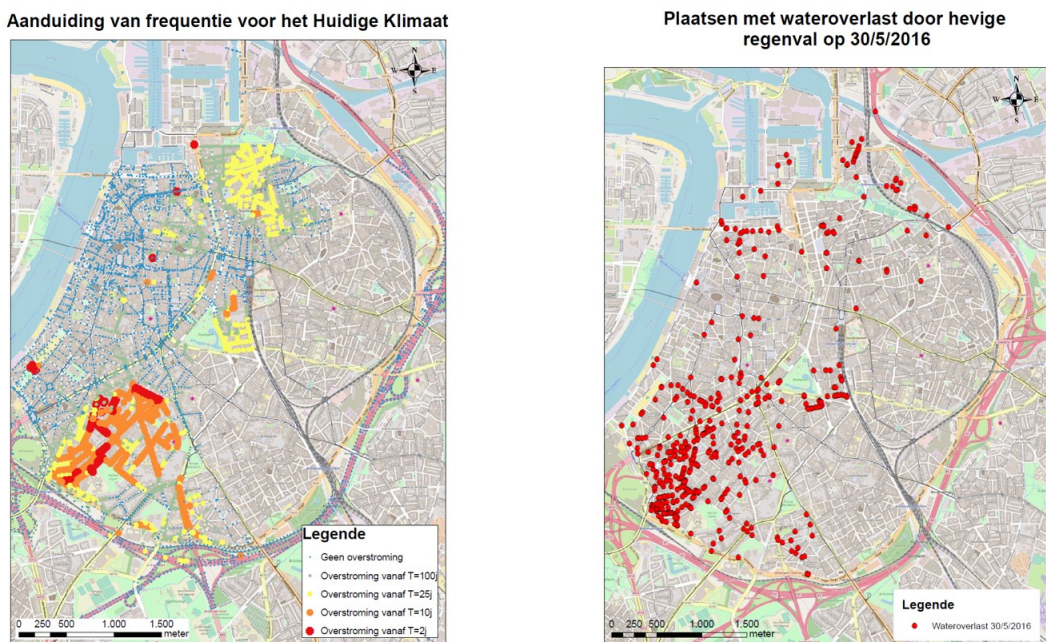
Datum	Plaats van overstroming	Terugkeerperiode in werkelijkheid	Kleinste terugkeerperiode in model voor overstroming
21/6/2013	Paleisstraat 78	5	100
	Boudewijnstraat 11	5	2
13/10/2013	Frankrijlei 98	2	100
8/11/2013	Brederodestraat 66	<2	100
10/8/2014	Coebergstraat 48	<2	10
30/5/2016	Ballaarstraat	>25	25 en 10
	Boudewijnstraat	>25	2
	Brederodestraat	>25	100
	Lange Elzenstraat	>25	10
	Nationalestraat	>25	100
	Paleisstraat	>25	100
	Dahliastraat	>25	25
	Brugstraat	>25	25

De overstroming op 8/11/2013 is te wijten aan een niet werkend rioolputje waardoor dit eigenlijk geen goed validatiepunt is. De andere data van 2013 en 2014 hebben niet al te beste overeenkomsten met het model zoals ook te zien in figuur 4.17. Het gebied rond de Brederodewijk kent zowel in het model als in de werkelijkheid overstroming, al overstroomt het model pas voor grotere terugkeerperiodes dan in

4.4. Gebruikte neerslag in InfoWorks ICM en bijkomende validatie



Figuur 4.17: Validatie van het InfoWorks ICM model op basis van de data tussen 2012 en 2016



Figuur 4.18: Validatie van het InfoWorks ICM model op basis van de data voor 30 mei 2016

werkelijkheid het geval is. In werkelijkheid overstroomden de aangeduide punten voor een terugkeerperiode van maximaal 5 jaar terwijl in het model deze punten pas een overstroming zullen kennen voor grotere terugkeerperiodes (vaak $T=100$ jaar). Voor de data van 30 mei 2016 zijn de overeenkomsten tussen model en werkelijkheid beter. De neerslaggebeurtenis die dag kende een terugkeerperiode die groter is dan 25 jaar. Dit wilt zeggen dat de rode, oranje en gele punten uit de linkerfiguur van 4.18 in het model overstroomden onder dergelijke neerslaggebeurtenis. In werkelijkheid zijn dezelfde gebieden onderworpen aan hinder en komt ook de terugkeerperiode van model en werkelijkheid min of meer overeen. Toch kan gezegd worden dat geen complete overeenkomst gevonden wordt.

De afwijkende resultaten tussen model en werkelijkheid kunnen verklaard worden door twee fenomenen. Enerzijds ligt Wilrijk ver verwijderd van het beschouwde studiegebied waardoor er bijgevolg onzekerheid bestaat op de neerslaginvoer gebruikt voor de validatie. Daarnaast zijn de composietbuizen van Ukkel gebruikt om de terugkeerperiode te bepalen. Deze zijn gemiddeld gezien representatief voor Vlaanderen, al kan het zijn dat in dit geval de terugkeerperiode van de historische gebeurtenis iets afwijkt van deze gevonden uit de IDF-curves van Ukkel.

Anderzijds houdt het model geen rekening met de vertraagde invoer van water aan rioolputjes. De inlaatcapaciteit van het model en werkelijkheid komen niet overeen. In werkelijkheid kan het zijn dat door de grote hoeveelheid regenwater die neervalt, de rioolputjes al dit water niet kunnen slikken met overstromingen tot gevolg, ook al is op die moment het rioleringsstelsel nog niet verzadigd. Het model beschouwt dit niet en gaat enkel uit van overstroming als de rioleringsbuizen gevuld zijn en het overtollige water geen andere uitweg meer heeft dan op straat uit te stromen. Een aanpassing van het model is nodig die deze zaken in rekening neemt.

Zoals ook gesteld in deel 3.5.4 zijn de resultaten van de validatie niet heel positief. Toch wordt met dit model verder gewerkt omdat enerzijds de beide validaties niet heel optimaal uitgevoerd zijn en anderzijds het model wel voldoende nauwkeurig is voor het beoogde doel van deze masterproef.

Hoofdstuk 5

Visualisatiemethodes

Uitgaande van de resultaten die verkregen worden uit de simulaties met behulp van InfoWorks ICM met de representatieve neerslag zoals bepaald in hoofdstuk 4, kunnen vervolgens de resultaten gevisualiseerd worden. Het is immers van belang om de resultaten op een duidelijk manier te communiceren om zodanig beleidsmakers en andere belanghebbenden te kunnen overtuigen van de klimaatveranderingsproblematiek in de stad Antwerpen.

Drie verschillende methodes zullen in dit hoofdstuk besproken worden om de impact van klimaatverandering op overstromingen in Antwerpen weer te geven. De eerste twee visualisatiemethodes zullen gebruik maken van simulatieresultaten op basis van de flood cones. De derde methode baseert zich op resultaten van de 2D mesh.

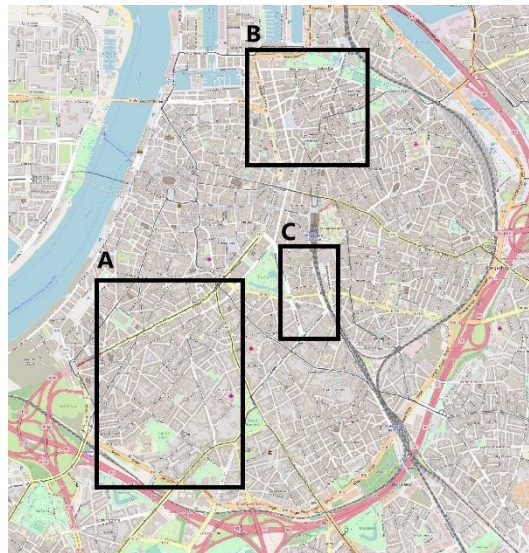
Onderstaande tabel 5.1 geeft een eerste vergelijking van de methodes die verduidelijkt zullen worden in onderstaande secties. Na voorstelling van de verschillende visualisatiemethodes zal besloten worden welke methode de meest geschikt is voor een bepaalde toepassing.

Tabel 5.1: Overzicht van de verschillende visualisatiemethodes gebruikt in deze masterproef

Methode	Omschrijving	Rekentijd
1D-visualisatie: Frequentie-verschuiving	Voorstelling van verandering in terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt tussen de verschillende klimaatscenario's op basis van simulatieresultaten met flood cones	InfoWorks ICM: 5 min
1D naar 2D- visualisatiemethode: Uitspreidingsalgoritme	Uitspreiding van het water in de flood cones tot 2D-overstromingskaarten	Infoworks ICM: 5 min Uitspreidingsalgoritme: 2,5 u
2D-visualisatiemethode	Opstellen van overstromingskaarten uitgaande van simulatieresultaten uitgevoerd met een 2D mesh in InfoWorks ICM	InfoWorks ICM: 20 tot 30 min

Dit hoofdstuk zal als eerste ingaan op de 1D-visualisatie van de frequentieverschuiving. Het tweede deel van het hoofdstuk zal zich dan toespitsen op de 1D naar 2D-visualisatiemethode en de 2D-visualisatiemethode, die beiden 2D-overstromingskaarten geven. Na overlopen van de methodologie van beide methodes zullen de resultaten samen besproken worden en zal tot slot het verschil tussen beide methodes gekwantificeerd worden.

Om de resultaten op eenvoudige wijze te kunnen voorstellen wordt gebruik gemaakt van drie zones binnen het studiegebied zoals te zien op onderstaande figuur 5.1. Zone A omvat het gebied ter hoogte van de Brederodewijk, zone B omvat het gebied rechts onder het Eilandje en zone C omvat het gebied ter hoogte van het stadspark. Deze zones zullen doorheen het verdere verloop van de masterproef gebruikt worden om duidelijk aan te geven over welk gebied gesproken wordt.



Figuur 5.1: Aanduiding van zones in het studiegebied voor bespreking van de visualisatiere resultaten

5.1 1D-visualisatie: Frequentieverschuiving

5.1.1 Methodologie van de visualisatie van de frequentieverschuiving

Om een beeld te krijgen van de mate van verandering in de terugkeerperiodes tussen de verschillende klimaatscenario's, wordt als eerste visualisatie de frequentieverschuiving voorgesteld.

Het doel van deze visualisatiemethode is om op een kaart aan te duiden met welke factor de terugkeerperiode van een neerslaggebeurtenis waarvoor overstromingen

optreden in een bepaalde knoop verandert. Op basis daarvan kan dan een beeld gevormd worden van de gebieden in het beschouwde studiegebied van Antwerpen die onder toekomstige klimaatscenario's een grotere impact zullen kennen. De opbouw van deze kaarten met de frequentieverschuiving wordt in dit deel stap voor stap uitgelegd. De kaarten zijn opgebouwd met behulp van het programma ArcGIS (ArcMap).

De eerste stap in deze methode is nagaan per beschouwde scenario welke knopen er overstromen voor een bepaalde terugkeerperiode van een neerslaggebeurtenis. Dit kan eenvoudig gebeuren door de overstromingsvolumes die volgen uit de simulaties in InfoWorks ICM te exporteren naar Excel. Alle waarden groter dan 0 geven een overstroming van de knoop aan, negatieve waarden of waarden gelijk aan 0 geven aan dat de knoop geen overstroming kent. Er wordt voorlopig geen aandacht besteed aan de exacte waarden van de overstromingsvolumes, het enige dat hier van belang is, is het al dan niet overstromen van de knoop. Door voor alle beschouwde terugkeerperiodes aan te geven of een knoop overstroomt of niet, wordt gevonden wat de kleinste terugkeerperiode is van de neerslaggebeurtenis waarvoor een knoop overstroomt. Als bijvoorbeeld een knoop zowel voor een terugkeerperiode van 10 jaar, 25 jaar en 100 jaar overstroomt dan kan gesteld worden dat de terugkeerperiode vanaf wanneer overstroming zich voordoet in de beschouwde knoop gelijk is aan 10 jaar. Door deze stap uit te voeren voor alle klimaatscenario's wordt gevonden wat de frequentie is waarvoor overstroming optreedt voor elke knoop onder elk scenario. Vervolgens kan dan het verschil in frequentie tussen twee klimaatscenario's nagegaan worden. Per knoop wordt vergeleken wat de terugkeerperiode is waarvoor overstroming optreedt voor scenario 1 en wat de terugkeerperiode is voor scenario 2. De frequentieverschuiving kan dan gedefinieerd worden als:

$$f = \frac{T_1}{T_2}$$

Als bijvoorbeeld in scenario 1 een knoop overstroomt voor een 100-jarige neerslaggebeurtenis, maar in scenario 2 de overstroming al plaatsvindt vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar dan is de frequentieverschuiving gelijk aan factor 10. Door voor elke knoop deze factor te bepalen en aan te geven tussen welke twee terugkeerperiodes deze factor geldt, is alle nodige input gevonden voor de visualisatie in ArcGIS.

Om de frequentiekaarten op te stellen wordt als eerste een achtergrondlaag ingeladen met het stratenplan van het studiegebied. Vervolgens wordt het rioleringsnetwerk uit InfoWorks ICM omgezet naar een shapefile om op die manier het netwerk te kunnen inladen in ArcGIS. Daarna wordt in de gegevenstabel van het netwerk extra kolommen toegevoegd voor alle verschillende frequentiefactoren. Een voorbeeld van dergelijke kolom is bijvoorbeeld "Van T100 naar T10". Voor elke knoop wordt in de tabel een 1 geplaatst als de terugkeerperiode tussen de scenario's effectief verandert van terugkeerperiode 100 jaar naar terugkeerperiode 10 jaar. Is dit niet het geval wordt in de kolom bij de beschouwde knoop een 0 geplaatst. Door dit te doen voor

alle knopen en alle mogelijke combinaties van veranderingen in terugkeerperiodes, is de gegevenstabel volledig uitgebreid met de nodige gegevens voor de visualisatie. De laatste stap bestaat er dan uit om deze factoren te visualiseren. Dit gebeurt door in ArcGIS aan elke factor voor een bepaalde knoop een bepaalde kleur toe te kennen. Wanneer al deze kleuren geplot worden op een kaart is duidelijk zichtbaar waar in het netwerk welke frequentieverschuiving zich voordoet.

5.1.2 Methodologie van visualisatie van de frequentieverschuiving met heatmaps

Een andere methode om de frequentieverschuiving voor te stellen is door gebruik te maken van heatmaps. Op deze manier zijn de frequentiekaarten minder beladen met de verschillende soorten knopen die de verschillende factoren aanduiden, maar kan toch een algemeen beeld gekregen worden van de verandering in kwetsbare gebieden binnen de stad. De heatmaps worden opgemaakt door gebruik te maken van het open source programma QGIS.

Om te vermijden dat alle knopen horende bij een bepaalde factor van de frequentieverschuiving als aparte laag ingevoerd moeten worden in QGIS en zo verschillende heatmaps over elkaar geplaatst dienen te worden, wordt er in dit geval gebruik gemaakt van een wegingsfactor die toegekend wordt aan alle knooppunten in het model. Op die manier worden punten die een grotere factor, en dus een grotere impact hebben op mogelijke overstromingen, belangrijker dan andere punten met een lagere factor en kunnen de heatmaps zich concentreren rond deze meer belangrijke knooppunten. Zo kan alles in dezelfde laag ingeladen worden in QGIS en wordt een overzichtelijke heatmap verkregen.

Als eerste stap wordt er per factor van frequentieverschuiving een csv-file opgesteld. Deze csv-files baseren zich op de gegevenstabel zoals opgemaakt in deel 5.1.1 en omvatten telkens alle knopen van het model. De file omvat het ID van de knoop, de bijhorende x- en y-coördinaten en vervolgens een waarde 0 of 1 die aangeeft of de bepaalde knoop al dan niet de beschouwde factor van frequentieverschuiving heeft. Na het opstellen van al deze files kunnen deze ingelezen worden in Matlab. De eerste stap in Matlab is om alle 0-lijnen uit de verschillende files te verwijderen zodat per file enkel de knopen overblijven die effectief een bepaalde factor in frequentieverschuiving kennen. Bijvoorbeeld de file “VanT100naarT10.csv” omvat na verwijderen van de 0-lijnen enkel nog de knopen die een frequentieverschuiving van factor 10 kennen tussen het beschouwde scenario en het huidige klimaat.

Vervolgens worden gewichten toegekend aan elke factor. Deze zijn terug te vinden in onderstaande tabel 5.2.

Dit gewicht geeft het aantal keer aan dat een bepaalde knoop gekopieerd wordt zodanig dat deze belangrijker wordt tegenover knopen met een lagere factor. Een voorbeeld is het geval van een frequentieverschuiving van T100 naar T10 in het Hoog Zomer scenario. Deze verschuiving is terug te vinden in 1041 knopen van het netwerk. Een gewicht wordt toegekend aan deze verschuiving gelijk aan 45, bijgevolg telt de

Tabel 5.2: Gewichten toegekend aan de knopen met een bepaalde frequentieverschuiving voor de opmaak van heatmaps

Frequentieverschuiving	Factor	Gewicht
Van T100 naar T2	Factor 50	nvt
Van T100 naar T10	Factor 10	45
Van T100 naar T25	Factor 4	20
Van T25 naar T2	Factor 12,5	50
Van T25 naar T10	Factor 2,5	10
Van T10 naar T2	Factor 5	30
Geen verandering	Factor 1	1
T100 in scenario	Factor > 1	5
T25 in scenario	Factor > 4	25
T10 in scenario	Factor > 10	50
T2 in scenario	Factor > 50	nvt

nieuwe csv-file na toekenning van de gewichten 45*1041 knopen ofwel 46 845 knopen. Opgemerkt dient te worden dat de knopen die in het huidige klimaat geen overstrooming kennen maar wel overstroomd in de scenario's, ook een gewicht toegewezen krijgen. De analyse van deze masterproef beperkt zich tot neerslaggebeurtenissen met een terugkeerperiode van 100 jaar. Knopen die in het huidige klimaat niet overstroomd voor een terugkeerperiode van 100 jaar of kleiner, kunnen eventueel wel overstroomd indien zich een gebeurtenis voordoet met een terugkeerperiode groter dan 100 jaar. Wanneer in een klimaatscenario de knoop dan wel overstroomt bij bijvoorbeeld een 25-jarige gebeurtenis, is deze frequentieverschuiving bijgevolg gelijk aan een factor groter dan 4, zoals te zien in tabel 5.2. Door deze aanname kunnen alle knopen die in één van de scenario's overstrooming kennen, meegenomen worden in de analyse. Eenmaal alle knopen in het netwerk een gewicht toegekend kregen en dus een aantal keer gekopieerd zijn, kunnen alle CSV-files samengevoegd worden tot 1 grote file die alle knopen en hun kopieën van het netwerk omvat. Een voorbeeld van de opgestelde Matlab-files voor de opmaak van deze CSV-file is terug te vinden in bijlage D. De CSV-file wordt tenslotte ingeladen in QGIS en gevisualiseerd als heatmaps.

5.1.3 Resultaten

De methodologie zoals hierboven beschreven wordt toegepast op de simulatiere-sultaten van de Ukkeldata om de frequentieverschuiving in kaart te brengen. De frequentieverschuiving tussen het huidige klimaat en het Midden scenario en tussen het huidige klimaat en het Hoog Zomer scenario wordt beschouwd.

5.1.3.1 Overstromingsfrequentie per klimaatscenario

De eerste stap in de visualisatie van de frequentieverschuiving is het bepalen van de overstromingsfrequentie per knoop. Voor de drie beschouwd scenario's (huidige

klimaat, Midden scenario en Hoog Zomer scenario) zijn de resultaten van deze visualisatie te zien in onderstaande figuren 5.2, 5.3 en 5.4.

Op deze figuren wordt aangegeven vanaf welke terugkeerperiode van de neerslaggebeurtenis overstroming plaatsvindt in de knoop. Dit wil zeggen dat voor die bepaalde knoop de flood cone (deels) gevuld is. De knopen die in het blauw gekleurd zijn kennen geen overstroming voor de beschouwde terugkeerperiodes. Eventuele overstroming met een terugkeerperiode groter dan 100 jaar zou kunnen voorkomen in deze knopen. Dit wordt echter niet beschouwd aangezien deze gebeurtenis zodanig weinig voorkomt en in het ontwerp van rioleringen niet relevant is. De groene punten zijn de knopen die overstromen voor neerslaggebeurtenissen die gemiddeld gezien 1 keer in de 100 jaar voorkomen. De gele, oranje en rode knopen kennen respectievelijk overstromingen vanaf terugkeerperiodes van 25, 10 en 2 jaar. De rode knopen zijn bijgevolg de meest kwetsbare knopen aangezien deze altijd zullen overstromen bij een neerslaggebeurtenis met een terugkeerperiode van 2 jaar of hoger.

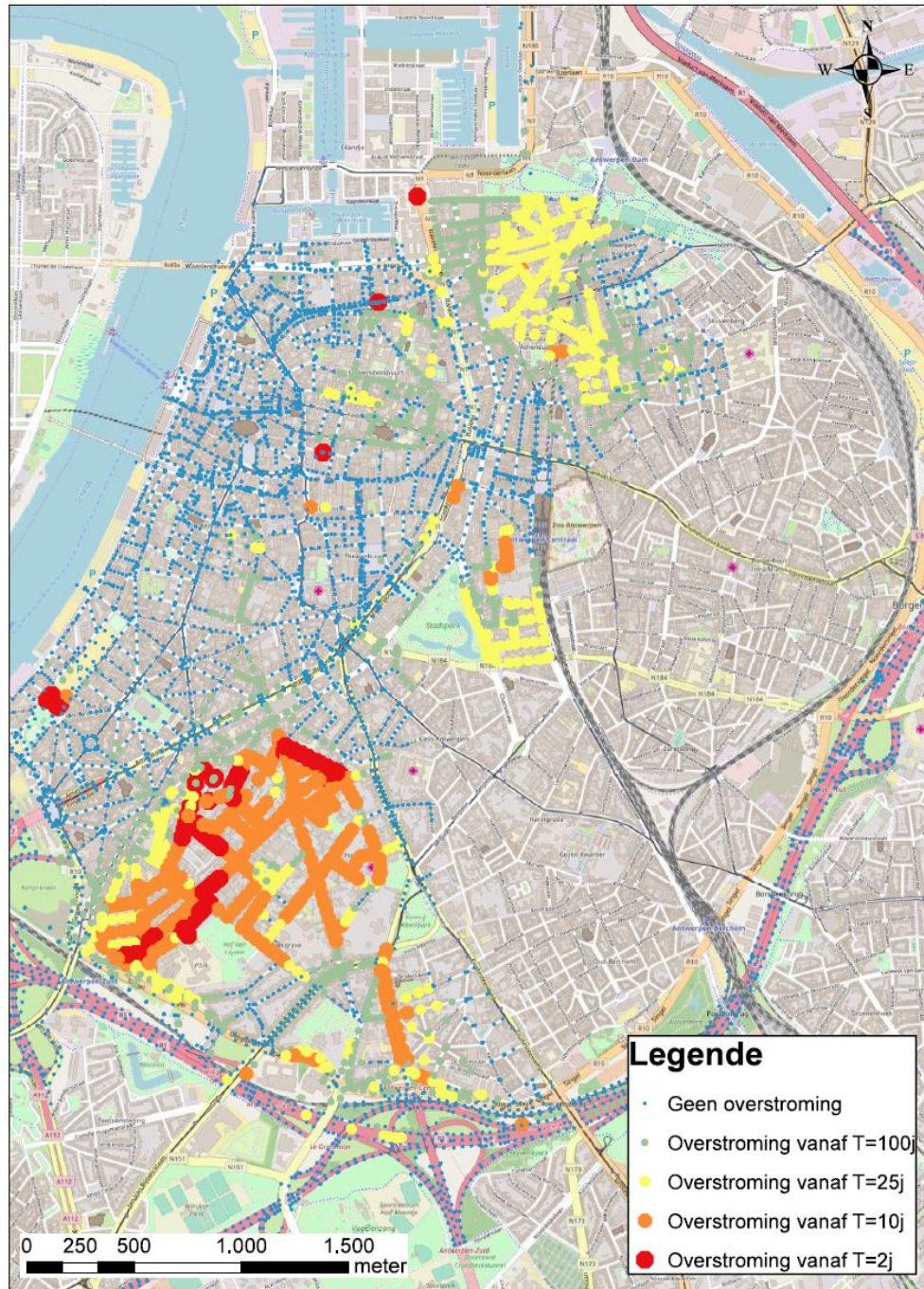
Wanneer de kaarten onderling vergeleken worden zijn duidelijke verschillen zichtbaar tussen de klimaatscenario's. Ook is duidelijk dat drie gebieden systematisch overstroming kennen en hierdoor als kwetsbare gebieden beschouwd kunnen worden. Aan de hand van de aangeduide zones in figuur 5.1 kunnen volgende zaken opgemerkt worden:

- **Zone A: Brederodewijk**

Voor zowel het huidige klimaat als voor de twee beschouwde scenario's is te zien in de figuren dat de Brederodewijk een erg kwetsbaar gebied is voor wateroverlast. De Brederodewijk is gevoelig voor overstromingen omdat dit deel van de stad lager ligt dan andere delen van Antwerpen. Bijgevolg stroomt er veel regenwater af naar dit gebied. In het **huidige klimaat** kleurt zone A voornamelijk oranje wat wil zeggen dat vooral vanaf een neerslaggebeurtenis met terugkeerperiode van 10 jaar grote wateroverlast te verwachten is. De randen van deze zone kleuren in het huidige scenario geel en groen wat aangeeft dat dit deel van de Brederodewijk pas kwetsbaar wordt vanaf de grotere terugkeerperiodes van 25 en 100 jaar.

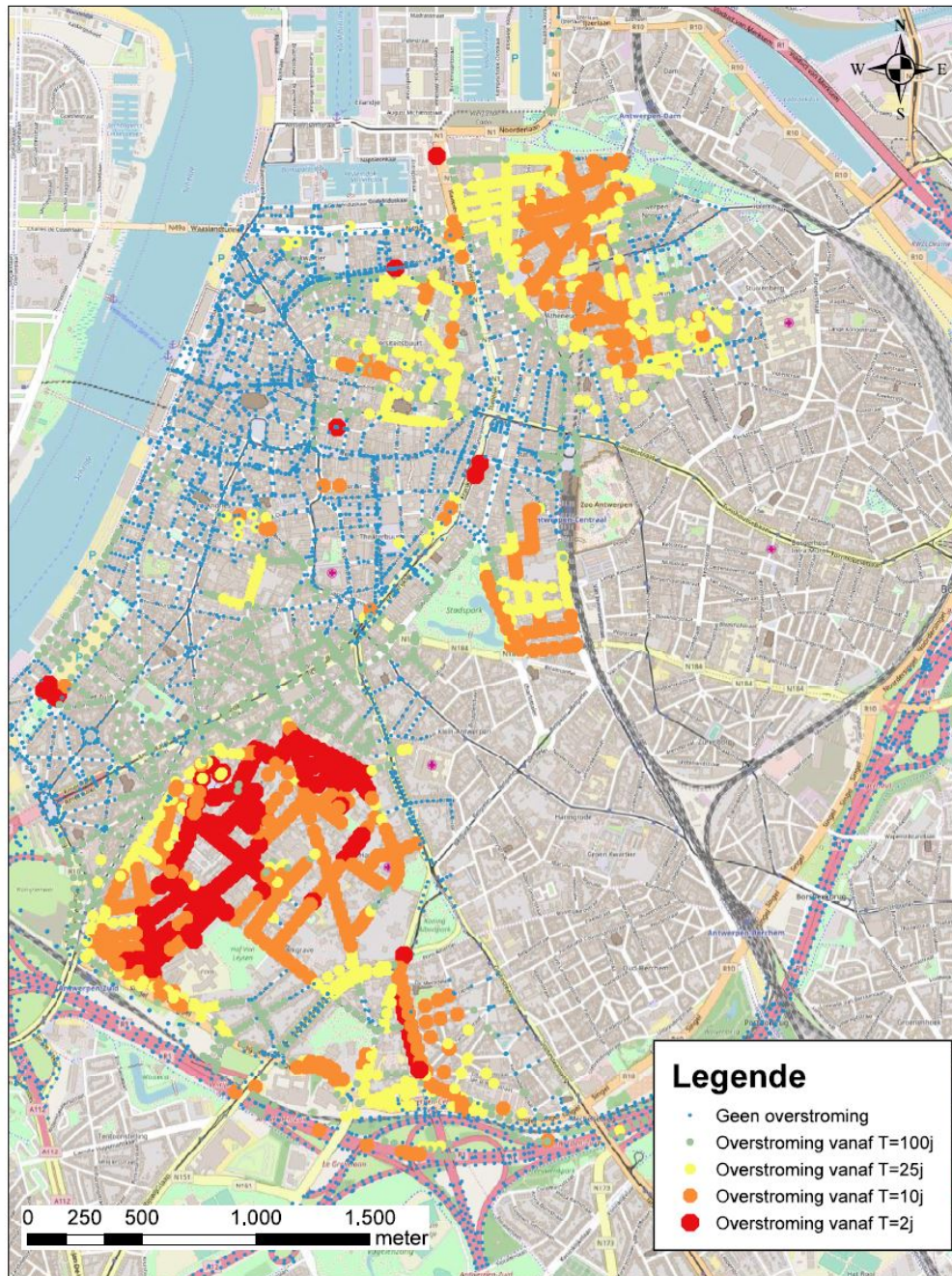
In het **Midden scenario** zijn er meer knopen te zien in deze zone die zullen overstromen voor een neerslaggebeurtenis met terugkeerperiode 2 jaar. Daarnaast zijn de groene punten (knopen die overstromen met een terugkeerperiode van 100 jaar) meer uitgespreid richting het gebied nabij de Schelde dat onder het huidige klimaat nog geen overstromingen kent. Aangezien het deel van de Brederodewijk verzadigd raakt, zoekt het water zijn weg naar andere gebieden met bijkomende overstromingen tot gevolg. De uitspreiding is echter beperkt, nog steeds kan gesteld worden dat dit deel van de stad amper of niet overstroomt. Wanneer het **Hoog Zomer scenario** beschouwd wordt toont dit een veel dramatischer resultaat. Het volledige gebied van de Brederodewijk kent nu een overstromingsfrequentie van 2 jaar of 10 jaar. Ook zijn er veel meer uitlopers te zien richting de Schelde van knopen die zullen overstromen bij 25-jarige neerslaggebeurtenissen.

Aanduiding van frequentie voor het Huidige Klimaat



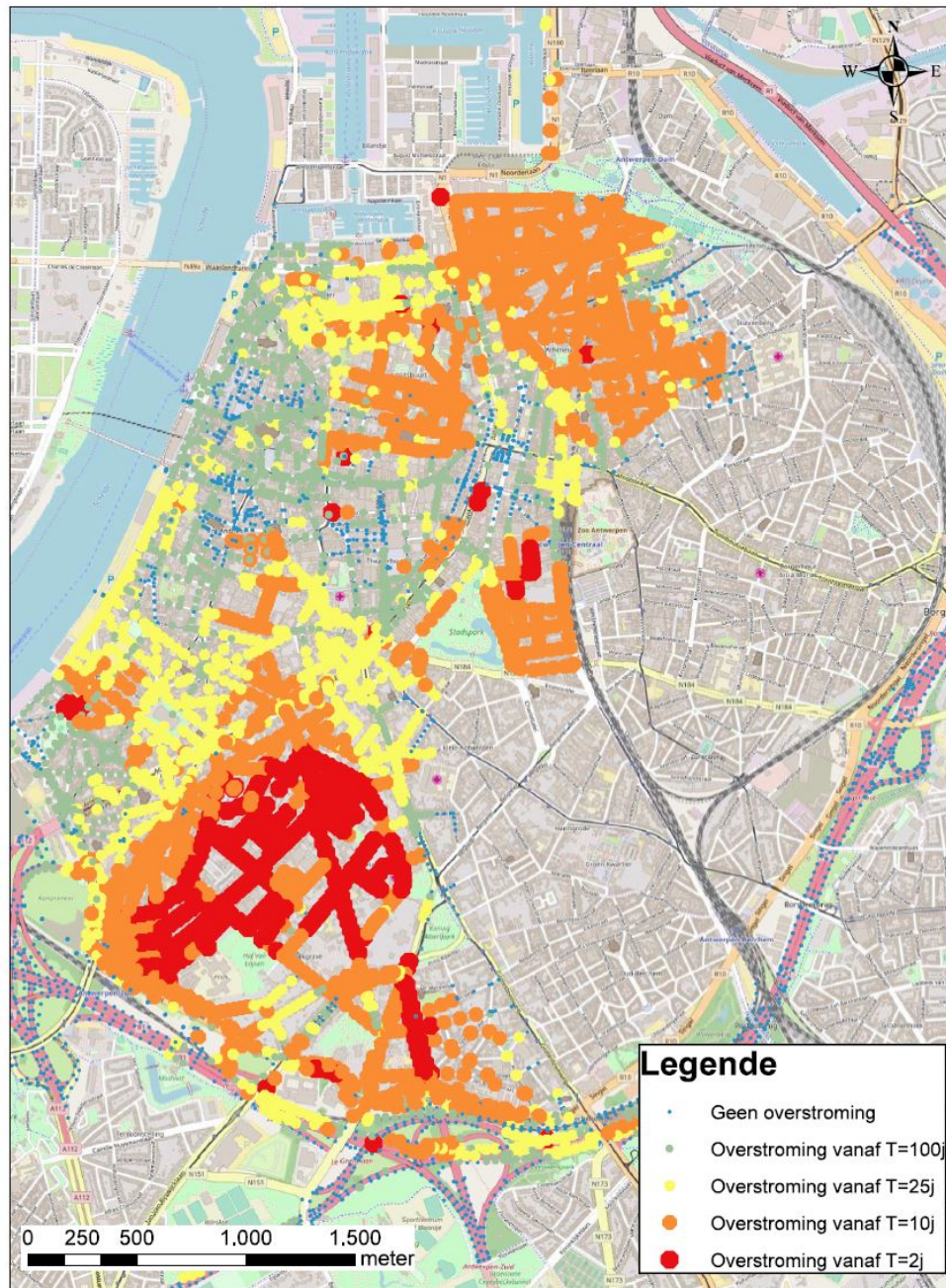
Figuur 5.2: Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstrooming optreedt in een knooppunt voor het huidige klimaat op basis van de Ukkeldata

Aanduiding van frequentie voor Midden scenario in 2100



Figuur 5.3: Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in een knooppunt voor het Midden klimaatsscenario in 2100 op basis van de Ukkeldata

Aanduiding van frequentie voor Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur 5.4: Aanduiding van terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in een knooppunt voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 op basis van de Ukkeldata

- **Zone B: Gebied schuin onder het Eilandje**

Het tweede kritische gebied is het gebied schuin onder het Eilandje. In het **huidige klimaat** treden overstromingen op in dit gebied onder invloed van neerslaggebeurtenissen met terugkeerperiodes 25 en 100 jaar. De oorzaak hiervan kan te wijten zijn aan de nabijheid van een RWZI die ervoor zorgt dat veel rioleringswater langs dit gebied passeert. Onder invloed van het **Midden scenario** zal dit gebied echter overstromingen kennen vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar en zullen de randen van het gebied wateroverlast kennen wanneer een 25-jarige neerslaggebeurtenis zich voordoet. In het **Hoog Zomer scenario** wordt de hele zone B kwetsbaar vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar.

- **Zone C: Stadspark**

Het derde kwetsbare gebied is de zone ter hoogte van het stadspark. Ten oosten van het park overstroomt het gebied in het **huidige klimaat** voor terugkeerperiodes vanaf 25 jaar. Een verklaring voor overstroming in dit gebied is moeilijker te geven. De overstromingen zouden zich kunnen voordoen als gevolg van afwatering in het stadspark naar de omliggende riolering, hoewel er veel infiltratie is van het regenwater in de groene zones van het park. De rioleringsbuizen in dit gebied zijn niet al te groot dus hevige regenbuien in combinatie met het extra water afkomstig van het stadspark door verzadiging van de grond, zou kunnen zorgen voor deze overstromingen. De terugkeerperiodes waarvoor overstroming optreedt in deze zone veranderen in het **Midden scenario** gedeeltelijk naar een terugkeerperiode 10 jaar terwijl in het **Hoog Zomer scenario** de hele zone kwetsbaar wordt vanaf een 10-jarige neerslaggebeurtenis.

- **Gebied langs de Schelde**

Het deel van de stad langs de Schelde kent weinig tot geen overstromingen onder het **huidige klimaat**. Dit deel is beter beschermd tegen overstromingen omwille van de nabijheid van de Schelde. Zo wordt onder meer de kaaimuur langs de Schelde vernieuwd om de impact van overstromingen vanuit de rivier daar te beperken. Anderzijds zijn de knopen in dit gebied het opwaartse deel van het netwerk. De rioleringsdiameters in dit deel zijn kleiner dan verder afwaarts in het gebied. Bijgevolg moet er minder water passeren langs deze rioleringsbuizen bij de afvoer van het regen- en afvalwater waardoor de belasting op het rioleringsnetwerk hier lager ligt dan in andere delen van het netwerk. Bovendien is er ook de mogelijkheid tot overstorting van rioleringswater rechtstreeks naar de Schelde. Wanneer dan de klimaatscenario's beschouwd worden is te zien dat er toch meer en meer wateroverlast zichtbaar begint te worden in dit gebied. Vooral in het **Hoog Zomer scenario** zal dit gebied kwetsbaar worden voor wateroverlast. Het gebied langs de Schelde overstroomt nu altijd voor een bui met terugkeerperiode van 100 jaar en grote delen overstroomen zelfs al bij een bui met terugkeerperiode van 25 jaar.

Zoals aangegeven in hoofdstuk 4 geeft het Midden scenario de gemiddelde impact van de piekafvoeren weer, het is dus logisch dat dit scenario een hogere overstro-

mingsfrequentie heeft dan het huidige klimaat aangezien er in de toekomst meer piekneerslaggebeurtenissen zullen zijn, maar dat dit scenario wel lagere overstromingsfrequenties heeft dan het Hoog Zomer scenario, dat de impact weergeeft van hoge piekafvoeren ten gevolge van zomeronweders. Een zomeronweder bereikt al snel hoge terugkeerperiodes waardoor uit de figuren blijkt dat het hele studiegebied onder dit scenario kwetsbaar wordt.

Het is op basis van deze kaarten duidelijk dat er wel degelijk een verandering is in de terugkeerperiodes van de neerslagevents die overstroming veroorzaken. Om meer exact de invloed van de klimaatscenario's te bekijken worden in de volgende delen de frequentieverschuivingen tussen het huidige klimaat en het Midden scenario en tussen het huidige klimaat en het Hoog Zomer scenario in kaart gebracht en besproken.

5.1.3.2 Frequentieverschuiving

Om de invloed van een scenario na te gaan in vergelijken met het huidige klimaat zijn de frequentieverschuivingen bepaald zoals aangegeven in deel 5.1.1. Onderstaande tabellen 5.3 en 5.4 geven aan welke frequentieverschuivingen in rekening gebracht dienen te worden en hoeveel knopen er dergelijke frequentieverschuiving kennen.

Tabel 5.3: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100

Factor	Frequentieverschuiving	Aantal knopen
Factor 1	Van T100 naar T100	388
	Van T25 naar T25	141
	Van T10 naar T10	208
	Van T2 naar T2	91
Factor 2,5	Van T25 naar T10	366
Factor 4	Van T100 naar T25	660
Factor 5	Van T10 naar T2	142
Factor 10	Van T100 naar T10	1

Tabel 5.4: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

Factor	Frequentieverschuiving	Aantal knopen
Factor 1	Van T10 naar T10	26
	Van T2 naar T2	91
Factor 2,5	Van T25 naar T10	503
Factor 4	Van T100 naar T25	8
Factor 5	Van T10 naar T2	324
Factor 10	Van T100 naar T10	1041
Factor 12,5	Van T25 naar T2	4

Daarnaast zijn er ook een aantal knopen die onder het huidige klimaat geen overstroming kennen (voor terugkeerperiodes kleiner of gelijk aan 100 jaar) maar wel overstromen onder de klimaatscenario's. Deze worden apart aangegeven op de kaart. In het Midden scenario zijn er 791 knopen die overstromen bij een 100-jarige neerslaggebeurtenis maar die geen overstroming kennen in het huidige klimaat. Voor het Hoog Zomer scenario zijn er 1924 knopen die overstromen bij een 100-jarige neerslaggebeurtenis, 1456 knopen die overstromen bij een 25-jarige neerslaggebeurtenis en 220 knopen die overstromen bij een 10-jarige gebeurtenis terwijl al deze knopen geen wateroverlast ondervinden in het huidige klimaat.

Een samenvatting van deze frequentieverschuivingen tussen huidige klimaat en Midden scenario en huidige klimaat en Hoog Zomer scenario zijn respectievelijk te zien in figuren 5.5 en 5.6. Om een duidelijker overzicht te hebben van welke knopen welke frequentiefactor hebben, worden in bijlage C deze kaarten opgesplitst per factor.

Om de resultaten van deze frequentiekaarten te bespreken worden opnieuw de zones uit figuur 5.1 beschouwd. Per zone kunnen voor beide klimaatscenario's de volgende zaken opgemerkt worden:

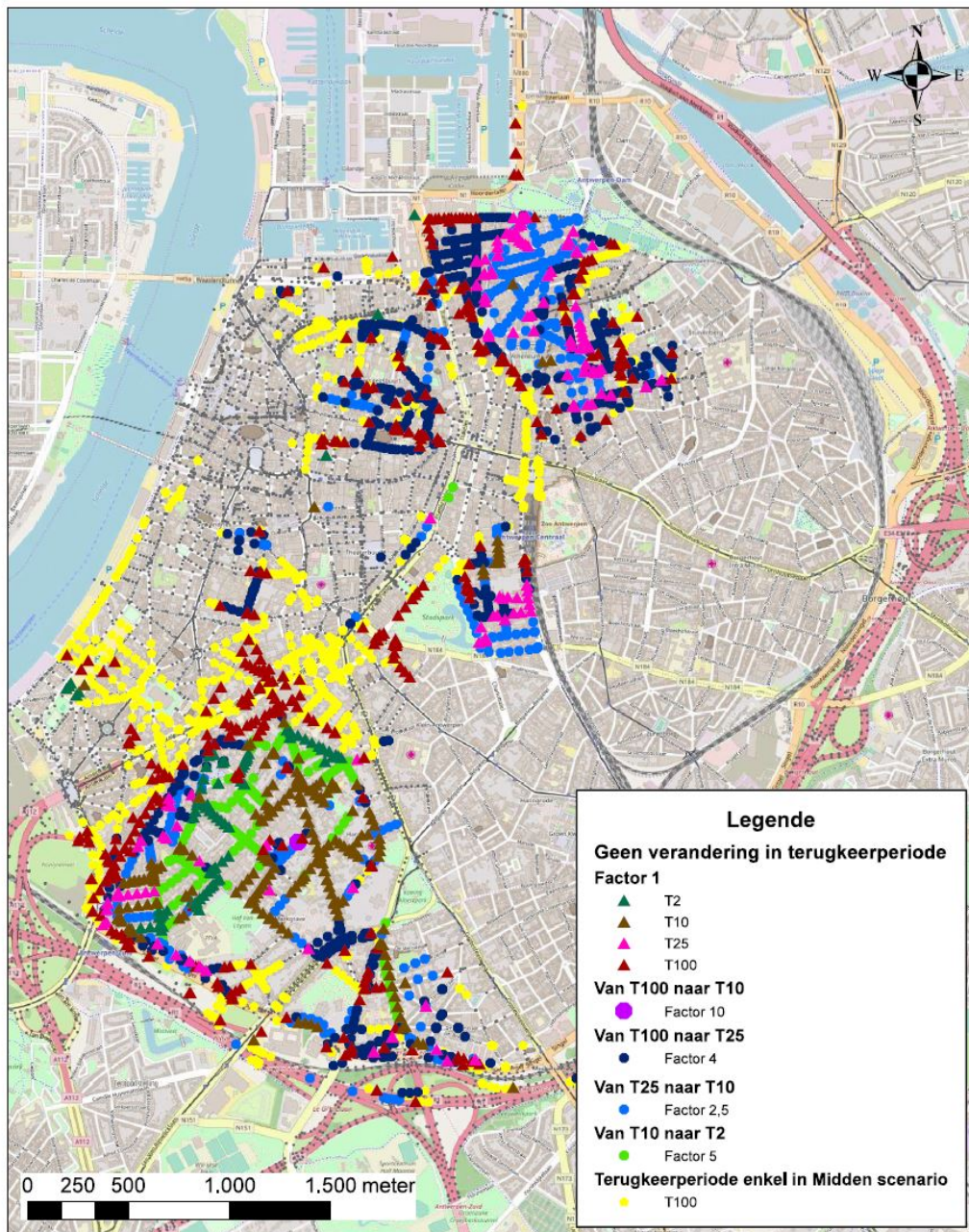
- **Zone A: Brederodewijk**

In het geval van de **frequentieverschuiving tussen huidig klimaat en Midden scenario** zijn er vele knopen die in het huidige klimaat overstromen met een terugkeerperiode van 10 jaar, die in het Midden scenario overstromen voor een terugkeerperiode van 2 jaar (licht groene bolletjes). Dit werd ook al opgemerkt in deel 5.1.3.1 maar wordt hier concreter weergegeven. Het gebied kent dus wijzigingen in de terugkeerperiode tot een factor 5. Daarnaast zijn er een aantal punten aan de overgang van het gebied Brederode en het gebied langs de Schelde die een verandering kennen in de terugkeerperiode. De knopen in dit overgangsgebied hebben ofwel een frequentieverschuiving met factor 2,5 tot factor 4 ofwel hebben de punten enkel een overstroming in het Midden scenario.

De **frequentieverschuiving tussen huidig klimaat en Hoog Zomer scenario** toont eveneens dat in dit gebied een heel deel knopen een verandering van terugkeerperiode kennen gelijk aan factor 5. Verschillende knopen zullen onder het Hoog Zomer scenario overstromen met een terugkeerperiode van 2 jaar. Aan de rand van de Brederodewijk is de frequentiefactor zelfs gelijk aan een factor 10. Door deze frequentieverschuiving kan besloten worden dat zo goed als de hele zone nu kwetsbaar is voor neerslaggebeurtenissen met een lage terugkeerperiode. Knopen die in het huidige klimaat al overstromen met de terugkeerperiode 2 of 10 jaar zullen dit ook doen in andere klimaatscenario's. De knopen die momenteel nog minder frequent overstromen zullen onder het Hoog Zomer scenario niet gespaard blijven waardoor het hele gebied erg kwetsbaar wordt.

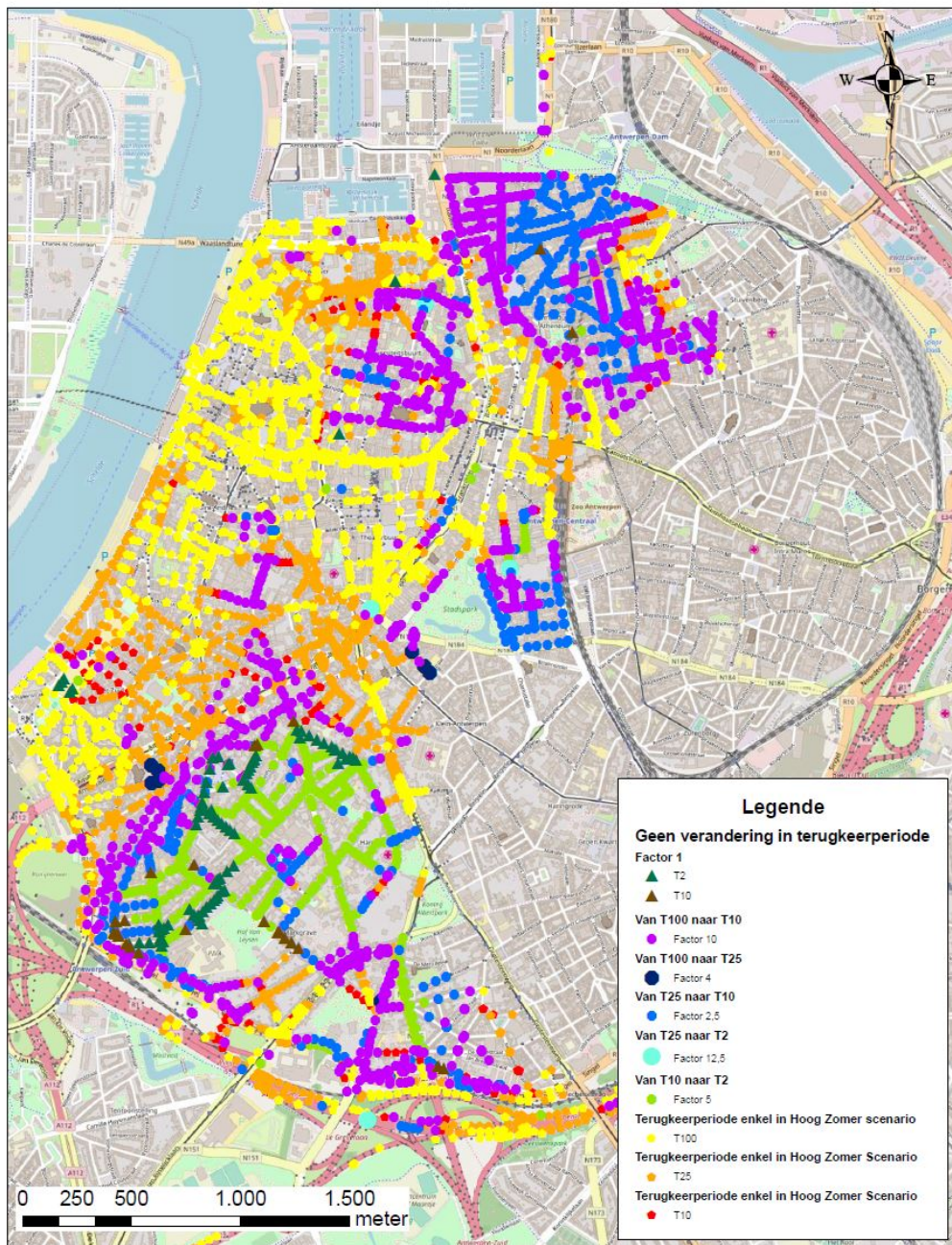
- **Zone B: Gebied schuin onder het Eilandje**

Frequentieverschuiving tussen huidig klimaat en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata



Figuur 5.5: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata

Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata



Figuur 5.6: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata

Ter hoogte van het gebied rechts onder het Eilandje kennen de meeste knopen in het geval van een **frequentieverschuiving tussen het huidige klimaat en het Midden Scenario** een frequentieverschuiving gelijk aan factor 2,5 en factor 4. De terugkeerperiode verandert in de kern van het gebied immers van terugkeerperiode 25 naar 10 en aan de randen van terugkeerperiode 100 naar 25. Ook het deel meer naar de schelde toe zal nu frequenter overstromen met een factor die oploopt tot factor 4. Ten gevolge van de **frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer scenario** loopt deze factor in zone B zelfs op tot een factor 10. De kern van het gebied kent een verandering met factor 2,5; de randen kennen een verandering met factor 10. De hele zone wordt nu kwetsbaar vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar.

- **Zone C: Stadspark**

Het gebied aan het stadspark kent zoals aangegeven in deel 5.3.2.1 veel meer knopen in het Midden scenario die zullen overstromen met een terugkeerperiode van 10 jaar in plaats van 25 jaar. De **frequentieverschuiving van huidig klimaat naar Midden scenario** op deze plaats kleurt daarom blauw, wat deze verandering van factor 2,5 aangeeft. Een deel van de terugkeerperiodes in het gebied blijft wel onveranderd (roze driehoekjes) in het Midden scenario. De **frequentieverschuiving van huidig klimaat naar Hoog Zomer scenario** zorgt dat overstromingen in zone C 2,5 tot 10 keer sneller voorkomen. Het hele gebied zal overstromen voor een terugkeerperiode van 10 jaar in het Hoog Zomer scenario.

Uitgaande van deze resultaten kan besloten worden dat onder het Midden klimaat-scenario meer overstromingen zullen plaatsvinden. Wel beperken de overstromingen zich tot de gebieden die momenteel ook al het meest kwetsbaar zijn. De gebieden die vandaag niet veel overstroming kennen, zullen ook in het Midden klimaatscenario gevrijwaard blijven. Er is wel nood aan oplossingen aangezien de overstromingen 4 tot 5 keer sneller zullen voorkomen wat geen te onderschatten hoeveelheid is. Voor het Hoog Zomer scenario zijn, zoals verwacht, de resultaten dramatischer. Zeer veel knopen kennen in dit geval een frequentieverschuiving met factor 10. Deze knopen zijn vooral terug te vinden rond de gebieden ter hoogte van Zones A en B. Ook in het deel langs de Schelde dat in het huidige klimaat weinig tot geen overstroming kent, zijn nu verschillende punten te zien die al zullen overstromen bij een terugkeerperiode van 10 en 25 jaar. Het gebied langs de Schelde wordt helemaal kwetsbaar wanneer een 100-jarige neerslaggebeurtenis zich voordoet.

Het Hoog Zomer scenario zal er bijgevolg voor zorgen dat het hele studiegebied erg kwetsbaar wordt voor overstromingen.

5.1.3.3 Visualisatie van de frequentieverschuiving met heatmaps

Om sneller een inzicht te krijgen in de mate van verandering van kwetsbare gebieden in de stad, zonder dat alle verschillende knopen met hun specifieke kleur geraadpleegd moeten worden, is de methodologie zoals beschreven in deel 5.1.2 gebruikt om figuren 5.5 en 5.6 om te zetten naar een heatmap. De resultaten van deze heatmaps

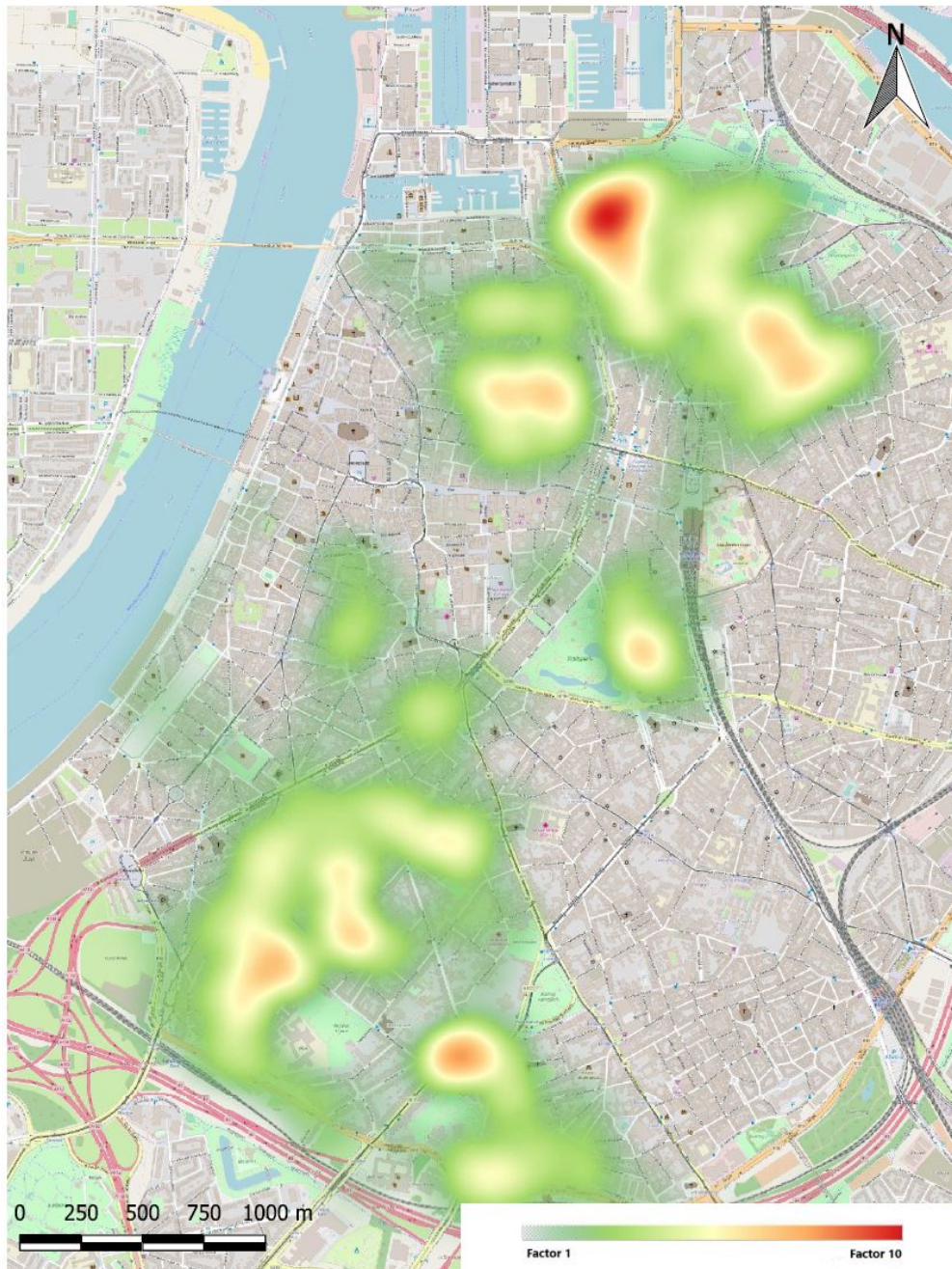
voor de frequentieverschuiving tussen het huidige klimaat en het Midden scenario tussen het huidige klimaat en het Hoog Zomer scenario zijn respectievelijk te zien op onderstaande figuren 5.7 en 5.8.

De kleurencode van de heatmaps varieert tussen groen en rood. De groene kleur geeft aan dat de terugkeerperiode van de overstroming in de knoop niet veel verandert tegenover het huidige klimaat (factor 1 of factor 2) terwijl rood een zeer grote verandering in de terugkeerperiode betekent (tot factor 10 of hoger). De tussenliggende kleuren (geel en oranje) geven tussenliggende factoren aan. Met andere woorden, hoe roder de heatmap wordt, hoe groter de factor van de frequentieverschuiving en hoe groter de verandering is in kwetsbaarheid tegenover het huidige klimaat.

In het geval van het **Midden scenario** is in deel 5.1.3.2 uitgelegd dat de meest ernstige frequentieverschuiving een factor 4 of factor 5 is. De gebieden op figuur 5.5 waar deze factoren optreden zouden bijgevolg de meest rode gebieden moeten zijn op de heatmap 5.7. Zoals besproken in deel 5.1.3.2 kent zone A voornamelijk een frequentieverschuiving van factor 5 en daarnaast een heel deel knopen die geen verandering kennen in terugkeerperiode aangezien in het huidige klimaat deze knopen reeds overstromen voor een terugkeerperiode van 2 jaar. Dit deel van de stad kleurt daarom in de heatmap voornamelijk geel en groen. Zone B kent voornamelijk een frequentieverschuiving gelijk aan factor 2,5 tot 4. Het deeltje van het gebied rechts onder het Eilandje waar de knopen tot 4 keer sneller zullen overstromen kleurt rood. Dit toont aan dat het huidige kwetsbare gebied in zone B onder het Midden scenario zal uitbreiden. De overige delen van dit gebied zijn nu ook reeds kwetsbaar maar zullen in de toekomst sneller overstromen waardoor dit voornamelijk geel kleurt. De exacte factoren kunnen op deze figuur niet meer afgelezen worden, al wordt op basis van deze heatmaps eveneens duidelijk dat onder het Midden scenario voornamelijk de gebieden die vandaag ook al kwetsbaar zijn, nog kwetsbaarder zullen worden ten gevolge van de klimaatverandering.

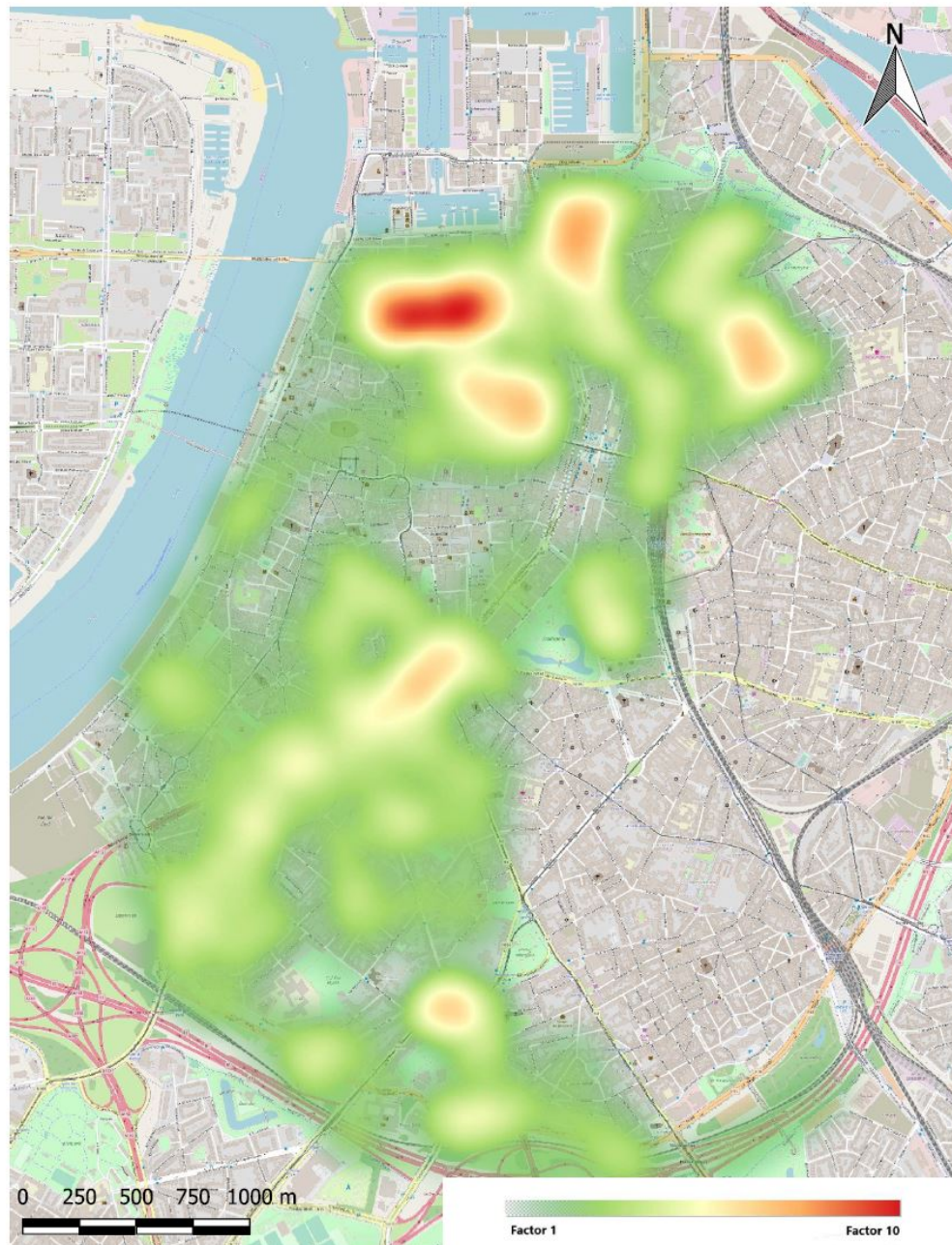
In het **Hoog Zomer scenario** kent het gebied aan de rand van zone A een verandering in terugkeerperiode met factor 10. Deze verandering is zichtbaar op de heatmap door de gele rand. Het groene deel op de heatmap in zone A geeft aan dat de terugkeerperiode waarvoor overstroming optreedt in dit gedeelte niet veel verandert tegenover het huidige klimaat. Dit is logisch aangezien eerder al opgemerkt is dat de kern van dit gebied reeds bij een terugkeerperiode van 2 tot 10 jaar kwetsbaar is in het huidige klimaat. Zone B kent onder het Hoog Zomer scenario een verandering van factor 4 en aan de randen een verandering tot factor 10. Dit is te zien aan de gele vlek op het gebied. Het gebied links van zone B kleurt rood op figuur 5.8. De reden hiervoor is dat daar in het huidige klimaat vele knopen terug te vinden zijn die geen overstroming kennen of pas overstromen voor een terugkeerperiode groter dan 100 jaar. In het Hoog Zomer scenario treedt er echter een overstroming op vanaf een terugkeerperiode van 25 of zelfs 10 jaar. Dat wil zeggen dat in deze regio de frequentieverschuiving een factor kent die groter is dan 10. Om deze reden is een groot gewicht (50) toegekend aan deze knopen wat verklaart waarom de heatmap op

Frequentieverschuiving tussen Huidige Klimaat en Midden scenario in 2100: Heatmap



Figuur 5.7: Heatmap van de frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata

Frequentieverschuiving tussen Huidige Klimaat en Hoog Zomer scenario in 2100: Heatmap



Figuur 5.8: Heatmap van de frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata

die plaats een grote dichtheid kent.

Het overige deel langs de Schelde kleurt groen aangezien de meeste knopen daar onder het Hoog Zomer scenario zullen overstromen vanaf een terugkeerperiode van 100 of 25 jaar.

De exacte factoren kunnen ook hier weer niet afgelezen worden van de heatmap, toch kunnen een aantal conclusies getrokken worden uit de heatmaps zoals hier beschreven. Deze heatmap laat toe om op snelle manier een inzicht te krijgen in de verandering van frequenties en kwetsbare gebieden.

5.1.4 Koppeling van de frequentieverschuivingen aan de ontwerpregels van rioleringen en besluit

Volgens de Code van Goede Praktijk [48] wordt voordimensionering van rioleringen uitgevoerd met neerslaggebeurtenissen met een terugkeerperiode van 2 jaar. Voor deze buien mogen er geen leidingen onder druk komen te staan en mag er bijgevolg geen water op straat terecht komen. Daarnaast worden nazichtsberekeningen uitgevoerd met neerslaggebeurtenissen met een terugkeerperiode van 20 jaar waarbij geldt dat geen water op straat terecht mag komen. In vroegere richtlijnen (voor 2012) werd gebruik gemaakt van 5 jaar als terugkeerperiode. De 20 jaar is ingevoerd om al enige buffer te hebben tegen mogelijke toename van neerslagintensiteiten onder de veranderende klimaatcondities. Een factor 4 in frequentieverschuiving wordt dus doorgevoerd.

Wanneer dit teruggekoppeld wordt aan de resultaten die hier naar voor komen in de frequentieverschuiving blijkt dat deze maatregel zeker geen overbodige luxe is. Onder het Midden scenario verandert de terugkeerperiode voornamelijk volgens deze factor 4 wat maakt dat in dat geval het aantal overstromingen die bijkomend zijn nog net binnen de aanvaardbare marge liggen van het ontwerp. Toch zijn er in het huidige scenario al een aantal punten die overstromen. Elke overstroming die daar nog bij komt is nadelig en moet vermeden worden of alleszins beperkt worden.

In het Hoog Zomer scenario verandert de terugkeerperiode van de overstromingen in de knopen voornamelijk met factor 10. In dat geval voldoet het huidige ontwerp van de rioleringen niet meer.

Op basis van al deze resultaten kan besloten worden dat de kwetsbaarheid van de stad onder beide klimaatscenario's zal toenemen, de vraag is alleen nog naar welk scenario het huidige klimaat zal evolueren. Daarnaast moet in gedachte gehouden worden dat de klimaatscenario's ook nog kunnen variëren doorheen de tijd. Wat wel al zeker gesteld kan worden op basis van deze kaarten is dat extra maatregelen nodig zijn om de stad, en zeker de kwetsbare delen ervan, te beschermen tegen overstromingen om de leefbaarheid en het comfort van de inwoners te garanderen.

5.2 2D-Overstromingskaarten

De simulaties in InfoWorks ICM met de flood cones geven per knooppunt in het netwerk het overstromingsvolume maar spreiden het overstromingswater niet uit over de straat. Naast de visualisatie van de frequentieverschuivingen gebaseerd op deze resultaten van de flood cones, kan het eveneens nuttig zijn om ook een idee te hebben van de hoeveelheid water dat effectief op de straat komt te staan. In dit tweede deel van het hoofdstuk zal daarom ingegaan worden op twee methodes die toelaten om 2D-overstromingskaarten te maken zodat inzicht verkregen wordt in de uitgestrektheid en waterdieptes van de overstromingen.

De eerste methode is de 1D naar 2D-visualisatiemethode die het water uit de flood cones zal uitspreiden op straat. Het voordeel van deze methode is dat een inzicht gekregen wordt in de mate van overstromingen in de stad onder de verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes zonder dat hiervoor een 2D-simulatie nodig is in InfoWorks ICM. Bijgevolg wordt in dit deel van het hoofdstuk uitgelegd hoe, uitgaande van de 1D-resultaten van de flood cones, toch een 2D-overstromingskaart verkregen wordt. Vooral voor real time forecasting en optimalisatieberekeningen kan het nuttig zijn om niet steeds een simulatie te moeten uitvoeren in InfoWorks ICM op basis van een 2D mesh aangezien deze veel tijdrovender is dan een simulatie op basis van flood cones. De simulaties met de 2D mesh kunnen wel gebruikt worden om de definitieve resultaten te visualiseren.

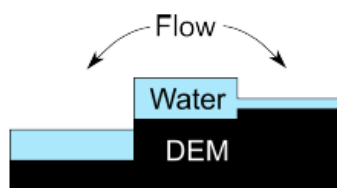
In het tweede deel van het hoofdstuk zal ingegaan worden op deze simulatie met de 2D mesh aangezien deze wel nauwkeurigere resultaten oplevert. De simulaties met de 2D mesh laten toe onmiddellijk water op straat te simuleren waardoor de simulatieresultaten eenvoudig geëxporteerd kunnen worden naar een GIS-programma om te verwerken naar een overstromingskaart zonder dat een tussenstap nodig is zoals bij de 1D naar 2D-visualisatiemethode.

Dit hoofdstuk bespreekt als eerste de methodologieën van beide visualisatiemethodes waarna vervolgens zal ingegaan worden op de resultaten. Tot slot wordt het verschil tussen beide methodes gekwantificeerd.

5.2.1 1D naar 2D-visualisatiemethode: Uitspreidingsalgoritme

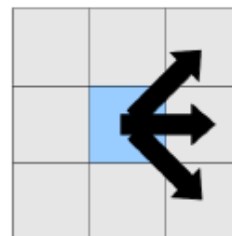
5.2.1.1 Achterliggende theorie van het uitspreidingsalgoritme

De methode die gehanteerd is om het water in de flood cones uit te spreiden over de straten is gebaseerd op een algoritme gemaakt aan de Canadese universiteit van Saskatchewan, het WDPM-algoritme (Wetland DEM Ponding Model). De opbouw van dit algoritme zelf is gebaseerd op de theorie zoals beschreven in [49] van Shapiro en Westervelt. Het algoritme gaat uit van het digitaal hoogtemodel en laat het water afstromen van hoger gelegen gebieden in het DHM tot in de laagst gelegen gebieden. Het algoritme gaat iteratief te werk en zal per gridcel van het DHM nagaan of een van de acht naburige gridcellen lager ligt [50]. Indien dit het geval is, zal het algoritme het water laten afstromen naar de lager gelegen cellen. Het principe van deze iteratieve procedure is te zien in onderstaande figuur 5.9 overgenomen uit [50].



(a) Schematische weergave van het uitspreidingsalgoritme

Shapiro and Westervelt algorithm



(b) Principe van uitspreiding van het water

Figuur 5.9: Principe van het uitspreidingsalgoritme (1D naar 2D-visualisatie)

```

if water surface elevation of selected cell > that of the neighbour cell
  if selected cell DEM elevation > neighbour cell DEM then
    move one eighth of the water in the selected cell to the neighbour cell
  else
    move one eighth of the difference in water elevation to the neighbour cell
  end if
end if
end if

```

Figuur 5.10: Pseudocode van het algoritme van Shapiro en Westervelt

Het principe van de uitspreiding van het water kan met behulp van de pseudocode in figuur 5.10 (overgenomen uit [50]) verder verduidelijkt worden. Het algoritme gaat na of een naburige cel hoger of lager ligt dan de beschouwde cel binnen een iteratiestap. Indien een naburige cel lager ligt, wordt 1/8e van het verschil in waterhoogte overgebracht naar de naburige cel. Het algoritme gaat uit van een overdracht van 1/8e aangezien een cel telkens 8 naburige cellen heeft, zoals ook te zien in figuur 5.9 (b) [50].

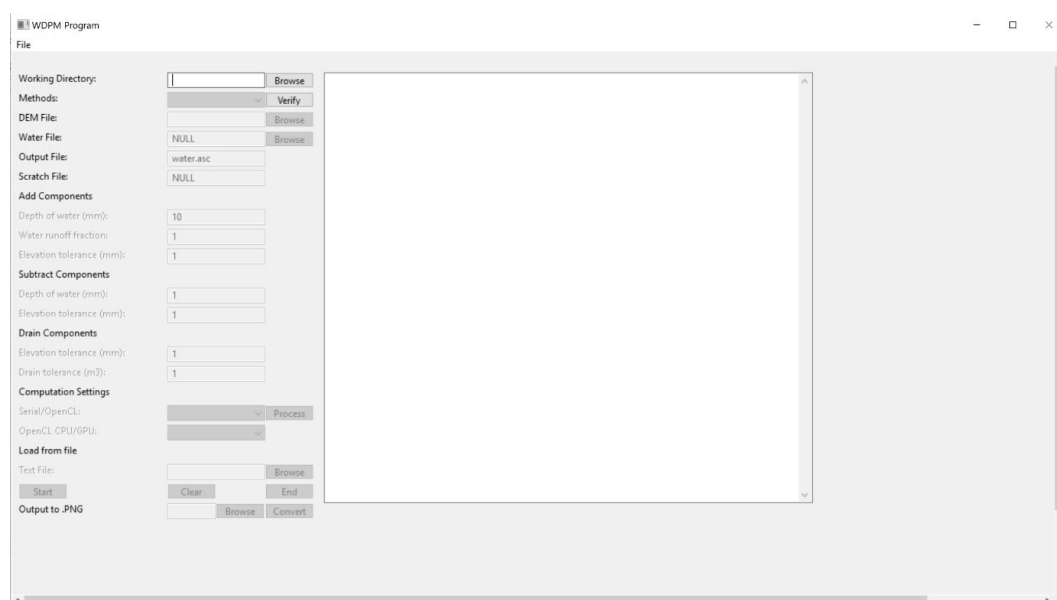
Het algoritme heeft erg veel iteraties nodig om over alle cellen van het DHM te lopen en de uitspreiding van het water uit te voeren [50]. Meer dan 200 000 iteraties zijn nodig om voor het studiegebied van deze masterproef de gewenste resultaten te bereiken. Uiteraard geldt dat hoe groter het DHM is, hoe langer de rekentijd zal zijn. Het algoritme stopt wanneer de verandering in waterhoogte bij de iteraties kleiner is dan het gewenste tolerantieniveau [50].

5.2.1.2 Algoritme en interface

Het volledige algoritme is geprogrammeerd in de taal C++. De interface van algoritme is opgebouwd in de programmeertaal Python. Om het programma te runnen kan er gekozen worden voor de optie 'serial CPU' of 'OpenCL'. Het onderscheid is dat in het eerste geval gebruik gemaakt wordt van 1 processor die alle taken

sequentieel uitvoert. In het geval van de OpenCL-optie kan er gekozen worden om het programma ofwel te runnen met behulp van de grafische kaart (GPU) ofwel met behulp van de processor (CPU) en worden de berekeningen parallel uitgevoerd. Het gebruik van de optie OpenCL - GPU levert de kortste rekentijd op.

Het algoritme zelf, dat het water uit de flood cones uitspreidt op de straat, was volledig opgebouwd. De interface van het algoritme, waar de input voor het algoritme ingegeven wordt, was eveneens opgebouwd maar kende nog een aantal errors. Door stap voor stap door deze errors te gaan die Python gaf en deze geleidelijk aan te passen en de nodige Python packages in te laden, werd uiteindelijk een werkend algoritme verkregen. De interface van het programma is te zien in onderstaande figuur 5.11.



Figuur 5.11: Interface van het uitspreidingsalgoritme

Het algoritme vraagt als input enerzijds een DHM-file met de gebouwen binnen het studiegebied en anderzijds een water-file met de volumes water in de flood cones. De opbouw van deze inputfiles is gebaseerd op [51].

De eerste stap voor de opmaak van de inputfile met het DHM bestaat uit het zoeken van het digitaal hoogtemodel. In het geval van deze masterproef kan dit DHM opgevraagd worden op de website van het Agentschap Geografische Informatie Vlaanderen. Eveneens wordt op dezelfde website voor het studiegebied de 3D GRB-file opgevraagd. Dit “Grootschalig Referentiebestand” omvat alle locaties van gebouwen binnen het studiegebied. Vervolgens worden het DHM en het GRB geclipd op het studiegebied door gebruik te maken van het programma QGIS. Hierbij wordt als eerste bepaald wat de extentie is van het DHM om het studiegebied te omvatten. Daarna wordt gebruik gemaakt van het commando ‘clip vector by extent’ om de

GRB-file exact dezelfde extenties te geven zodat de locaties van de gebouwen op de exacte positie terecht komen in het DHM. Zowel het DHM als het GRB zijn rasters met een resolutie van 1 m.

De volgende stap in het maken van de eerste inputfile is dan om het DHM en de GRB-file te combineren. De bedoeling is om de locaties waar gebouwen staan in het DHM te verhogen met 10 m zodanig dat het algoritme weet dat op die locaties geen water kan stromen. De methode die hiervoor gehanteerd wordt is het uitvoeren van een rasterberekening. Wanneer een bepaalde locatie in het GRB een hoogte kent die groter is dan 0, wordt in het DHM dezelfde locatie verhoogd met 10 m. Indien in het GRB op een bepaalde locatie geen gebouw staat, wordt de hoogte in het DHM behouden. De input van deze rasterberekening in QGIS kan als volgt beschreven worden:

$$((GRB > 0) * (10 + DHM)) + ((GRB = 0) * (DHM))$$

Door dit te doen voor het hele raster van het DHM wordt een gemanipuleerd DHM verkregen dat rekening houdt met de locaties van gebouwen in de stad. Tot slot wordt het finale raster met de gemanipuleerde DHM omgezet naar een asc-file dat dient als input voor het WDPM-algoritme.

De tweede inputfile die vereist is voor het algoritme, is een file waarbij de initiële waterhoogtes in het gebied worden aangegeven. De eerste stap voor de opmaak van deze inputfile is het maken van een txt-bestand waarin voor elke knoop van het rioleringsnetwerk in InfoWorks ICM de x- en y-coördinaten, het volume water in de flood cone en het ID van de knoop vervat zit. De volumes water in de flood cones kunnen eenvoudig opgevraagd worden in InfoWorks ICM door middel van shapefiles. Deze puntdata wordt vervolgens ingeladen in QGIS en wordt omgezet naar een raster. Het volume water uit de flood cones wordt bijgevolg uitgespreid over de gridcel waarin de flood cone valt. Aangezien in deze masterproef gewerkt wordt met een gridcel van 1 m op 1 m is het heel eenvoudig om uitgaande van het watervolume dit om te zetten naar een initiële waterhoogte.

Na het opmaken van het raster met de initiële waterhoogtes, moeten deze eveneens gekoppeld worden aan het DHM. Analooq als in het geval van het gemanipuleerde DHM met de gebouwen, wordt ook hier een rasterberekening uitgevoerd. Indien een bepaalde gridcel een waterhoogte kent groter dan 0 (een gridcel met een gevulde floodcone), dan wordt het DHM verhoogd met deze waterhoogte. Indien een bepaalde gridcel geen waterhoogte kent dan blijft het DHM onveranderd. In QGIS ziet deze rasterberekening er als volgt uit:

$$((Waterhoogte > 0) * (Waterhoogte + DHM)) + ((Waterhoogte \leq 0) * (DHM))$$

Door deze berekening uit te voeren voor alle gridcellen van het DHM wordt opnieuw een gemanipuleerd DHM verkregen dat de initiële waterhoogtes bevat die volgen uit de flood cones. Dit raster moet omgezet worden naar een asc-file om als geldige input te kunnen dienen voor het algoritme.

Het algoritme heeft een aantal verschillende modules die gekozen kunnen worden en toegepast worden op de twee input-files. Een onderscheid wordt gemaakt tussen:

- **Add**
In deze module wordt water toegevoegd aan het gebied om de afstroming van een teveel aan water als gevolg van hevige regenval te simuleren. Aan elke gridcel wordt een bepaalde waterhoogte toegekend. Indien een inputfile met initiële waterhoogtes ingeladen wordt, worden deze waterhoogtes opgeteld bij de waterhoogte gedefinieerd in de Add module. Het algoritme wordt dan toegepast op deze hoeveelheid water zodanig dat als resultaat een uitspreiding van het water over de straten gevonden wordt [50].
- **Subtract**
In deze module wordt er een bepaalde waterhoogte afgetrokken van elke DHM gridcel om verdamping te kunnen simuleren [50].
- **Drain**
Deze module voert water af naar het laagste punt van het DHM om te vermijden dat het water blijft hangen in het DHM in plaats van helemaal af te stromen. Deze module is enkel nodig indien een waterloop beschouwd wordt in het studiegebied [50].

De module die van toepassing is in deze masterproef is de Add module. De waterhoogte die toegevoegd wordt aan elke gridcel wordt in dit geval gelijk gesteld aan nul aangezien de input files met de initiële waterhoogtes reeds de hoeveelheid water bevatten die af moet stromen in het gebied.

De laatste variabele die aangepast kan worden in de interface van het algoritme is het tolerantieniveau. Dit tolerantieniveau bepaalt wanneer het algoritme stopt. Vanaf dat de verandering in waterhoogte bij de iteraties kleiner is dan het tolerantieniveau, wordt het algoritme stopgezet [50]. De default-waarde van dit tolerantieniveau is gelijk aan 1 mm. In het geval van deze masterproef wordt het tolerantieniveau gelijk gesteld aan 1 cm. Dit niveau kent een voldoende nauwkeurigheid en kent een relatief snelle rekentijd in vergelijking met een tolerantieniveau van 1 mm.

De output van het algoritme is een water.asc file. Deze file omvat per gridcel een bepaalde waterhoogte groter of gelijk aan 0. Door deze gridcel in te laden in QGIS, wordt een overstromingskaart verkregen die het water op straat toont afkomstig van het water uit de flood cones.

5.2.1.3 Optimalisatie van de rekentijden

Het itereren over alle gridcellen van het DHM en het uitspreiden van het water uit de flood cones op de straat is een intensieve opdracht en vraagt bijgevolg een grote rekentijd. Een computer die geen grafische kaart ter beschikking heeft, runt meer dan 14u aan slechts een deelgebied van de totale studie-omgeving. Een optimalisatie

van de rekentijden is bijgevolg nodig. Een aantal mogelijkheden kunnen toegepast worden om de rekentijden te minimaliseren.

Aanpassen van de gridcelgrootte

Zoals aangegeven in deel 5.2.1.2 wordt er in deze masterproef gebruik gemaakt van een DHM met een gridcelgrootte van 1 m op 1 m. Een mogelijke manier om de rekentijd van het algoritme te beperken is door deze gridcelgrootte groter te maken zodat het DHM verkleint. Bijvoorbeeld een verdubbeling van de gridcelgrootte zal ervoor zorgen dat het totale DHM van het studiegebied vier keer kleiner wordt.

De rekentijden reduceren hierdoor opmerkelijk, voor hetzelfde voorbeeld van een verdubbeling van de gridcelgrootte, neemt de rekentijd af tot een factor 6.

In deze masterproef is er echter voor gekozen om toch de 1 m gridcel te behouden. Met behulp van een rekencomputer kan op relatief korte tijd een gedetailleerd resultaat verkregen worden. Voor toepassingen waar een iets ruwer resultaat volstaat kan zeker overwogen worden om de gridcelgrootte aan te passen om op snelle wijze inzicht te krijgen in de mogelijke overstromingen.

Indien een grotere gridcel gewenst is, kunnen eenvoudig de inputfiles van het algoritme geresampeld worden met behulp van QGIS of ArcGIS.

Code-efficiëntie

Een andere methode die de rekentijd kan reduceren is het meer efficiënt maken van de code achter het algoritme. Echter is deze code geschreven in C++ wat maakt dat deze code reeds op de meest optimale manier is gevormd en bijgevolg niet verder geoptimaliseerd kan worden.

Aanpassen van de tolerantiegrens

De default-waarde van het algoritme vanaf wanneer iteraties mogen stoppen is gelijk aan 1 mm. Deze grens is erg klein en vraagt bijgevolg zeer veel iteraties alvorens het algoritme deze grens heeft bereikt. Afhankelijk van de toepassing kan deze grens verhoogd worden waardoor het algoritme sneller kan stoppen met itereren en bijgevolg ook de rekentijd verkort.

Voor deze masterproef volstaat een tolerantiegrens van 1 cm. Er wordt uitgegaan dat schade pas optreedt vanaf een waterdiepte van 10 cm [16]. Itereren tot op 1 cm nauwkeurig is dus voor deze toepassing zeker voldoende.

Gebruik van rekencomputer met grafische kaart

De laatste oplossing die kan leiden tot een gereduceerde rekentijd, is het gebruik van een rekencomputer met grafische kaart. De iteratieve berekeningen zijn berekeningen die het snelst uitgevoerd kunnen worden door gebruik te maken van een grafische kaart in plaats van te rekenen op de processor van de computer. Het gebruik van dergelijke rekencomputer geeft een aanzienlijk voordeel in rekentijd. Voor het volledige studiegebied van deze masterproef, een gridcel van 1 m op 1 m en een

tolerantiegrens van 1 cm, vraagt de rekencomputer ongeveer 2,5 u. Binnen deze tijd voert de rekencomputer meer dan 200 000 iteraties uit om tot het gewenste resultaat te komen.

Om te kunnen rekenen op de grafische kaart dient in de interface van het algoritme gekozen te worden voor de optie “OpenCL-GPU”.

Een overzicht van de reketijden die behaald zijn door gebruik te maken van de rekencomputer en de genoemde gridcelgrootte en tolerantiegrens voor alle klimaat-scenario’s en terugkeerperiodes zijn terug te vinden in de onderstaande tabel 5.5. Alle resultaten zijn gebaseerd op de composietbuien van Ussel (voor huidige klimaat en de geperturbeerde composietbuien voor het toekomstige klimaat).

Tabel 5.5: Overzicht van de behaalde reketijden voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode door gebruik te maken van een rekencomputer, een gridcelgrootte van 1 m op 1 m en een tolerantiegrens van 1 cm

Klimaatscenario en terug- keerperiode	Reketijd	Aantal iteraties
Huidig klimaat - T2	7851,93 s	215 000
Huidig klimaat - T10	8904,09 s	235 000
Huidig klimaat - T25	8066,06 s	213 000
Huidig klimaat - T100	7543,34 s	199 000
Midden scenario - T2	8024,13 s	215 000
Midden scenario - T10	7457,15 s	204 000
Midden scenario - T25	7335,75 s	199 000
Midden scenario - T100	7383,71 s	198 000
Hoog Zomer scenario - T2	7863,60 s	215 000
Hoog Zomer scenario - T10	7318,48 s	197 000
Hoog Zomer scenario - T25	8293,77 s	221 000
Hoog zomer scenario - T100	10 365,84 s	266 000

Een opmerkelijke uitschieter is de berekening van de overstromingskaart voor het Hoog Zomer scenario voor een terugkeerperiode van 100 jaar. In dat geval is een groot deel van het studiegebied overstroomd en zijn er bijgevolg meer flood cones gevuld en kennen ze een grotere gevuld volume. Hierdoor heeft het algoritme meer tijd nodig om de grotere volumes water uit te spreiden en te laten afstromen in de straten.

5.2.2 2D-visualisatie op basis van een 2D mesh

Om rechtstreeks het water op straat te kunnen simuleren in plaats van uit te gaan van de flood cones en vervolgens via een tussenstap dit water op straat uit te spreiden, wordt nog een derde visualisatiemethode besproken. Deze methode gaat uit van simulaties in InfoWorks ICM met een 2D mesh. Uitgaande van deze simulaties, kunnen

de resultaten opgevraagd worden onder de vorm van shapefiles. Een voorbeeld van dergelijke shapefile is te zien in onderstaande figuur 5.12. In deze figuur zijn duidelijk de openingen ('voids') te zien om rekening te houden met de gebouwen waar geen water kan stromen (zie deel 3.5.2). Het 2D-model, opgemaakt door ir. A. A. Gonzalez Iniguez, omvat de hele stad Antwerpen binnen de ring. Deze masterproef omvat enkel het linkerdeel van de stad. Om enkel het deel van de shapefile te hebben dat van toepassing is op deze masterproef, kan eenvoudig het 'clip' commando toegepast worden in QGIS.



Figuur 5.12: Voorbeeld van resultaat van de 2D-simulaties in InfoWorks ICM onder de vorm van shapefiles

Van zodra de shapefiles geclipt zijn, kunnen ze omgezet worden naar rasters om de waterdieptes te kunnen voorstellen op een overstromingskaart. De shapefiles omvatten zeer veel informatie zoals de waterdiepte, stroomsnelheid, grootte van de verschillende deelgebiedjes in de mesh, etc. Door de shapefiles te rasteriseren naar de waterdiepte, wordt bijvoorbeeld onderstaande raster verkregen zoals te zien in figuur 5.13.

De laatste stap is dan om de opmaak van het raster te bewerken in QGIS tot duidelijke overstromingskaarten verkregen worden. De resultaten van de 2D-simulaties in InfoWorks ICM zijn dus zeer eenvoudig te gebruiken. Na enkele eenvoudige bewerkingen in een GIS-programma worden de gewenste overstromingskaarten verkregen uitgaande van de simulatieresultaten. Ook de rekentijd van een simulatie met een 2D



Figuur 5.13: Voorbeeld van raster met de resultaten van de 2D-simulaties in InfoWorks ICM

mesh is beperkt: Ongeveer 20 tot 30 min zijn nodig om een simulatie uit te voeren met behulp van een rekencomputer.

5.2.3 Resultaten

In het eerste deel van deel 5.2 werd overlopen hoe de 1D naar 2D-visualisatiemethode werkt en wat de nodige inputgegevens zijn voor het algoritme om een overstromingskaart te verkrijgen. Vervolgens is ingegaan op de 2D-visualisatiemethode op basis van een 2D mesh in InfoWorks ICM. De resultaten van de visualisatiemethodes worden in dit deel van het hoofdstuk overlopen.

Voor beide methodes is per klimaatscenario een overzichtskaart gemaakt die inzicht geeft in de mate van uitspreiding van de overstromingen voor de verschillende terugkeerperiodes. Deze overstromingskaarten omvatten alle terugkeerperiodes (T2j, T10j, T25j en T100j) als lagen op elkaar. Om deze kaarten op te stellen is uitgegaan van een threshold-waarde van 0,1 m. Dit wil zeggen dat alle waterdieptes groter of gelijk aan 10 cm bij een bepaalde terugkeerperiode aangeduid worden. Door daarna de vier verschillende terugkeerperiodes als vier lagen op elkaar weer te geven, kan inzicht verkregen worden in het verschil in uitspreiding van de overstromingen. Het is belangrijk op te merken dat waterdieptes niet afgelezen kunnen worden op deze kaart, enkel de uitspreiding van de overstroming.

De overzichtskaarten van alle klimaatscenario's voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode en voor de 2D-visualisatiemethode op basis van de 2D mesh zijn terug te vinden in onderstaande figuren.

Figuren 5.14 en 5.17 tonen wat vandaag al kwetsbare gebieden zijn in de stad. De gebieden die een lichtblauwe kleur hebben, overstroomden vanaf een terugkeerperiode van 2 jaar. Uiteraard overstroomden deze gebieden ook indien er zich een neerslaggebeurtenis voordoet die een hogere terugkeerperiode kent. Hoe donkerder het blauw op de kaart, hoe minder frequent overstroming optreedt en dus hoe hoger de terugkeerperiode alvorens water op straat terug te vinden is.

Indien het klimaat evolueert naar een Midden scenario dan is de toestand te verwachten zoals te zien in figuren 5.15 en 5.18. Wanneer het Hoog Zomer scenario beschouwd wordt, zijn figuren 5.16 en 5.19 van toepassing.

Voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode en de 2D-visualisatiemethode op basis van de 2D mesh wordt respectievelijk in de bijlages E en F per klimaatscenario en per terugkeerperiode een meer gedetailleerde overstromingskaart getoond waarbij de waterdieptes van de overstromingen wel geraadpleegd kunnen worden.

De kaarten van beide visualisatiemethodes hebben goede overeenkomsten qua visualisatie van de overstromingen in de stad onder de verschillende terugkeerperiodes en klimaatscenario's en laten eigenlijk min of meer dezelfde resultaten zien. Aangezien de resultaten op basis van de 2D mesh toch iets nauwkeuriger zijn en om herhaling te vermijden, worden de resultaten meer gedetailleerd besproken aan de hand van de kaarten opgemaakt op basis van de 2D-visualisatiemethode met de 2D mesh. Nadien zal dan een vergelijking gemaakt worden tussen de methodes om de overeenkomsten en afwijkingen aan te geven. Hieruit zal blijken dat de 1D naar 2D-methode een goede eerste inschatting geeft van de overstromingsgebieden.

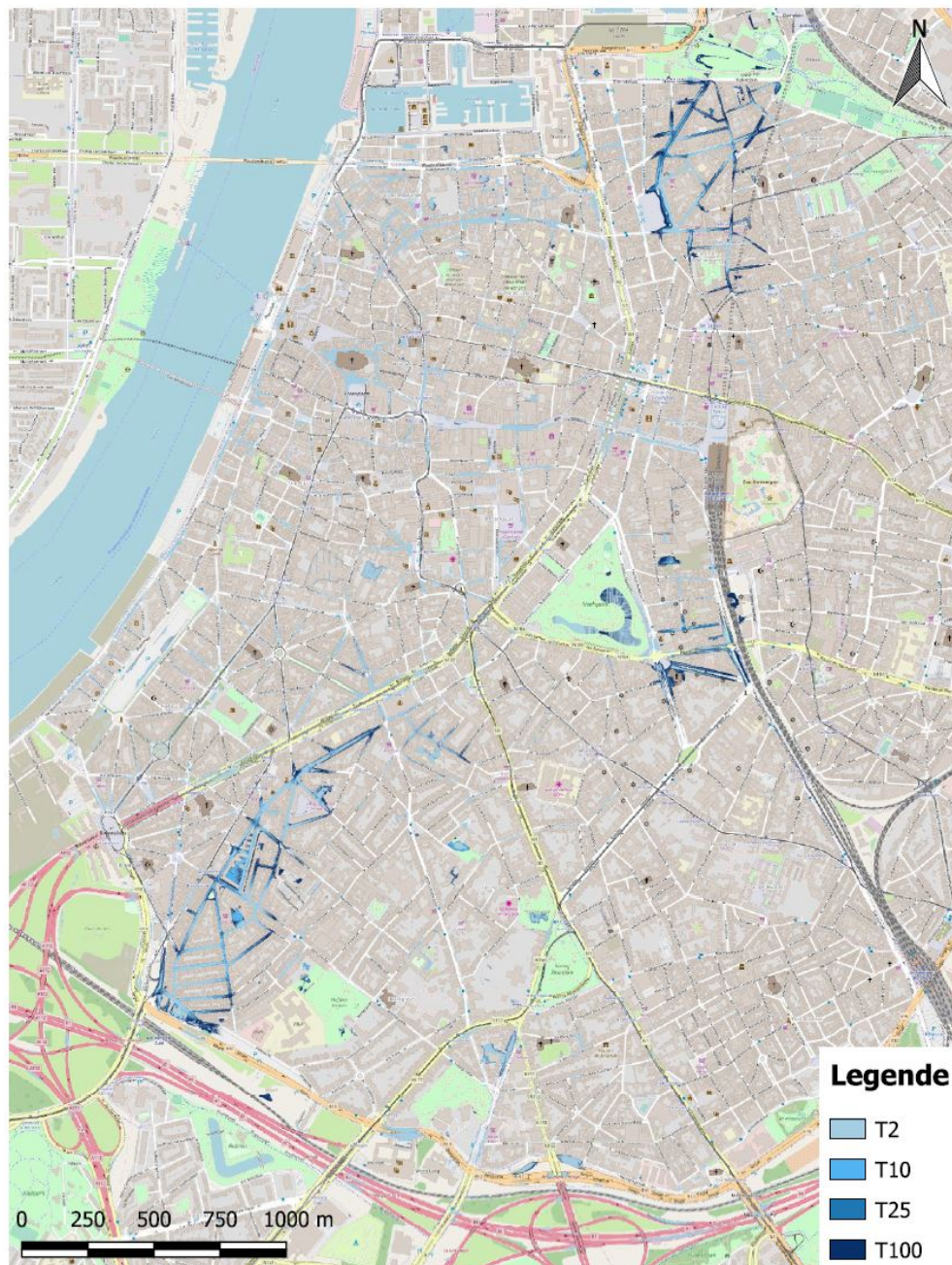
Voor de bespreking van de resultaten zal opnieuw uitgegaan worden van de zones zoals aangeduid in figuur 5.1.

1D naar 2D-overstromingskaart: Huidig klimaat



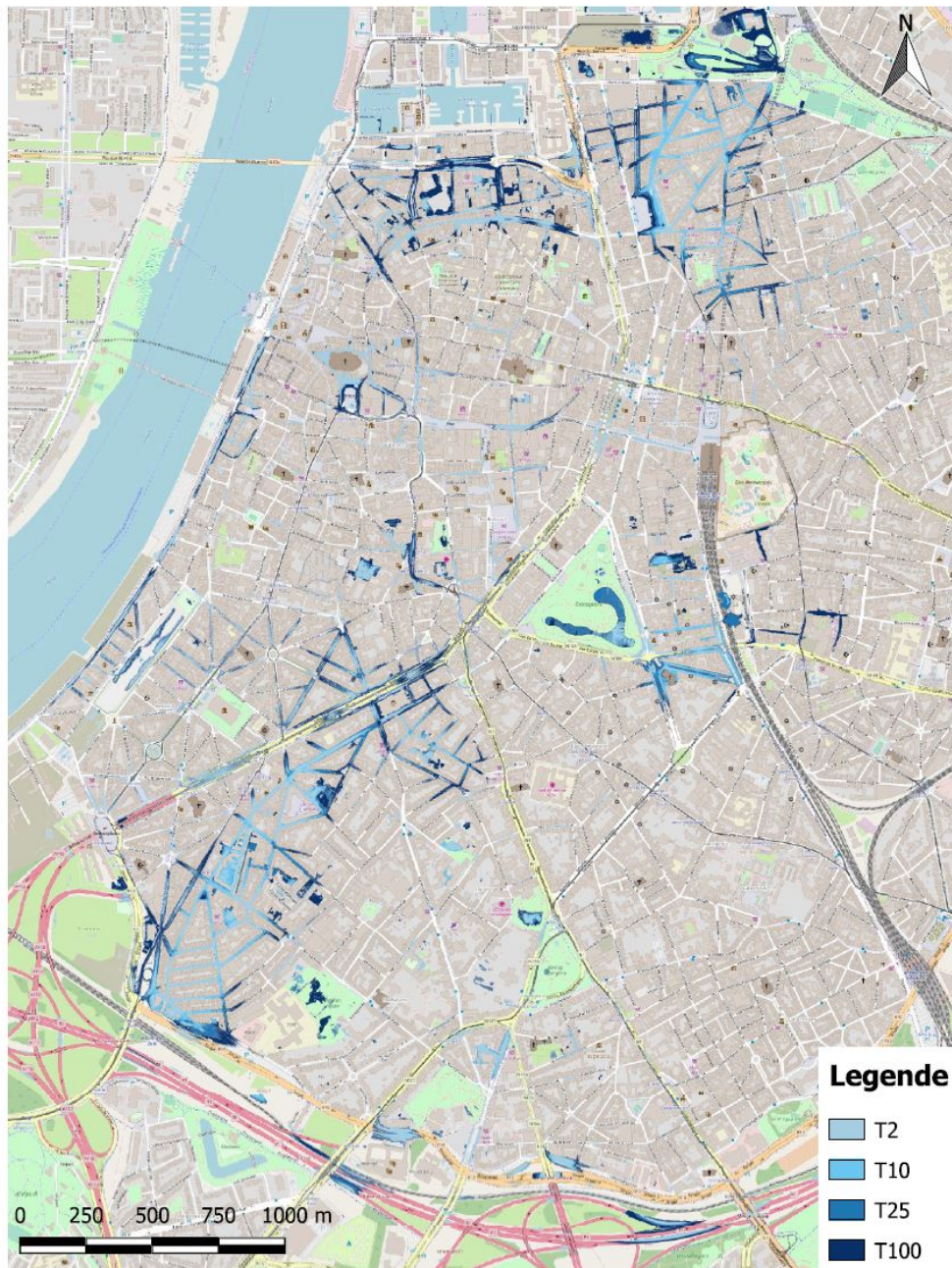
Figuur 5.14: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het huidige klimaat op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode

1D naar 2D-overstromingskaart: Midden scenario in 2100



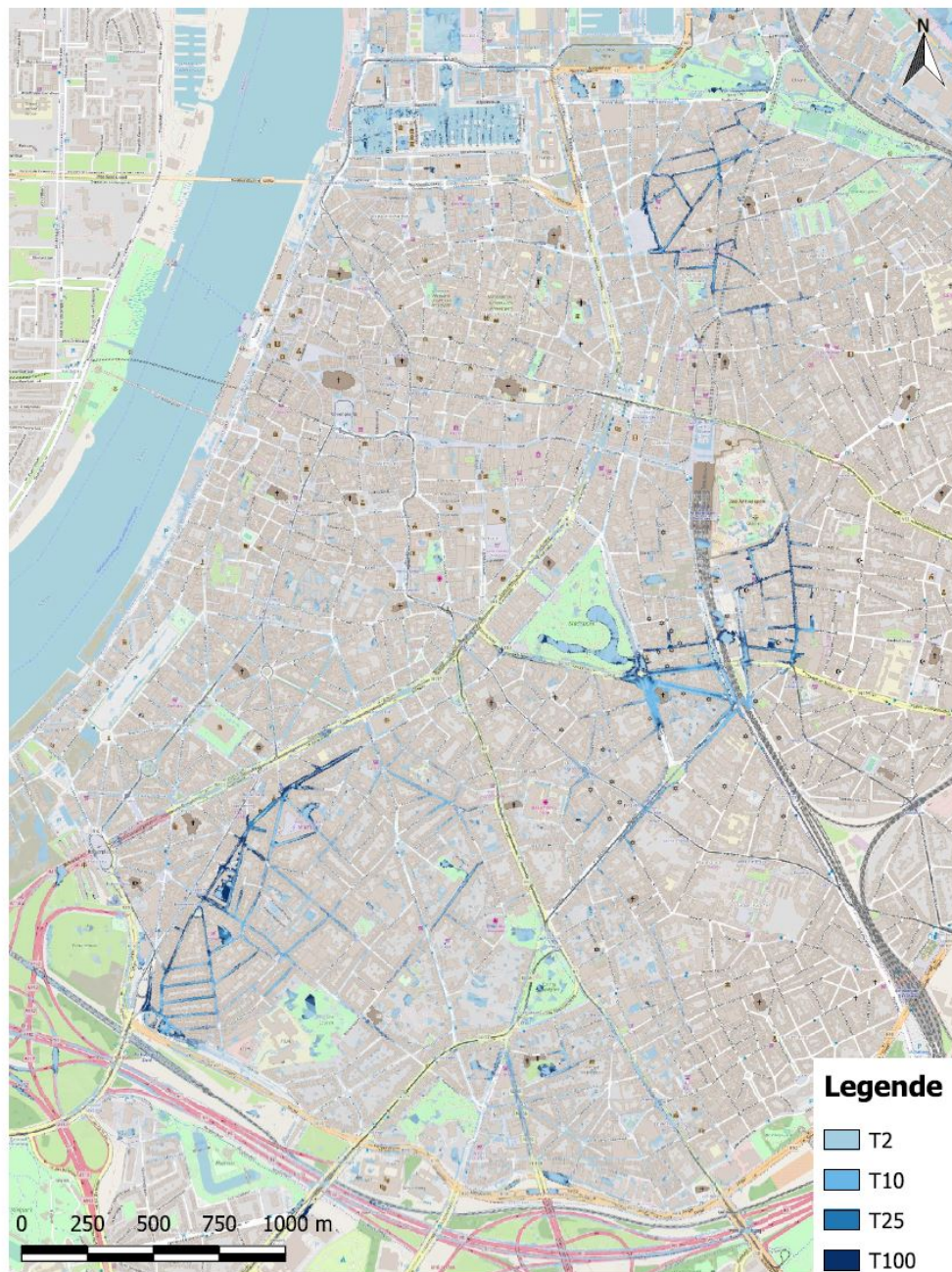
Figuur 5.15: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Midden klimaatsscenario in 2100 op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode

1D naar 2D-overstromingskaart: Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur 5.16: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Hoog Zomer klimaat scenario in 2100 op basis van de 1D naar 2D-visualisatiemethode

2D-overstromingskaart: Huidig klimaat



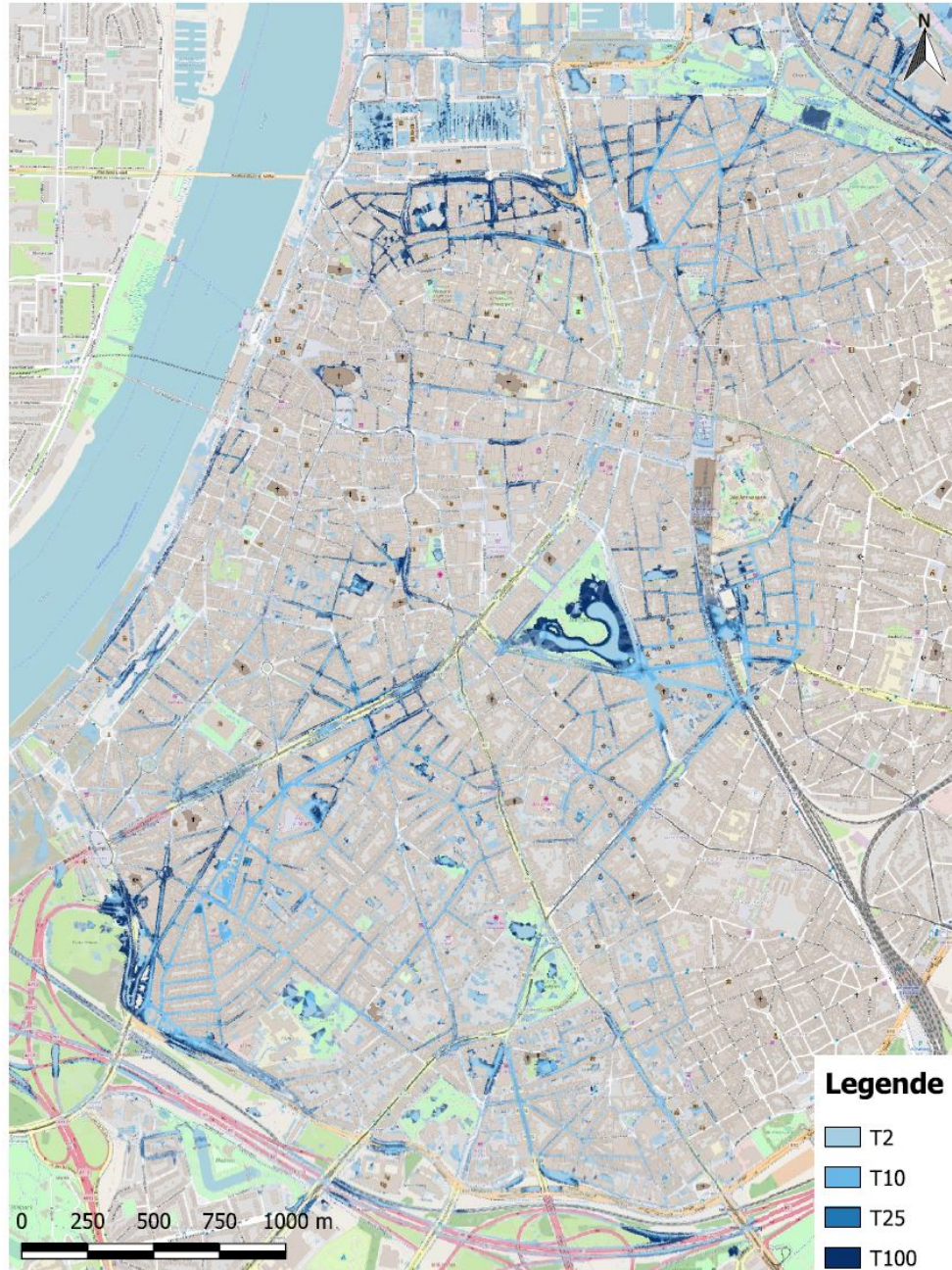
Figuur 5.17: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het huidige klimaat op basis van de 2D-visualisatiemethode

2D-overstromingskaart: Midden scenario in 2100



Figuur 5.18: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeperiodes in het Midden klimaatscenario in 2100 op basis van de 2D-visualisatiemethode

2D-overstromingskaart: Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur 5.19: Overzicht van het overstromingsgebied voor de verschillende terugkeerperiodes in het Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100 op basis van de 2D-visualisatiemethode

5.2.2.1 Huidige klimaat

De overstromingskaart die verkregen wordt voor het huidige klimaat is te zien in figuur 5.17. Wat als eerste opvalt is dat de overstromingskaart voornamelijk de kleuren bevat voor terugkeerperiodes 10, 25 en 100 jaar. Voor een terugkeerperiode van 2 jaar treedt er nog geen wateroverlast op (of waterdieptes kleiner dan 0,1 m). Dit is een logisch resultaat aangezien het rioleringsstelsel is ontworpen volgens de Code van Goede Praktijk die zegt dat pas vanaf een terugkeerperiode groter dan 20 jaar er water op straat toegelaten wordt [48].

Zoals reeds verschillende malen aangegeven in deze masterproef valt ook op basis van deze resultaten af te leiden dat voornamelijk de gebieden aan de Brederodewijk in Antwerpen-Zuid (zone A), het gebied rechts onder het Eilandje in het noorden van Antwerpen (zone B) en het gebied rechts van het stadspark (zone C), kwetsbaar zijn voor overstromingen.

De meer gedetailleerde resultaten voor het huidige klimaat zijn terug te vinden in bijlage F, figuren F.1, F.2, F.3 en F.4. De schaalverdeling die toegepast is voor de verschillende overstromingskaarten gaat uit van een gelijke verdeling voor alle verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes om een goede vergelijking mogelijk te maken. De schaalverdeling varieert tussen 0,1 tot 0,5 m. Waterdieptes groter dan 0,5 m kunnen zeker voorkomen maar deze zijn allen omvat in de kleur horende bij 0,5 m. Uitgaande van deze figuren volgen voor de drie kwetsbare zones volgende waarnemingen:

- **Zone A: Brederodewijk**

Wateroverlast in deze zone is pas waar te nemen vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar hoewel de wateroverlast dan ook nog steeds zeer beperkt blijft. Enkel de Sint-Laureisstraat kent wateroverlast met een waterdiepte van ongeveer 0,3 tot 0,4 m. Vanaf een terugkeerperiode van 25 jaar is er wel grotere wateroverlast merkbaar in zone A en dit met een gemiddelde waterdiepte van ongeveer 0,3 m. In het geval van een terugkeerperiode van 100 jaar zijn er duidelijke verschillen te zien met de lagere terugkeerperiodes. Het hele gebied kleurt blauw met waterdieptes van ongeveer 0,4 tot 0,5 m. Enkel de Paleisstraat kent waterdieptes die oplopen tot meer dan 0,5 m.

- **Zone B: Gebied schuin onder het Eilandje**

In zone B is er pas wateroverlast merkbaar vanaf een terugkeerperiode van 100 jaar. Voor een terugkeerperiode van 25 jaar is er een zeer kleine hoeveelheid water zichtbaar maar de waterdieptes beperken zich tot 0,1 m waardoor aangenomen kan worden dat de wateroverlast in dat geval weinig tot geen impact heeft. Bij een terugkeerperiode van 100 jaar is wel duidelijk water op straat te zien. Vooral het ruitvormige stratencomplex naast het Sint-Jansplein ondervindt hinder en dit met waterdieptes van ongeveer 0,4 tot 0,5 m.

- **Zone C: Stadspark**

In het geval van een terugkeerperiode van 10 jaar kent het gebied naast het

stadspark de grootste wateroverlast in het hele studiegebied. Rechts van het stadspark is enige waterophoping te zien met waterdieptes die oplopen tot ongeveer maximaal 0,3 m. Wanneer een 25-jarige neerslaggebeurtenis zich voordoet komt er nog 10 cm water bij en zijn de waterdieptes in deze zone dus ongeveer 0,4 m. Voor een terugkeerperiode van 100 jaar stijgen de waterdieptes wederom tot 0,5 m en zijn er bovendien ook uitlopers te zien van het water naar de rechterhelft van de stad Antwerpen.

5.2.2.2 Midden scenario

Het Midden scenario geeft de toestand met gemiddelde piekafvoeren aan. Te verwachten is dat de overstromingskaarten van dit scenario in beperkte mate een grotere uitgestrektheid en/of grotere waterdieptes kennen dan in het huidige klimaat. Op figuur 5.18 is te zien dat de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden slechts beperkt zal veranderen maar dat er wel meer lichter blauw zichtbaar is. Onder invloed van het Midden scenario zullen overstromingen dus sneller optreden dan in het huidige klimaat. Dit bevestigt de resultaten uit deel 5.1. Net als in het huidige klimaat komt ook in het Midden scenario nog geen water op straat bij een neerslaggebeurtenis met terugkeerperiode van 2 jaar. Op basis van deze overzichtskaart en de meer gedetailleerde overstromingskaarten F.5, F.6, F.7 en F.8 in bijlage F kunnen per zone volgende besluiten getrokken worden:

- **Zone A: Brederodewijk**

In het geval van een terugkeerperiode van 10 jaar kent de Brederodewijk enige wateroverlast. De waterdieptes blijven beperkt tot maximaal 0,2 m maar wel is de uitgestrektheid van het overstromingsgebied groter dan bij een 10-jarige neerslaggebeurtenis in het huidige klimaat. De Sint-Laureisstraat is ook hier weer de meest kwetsbare met hogere waterdieptes tot 0,4 m. Vanaf een terugkeerperiode van 25 jaar kent bijna de hele Brederodewijk wateroverlast. De kruising van de Sint-Laureisstraat met de Paleisstraat zijn het meest kritisch met waterdieptes van ongeveer 0,5 m. Voor een terugkeerperiode van 100 jaar lopen de waterdieptes in de hele zone A op tot 0,5 m of meer.

- **Zone B: Gebied schuin onder het Eilandje**

In tegenstelling tot het huidige klimaat is er onder het Midden scenario meer water zichtbaar in zone B bij een terugkeerperiode van 25 jaar. De waterdieptes in dat geval zijn ongeveer gelijk aan 0,3 tot 0,4 m. Voor een terugkeerperiode van 100 jaar is de uitgestrektheid van het overstromingsgebied in zone B iets groter dan in het huidige klimaat, al is dit verschil beperkt. De waterdieptes lopen wel op tot meer dan 0,5 m.

- **Zone C: Stadspark**

Voor een terugkeerperiode van 10 jaar, is er een kleine hoeveelheid water die zichtbaar wordt aan de rechterhoek van het stadspark. De waterdieptes daar kunnen oplopen tot 0,3 á 0,4 m. Voor een terugkeerperiode van 25 jaar en 100

jaar lopen deze waterdieptes verder op tot respectievelijk 0,4 á 0,5 m en 0,5 m of meer.

Algemeen kan hieruit besloten worden dat in het geval van het Midden klimaat de uitgestrektheid van het overstromingsgebied min of meer gelijk blijft aan het huidige klimaat maar dat er wel veranderingen zullen optreden in de waterdieptes van het water op straat.

5.2.2.3 Hoog Zomer scenario

Als laatste worden de resultaten overlopen voor het Hoog Zomer scenario. De overzichtskaart is terug te vinden in figuur 5.19, de meer gedetailleerde kaarten zijn terug te vinden in bijlage F, figuren E.9, E.10, E.11 en E.12.

De situatie onder het Hoog Zomer klimaatscenario is zoals reeds eerder vermeld, de meest dramatische. In dit geval is een duidelijk verschil te zien met het huidige klimaat. De genoemde kwetsbare gebieden aan de Brederodewijk (zone A), rechts onder het Eilandje (zone B) en aan het stadspark (zone C) kennen in het geval van het Hoog Zomer scenario een veel grotere uitspreiding en waterdieptes.

De hele zone A en zelfs de gebieden rechts ervan zullen in het Hoog Zomer scenario wateroverlast ondervinden bij de hogere terugkeerperiodes. De oorzaak voor het water aan de rechterzijde van de Brederodewijk kan verklaard worden door het feit dat de 2D-simulatie is gebeurd voor een model dat de hele stad Antwerpen binnen de ring bevat en vervolgens geclipt is tot het gebied van toepassing in deze masterproef. Aangezien in het Hoog Zomer scenario er heel veel water op straat terecht komt kan het zijn dat een deel van het overstromingswater van het rechterdeel van Antwerpen dat eigenlijk niet beschouwd wordt, afstroomt richting de Brederodewijk. Bijgevolg is de zichtbare situatie wel realistisch aangezien in werkelijkheid het overstromingswater niet gescheiden wordt door twee verschillende modellen, maar zou op basis van een model alleen voor de linkerkant van Antwerpen, de uitgestrektheid van het overstromingsgebied kleiner zijn. Een analoog principe geldt voor de uitlopers rechts van zone B en zone C.

Meer in detail geldt voor de drie zones het volgende:

- **Zone A: Brederodewijk**

Voor een terugkeerperiode van 2 jaar is er enkel in de Sint-Laureisstraat enige wateroverlast zichtbaar en dit met een waterdiepte van ongeveer 0,15 m. De wateroverlast in het overige deel van zone A is verwaarloosbaar. Vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar is de hele Brederodewijk kwetsbaar. Het hele gebied staat onder water en dit met waterdieptes die al snel bijna een halve meter bereiken. Het meest kritische punt is opnieuw de kruising van de Sint-Laureisstraat met de Paleisstraat waar de waterdieptes zelfs tot bijna 0,6 m reiken. De situatie die zich voordoet voor een terugkeerperiode van 10 jaar onder het Hoog Zomer klimaat is eerder te vergelijken met de toestand voor een terugkeerperiode van 100 jaar in het huidige klimaat. Dit bevestigt het resultaat zoals gevonden in hoofdstuk 5.1 dat er een frequentieverschuiving is van grootte-orde factor 10.

Voor een terugkeerperiode van 25 jaar kleurt het hele gebied donkerblauw. Alle waterdieptes zijn nu groter dan 0,5 m. Het kritische punt aan de Sint-Laureisstraat en de Paleisstraat overstroomt nu met waterdieptes van 0,8 m. Bij een terugkeerperiode van 100 jaar staat het water op deze plaats zelfs 1 m hoog. De rest van zone A kent onder een 100-jarige neerslaggebeurtenis een gemiddelde waterdiepte van ongeveer 0,7 m.

- **Zone B: Gebied schuin onder het Eilandje**

Net als bij het huidig klimaat en het Midden scenario is er voor een terugkeerperiode van 2 jaar ook in het Hoog Zomer scenario nog geen water op straat te zien in zone B. Vandaag kent deze zone pas wateroverlast vanaf een terugkeerperiode van 25 jaar, in het Hoog Zomer scenario zal er echter vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar water zichtbaar zijn en dit voornamelijk in het ruitvormige stratencomplex naast het Sint-Jansplein. De waterdieptes daar lopen op tot 0,4 á 0,5 m. Vanaf een terugkeerperiode van 25 jaar begint het overstromingsgebied zich meer uit te strekken in zone B. De waterdieptes in dat geval zijn gemiddeld gezien gelijk aan 0,6 tot 0,7 m. Bij een terugkeerperiode van 100 jaar is er een uitspreiding te zien van het overstromingsgebied richting de Schelde met waterdieptes van meer dan een halve meter. Dit laatste fenomeen is ook duidelijk te zien op aan de rode kleur op de heatmap in figuur 5.8.

- **Zone C: Stadspark**

De enige plaats in het studiegebied dat enige wateroverlast kent onder een terugkeerperiode van 2 jaar is het gebied naast het stadspark. Een waterophoping met een waterdiepte tot 0,3 m is zichtbaar. Bij een terugkeerperiode van 10 jaar komt er meer water op straat en zijn er uitlopers zichtbaar van zone C richting de rechterkant van de stad Antwerpen. De waterdieptes dan zijn al snel 0,4 m of meer. Vanaf een terugkeerperiode van 25 jaar kleurt het hele gebied donkerblauw met waterdieptes tot 0,6 m. Helemaal overstroomt deze zone onder een terugkeerperiode van 100 jaar. Het water staat ongeveer 0,6 tot 0,7 m hoog. Zelfs de vijver in het stadspark zal ten gevolge van een 100-jarige bui zorgen voor wateroverlast.

Er kan geconcludeerd worden dat de situatie onder het Hoog Zomer scenario voor erg grote wateroverlast zal zorgen die zich uitstrekt over grote delen van het studiegebied. Ook treedt deze wateroverlast al op vanaf een terugkeerperiode van 10 jaar. Het huidige ontwerp van het rioleringsstelsel zal in dat geval niet meer volstaan. Indien het klimaat evolueert naar dit scenario zal grote schade optreden wanneer overstromingen zich voordoen. Bijgevolg zijn maatregelen nodig om de stad en haar inwoners te beschermen.

5.2.2.4 Besluit

De resultaten van de 2D-visualisatie zijn in dit deel besproken om aan te geven welke gebieden er vandaag al kwetsbaar zijn en hoe deze kwetsbare gebieden zullen evolueren in de toekomst onder invloed van de verschillende klimaatscenario's.

De resultaten lieten toe op te merken dat indien het klimaat evolueert naar het Midden scenario, de kwetsbare gebieden min of meer overeenkomen met de gebieden die vandaag ook al overstromen. Echter wel zal er een toename zijn in de waterdieptes van de wateroverlast. Globaal gezien voor alle terugkeerperiodes nemen de waterdieptes met ongeveer 10 tot 20 cm toe in het Midden scenario.

Indien het klimaat evolueert naar het Hoog Zomer scenario zijn de resultaten meer dramatisch. De huidige kwetsbare gebieden zullen zich verder uitspreiden in de stad en de waterdieptes van de overstromingen kunnen oplopen tot 1 m of zelfs meer. Bijna het hele studiegebied wordt onder dit scenario kwetsbaar. In vergelijking met het huidige klimaat is er een globale toename in de waterdiepte van bijna een halve meter.

5.2.4 Vergelijking van de 1D naar 2D-visualisatiemethode en de 2D-visualisatiemethode

In het voorgaande deel zijn de resultaten voor de impact van klimaatverandering op de stad Antwerpen besproken aan de hand van de 2D-visualisatiemethode. Er werd gekozen om deze visualisatiemethode te beschouwen voor de bespreking van de resultaten omdat de resultaten van de 1D naar 2D-visualisatiemethode eigenlijk hetzelfde zeggen maar iets minder nauwkeurig zijn aangezien ze gebaseerd zijn op de flood cones. In dit deel zal daarom ingegaan worden op een vergelijking van beide visualisatiemethodes om aan te tonen dat de 1D naar 2D-visualisatiemethode zeker goede en realistische resultaten oplevert die gebruikt kunnen worden als eerste inschatting van de overstromingsgebieden met bijhorende waterdieptes. Per klimaat-scenario zal enerzijds een visuele vergelijking uitgevoerd worden en anderzijds zal een kwantificering plaats vinden van de verschillen in waterdieptes tussen beide methodes.

De methodologie van deze kwantificering van verschillen in waterdieptes kan heel kort als volgt samengevat worden: Aangezien van beide methodes een rasterfile is opgesteld met de resultaten van de simulaties, kan met behulp van QGIS het verschil bepaald worden tussen de rasters. Op die manier is dan het absolute verschil in waterdieptes gekend tussen beide methodes en kan een inschatting gemaakt worden van de mate van overeenkomst. Dit verschil is vervolgens gevisualiseerd in een kaart, gelijkaardig aan de getoonde overstromingskaarten. Op de kaarten zijn de verschillen aangeduid met een kleurenvariatie tussen geel en rood waarbij geel een waterdiepteverschil symboliseert van 0,1 m en donkerrood een waterdiepteverschil van 0,5 m. De tussenliggende geel- en roodtinten, vertegenwoordigen tussenliggende waterdiepteverschillen.

De resultaten van deze rasterberekeningen zijn te zien in onderstaande figuren 5.20, 5.21 en 5.22 voor de verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes.

5.2.4.1 Vergelijking van de methodes in het geval van het huidig klimaat

Wanneer de resultaten van de 2D-visualisatiemethode visueel vergeleken worden met de overstromingskaarten die gevonden zijn met de 1D naar 2D-visualisatiemethode kunnen een aantal verschillen opgemerkt worden.

Als eerste valt op dat in het geval van de overzichtskaart van de 2D-visualisatiemethode (figuur 5.17) er veel meer donkerblauw te zien is dan in het geval van figuur 5.14. Dit wijst er op dat in het geval van de 2D-methode, er pas vanaf de grotere terugkeerperiodes wateroverlast optreedt en dat lagere terugkeerperiodes ofwel geen wateroverlast ofwel wateroverlast kleiner dan 10 cm kennen. In het geval van de 1D naar 2D-visualisatiemethode is er wel meer lichtblauw te zien wat wil zeggen dat de kleinere terugkeerperiodes daar wel wateroverlast kennen met een waterdiepte die groter is dan 0,1 m. Bijgevolg overschat de 1D naar 2D-methode lichtelijk de werkelijke overstromingsdiepte.

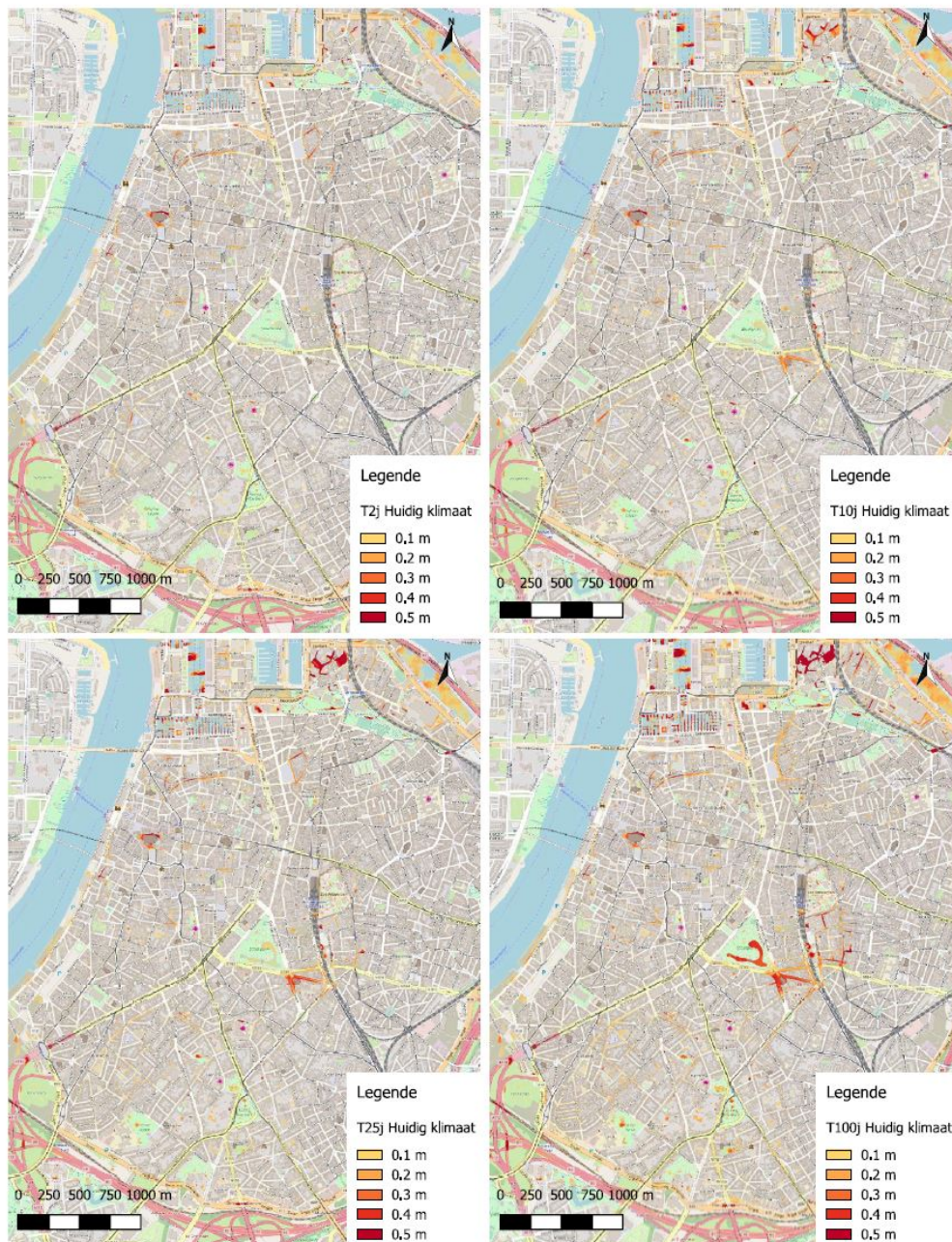
Ook opmerkelijk is dat de overstroming aan het stadspark zich enkel voordoet in het geval van de 2D-methode. Voor de 1D naar 2D-methode is er in bepaalde gevallen wel water te zien maar de waterdieptes daarvan zijn zeer beperkt.

Daarnaast zijn nog een aantal andere gebieden te zien op de kaart van de 1D naar 2D-visualisatiemethode die blauw kleuren, voornamelijk in het gebied langs de Schelde waar in dit klimaatscenario in principe weinig tot geen overstromingsrisico is. Een eerste reden voor het water in dit gebied is terug te vinden in de onnauwkeurigheid van het model in InfoWorks ICM. Een aantal flood cones in dit deel van het studiegebied bevatten water terwijl er in werkelijk geen wateroverlast is. Het water in deze flood cones wordt door het algoritme uitgespreid en zorgt voor een aantal lichtblauwe gebieden die in principe niet overstromen. Een andere reden waarom, voornamelijk langs de randen van de studie-omgeving, water te zien is, is te verklaren door beperkingen in het algoritme. Wanneer het algoritme botst op de rand van het DHM of op een erg uitgestrekt gebouw, ziet het algoritme dit als een gigantische muur waarlangs het water niet kan passeren. Bijgevolg blijft al het water dat uitgespreid dient te worden hangen aan de rand van de DHM of rond het gebouw. Voorbeelden zijn terug te vinden over de volledige lengte van de kaai langs de Schelde. De volledige lijn kleurt blauw ten gevolge van het bereiken van de rand van het DHM. Een ander voorbeeld is de kathedraal van Antwerpen. Het algoritme botst op de kathedraal en kan bijgevolg het water niet verder laten uitspreiden. Hierdoor is volledig rondom de kathedraal een blauwe kleur te zien. Dit probleem doet zich niet of veel beperkter voor bij de 2D-methode.

In figuur 5.20 kan de kwantificering van de verschillen in waterdieptes tussen beide methodes gezien worden. Algemeen zijn de verschillen zeer beperkt, er treden verschillen in waterdieptes op van 0,1 tot maximaal 0,2 m. Lokaal kunnen er iets grotere verschillen zijn die oplopen tot 0,3 m of meer, zoals bijvoorbeeld aan het stadspark.

Voor een **terugkeerperiode van 2 jaar** is er slechts een klein verschil te zien in

Verskil in waterdieptes voor huidig klimaat tussen de gebruikte visualisatiemethodes



Figuur 5.20: Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het huidig klimaat

zones A en B. Voor een terugkeerperiode van 2 jaar blijkt dat er voor de 2D-methode zo goed als geen water op straat terecht komt. Voor de 1D naar 2D-methode staat er wel water op straat hoewel de plaatsen met wateroverlast beperkt zijn. Echter zijn de verschillen in waterdieptes maximaal 0,2 m.

Voor een **terugkeerperiode van 10 jaar** kan hetzelfde besluit getrokken worden: Bij de 2D-methode is er slechts een kleine hoeveelheid wateroverlast waar te nemen terwijl dit bij de 1D naar 2D-methode vooral in zone A aan de Brederodewijk wel goed waarneembaar is. Het verschil in waterdieptes blijft wel beperkt tot maximaal 0,2 m.

Ter hoogte van zone C aan het stadspark zijn er wel duidelijke verschillen te zien. Eerder is al aangehaald dat er enkel overstromingen zichtbaar worden in het geval van de 2D-methode waardoor uiteraard hier grote verschillen zichtbaar worden met de 1D naar 2D-methode.

Vanaf een **terugkeerperiode van 25 jaar**, komt de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden min of meer overeen maar zijn er een aantal kleine verschillen waarneembaar in waterdieptes. Ter hoogte van zone A is er amper een verschil merkbaar tussen beide methodes. Enkel aan zone B treden er verschillen op in waterdieptes die ongeveer 0,2 tot 0,3 m bedragen.

Voor een **terugkeerperiode van 100 jaar** zijn er eveneens slechts kleine verschillen merkbaar. Ter hoogte van zone A beperken de verschillen zich tot 0,1 m, ter hoogte van zone B zijn de verschillen in waterdieptes ongeveer 0,2 m.

5.2.4.2 Vergelijking van de methodes in het geval het Midden Scenario in 2100

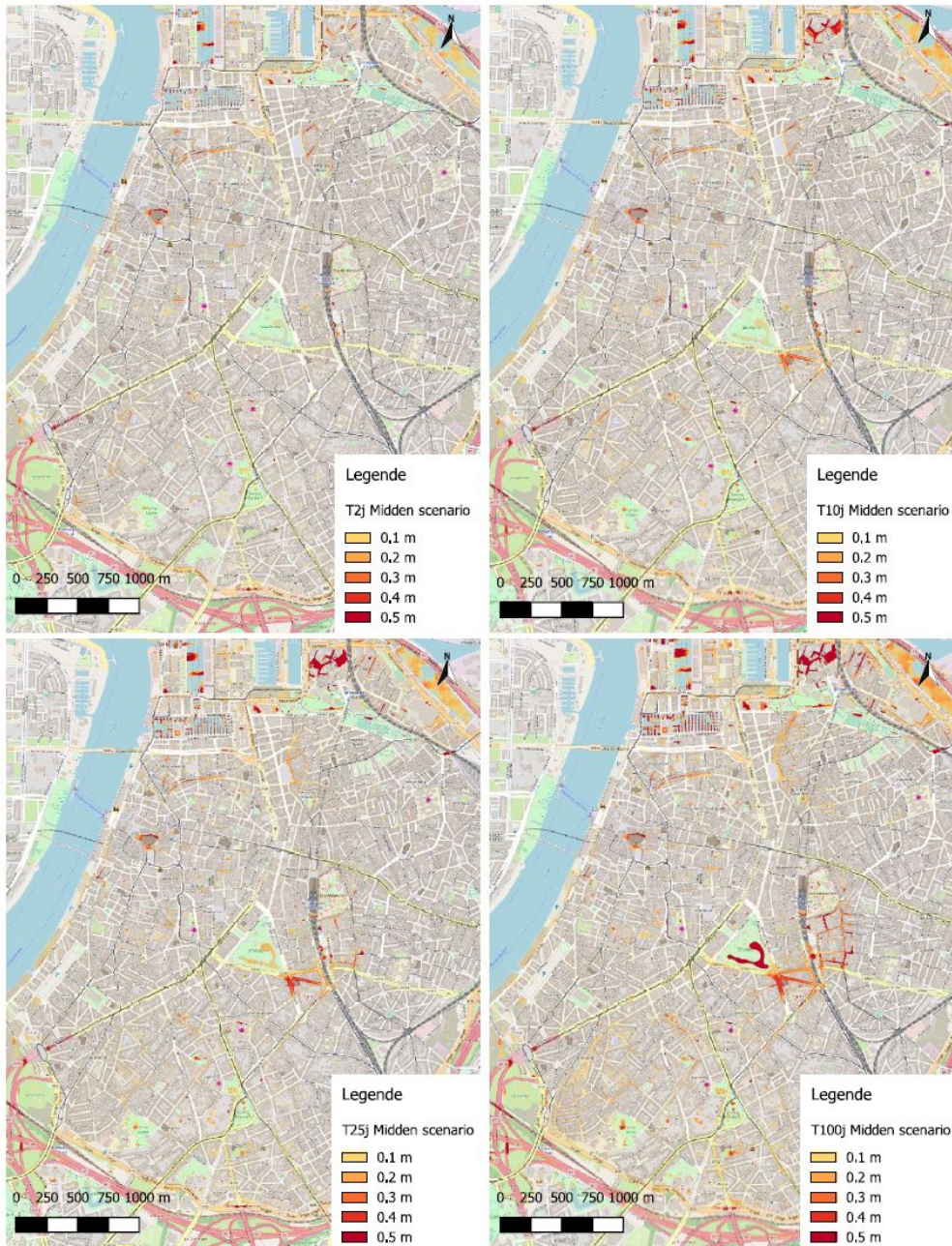
In het geval van het Midden scenario valt opnieuw op dat in het geval van de 2D-overstromingskaart op figuur 5.18 er veel meer donkerder blauw te zien is dan in het geval van figuur 5.15. De overschatting van de 1D naar 2D-methode van de overstromingen bij de kleinere terugkeerperiodes, doet zich dus ook voor bij dit scenario.

De opmerking over water aan de randen van het DHM en aan grote gebouwen die een obstakel vormen voor het water, zoals beschreven bij het huidige klimaat, is ook hier geldig. Een voorbeeld is te zien aan de kathedraal van Antwerpen waar een waterdiepteverschil zichtbaar is tot 0,4 m.

In het geval van het Midden scenario op figuur 5.21 kunnen een aantal gelijkaardige zaken geconcludeerd worden als bij het huidige klimaat. Wanneer gekeken wordt naar de overstromingskaart voor een **terugkeerperiode van 2 jaar** lopen de waterdieptes bij de 1D naar 2D-methode op tot maximaal 0,3 m. In het geval van de 2D-methode is er geen water op straat te zien. De grootste verschillen tussen beide visualisatiemethodes doen zich voor ter hoogte van zone B.

Een analoog besluit kan getrokken worden voor een **terugkeerperiode van 10 jaar**. Wat wel extra op te merken valt is dat vanaf deze terugkeerperiode het voornaamste verschil weer terug te vinden is in zone C aan het stadspark omdat er bij de 1D naar 2D-methode geen overstroming terug te vinden is in dit gebied.

Verskil in waterdieptes voor Midden scenario in 2100 tussen de gebruikte visualisatiemethodes



Figuur 5.21: Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het Midden scenario in 2100

Voor een **terugkeerperiode van 25 jaar** zijn er zeer goede overeenkomsten zichtbaar tussen beide methodes. Zeker in zone A geven beide zones min of meer dezelfde resultaten. Ter hoogte van zone B zijn de verschillen nu ook gereduceerd tot maximaal 0,2 m. Opnieuw is er wel een groot verschil aan de rechterhoek van het stadspark tot ongeveer 0,4 m. Alleen bij de 2D-methode kan er gesproken worden van wateroverlast aan het stadspark.

Bij een **terugkeerperiode van 100 jaar** zijn er iets grotere verschillen te zien in zone A. De kern van zone A geeft goede overeenkomsten tussen beide methodes maar onderaan deze zone zijn er verschillen in waterdieptes te zien van ongeveer 0,3 m. Ter hoogte van zone B is het waterdiepteververschil beperkt tot ongeveer 0,1 à 0,2 m. De verschillen in waterdieptes die getoond worden aan zone C zijn bijna gelijk aan de effectieve waterdieptes die er op treden aangezien de 1D naar 2D-modellering deze overstromingen bijna niet in acht neemt.

5.2.4.3 Vergelijking van de methodes in het geval van het Hoog Zomer scenario in 2100

Tot slot worden ook de resultaten van de 2D-visualisatiemethode vergeleken met de overstromingskaarten die gevonden zijn met de 1D naar 2D-visualisatiemethode onder het Hoog Zomer scenario.

Zoals vermeld valt het op dat onder invloed van de 2D-modellering met de 2D mesh de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden veel groter zijn en uitspreiden richting de rechterhelft van de stad Antwerpen. De reden hiervoor is terug te vinden in het gebied dat beschouwd is bij de simulatie (volledige stad Antwerpen binnen de ring) in vergelijking met de 1D naar 2D-methode (enkel de linkerkant van de het stadsgedeelte binnen de ring).

Daarnaast kan ook de rode kleur opgemerkt worden ter hoogte van de kathedraal en de oranje kleur aan de randen van de Schelde. Dit toont duidelijk het probleem aan van het water dat botst op grote obstakels of randen van het gebied in het geval van de 1D naar 2D-methode. Dit probleem komt niet voor bij de 2D-methode waardoor, zeker aan de kathedraal, de waterdieptes zo verschillend zijn.

De verschillen tussen beide methodes zijn zichtbaar op onderstaande figuur 5.22.

Bij de overstromingskaarten voor een **terugkeerperiode van 2 jaar**, kan opnieuw besloten worden dat de 1D naar 2D-methode de hoeveelheid water op straat overschat in vergelijking met de 2D-methode. Er is immers in de 2D-methode weinig tot geen water op straat zichtbaar, terwijl in de 1D naar 2D-methode er een kleine hoeveelheid water in zone A en B zichtbaar is met een waterdieptes die oplopen tot lokaal 0,3 m.

De situatie voor een **terugkeerperiode van 10 jaar** is bijna gelijk. De kleine verschillen die terug te vinden zijn tussen de 1D naar 2D- en 2D-methode zijn enerzijds aan het stadspark in zone C waar alleen in de 2D-methode water terug te vinden is en anderzijds de uitgestrektheid van het overstromingsgebied in zone B die groter is bij de 1D naar 2D-methode.

Vanaf een **terugkeerperiode van 25 jaar** is bij de 2D-methode de uitloper van het

Vershil in waterdieptes voor Hoog Zomer scenario in 2100 tussen de gebruikte visualisatiemethodes

Figuur 5.22: Kwantificering van de verschillen in de waterdieptes tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode in het geval van het Hoog Zomer scenario in 2100

overstromingsgebied aan zone A, richting de rechterkant van Antwerpen, zichtbaar. Het verschil in waterdieptes in deze zone blijft wel beperkt tot 0,1 m met lokaal een waterdiepteverschil tot 0,2 m. In zone B doet het omgekeerde zich voor. Daar is het overstromingsgebied iets groter bij de 1D naar 2D-methode en kent het gebied eveneens grotere waterdieptes waardoor er verschillen opgemerkt kunnen worden van 0,2 tot 0,3 m.

Bij een **terugkeerperiode van 100 jaar**, zijn bijna alle waterdieptes in de overstromingsgebieden groter dan een halve meter en lopen ze lokaal op tot een meter. Dit wordt teruggevonden bij zowel de 1D naar 2D-methode als de 2D-methode. Wel is er enige verschil in uitgestrektheid. In zone A is enerzijds de uitloper richting de rechterkant van Antwerpen te zien maar is anderzijds ook een grote toename in overstromingswater aan de linkeronderhoek in tegenstelling tot de 1D naar 2D-overstromingskaart. De verschillen in waterdieptes kunnen daar oplopen tot 0,3 m. Zone B kent een vrij goede overeenkomst tussen 1D naar 2D- en 2D-overstromingskaart. De 2D-overstromingskaart laat ook toe om de overstroming of toename van waterdiepte van de vijver in het stadspark (Zone C) in rekening te brengen. Bovendien kent het gebied naast het stadspark ook een overstroming, die eigenlijk bijna niet zichtbaar is in de 1D naar 2D-overstromingskaart.

5.2.5.4 Besluit

Uitgaande van deze resultaten blijkt dat al bij al een goede overeenkomst gevonden wordt tussen beide visualisatiemethodes. Er werd aangenomen dat de 2D-methode de meest nauwkeurige is. Uitgaande hiervan kan besloten worden dat de eenvoudige 1D naar 2D-methode met het uitspreidingsalgoritme toch een goede weergave geeft van de mogelijke overstromingen in de stad en een eerste inzicht geeft in de waterdieptes. Ondanks de beperkingen van de eenvoudige methode, levert het toch min of meer correct resultaten op mits een aantal kleine verschillen. De uitgestrektheid van de gebieden komt in beide methodes min of meer overeen. De verschillen in waterdieptes kennen, naargelang de terugkeerperiode en scenario wel een aantal verschillen. Globaal gezien blijven deze verschillen meestal beperkt tot 10 tot 20 cm. Dit verschil in waterdieptes is te verklaren door een overschatting van de overstromingen door de 1D naar 2D-modellering. De optredende verschillen tussen de 1D naar 2D-methode en de 2D-methode, kunnen verklaard worden door onder andere volgende aspecten:

- **Verskil in nauwkeurigheid tussen flood cones en 2D mesh**
De hoeveelheid water die in de flood cones terecht komt, is niet even nauwkeurig als de hoeveelheid water die op straat uitgespreid wordt bij de 2D mesh. De afwijking op deze hoeveelheid water, kan een eerste verschil zijn voor de afwijkingen in de overstromingskaarten.
- **Beperkingen en nauwkeurigheid van het 1D naar 2D-uitspreidingsalgoritme**
Zoals aangehaald, kent het algoritme een aantal beperkingen. Zo blijft bijvoorbeeld water dat botst tegen de rand van het DHM staan en wordt water ook

opgehoopt tegen grote gebouwen die gezien worden als obstructie, terwijl in werkelijkheid het water er rond stroomt.

- **Inrekenen van infiltratie**

De simulatie met de 2D mesh laat toe om infiltratiezones aan te duiden waar overtollig regenwater in de grond kan infiltreren. Dit kan niet in rekening genomen worden bij de 1D naar 2D-methode met als gevolg dat meer water op straat blijft staan en dus een beeld geeft van meer overstroming. Vooral bij de kleinere terugkeerperiodes speelt dit een rol omdat de grond dan nog niet helemaal verzadigd is, en capaciteit heeft om regenwater te laten infiltreren. Bij grotere terugkeerperiodes is de regenbui vaak zo hevig dat ook de grond geen tijd krijgt om water te laten infiltreren en er veel minder op de infiltratiecapaciteit gerekend kan worden.

- **Directe neerslag op de 2D mesh**

Bij de modellering van de 2D mesh wordt de neerslag aangebracht op de mesh zelf en vervolgens afgevoerd naar de riolering. Dit is anders dan bij de flood cones waarbij het water rechtstreeks op het rioleringsmodel komt. Ook dit verschil zou een mogelijke afwijking kunnen veroorzaken in de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden.

5.2.5 Aanbevelingen ter verbetering en uitbreiding van het uitspreidingsalgoritme

Het gebruik van het spreidingsalgoritme is erg eenvoudig en kijkt enkel naar uitspreiding van het regenwater, voegt eventueel nog extra regen toe of neemt eventueel water weg om verdamping in rekening te brengen. Uit voorgaande analyse is duidelijk dat deze methode goede en realistische inzichten geeft in mogelijke overstromingen in vergelijking met de 2D mesh maar dat er nog ruimte is tot verbetering. Een kort overzicht wordt daarom gegeven voor een mogelijk vervolgonderzoek omtrent dit algoritme om het verder te verbeteren en uit te breiden zodat de resultaten nog meer realistisch voorgesteld kunnen worden.

- **Waterophoping aan rand van het gebied**

Zoals vermeld bij de bespreking van de resultaten, kent het algoritme als beperking dat aan de rand van het DHM of aan langgerekte gebouwen het water op een ‘muur’ bots en bijgevolg niet meer weg kan. Hierdoor is aan de rand van het studiegebied en bijvoorbeeld aan de kathedraal van Antwerpen een waterophoping te zien die er in werkelijkheid niet is. Een eventuele oplossing die nagaat hoeveel van het water aan de rand van het studiegebied afstroomt naar een naburig gebied zou toegevoegd kunnen worden aan het algoritme. Daarnaast kan bijvoorbeeld het probleem van de kathedraal verholpen worden door na te gaan wat het effect zou zijn van een afronding van de gridcellen rondom ronde gebouwen in plaats van de gebruikte vierkante gridcellen zodat dergelijke gebouwen realistischer worden voorgesteld en waterophoping vermeden wordt.

- **Infiltratie**

Het algoritme houdt momenteel geen rekening met de mogelijkheid van het regenwater om te infiltreren in de grond aangezien enkel afstroming langs de verharde straten wordt beschouwd. In de onverharde delen van het studiegebied zoals in het stadspark, Park Spoor Noord of andere groene stadsdelen zou wel infiltratie mogelijk zijn. Wanneer dit in rekening gebracht kan worden in het algoritme, zou een deel van het regenwater niet meer op de straat terecht komen maar ‘verdwijnen’ in de grond en bijgevolg misschien een vermindering in overstroming met zich meebrengen. Een uitbreiding van dit aspect is dat tuinen van woningen mee in rekening genomen worden en een deel van het water daar kan infiltreren.

- **Tijdelijke berging in groene zones**

Een mogelijke oplossing om overstromingen in de stad tegen te gaan, is het voorzien van berging binnen de stad in bijvoorbeeld stadsparken. Door dit aan te leggen kan enerzijds water infiltreren in de grond en anderzijds vertraagd afgevoerd worden zodat het regenwater niet allemaal tegelijk afstroomt naar de meest kwetsbare delen van het studiegebied. Bijgevolg zou in het algoritme rekening gehouden moeten kunnen worden met enerzijds berging van het water en dat water pas na verloop van tijd gaan uitspreiden over het gebied en anderzijds ondertussen een deel van het water laten infiltreren in de grond.

- **Bidirectionele koppeling tussen oppervlakte en rioleringssysteem**

Het huidige algoritme gaat uit van afstromend regenwater maar houdt geen rekening met water dat na verloop van tijd toch terug afstroomt in de riolering. Een voorbeeld hiervan is de opstopping van het regenwater aan de rioolputjes. Bij een zeer hevige bui kan het zijn dat de riolering nog niet helemaal gevuld is maar dat toch water op straat blijft staan doordat de grote toevoer aan water niet allemaal tegelijk afgevoerd kan worden naar de riolering via de rioolinelaten. Door deze vertraagde vulling van de riolering in rekening te brengen kan een meer realistisch beeld verkregen worden van de werkelijke overstroming. Wel moet afgewogen worden of deze optie in InfoWorks ICM of in het algoritme moet geïmplementeerd worden.

Een ander voorbeeld is het toevoegen van een tijdsaspect die rekening houdt met een lediging van de riolering nadat de piek van de bui gepasseerd is en er bijgevolg terug enige capaciteit is om het oppervlaktewater af te voeren. Hierdoor zou het kunnen dat een deeltje van het oppervlaktewater dat nu allemaal afstroomt toch al geborgen kan worden in de riolering.

- **Ponding**

Een andere toevoeging die al deels aanwezig is in het algoritme maar verder uitgewerkt kan worden, is het principe van ponding of plasvorming.

In het kader van deze masterproef is gebruik gemaakt van de Add-module in het algoritme maar is als waarde voor deze module 0 mm water toegevoegd aangezien het water dat uitgespreid moest worden vervat zat in de input-file met de initiële waterdieptes die het water uit de flood cones bevatten. Indien

echter bovenop deze file nog eens water toegevoegd wordt aan het studiegebied, is er niet alleen water te zien in de gebieden waar overstroming optreedt maar zijn ook in de andere gebieden kleine watervlekjes te zien. Een voorbeeld van dergelijke overstromingskaart waarbij 10 mm extra water is toegevoegd, is terug te vinden in bijlage G. Door deze optie verder uit te werken kan nagegaan worden hoe de stad reageert op de overstromingen ten gevolge van het bereiken van de capaciteit van de riolering in combinatie met het ponding-effect.

- **Hybride modellering**

Tot slot kan er nagedacht worden over een meer hybride algoritme dat rekening houdt met zowel de neerslag, de rioleringen, mogelijkheid tot infiltratie, etc. Echter wordt dan wel meer en meer InfoWorks ICM benaderd waardoor het voordeel van dit eenvoudige algoritme misschien verdwijnt.

5.3 Vergelijking van de methodes en besluit

Visualisatie van overstromingen kan op verschillende manier gebeuren, zoals aangetoond in dit hoofdstuk. Als eerste methode is op eenvoudige wijze aangeduid voor welke terugkeerperiode een bepaalde knoop in het rioleringsstelsel overstroomt. Vervolgens is een vergelijking gemaakt tussen de klimaatscenario's door de frequentieverschuiving in kaart te brengen, namelijk de factor die de verandering aangeeft van terugkeerperiode waarvoor een bepaald knooppunt overstroomt. De methode laat toe inzicht te krijgen in hoeveel sneller overstroming zal plaatsvinden in de stad. Als tweede methode is verder gegaan met de flood cones die ook in de eerste methode gebruikt zijn, om het water in deze flood cones uit te spreiden op de straat. Hierdoor wordt een overstromingskaart verkregen die inzicht geeft in de uitspreiding van de overstroming en de waterdieptes. De methode is eenvoudig toe te passen maar vraagt enige rekentijd.

De derde methode laat analoog als de tweede visualisatiemethode toe om een overstromingskaart te verkrijgen. In dit geval is niet langer gebruik gemaakt van de flood cones maar van een 2D mesh die toelaat om op meer nauwkeurige wijze de overstromingen in kaart te brengen. Ook hier is wel enige rekentijd vereist alvorens de resultaten geraadpleegd kunnen worden.

Indien op zeer snelle wijze inzicht verkregen moet worden in de locaties waar wateroverlast zal optreden, zonder te kwantificeren hoe groot die wateroverlast zal zijn, kan de eerste methode perfect gebruikt worden. Uitgaande van de simulaties met de flood cones kan immers snel aangeduid worden welke knopen zullen overstroomen en kan deze info gebruikt worden om te bepalen welke gebieden wateroverlast zullen kennen. Echter wanneer informatie nodig is over de waterdieptes en de exacte uitspreiding van het overstromingswater, moet overgegaan worden naar de tweede of derde methode die toelaten om overstromingskaarten te maken. Hierbij dient gesteld te worden dat de 1D naar 2D-methode met het uitspreidingsalgoritme gebruikt kan worden indien geen 2D mesh voorhanden is en slechts simulaties in InfoWorks ICM uitgevoerd kunnen worden met flood cones. De methode is zeer geschikt om een

eerste beeld te krijgen van de uitspreiding van het water zonder dat daarvoor een 2D mesh opgesteld moet worden. Ook dient opgemerkt te worden dat de rekentijd nog gereduceerd kan worden door de grootte van de rastercellen van het DHM aan te passen waardoor op relatief snelle wijze een eerste inzicht verkregen kan worden in de uitspreiding van de overstromingen en de waterdieptes. Wanneer tot slot zeer nauwkeurig een beeld vereist is van de overstromingen, kan best overgeschakeld worden naar de 2D-methode. Ondanks de kleine verschillen met de 1D naar 2D-methode is deze 2D-methode wel de meest nauwkeurige (binnen de beperkingen van het model). Zoals aangegeven in de inleiding van deel 5.2 zijn de eerste twee methodes geschikt indien op snelle wijze een eerste inzicht verkregen moeten worden in mogelijke overstromingen zoals bij een real time forecasting. Door de grootte van de rastercellen en het tolerantieniveau van het 1D naar 2D-algoritme groter te nemen kan op snelle wijze een overstromingskaart verkregen worden. Nadien kan dan nog steeds een nauwkeurige overstromingskaart opgesteld worden met de 2D-visualisatiemethode op basis van de 2D mesh. Ook indien het model geoptimaliseerd wordt is het nuttiger om eerste de optimalisatie uit te voeren aan de hand van de flood cones en nadien de definitieve modellering te doen met de 2D mesh om de reketijden tijdens het optimalisatieproces te beperken.

De drie beschouwde methodes hebben allen hun voor- en nadelen maar geven allen hetzelfde resultaat: Voornamelijk de gebieden aan de Brederodewijk (zone A), het gebied schuin onder het Eilandje (zone B) en het gebied rechts naast het stadspark (zone C) zullen in de toekomst een toename in wateroverlast kennen. Wanneer het klimaat verandert richting het Midden scenario zullen neerslaggebeurtenissen die overstroming veroorzaken 4 tot 5 keer sneller voorkomen dan in het huidige klimaat. Onder dit scenario blijft de uitgestrektheid van de huidige overstromingsgebieden min of meer gelijk maar moet rekening gehouden worden met verhoogde waterdieptes van ongeveer 0,2 m.

Wanneer het klimaat in de toekomst zich eerder in het Hoog Zomer scenario bevindt zullen neerslaggebeurtenissen die overstroming veroorzaken tot 10 keer sneller voorkomen dan in het huidige klimaat. In dit scenario moet rekening gehouden worden met wateroverlast in het gehele studiegebied met een toename in de waterdieptes van 0,5 m. De waterdieptes kunnen plaatselijk oplopen tot 1 m of zelfs meer.

Maatregelen moeten genomen worden voor de beide scenario's om de leefbaarheid in de stad te behouden aangezien beide scenario's momenteel nog een gelijke kans op voorkomen hebben. Welk scenario representatief zal worden, zal de toekomst moeten uitwijzen.

Hoofdstuk 6

Impact van hitte eiland effect op wateroverlast

Zoals reeds in de inleiding meegegeven, kennen steden nog een bijkomend fenomeen dat eveneens zorgt voor verhoogde neerslagintensiteiten binnen de stad. Dit is het zogenaamde hitte eiland effect. Onder invloed van de vele verharding en dichte bebouwing in stedelijk context, is de opslag van warmte in steden groter. De temperatuur in de stedelijke omgeving neemt hierdoor toe bovenop de temperatuurstijging ten gevolge van de klimaatverandering. De verzadigingsdampdruk in de atmosfeer verhoogt bijgevolg waardoor grotere neerslagintensiteiten zich voordoen binnen de stad en de kwetsbaarheid van de stad voor overstromingen toeneemt [10].

Nu een beeld verkregen is van de kwetsbare gebieden in Antwerpen en de mate van overstroming in de verschillende klimaatscenario's en onder de verschillende terugkeerperiodes (hoofdstuk 5), zal in dit hoofdstuk nagegaan worden wat de invloed is van het hitte eiland effect binnen de stad Antwerpen.

Om dit effect te beschouwen worden de composietbuien van Antwerpen voor deelgebied 62 op figuur 3.5 meegenomen in de analyse. Voor de verschillende klimaatscenario's worden deze composietbuien van Antwerpen met een terugkeerperiode van 2 jaar, 5 jaar en 20 jaar vergeleken met composietbuien van Ukkel voor dezelfde terugkeerperiodes. De composietbuien van Ukkel worden als representatief beschouwd als gemiddelde voor heel Vlaanderen [3]. Hogere neerslagintensiteiten van de composietbuien van Antwerpen dan deze van Ukkel zullen bevestigen dat het hitte eiland effect aanwezig is in de stad.

Daarnaast wordt ook een kwantificering gedaan van het verschil in overstroming door gebruik te maken van InfoWorks ICM en door gebruik te maken van de 1D naar 2D-visualisatiemethode zoals beschreven in hoofdstuk 5 van deze masterproef.

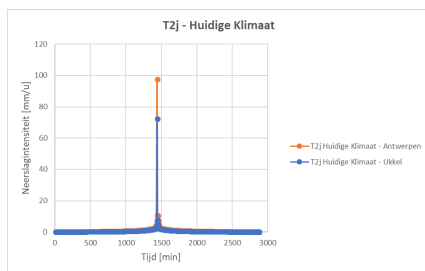
6.1 Vergelijking van de composietbuien van Ukkel en Antwerpen

De eerste vergelijking die uitgevoerd wordt om snel inzicht te krijgen in de mate van aanwezigheid van het hitte eiland effect, gebeurt door middel van vergelijking van de

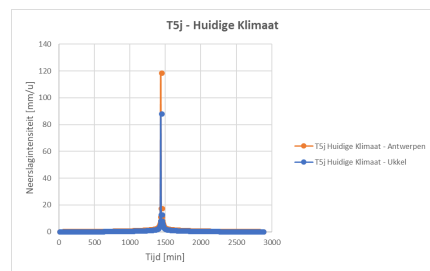
6.1. Vergelijking van de composietbuien van Ukkel en Antwerpen

composietbuien. De beschikbare composietbuien van Ukkel en Antwerpen kunnen samen geplot worden. Er wordt verwacht dat de grafiek van de composietbuien van Antwerpen grotere intensiteiten kent dan de composietbuien van Ukkel.

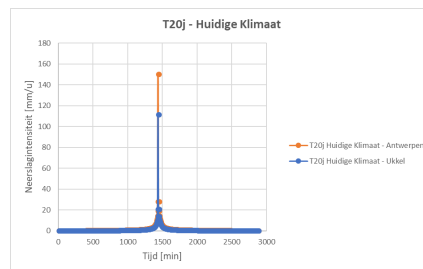
De figuren 6.1, 6.2 en 6.3 tonen de vergelijking van de composietbuien van Ukkel en Antwerpen. Het valt duidelijk op voor alle klimaatscenario's en alle terugkeerperiodes dat de piek van de composietbuien van Antwerpen steeds hoger ligt dan de piek van de composietbuien van Ukkel. Hieruit kan reeds geconcludeerd worden dat Antwerpen hogere neerslagintensiteiten kent dan Vlaanderen gemiddeld gezien kent.



(a) Huidig Klimaat - T2j



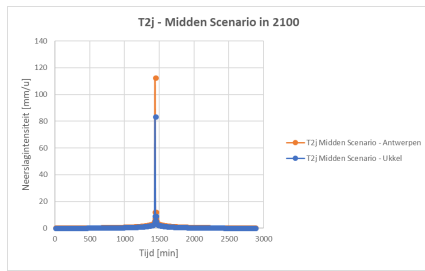
(b) Huidig Klimaat - T5j



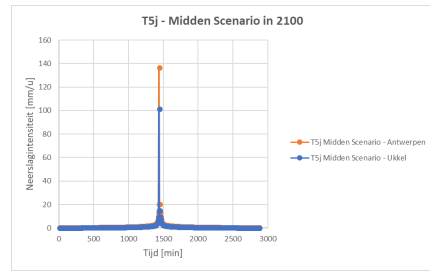
(c) Huidig Klimaat - T20j

Figuur 6.1: Vergelijking tussen de composietbuien van Antwerpen en deze van Ukkel voor het huidige klimaat

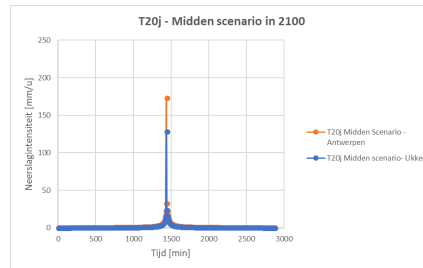
6.1. Vergelijking van de composietbuien van Ukkel en Antwerpen



(a) Midden scenario - T2j

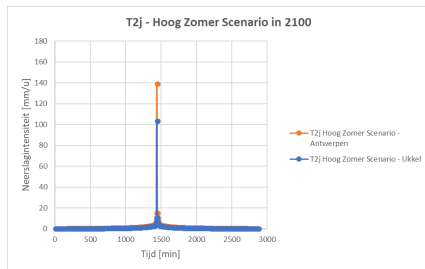


(b) Midden scenario - T5j

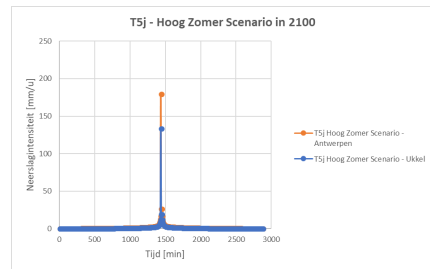


(c) Midden scenario - T20j

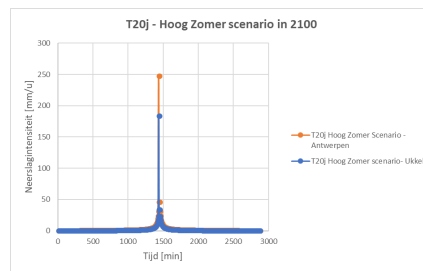
Figuur 6.2: Vergelijking tussen de composietbuien van Antwerpen en deze van Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100



(a) Hoog Zomer scenario - T2j



(b) Hoog Zomer scenario - T5j



(c) Hoog Zomer scenario - T20j

Figuur 6.3: Vergelijking tussen de composietbuien van Antwerpen en deze van Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

Om een meer concreet inzicht te krijgen in het verschil in piekintensiteit tussen de composietbuizen van Antwerpen en de composietbuizen van Ukkel, zijn in onderstaande tabel 6.1 de verschillende piekintensiteiten opgelijst. Op deze manier kan gekwantificeerd worden wat de impact is van het hitte eiland effect.

Tabel 6.1: Vergelijking van de piekintensiteiten tussen de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen

	Piekintensiteit composietbuizen Ukkel [mm/u]	Piekintensiteit composietbuizen Antwerpen [mm/u]
Huidige klimaat T2j	72,78	97,94
Huidige klimaat T5j	88,47	119,05
Huidige klimaat T20j	112,19	150,97
Midden scenario T2j	83,89	112,89
Midden scenario T5j	101,97	137,22
Midden scenario T20j	129,02	174,02
Hoog Zomer scenario T2j	103,87	139,78
Hoog Zomer scenario T5j	133,96	180,26
Hoog Zomer scenario T20j	184,65	248,47

Uitgaande van deze tabel kan gezien worden dat er toch een opmerkelijk verschil is in neerslagintensiteiten tussen de composietbuizen van Antwerpen en Ukkel. Kijkende naar de verschillen tussen de terugkeerperiodes kan een schatting gemaakt worden van de frequentieverschuiving die zich voordoet tussen de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen. Er valt op te merken voor zowel het huidige klimaat als voor de twee klimaatscenario's dat een 20-jarige Ukkel composietbui in de lijn ligt van de neerslagintensiteiten bij de composietbuizen van Antwerpen voor een terugkeerperiode van 5 jaar. Daarnaast valt op te merken dat een 5-jarige Ukkel composietbui aansluit bij een 2-jarige composietbui van Antwerpen. Deze resultaten bevestigen de resultaten uit [1] zoals beschreven in deel 2.4.1 van deze masterproef. Uit vergelijking van deze neerslagintensiteiten blijkt dus dat de neerslagintensiteiten die zich gemiddeld gezien in Vlaanderen voordoen frequenter voorkomen in Antwerpen. Een verhoogd risico op overstromingen in de stad Antwerpen is dus zeker te verwachten ten gevolge van het hitte eiland effect.

6.2 Vergelijking van de volumes water in de flood cones

De volgende stap in de kwantificering van de impact van het hitte eiland effect, is nagaan hoeveel meer overstroming er zal plaatsvinden ten gevolge van de verhoogde neerslagintensiteiten in de stad. Een eerste methode die gebruikt wordt om dit verschil te bepalen is door uit te gaan van de simulatieresultaten in InfoWorks ICM

van de verschillende composietbuizen. Door na te gaan wat het verschil is in de totale waterhoeveelheid in de flood cones, kan nagegaan worden hoeveel extra water er op straat terecht komt ten gevolge van het hitte eiland effect.

De eerste stap is dus om alle nodige composietbuizen te simuleren in InfoWorks ICM. Vervolgens worden de shapefiles opgevraagd die de watervolumes bevatten in de flood cones. Ten slotte wordt per klimaatscenario en per terugkeerperiode, zowel voor de composietbuizen van Antwerpen als deze van Ukkel, het totale volume aan water in de flood cones opgeteld. Hieruit volgt dan de totale toename in water die zorgt voor overstromingen in de stad ten gevolge van het hitte eiland effect. De resultaten van deze methode zijn terug te vinden in onderstaande tabel 6.2. De vierde kolom van de tabel geeft aan hoeveel keer groter het totale overstromingswater is in het geval van de composietbuizen van Antwerpen met het hitte eiland effect tegenover de composietbuizen van Ukkel zonder dit effect.

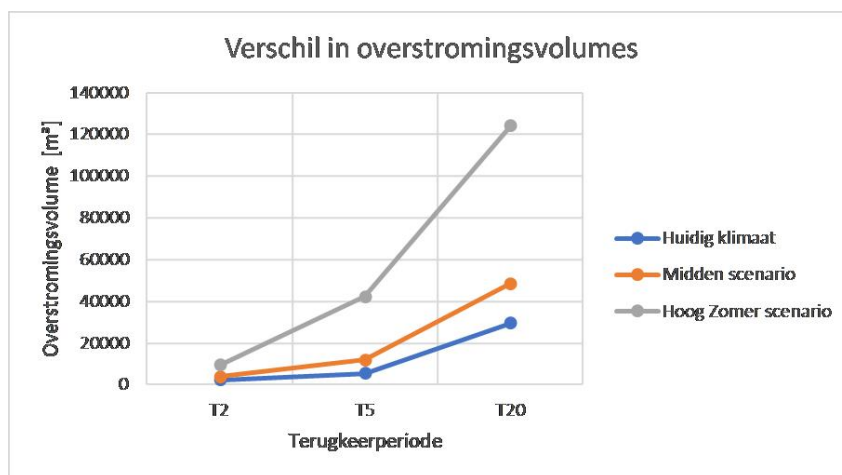
Tabel 6.2: Vergelijking van de volumes overstromingswater in de flood cones tussen de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen

	Totaal volume water in de flood cones voor de composietbuizen van Ukkel [m^3]	Totaal volume water in de flood cones voor de composietbuizen van Antwerpen [m^3]	Factor in toename van overstromingswater
Huidige klimaat T2j	164,13	2407,58	14,67
Huidige klimaat T5j	1691,77	7086,15	4,19
Huidige klimaat T20j	7306,29	36770,56	5,03
Midden scenario T2j	885,52	4680,07	5,29
Midden scenario T5j	3564,41	15380,17	4,31
Midden scenario T20j	16720,67	65264,32	3,90
Hoog Zomer scenario T2j	3160,31	12676,87	4,01
Hoog Zomer scenario T5j	13383,61	55526,88	4,15
Hoog Zomer scenario T20j	80548,79	204680,89	2,54

Op basis van deze tabel kan besloten worden dat verandering in hoeveelheid overstromingswater zeker niet te onderschatten is. Het blijkt dat er onder alle terugkeerperiodes en klimaatscenario's een niet te verwaarlozen hoeveelheid water extra op straat komt te staan. Dit geeft aan dat de stad kwetsbaarder is ten gevolge van het hitte eiland effect. Het effect zorgt immers al snel voor 3 tot 5 keer meer water op straat.

Voor een terugkeerperiode van 2 jaar in het huidige klimaat, is er een zeer groot verschil te zien, veel groter dan in de andere gevallen. Deze grote factor in toename van overstromingswater is te wijten aan het feit dat in het geval van terugkeerperiode 2 jaar er sowieso al weinig water op straat staat en elke toename van water dus direct een relatief grote verandering met zich meebrengt. Om aan te tonen dat de verschillen in overstromingsvolumes ten gevolge van de twee soorten composietbuizen eigenlijk steeds verhoudingsgewijs hetzelfde zijn, is onderstaande grafiek 6.4 opgemaakt. Deze grafiek toont het verschil in de overstromingsvolumes tussen de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen voor de verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes. De grafiek toont voor terugkeerperiode 2 jaar dat de verschillen tussen de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen dicht bij elkaar liggen. Relatief gezien blijkt dus dat de toename in waterhoeveelheid op straat voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat in de lijn ligt van de toename in waterhoeveelheid voor de andere klimaatscenario's bij dezelfde terugkeerperiode.

De lijn van het Hoog Zomer scenario ligt beduidend hoger dan de lijn van het huidige klimaat en de lijn van het Midden scenario. De reden hiervoor is reeds verklaard in hoofdstuk 5 waarin aangegeven is dat in het Hoog Zomer scenario de frequentie van overstromingen veel hoger ligt dan in het huidige klimaat of in het Midden scenario. Tot slot kan uit de figuur ook afgeleid worden dat naarmate de terugkeerperiode groter wordt, ook het verschil in overstromingsvolumes groter wordt. Hoe hoger de terugkeerperiode, hoe sterker het hitte eiland effect een invloed heeft op de mate van overstroming.



Figuur 6.4: Verschil van de overstromingsvolumes zoals gevonden voor de composietbuizen van Ukkel en de composietbuizen van Antwerpen

6.3 1D naar 2D-visualisatiemethode op basis van het uitspreidingsalgoritme

De laatste methode die toegepast wordt om de impact van het hitte eiland effect te kunnen inschatten, is het uitvoeren van de 1D naar 2D-visualisatiemethode zoals uitgelegd in hoofdstuk 5 van deze masterproef. Overstromingskaarten worden opgesteld voor zowel de composietbuien van Ukkel als de composietbuien van Antwerpen om zo na te gaan wat het verschil is in overstromingsgebieden. Voor de bespreking van de resultaten wordt verwezen naar de zones zoals te zien in figuur 5.1.

De resultaten voor zowel het huidige klimaat, het Hoog Zomer scenario als het Midden scenario zijn te zien in onderstaande figuren 6.5, 6.6 en 6.7. Op dezelfde manier als beschreven in hoofdstuk 5 tonen deze kaarten een overzicht per scenario met alle terugkeerperiodes. Een threshold van 0,1 m is ingesteld waardoor alle waterdieptes van 0,1 m of groter weergegeven worden op de kaart. Vervolgens zijn de verschillende terugkeerperiodes als lagen op elkaar weergegeven en worden de kaarten zoals te zien in de drie figuren verkregen.

Deze drie figuren tonen de vergelijking van enerzijds de toestand wanneer een composietbui van Ukkel gebruikt is en anderzijds de situatie wanneer een composietbui van Antwerpen (met het hitte eiland effect) gebruikt is. Op basis van deze overstromingskaarten kan dan een inzicht verkregen worden in de verandering van overstromingen ten gevolge van het hitte eiland effect. De waterdieptes kunnen echter niet afgelezen worden uitgaande van deze figuren. In bijlage H kan voor elk scenario en elke terugkeerperiode apart de vergelijking teruggevonden worden en worden de waterdieptes op gedetailleerdere wijze aangegeven.

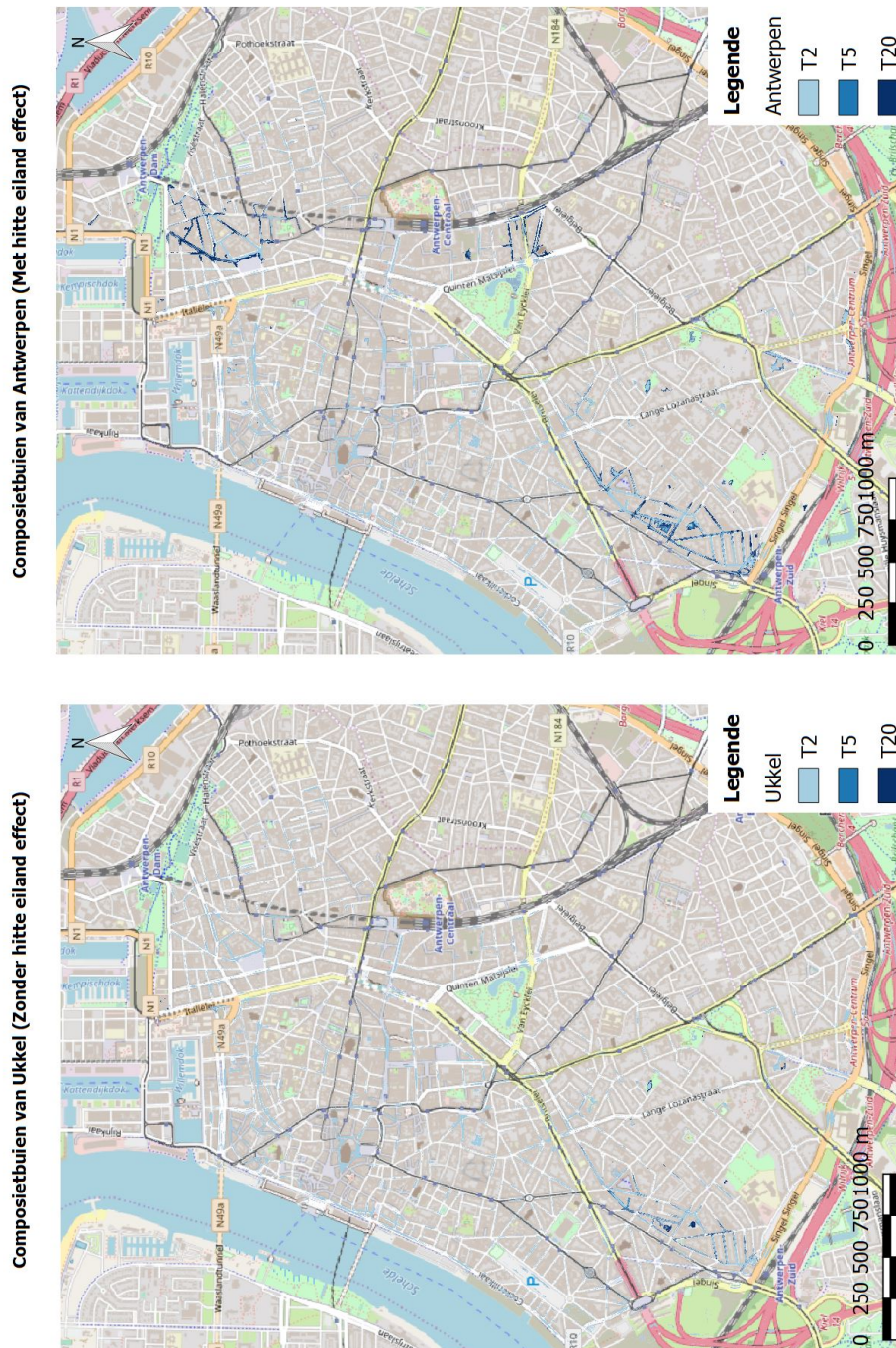
Deze overstromingskaarten bevestigen de resultaten van deel 6.1 en deel 6.2 dat de stad Antwerpen meer wateroverlast kent ten gevolge van het hitte eiland effect. Op de overstromingskaarten is te zien dat onder invloed van het hitte eiland effect de overstromingsgebieden lichtelijk uitspreiden en dat er meer donkerblauw te zien is in het geval van de composietbuien van Antwerpen wat erop wijst dat voornamelijk voor een terugkeerperiode van 20 jaar de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden groter wordt. Ten gevolge van het hitte eiland effect zullen overstromingen dus groter en kritischer zijn voor de stad.

Wanneer afzonderlijk gekeken wordt naar vergelijking voor de verschillende terugkeerperiodes en klimaatscenario's apart (figuren in bijlage H) vallen ook een aantal zaken op die aansluiten bij de besluiten uit deel 6.1 en 6.2.

Voor het **huidige klimaat** valt als eerste op dat voor een terugkeerperiode van 2 jaar er amper verschil te zien is tussen de overstromingskaarten. Het enige verschil doet zich voor ter hoogte van de Paleisstraat in zone A waar ten gevolge van het hitte eiland effect meer water op straat terecht komt.

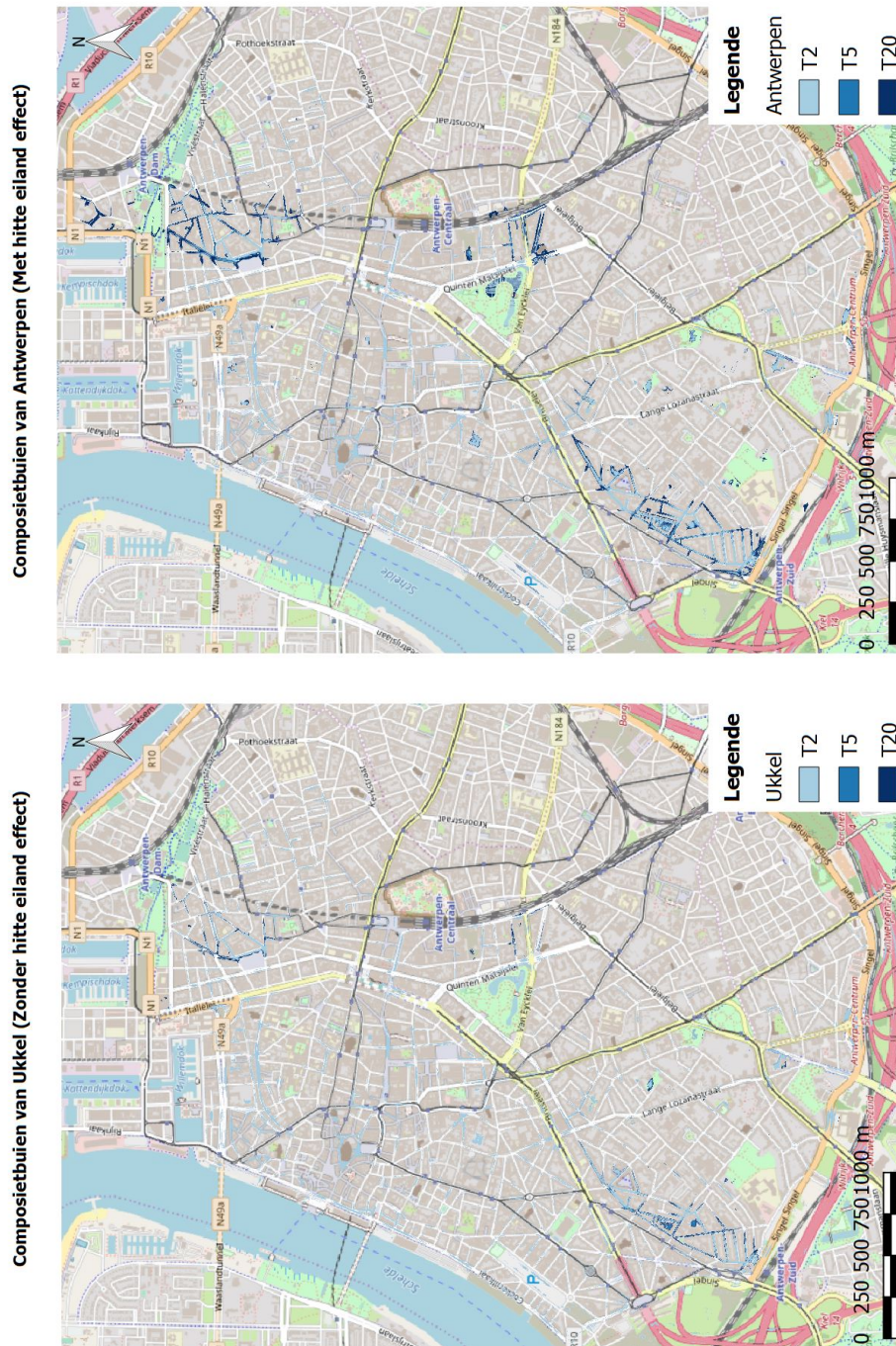
In het geval van een terugkeerperiode van 5 jaar, zal bij inrekenen van het hitte

Hitte eiland effect - Vergelijking Huidig klimaat



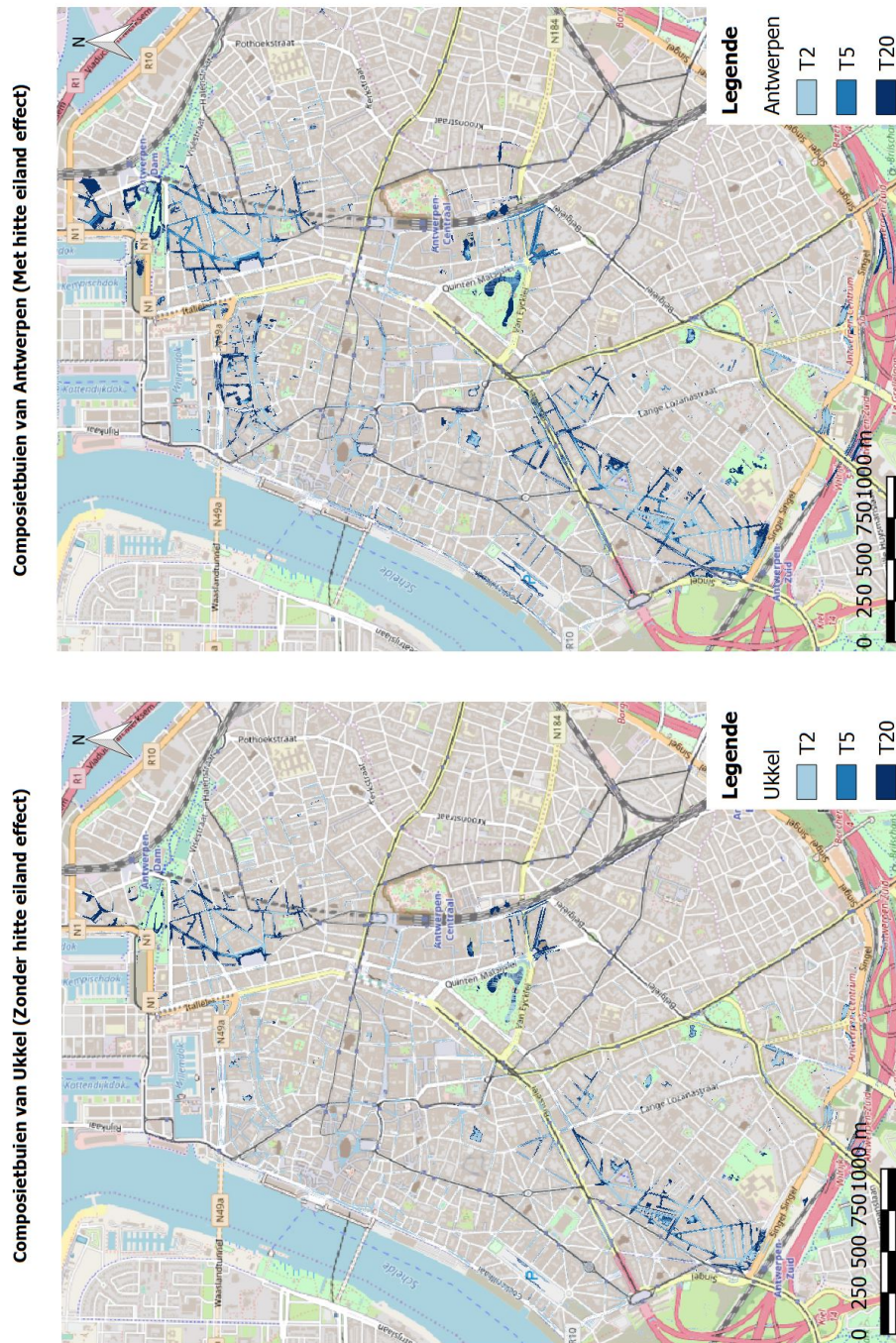
Figuur 6.5: Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het huidige klimaat

Hitte eiland effect - Vergelijking Midden scenario in 2100



Figuur 6.6: Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het Midden klimaatscenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur 6.7: Effect van het hitte eiland effect in de stad Antwerpen voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

eiland effect, het gebied rond de Brederodewijk (zone A) meer blauw kleuren dan in het geval van gebruik van de composietbuizen van Ukkel. Waar de Brederodewijk bij gebruik van de composietbuizen van Ukkel nog bijna geen overstroming kent, staat het water ten gevolge van het hitte eiland effect in sommige straten ongeveer 0,3 tot 0,4 m hoog.

Voor een terugkeerperiode van 20 jaar zijn er duidelijkere verschillen te zien in de kritische gebieden van Antwerpen. Ten gevolge van het hitte eiland effect overstroomt nu de hele Brederodewijk (zone A) met waterdieptes tot bijna 0,5 m. Ook aan het gebied in zone B is er een uitspreiding te zien van het overstromingsgebied en lopen de waterdieptes op tot boven 0,5 m.

Bij het **Midden scenario** kunnen ongeveer dezelfde besluiten getrokken worden: Voor een terugkeerperiode van 2 jaar kan opnieuw gesteld worden dat het enige verschil zich voordoet ter hoogte van de Paleisstraat in zone A.

Voor een terugkeerperiode van 5 jaar overstroomt de hele zone A en kent dit gebied grotere waterdieptes dan zonder het hitte eiland effect. In het geval van de situatie zonder het hitte eiland effect is de overstroming in deze zone A nog beperkt. Ook zone B kleurt donkerder blauw ten gevolge van het hitte eiland effect en kent dus meer water op straat.

De terugkeerperiode van 20 jaar toont, onder de situatie met het hitte eiland effect, ter hoogte van de Brederodewijk in zone A waterdieptes die ongeveer 0,5 m zijn terwijl dit zonder hitte eiland effect beperkt blijft tot ongeveer 0,2 tot 0,3 m. In het deel van Antwerpen aan zone B lopen de waterdieptes zelfs nog hoger op dan 0,5 m (tot ongeveer 0,7 á 0,8 m) door het hitte eiland effect.

Onder het Midden scenario met inrekening van het hitte eiland effect, begint er bovendien meer en meer water op straat te komen aan de rechterhoek van het stadspark (zone C).

Tot slot voor het **Hoog Zomer scenario** kan gezien worden dat voor een terugkeerperiode van 2 jaar niet alleen ter hoogte van de Brederodewijk in zone A er meer water zichtbaar wordt maar dat ook de waterdiepte ter hoogte van het gebied schuin onder het Eilandje in zone B toeneemt.

Voor een terugkeerperiode van 5 jaar doet dit effect zich nog sterker voor en is er grote uitbreiding van het overstromingsgebied in zone B te zien. De waterdieptes in alle overstromingsgebieden lopen ten gevolge van het hitte eiland effect al snel op tot 0,5 m en hoger terwijl dit voor het de situatie zonder het hitte eiland effect gemiddelde gezien maar 0,3 m is.

Voor een terugkeerperiode van 20 jaar kleurt het hele gebied donkerblauw wat wijst op waterdieptes groter dan 0,5 m. Zonder het hitte eiland effect, blijft het merendeel van de waterdieptes rond of net onder de grens van 0,5 m. Het grootste effect is bijgevolg te zien in het Hoog Zomer scenario voor een terugkeerperiode van 20 jaar, wat perfect overeenkomt met wat te zien is in figuur 6.4.

6.4 Besluit

Om het effect van het hitte eiland te kunnen kwantificeren is een vergelijking gemaakt van de composietbuien van Ukkel tegenover de composietbuien van Antwerpen. Uit deze vergelijking volgt dat de neerslagintensiteiten die horen bij een bui die gemiddeld gezien in Vlaanderen om de 20 jaar voorkomt, in Antwerpen behoren tot een bui die gemiddeld gezien om de ongeveer 5 jaar voorkomt. Het hitte eiland effect zorgt dus zeker voor verhoogde neerslagintensiteiten boven de stad.

Deze verhoogde neerslagintensiteiten zorgen bovendien voor meer wateroverlast. Ongeveer 3 tot 5 keer meer overstromingswater is aanwezig ten gevolge van het hitte eiland effect.

Weergave van de overstromingsvolumes op overstromingskaarten biedt inzicht in de verandering van uitgestrektheid van overstromingsgebieden en de veranderingen in waterdieptes. De uitgestrektheid van deze overstromingsgebieden blijven, zeker voor de kleinere terugkeerperiodes min of meer gelijk. Voor een terugkeerperiode van 20 jaar en in het geval van het Hoog Zomer scenario is de uitgestrektheid van de overstromingsvolumes wel groter wanneer het hitte eiland effect in rekening wordt genomen. Algemeen gezien is er al snel een toename in de waterdieptes van 20 tot 30 cm in vergelijking met de overstromingsdieptes die bereikt worden onder invloed van de composietbuien van Ukkel.

Het hitte eiland effect heeft dus zeker een nadelige invloed op de wateroverlast in de stad en moet bijgevolg meegenomen worden in de zoektocht naar gepaste maatregelen om de stad Antwerpen te beschermen tegen overmatige wateroverlast.

Hoofdstuk 7

Communicatie naar externen en beleidsmakers

Het overbrengen van de resultaten op een duidelijke en verhelderende manier naar beleidsmakers en andere belanghebbenden, is eveneens één van de vooropgestelde doelstellingen van deze masterproef. Enerzijds is hieraan voldaan door het opstellen van de verschillende overstromingskaarten in hoofdstukken 5 en 6 maar anderzijds zijn er nog andere, meer interactieve manieren mogelijk. In dit hoofdstuk wordt daarom ingegaan op de methode van een WebGIS die gebruikers toelaat om op interactieve wijze informatie af te lezen van de overstromingskaarten uit hoofdstuk 5.

7.1 WebGIS

Het gebruik van een WebGIS laat toe om data uit een GIS-programma online te publiceren zodanig dat het zichtbaar wordt voor andere gebruikers. Voor deze masterproef is gebruik gemaakt van het open source programma QGIS om de WebGIS te maken. Het uiteindelijke resultaat dat verkregen is in het kader van deze masterproef, is een website met een webversie van de overstromingskaarten uit hoofdstuk 5. De methodologie voor het opstellen van de WebGIS en de bijhorende resultaten worden in wat volgt besproken.

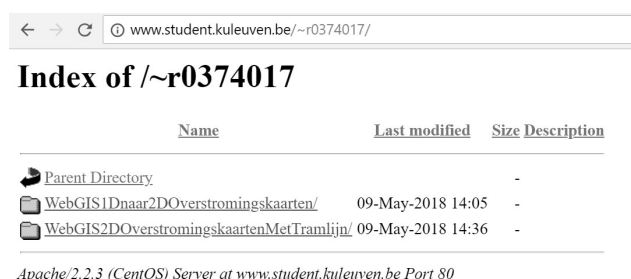
7.1.1 Methodologie

De eerste stap voor het verkrijgen van de webversie van de overstromingskaarten, is het toepassen van de “QGIS2Web” plugin. Deze plugin laat toe aan te duiden welke kaartlagen gepubliceerd dienen te worden, wat de achtergrondlaag is van de online kaarten, extra tools toe te voegen zoals een meettool, locatiebepaling, etc.

Voor deze masterproef zijn de WebGIS-kaarten eenvoudig gehouden. De resultaten van de 1D naar 2D- en 2D-visualisatiemethode (hoofdstuk 5) zijn weergegeven in de WebGIS voor het huidige klimaat, Midden klimaatscenario in 2100 en het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 en voor de verschillende terugkeerperiodes 2 jaar, 10 jaar, 25 jaar en 100 jaar. Daarnaast is toegelaten aan de gebruiker in de WebGIS om

in- en uit te zoomen op de kaart en is er een mogelijkheid toegevoegd tot opmeting. Uiteraard zijn er nog vele uitbreidingen mogelijk, maar deze zijn niet van toepassing voor deze masterproef.

De output van deze plugin is een HTML-pagina. Een server is bijgevolg nodig om deze pagina's te publiceren op het internet. KULeuven biedt de mogelijkheid aan studenten om op een server van de universiteit een persoonlijke FTP-ruimte te gebruiken door met behulp van het programma FileZilla de files online te plaatsen [52]. De WebGIS-kaarten zijn hierdoor online beschikbaar maar deze webpagina kent geen enkele layout zoals te zien in onderstaande figuur 7.1. Enkel een verwijzing naar de HTML-pagina's is terug te vinden op deze webpagina. Daarom is gezocht naar een manier om een website te maken die verwijst naar de HTML-pagina's op de server van de KULeuven.



Figuur 7.1: WebGIS op server van KULeuven

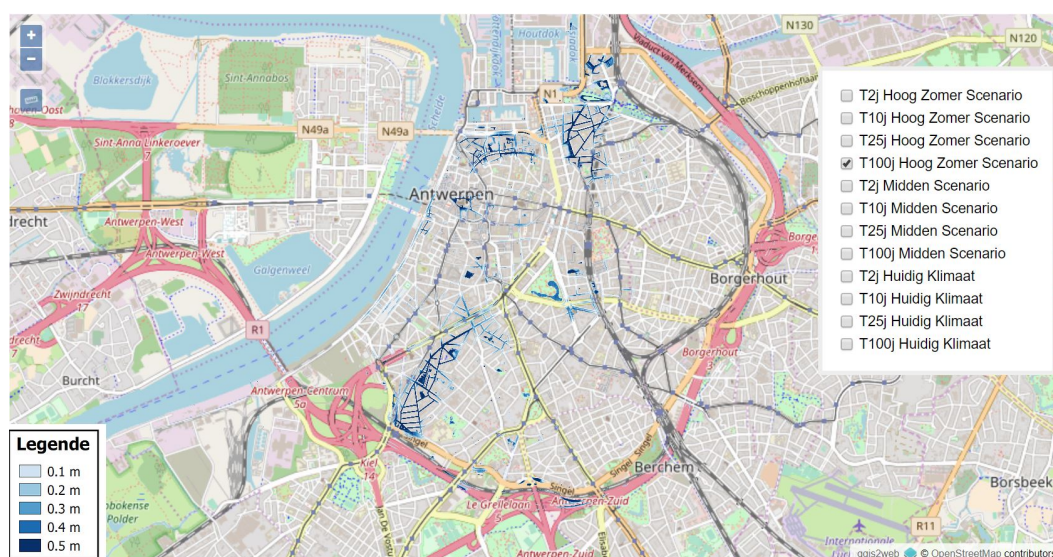
Er is gebruik gemaakt van de website Wix.com om op snelle wijze een overzichtelijke website te maken [53]. Deze website gebruikt een verwijzing naar de webpagina waarop de HTML-bestanden zijn toegevoegd waardoor de HTML-pagina's rechtstreeks zichtbaar zijn op de Wix-pagina. Door verder de lay-out van deze persoonlijke Wix-website aan te passen wordt een duidelijke website verkregen die toelaat om de WebGIS-kaarten te raadplegen.

7.1.2 Resultaten

Een voorbeeld van een WebGIS-kaart is terug te vinden in onderstaande figuur 7.2. De andere WebGIS-kaarten en een verdere detaillering van deze kaarten is uiteraard ook te zien op de website zelf (zie deel 7.2.3).

Op de figuur is te zien dat de mogelijkheid gelaten is aan de gebruiker om zelf de laag aan te duiden waarover informatie gewenst is. De symbolen aan de linkerbovenkant laten toe om in en uit te zoomen op de kaart of om een bepaalde afstand op te meten. Aan de linkeronderkant is een legende toegevoegd om de kleurencode van het overstromingswater aan te duiden.

Deze WebGIS-kaarten zijn bijgevolg volledig gelijk aan de overstromingskaarten uit hoofdstuk 5, al kan nu de gebruiker zelf inzoomen op een gebied waarover meer



Figuur 7.2: Voorbeeld van de WebGIS voor de 1D naar 2D-visualisatiemethode

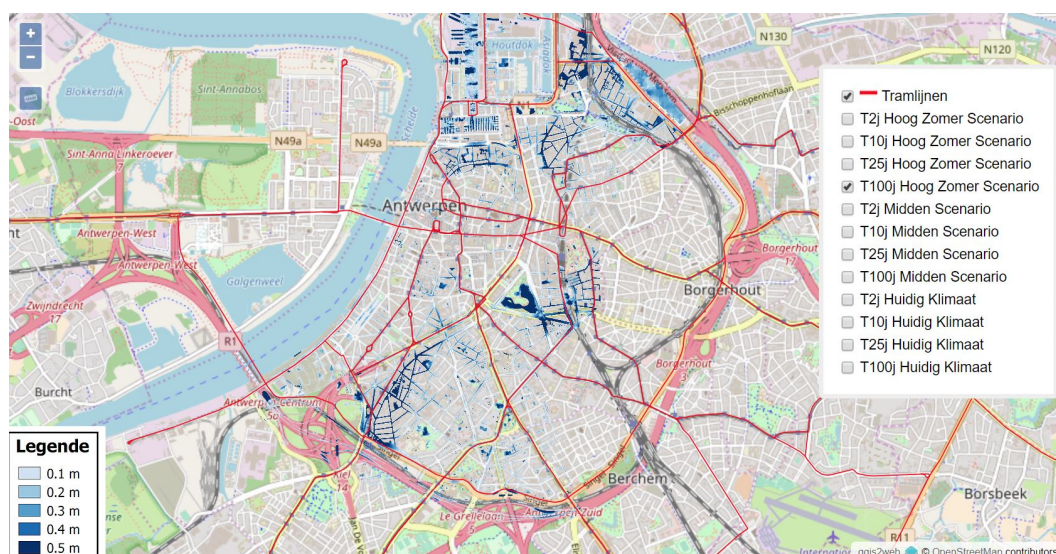
gedetailleerde informatie gewenst is.

Naast het publiceren van de overstromingskaarten, kunnen de WebGIS-kaarten gebruikt worden om bijvoorbeeld een visuele kwantificering van eventuele schade of hinder uit te voeren. Om dit principe aan te tonen is op de WebGIS die de 2D-visualisatiemethode omvat, een extra laag toegevoegd die de bovengrondse tramlijnen in Antwerpen toont. Door deze laag samen met één van de overstromingslagen te tonen, kan nagegaan worden in hoeverre de tramlijnen hinder ondervinden van eventuele overstromingen onder de verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes. Onderstaande figuur 7.3 toont het voorbeeld van een WebGIS met de tramlijnen.

Door deze WebGIS uit te breiden met demografische gegevens, transportinfrastructuur, historische gebouwen, etc. wordt de WebGIS de ideale tool om kritische punten in de stad aan te duiden en deze over te brengen naar beleidsmakers om bijgevolg te helpen in het nemen van beslissingen omtrent maatregelen voor het vermijden of het beheersen van de overstromingen.

7.1.3 Toegang tot de WebGIS

De WebGIS van deze masterproef kan geraadpleegd worden op volgende internet-adres: <http://celinevanhavere.wixsite.com/home>. Toegang tot de website kan verkregen worden met het wachtwoord: ThesisCVH2018.



Figuur 7.3: Voorbeeld van de WebGIS voor de 2D-visualisatiemethode met aanduiding van tramlijnen

7.2 Besluit

De WebGIS is een nuttige tool die toelaat om op interactieve wijze informatie over te dragen aan belanghebbende en beleidsmakers. De tool kan echter nog verder uitgebreid worden door extra informatie zoals bijvoorbeeld demografische gegevens, toe te voegen. Op deze manier wordt de WebGIS omgebouwd tot een ideaal hulpmiddel om op snelle wijze een visueel beeld te krijgen van schade en hinder in de stad.

Uiteraard zijn er nog andere visualisatiemethodes mogelijk om de communicatie naar externen en beleidsmakers te optimaliseren. Een voorbeeld hiervan is de opmaak van een 3D-animatie die toelaat om een ruimtelijk inzicht te krijgen in de overstrooming. Door de waterdieptes in 3D te zien kan sneller een beeld gevormd worden van de problematiek en bijhorende schade dan enkel deze waterdieptes aan te duiden op een 2D-kaart.

Hoofdstuk 8

Besluit en aanbevelingen voor de toekomst

8.1 Besluit

Onder invloed van de klimaatverandering en de bijhorende toename in temperatuur op de aarde, zal het in de wintermaanden natter worden. In de zomer echter zullen er langere droge periodes zijn die afgewisseld zullen worden met neerslagperiodes met een verhoogde neerslagintensiteit tegenover het huidige klimaat [7]. Vooral deze zomeronweders zijn problematisch voor steden en zullen zorgen voor een toename in wateroverlast. Naast de toename in kwetsbaarheid voor overstromingen zijn steden ook onderworpen aan hitte stress. De vele verharding in steden zorgt voor een opslag van warmte waardoor de temperatuur in stedelijke omgeving toeneemt bovenop de temperatuuroptoe name door de klimaatverandering [10]. Ten gevolge van deze fenomenen gaat de leefbaarheid in de stad achteruit en kennen steden een aantal grote uitdagingen om de gevolgen van klimaatverandering te beperken.

Deze masterproef focust zich op de problematiek omtrent toenemende wateroverlast. Concreet gaat deze masterproef na wat de impact is van de klimaatverandering op stedelijke overstromingen en dit specifiek voor de stad Antwerpen.

Er is uitgegaan van drie verschillende klimaatscenario's. Het huidige klimaat is enerzijds vergeleken met het Midden scenario dat een toestand weergeeft van gemiddelde piekafvoeren en anderzijds met het Hoog Zomer scenario waarin een toestand beschouwd wordt van hevige neerslaggebeurtenissen met hoge piekafvoeren. De tijdshorizon waarmee het huidige klimaat vergeleken is, is het jaar 2100.

De hele studie baseert zich als neerslaggegevens op de composietbuien van Ukkel, die als representatief gelden voor Vlaanderen en op de composietbuien van Antwerpen, specifiek voor het studiegebied.

De impact van klimaatverandering in de stad Antwerpen is vervolgens aangetoond door middel van drie verschillende methodes. Als eerste is nagegaan met behulp van een 1D-visualisatie wat de verandering is in frequentie van de neerslaggebeurtenissen

waarvoor overstroming optreedt in de knopen van het rioleringsnetwerk. Een simulatie in InfoWorks ICM op basis van flood cones is hiervoor gebruikt. De methode liet toe te besluiten dat wanneer het klimaat verandert richting het Midden scenario, de frequentie van de neerslaggebeurtenissen waarvoor overstroming optreedt met een factor 4 tot 5 toeneemt. Een kritische neerslaggebeurtenis zal met andere woorden in dit scenario 4 tot 5 keer sneller voorkomen. In het geval van het Hoog Zomer scenario blijkt dat deze factor in frequentieverschuiving zelfs oploopt tot een factor 10. Maatregelen in de stad zijn dus zeker nodig om de overstromingen die in de toekomst vaker zullen voorkomen te milderen of in het beste geval zelfs te vermijden. Naast deze kwantificering is op basis van 2D-overstromingskaarten nagegaan wat de impact is van de klimaatverandering op de stad. Twee methodes zijn hiervoor toegepast. Als eerste methode is verder gewerkt met de simulaties met de flood cones en is het water door middel van een uitspreidingsalgoritme op straat gebracht. Bij de tweede methode is een modellering uitgevoerd in InfoWorks ICM met een 2D mesh die rechtstreeks een 2D-simulatie geeft.

Uit deze 2D-overstromingskaarten blijkt dat er vandaag al drie gebieden zijn die onder invloed van een ernstige neerslaggebeurtenis wateroverlast kennen: Het gebied aan de Brederodewijk in Antwerpen-Zuid, het gebied schuin onder het Eilandje ter hoogte van Park Spoor Noord in Antwerpen-Noord en het gebied naast het stadspark. Onder invloed van het Midden scenario zal de grootte van deze overstromingsgebieden niet zozeer veranderen maar zal de stad wel te maken krijgen met hogere waterstanden. In vergelijking met het huidige klimaat zal een neerslaggebeurtenis met eenzelfde terugkeerperiode zorgen voor een toename van de waterstanden met 20 cm. Onder invloed van het Hoog Zomer scenario zullen de huidige kwetsbare gebieden zich verder uitspreiden doorheen de stad. Onder invloed van de grotere terugkeerperiodes zal zelfs het hele gebied kwetsbaar worden voor wateroverlast. In vergelijking met het huidige klimaat is er een globale toename van de waterdieptes van bijna een halve meter. Plaatselijk kunnen de waterstanden oplopen tot 1 m.

De drie gebruikte methodes laten allen toe om inzicht te verkrijgen in de verandering van kwetsbaarheid van de stad. De 1D-visualisatie doet dit op eenvoudige maar snelle wijze. De 1D naar 2D-visualisatie met het uitspreidingsalgoritme geeft een eerste inzicht in de uitgestrektheid en de waterdieptes van de overstromingen, zij het op meer benaderende wijze maar toch met voldoende realistische resultaten. De 2D-visualisatie geeft de meest nauwkeurigste resultaten aangezien het op de meest realistische wijze de (ondergronds) stroming in rekening brengt. De drie methodes hebben allen hun voor- en nadelen maar geven allemaal een goed inzicht in de kwetsbaarheid van de stad en kunnen bovendien allen gebruikt worden om de impact van klimaatverandering in te schatten.

Naast de verandering in kwetsbare gebieden is nagegaan hoe het klimaat van Antwerpen verschilt tegenover de rest van Vlaanderen. De invloed van het hitte eiland effect op wateroverlast is gekwantificeerd. Vergelijking van de composietbuien van Antwerpen en Ukkel liet toe te besluiten dat een neerslaggebeurtenis die gemiddeld gezien in Vlaanderen om de 20 jaar voorkomt in de stad Antwerpen gemiddeld gezien

om de ongeveer 5 jaar voorkomt. Het hitte eiland effect heeft een grote impact op de wateroverlast in de stad. Algemeen kan een bijkomende wateroverlast van 20 tot 30 cm verwacht worden bovenop de waterdieptes die bereikt zouden worden indien een gemiddelde Vlaamse neerslaggebeurtenis zich voordoet. Ook de uitgestrektheid van de overstromingsgebieden zal, onder invloed van neerslaggebeurtenissen van hogere terugkeerperiodes en zeker in het Hoog Zomer scenario, toenemen tegenover een situatie zonder het hitte eiland effect.

Kortom, de invloed van de klimaatverandering is aanwezig en adaptieve maatregelen zijn nodig om de stad, haar inwoners en haar erfgoed te beschermen. De meest kritische vraag die zich stelt is naar welk klimaatscenario uiteindelijk geëvolueerd wordt.

8.2 Aanbevelingen voor de toekomst

Tot slot zijn er ook nog een aantal zaken die verder onderzocht kunnen worden in de toekomst om het onderzoek van deze masterproef verder uit te diepen. De belangrijkste aanbevelingen worden hier in een aantal categorieën opgesomd.

1. InfoWorks ICM model

- **Validatie en optimalisatie van het rioleringsnetwerk**

Het gebruikte rioleringsmodel van deze masterproef kende een niet al te beste validatie zoals aangetoond in delen 3.5.4 en 4.4.3. Een aantal inconsistenties zijn teruggevonden en ook komen de historische neerslaggebeurtenissen niet helemaal overeen met wat het model simuleert. De validatie is echter niet helemaal optimaal uitgevoerd waardoor deze resultaten ook niet helemaal betrouwbaar zijn. Verder onderzoek en optimalisatie van het model is bijgevolg nodig.

- **Randvoorwaarden in het rioleringsmodel**

Deze masterproef is uitgegaan van het rioleringsmodel waarbij de waterstanden in de Schelde niet meegenomen zijn en dus overstorting in de Schelde altijd mogelijk is. In realiteit is dit niet steeds mogelijk en sluiten de overstortschuiven wanneer de waterstanden in de Schelde te hoog zijn. De analyse in deze masterproef kan daarom herhaald worden door wel rekening te houden met de waterstanden in de Schelde en op basis daarvan te kwantificeren wat de impact is op de stad. Zoals aangehaald in deel 3.5.3 zal er voornamelijk een extra druk zijn op het gebied ter hoogte van de Brederodewijk (zone A in deze masterproef). De exacte extra impact kan nagegaan worden.

Hierbij aansluitend kunnen ook de verandering in de waterstanden in de Schelde ten gevolge van de klimaatverandering meegenomen worden.

Onder invloed van de klimaatverandering zal immers niet alleen de hoeveelheid neerslag veranderen maar zal ook de zeespiegel een stijging ondergaan.

De waterstanden in de Schelde zullen hierdoor eveneens veranderingen ondergaan die een negatieve impact kunnen hebben op de stad. Deze zeespiegelstijging zou gekoppeld kunnen worden aan overstromingskanalen van de Schelde. De kwetsbaarheid van de stad Antwerpen kan dan nagegaan worden onder invloed van enerzijds overstromingen vanuit de Schelde en anderzijds overstromingen door bereiken van de capaciteit van de rioleringen.

2. Klimaatscenario's

- **Onzekerheden op klimaatscenario's**

De klimaatscenario's die gebruikt zijn, zijn bepaald voor 2100. Echter kennen de veranderingen in het klimaat nog een groot aantal onzekerheden. Doorheen de tijdspanne tussen nu en 2100 zal de uitstoot van broeikasgassen veranderen waardoor meer duidelijk zal worden naar welk klimaatscenario geëvolueerd wordt. Daarnaast zullen er ook nog variaties optreden op deze uitstoot waardoor ook de neerslagintensiteiten zullen variëren. Al deze opties zouden eigenlijk moeten meegenomen worden in de analyse om een meer exact beeld te krijgen van de klimaatverandering om naar de toekomst toe meer concreet te kunnen inschatten naar welk scenario het klimaat zal evolueren.

- **Composietbuien van Antwerpen**

De composietbuien van Antwerpen kunnen naar de toekomst toe verder aangepast worden op basis van de veranderingen van het klimaat waarna de analyse zoals beschreven in deze masterproef opnieuw kan gebeuren om meer en meer de onzekerheid van de klimaatscenario's uit te schakelen.

3. Visualisatiemethodes

- **1D naar 2D-uitspreidingsalgoritme**

Het 1D naar 2D-uitspreidingsalgoritme liet toe om een eerste realistische inschatting te kunnen maken van de uitgestrektheid en waterdieptes van de overstromingen in de stad. Echter is het algoritme nog minder nauwkeurig dan simulaties op basis van een 2D mesh en kent het algoritme ook een aantal beperkingen. Zoals aangegeven in deel 5.2.5 zijn er nog een aantal verbeteringen en uitbreidingen mogelijk van dit algoritme. De belangrijkste verbetering is om de waterophoping aan de rand van het DHM en aan uitgestrekte gebouwen te reduceren. Daarnaast kan er nagedacht worden om bijvoorbeeld de mogelijkheid tot infiltratie in rekening te brengen en om een eventuele bidirectionele koppeling tussen oppervlakte en rioleringssysteem uit te werken.

- **3D-visualisatie**

Een 3D-visualisatie kan uitgewerkt worden van de resultaten om een meer ruimtelijk inzicht te geven in de overstromingen.

4. Risico-analyse en communicatie

- **Risico- en kwetsbaarheidsanalyse**

Een risico-analyse zou uitgevoerd kunnen worden op basis van de aangereikte overstromingsresultaten in deze masterproef. Zo kan gekwantificeerd worden wat de schade zal zijn van deze overstromingen en wat de impact zal zijn op de inwoners van de stad zelf. Inzicht kan op deze manier verkregen worden wat de risico's zijn voor inwoners, gebouwen transportinfrastructuur, etc. ten gevolge van de overstromingen.

- **Uitbreiding van de WebGIS als communicatiemiddel**

Na bepaling van de risico- en kwetsbaarheidsanalyse kan de WebGIS uit hoofdstuk 7 verder uitgebreid worden met deze aspecten. Op deze manier wordt een globale tool aangereikt die niet alleen inzicht geeft in de mate van overstromingen in de stad maar ook aanduidt wat risico's zijn ten gevolge van de overstromingen. De uitgebreide WebGIS vormt dan een geschikt communicatiemiddel voor de bewustmaking van beleidsmakers en ander belanghebbenden.

5. Aanbevelingen voor de rioleringssector en de stad Antwerpen

Naast de aanbevelingen voor uitbreiding van de studie zoals besproken in deze masterproef, kunnen er op basis van de gevonden resultaten ook een aantal aanbevelingen opgemaakt worden ten aanzien van de rioleringssector en de stad Antwerpen zelf. Het is daarbij van belang om aandacht te vestigen op flexibele en duurzame oplossingen die onder alle klimaatscenario's gelden [1].

- **Aanpassingen in het huidige rioleringsstelsel**

Zoals aangetoond in hoofdstuk 5.1 zal onder invloed van het Midden klimaatscenario een maatgevende neerslaggebeurtenis waarvoor wateroverlast optreedt 4 tot 5 keer sneller voorkomen dan vandaag het geval is. In het Hoog Zomer scenario zal er zelfs een verandering zijn in terugkeerperiode van factor 10. Hieruit blijkt dat het oorspronkelijke rioleringsmodel niet meer zal voldoen. Een analyse van het huidige rioleringsstelsel is bijgevolg nodig om na te gaan of er plaatsen zijn waar eventuele uitbreiding mogelijk is en/of er aanpassingen mogelijk zijn aan het stelsel zodanig dat er meer water geborgen kan worden. De eerste stap hierbij kan bijvoorbeeld zijn om de delen in de stad die vandaag nog een gemend rioleringsstelsel hebben te veranderen tot een gescheiden stelsel.

Bij aanpassingen van het rioleringsstelsel moet wel nagedacht worden over maatregelen die toepasbaar en werkzaam zijn in alle klimaatscenario's. Aanpassingen mogen immers niet leiden tot een overdimensionering van het stelsel als blijkt dat het klimaat toch niet verandert richting het meest kwetsbare scenario [1].

- **Adaptieve maatregelen**

Een aanpassing van het rioleringsstelsel alleen zal niet voldoende zijn om weerstand te bieden tegen alle wateroverlast in de stad. Aandacht

kan daarom ook besteed worden aan het implementeren van adaptieve maatregelen die effectief zijn onder elk klimaatscenario. Voorbeelden van dergelijke adaptieve maatregelen zijn het implementeren van bufferzones, infiltratiezones in bijvoorbeeld het stadspark, het aanleggen van doorlatende verharding, voorzien van groendaken, etc [1]. Op deze manier kan het regenwater op vertraagde wijze afgevoerd worden naar het rioeringsstelsel. Een bijkomend voordeel is dat ook de grondwaterreserves aangevuld worden door de infiltratiezones.

- **Bewustmaking van de problematiek**

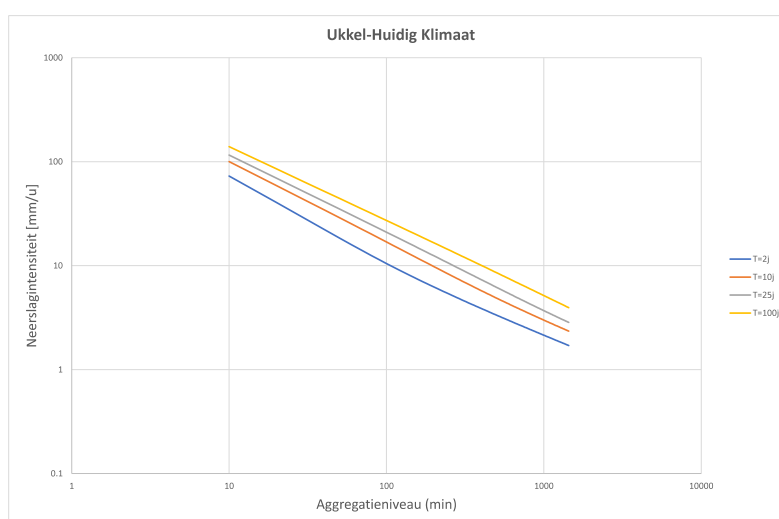
Alvorens maatregelen getroffen kunnen worden moeten de juiste beleidsmakers en beslissende bevoegdheden bewust gemaakt worden van de problematiek. Maatregelen kunnen immers maar geïmplementeerd worden indien alle bevoegde instanties hier achter staan en beseffen dat een oplossing nodig is om de stad te beschermen.

Bijlagen

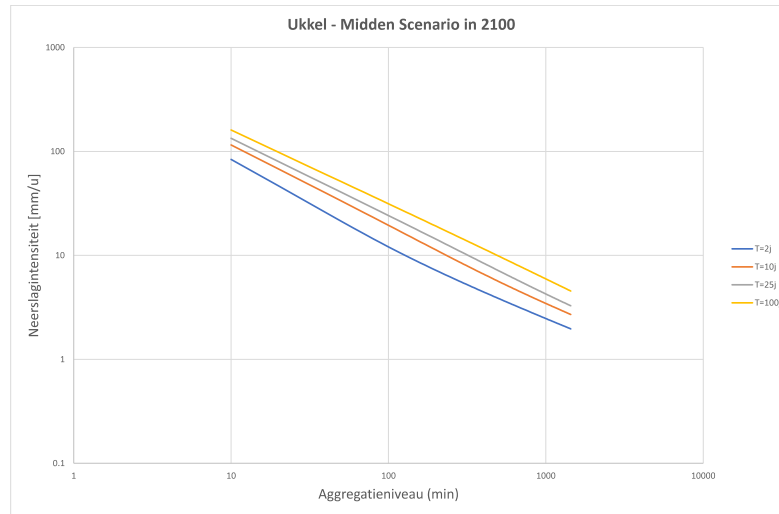
Bijlage A

IDF-curves van Ukkel en Deurne

A.1 IDF-Curves van Ukkel



Figuur A.1: IDF-curves voor Ukkel voor het Huidige klimaat voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar

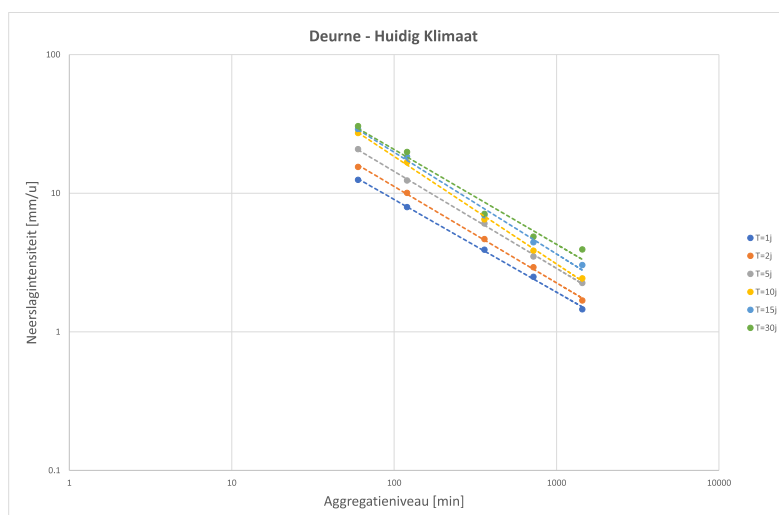


Figuur A.2: IDF-curves voor Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar

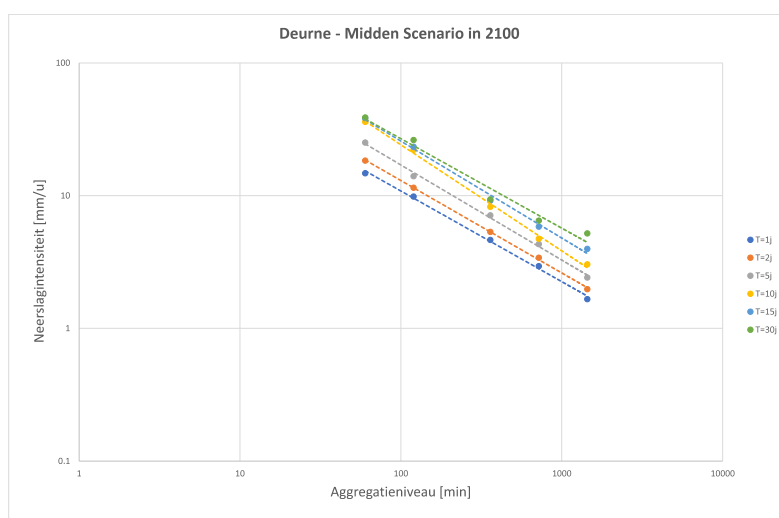


Figuur A.3: IDF-curves voor Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 2, 10, 25 en 100 jaar

A.2 IDF-Curves van Deurne



Figuur A.4: IDF-curves voor Deurne voor het huidige klimaat voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar



Figuur A.5: IDF-curves voor Deurne voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar



Figuur A.6: IDF-curves voor Deurne voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 15 en 30 jaar

Bijlage B

Neerslagdata Deurne en Ussel

B.1 Vergelijkende data voor het huidige klimaat

Aggregatieniveau	Deurne	Ussel
60 min	15,5 mm/u	15,88 mm/u
120 min	10,05 mm/u	9,09 mm/u
360 min	4,67 mm/u	4,16 mm/u
720 min	2,93 mm/u	2,64 mm/u
1440 min	1,68 mm/u	1,70 mm/u

Tabel B.1: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het huidige klimaat voor terugkeerperiode 2 jaar

Aggregatieniveau	Deurne	Ussel
60 min	27,20 mm/u	25,20 mm/u
120 min	16,75 mm/u	14,64 mm/u
360 min	6,48 mm/u	6,23 mm/u
720 min	3,85 mm/u	3,76 mm/u
1440 min	2,43 mm/u	2,34 mm/u

Tabel B.2: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ussel voor het huidige klimaat voor terugkeerperiode 10 jaar

B.2 Vergelijkende data voor het Midden Scenario

B.3. Vergelijkende data voor het Hoog Zomer Scenario

Aggregatieniveau	Deurne	Ukkel
60 min	18,39 mm/u	18,30 mm/u
120 min	11,47 mm/u	10,48 mm/u
360 min	5,33 mm/u	4,78 mm/u
720 min	3,41 mm/u	3,04 mm/u
1440 min	1,97 mm/u	1,96 mm/u

Tabel B.3: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiode 2 jaar

Aggregatieniveau	Deurne	Ukkel
60 min	35,98 mm/u	29,04 mm/u
120 min	22,16 mm/u	16,87 mm/u
360 min	8,25 mm/u	7,17 mm/u
720 min	4,73 mm/u	4,33 mm/u
1440 min	3,04 mm/u	2,7 mm/u

Tabel B.4: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ukkel voor het Midden klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiode 10 jaar

B.3 Vergelijkende data voor het Hoog Zomer Scenario

Aggregatieniveau	Deurne	Ukkel
60 min	26,31 mm/u	22,66 mm/u
120 min	16,93 mm/u	12,98 mm/u
360 min	8,07 mm/u	5,93 mm/u
720 min	4,81 mm/u	3,77 mm/u
1440 min	2,75 mm/u	2,43 mm/u

Tabel B.5: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiode 2 jaar

Aggregatieniveau	Deurne	Ukkel
60 min	61,17 mm/u	39,81 mm/u
120 min	37,25 mm/u	23,14 mm/u
360 min	13,46 mm/u	9,83 mm/u
720 min	7,48 mm/u	5,93 mm/u
1440 min	4,58 mm/u	3,70 mm/u

Tabel B.6: Vergelijking van de neerslagdata van Deurne en Ukkel voor het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100 voor terugkeerperiode 10 jaar

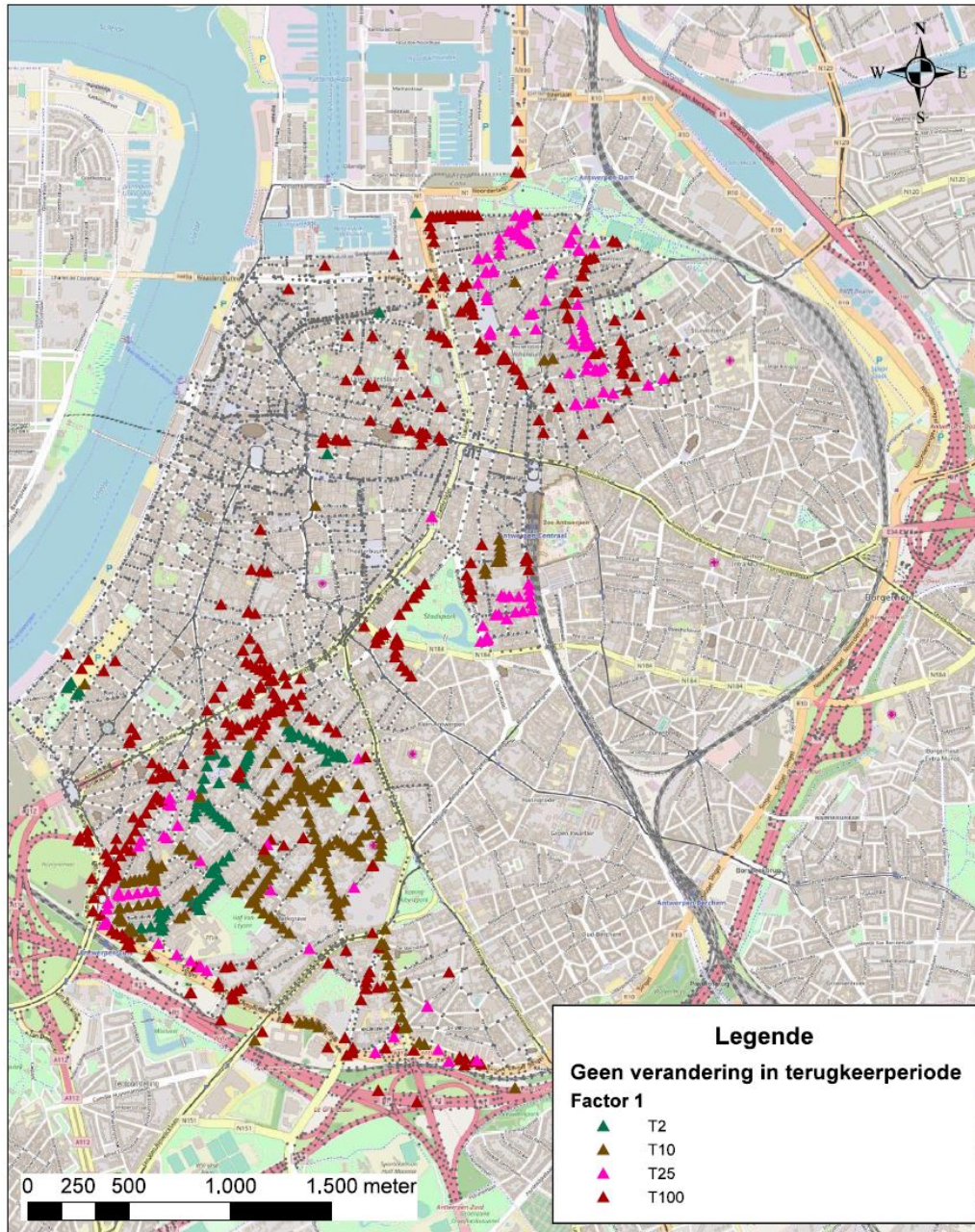
Bijlage C

Visualisatie van de frequentieverschuiving

C.1 Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden scenario

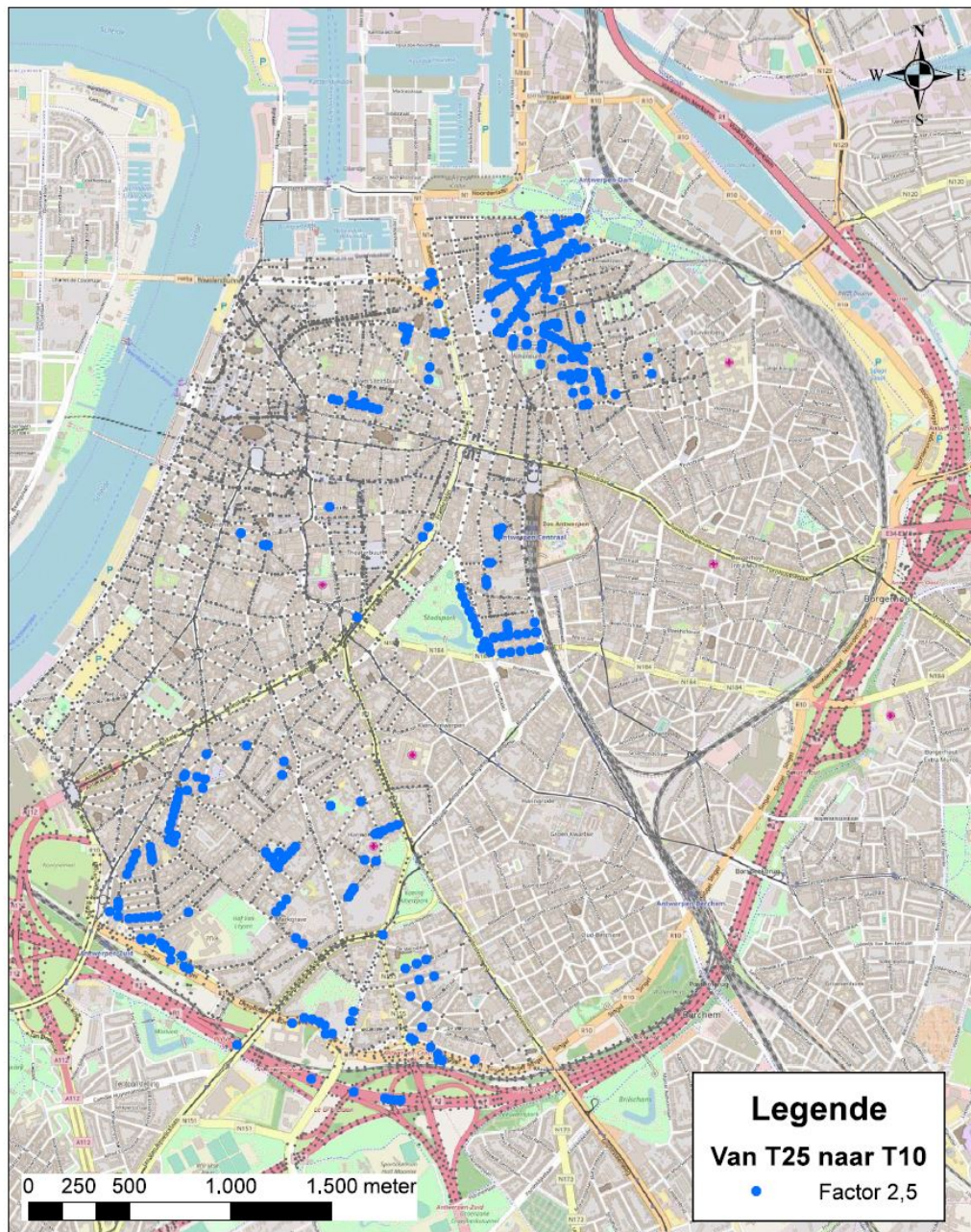
Onderstaande figuren tonen de opsplitsing van de frequentieverschuiving om een duidelijk beeld te hebben van welke knopen beïnvloed worden door een bepaald factor. De kaarten die hier getoond worden geven respectievelijk beeld van de knopen met factor 1 (dezelfde terugkeerperiode in beide klimaatscenario's); factor 2,5; factor 4; factor 5; factor 10 en de kaart met knopen die enkel overstromen in het Midden scenario voor T100.

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
Geen verandering in terugkeerperiode**



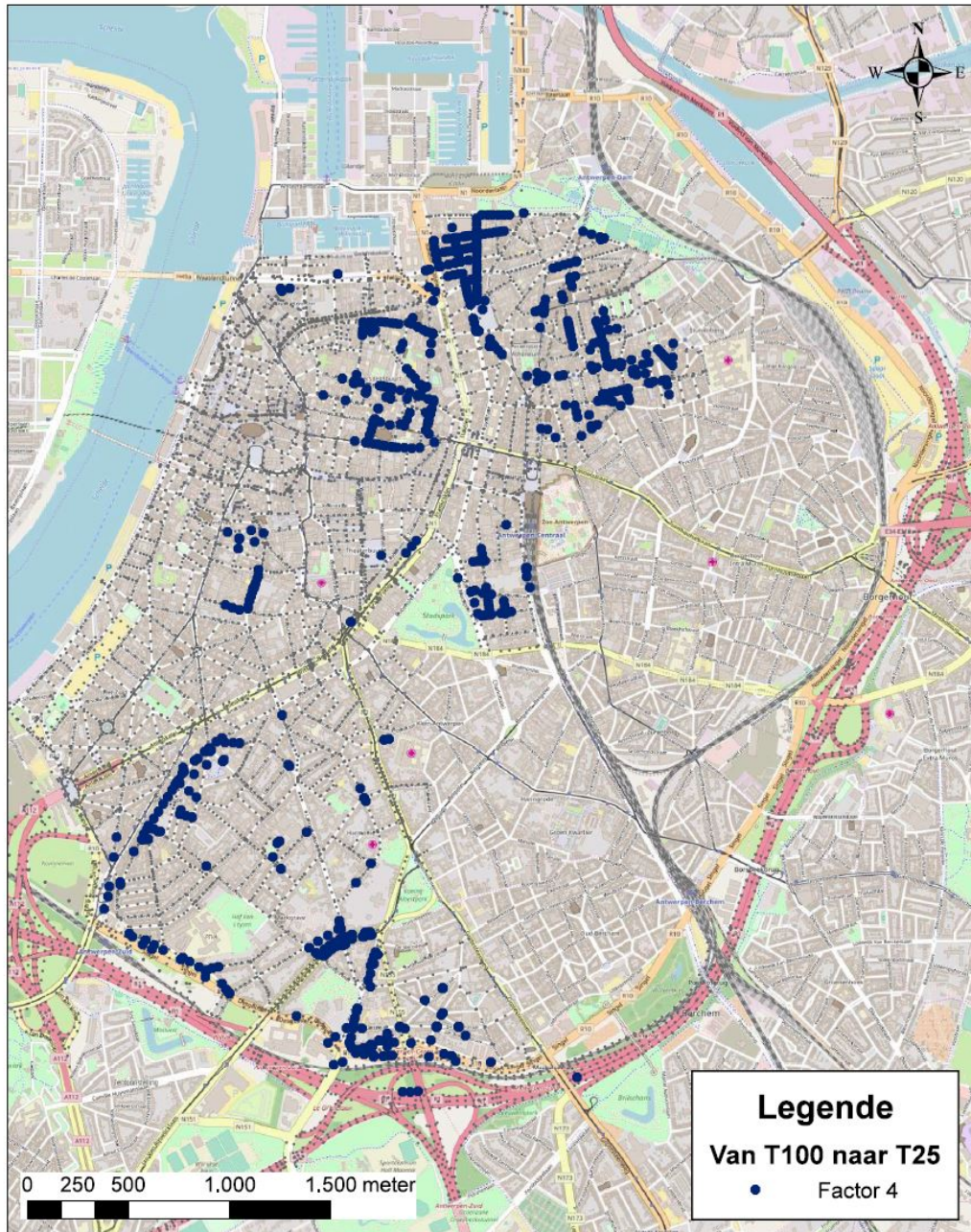
Figuur C.1: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Geen verandering in terugkeerperiode

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T25 naar T10**



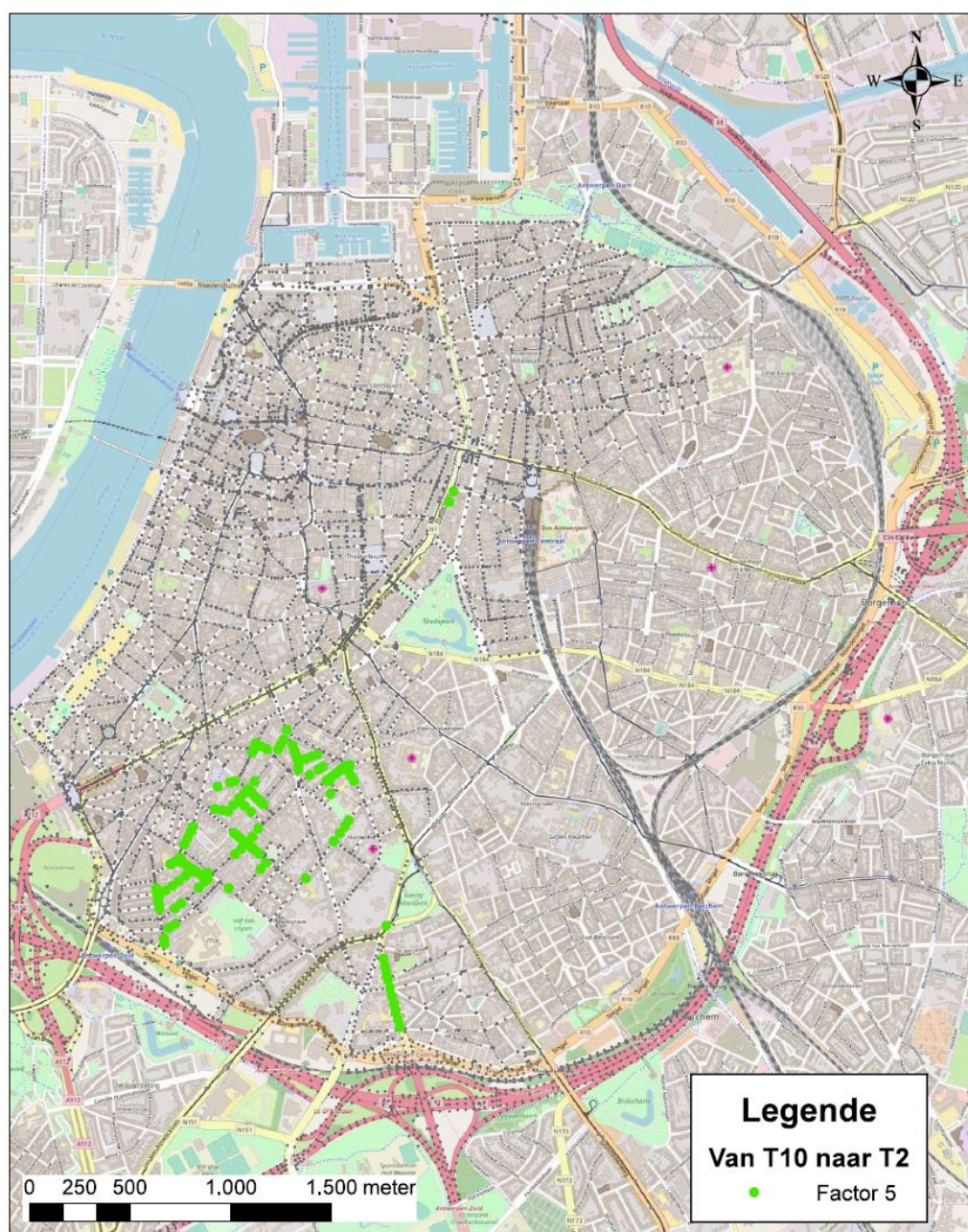
Figuur C.2: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T25 naar T10

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T100 naar T25**



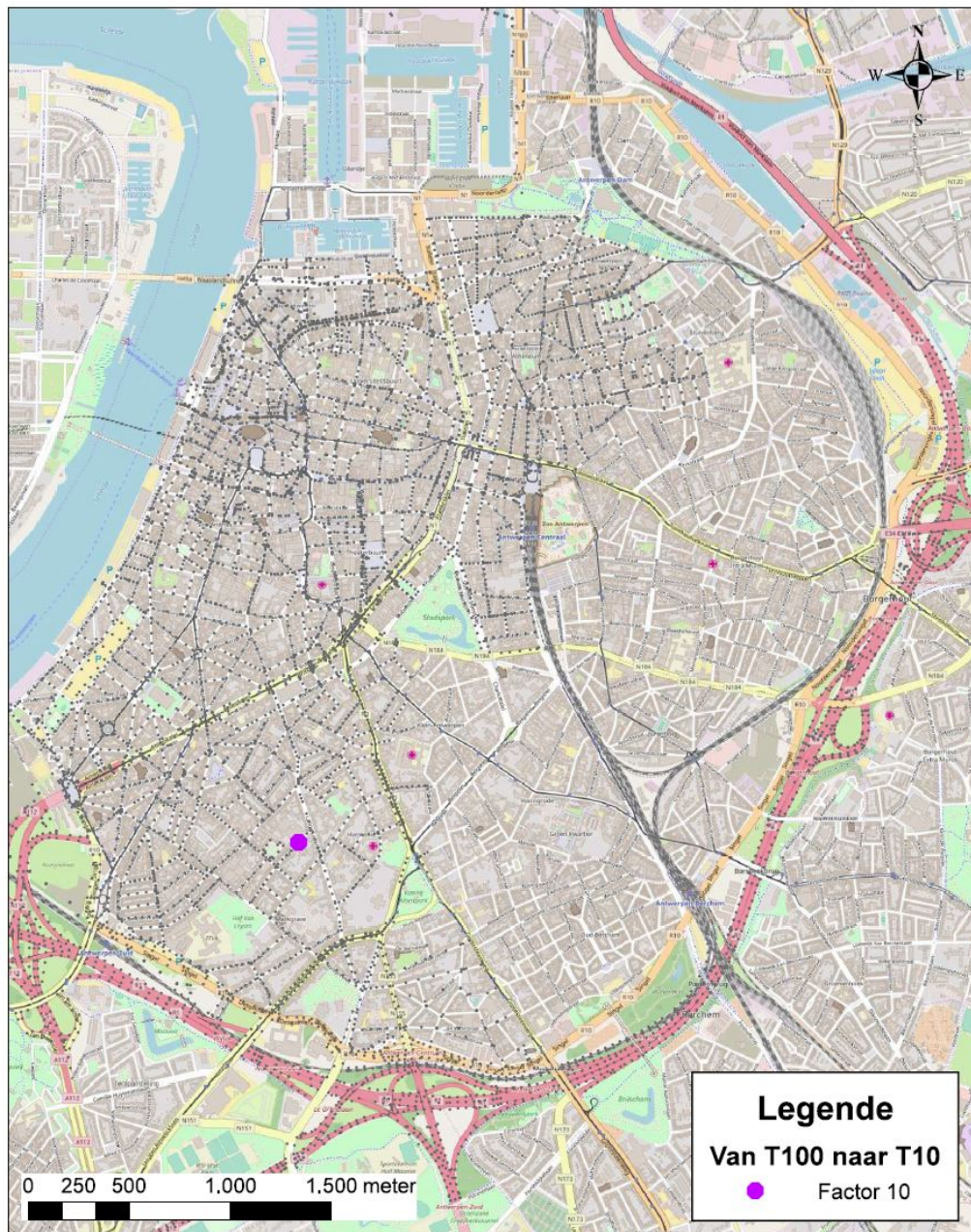
Figuur C.3: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T25

Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata: van T10 naar T2



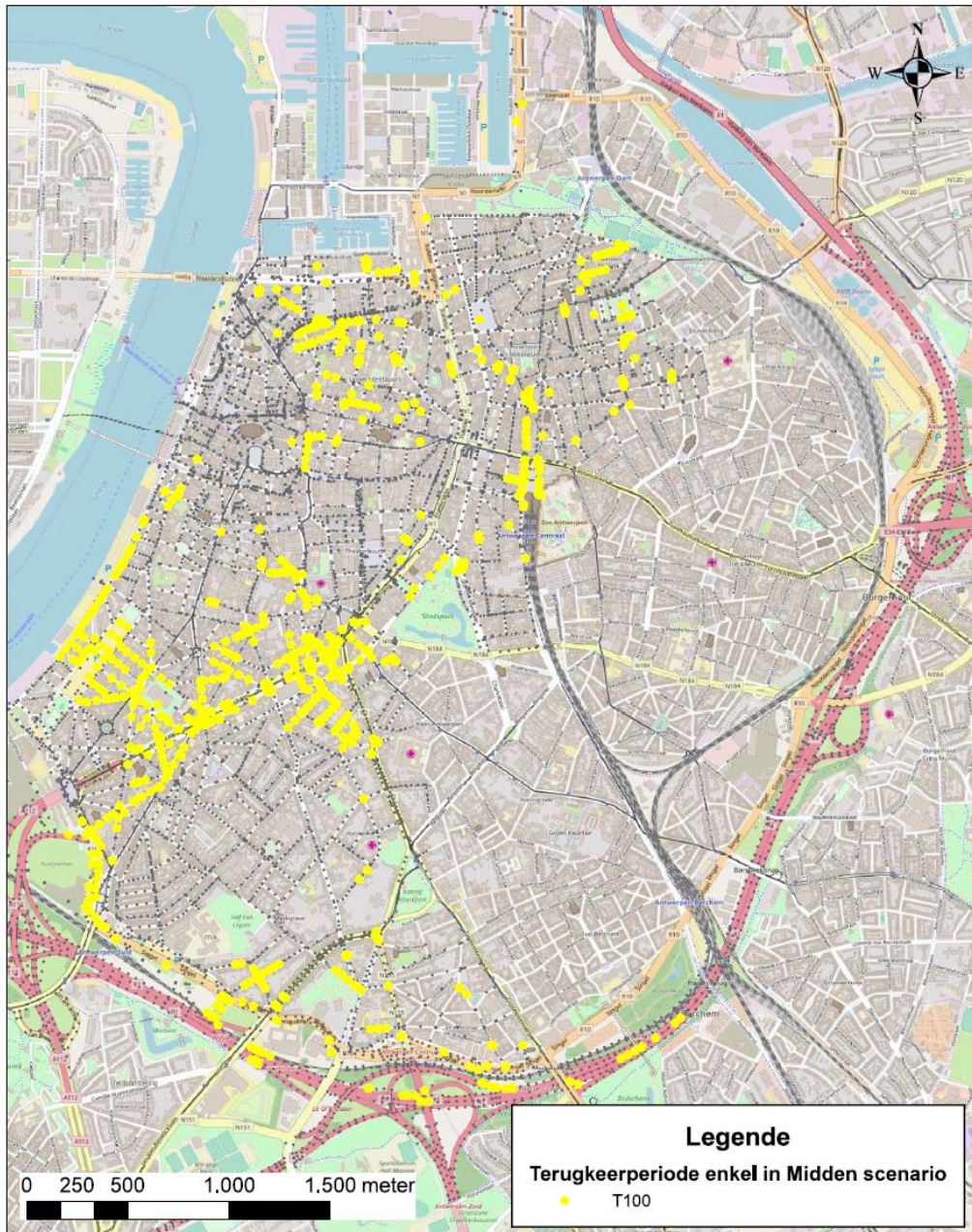
Figuur C.4: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T10 naar T2

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Midden scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T100 naar T10**



Figuur C.5: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Van T100 naar T10

**Frequentieverschuiving gebaseerd op Ukkeldata:
Geen overstrooming in huidige klimaat,
T=100 in Midden scenario in 2100**

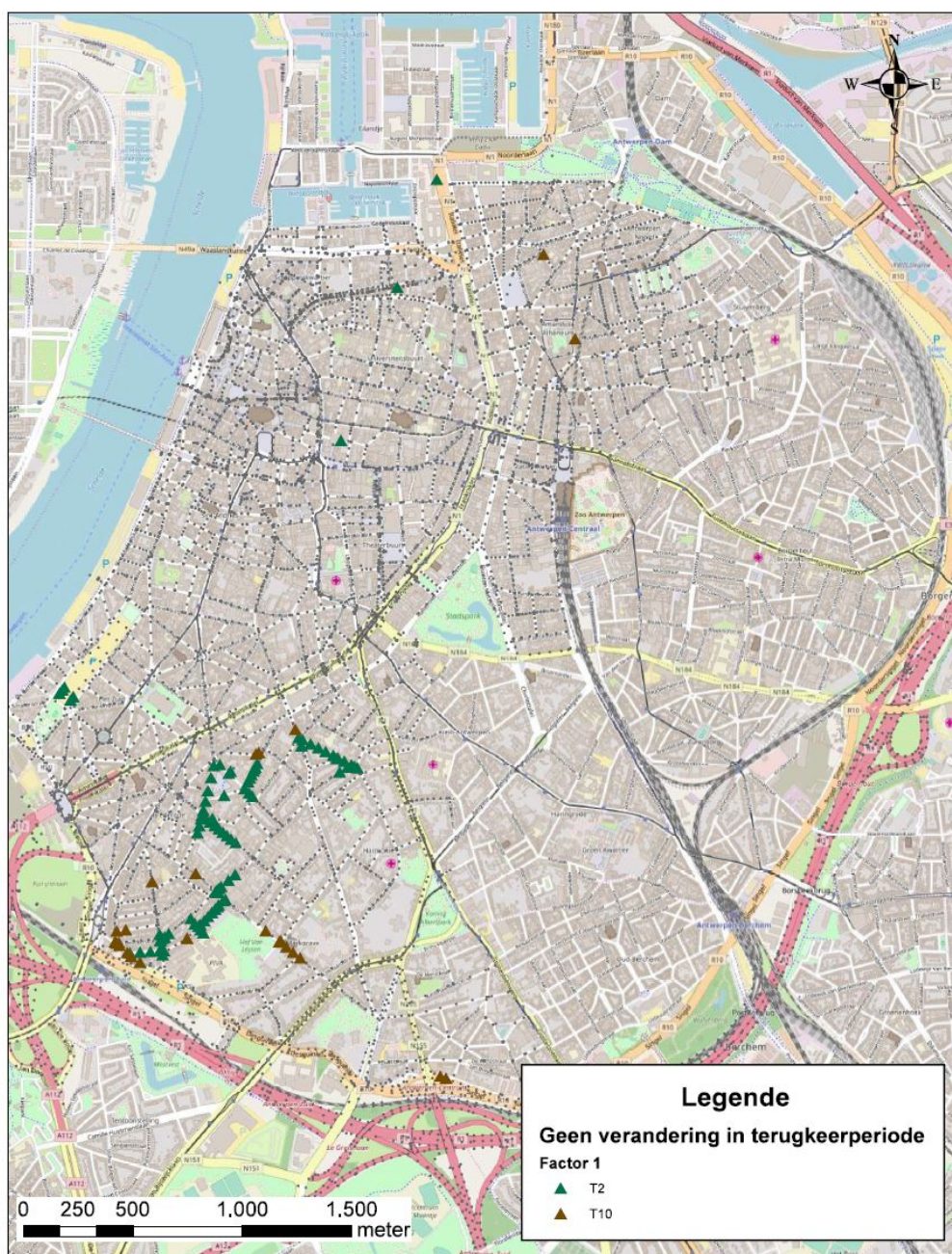


Figuur C.6: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Midden klimaatscenario in 2100: Geen overstrooming in huidige klimaat, T100 in Midden scenario

C.2 Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer scenario

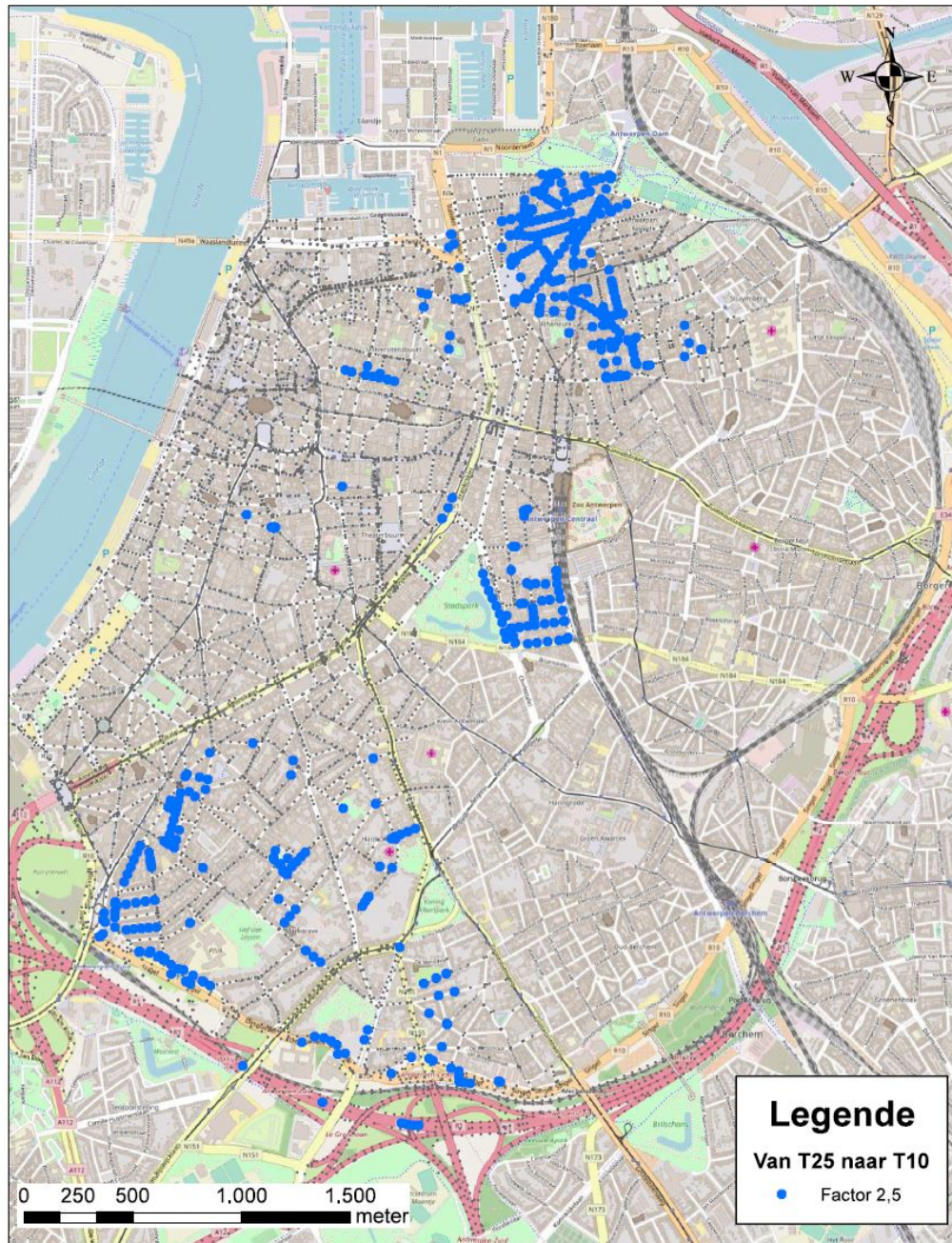
Onderstaande figuren tonen de opsplitsing van de frequentieverschuiving om een duidelijk beeld te hebben van welke knopen beïnvloed worden door een bepaald factor. De kaarten die hier getoond worden geven respectievelijk beeld van de knopen met factor 1 (dezelfde terugkeerperiode in beide klimaatscenario's); factor 2,5; factor 4; factor 5; factor 10; factor 12,5 en de kaarten met knopen die enkel overstromen in het Hoog Zomer scenario voor T100, T25 en T10.

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
Geen verandering in terugkeerperiode**



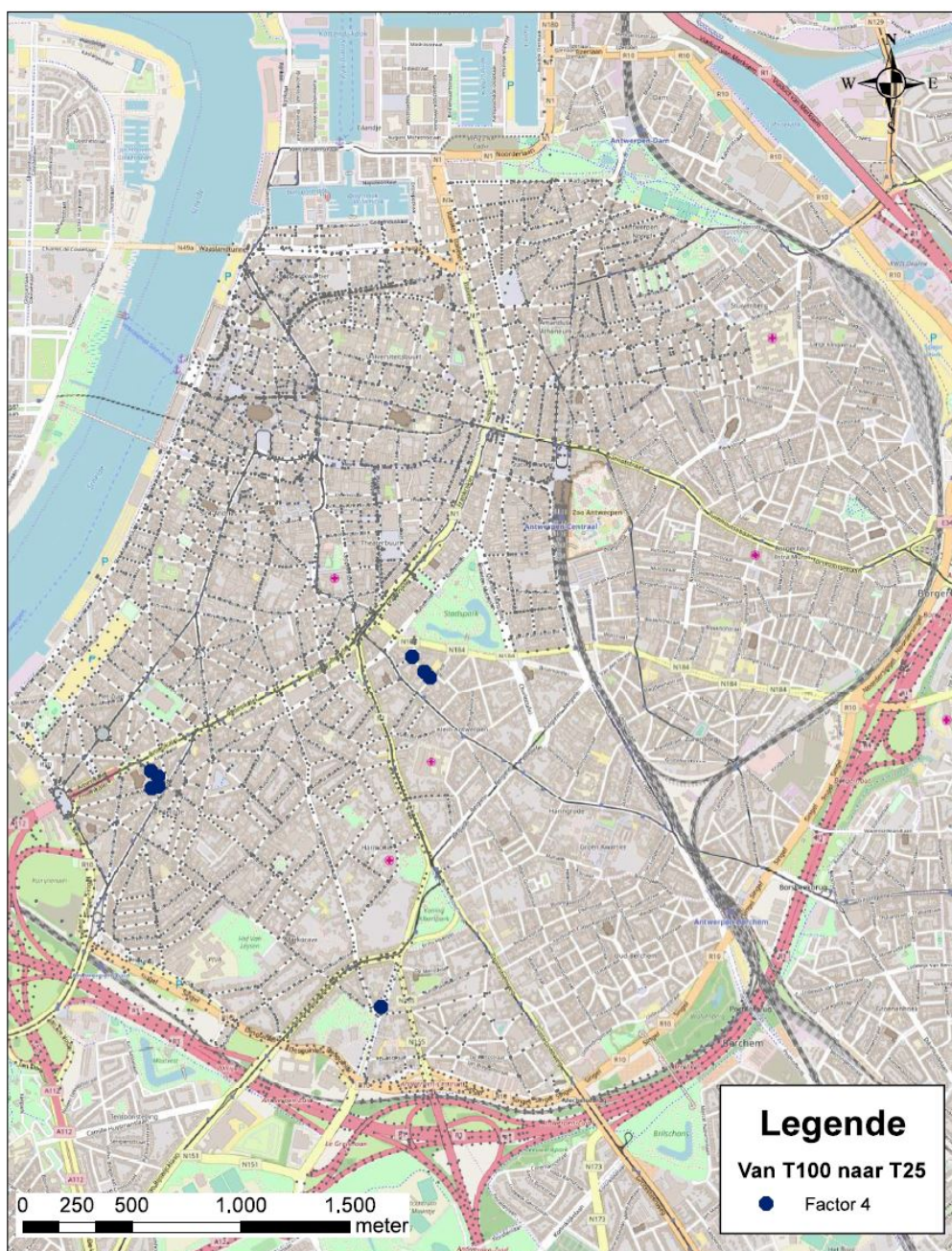
Figuur C.7: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Geen verandering in terugkeerperiode

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T25 naar T10**



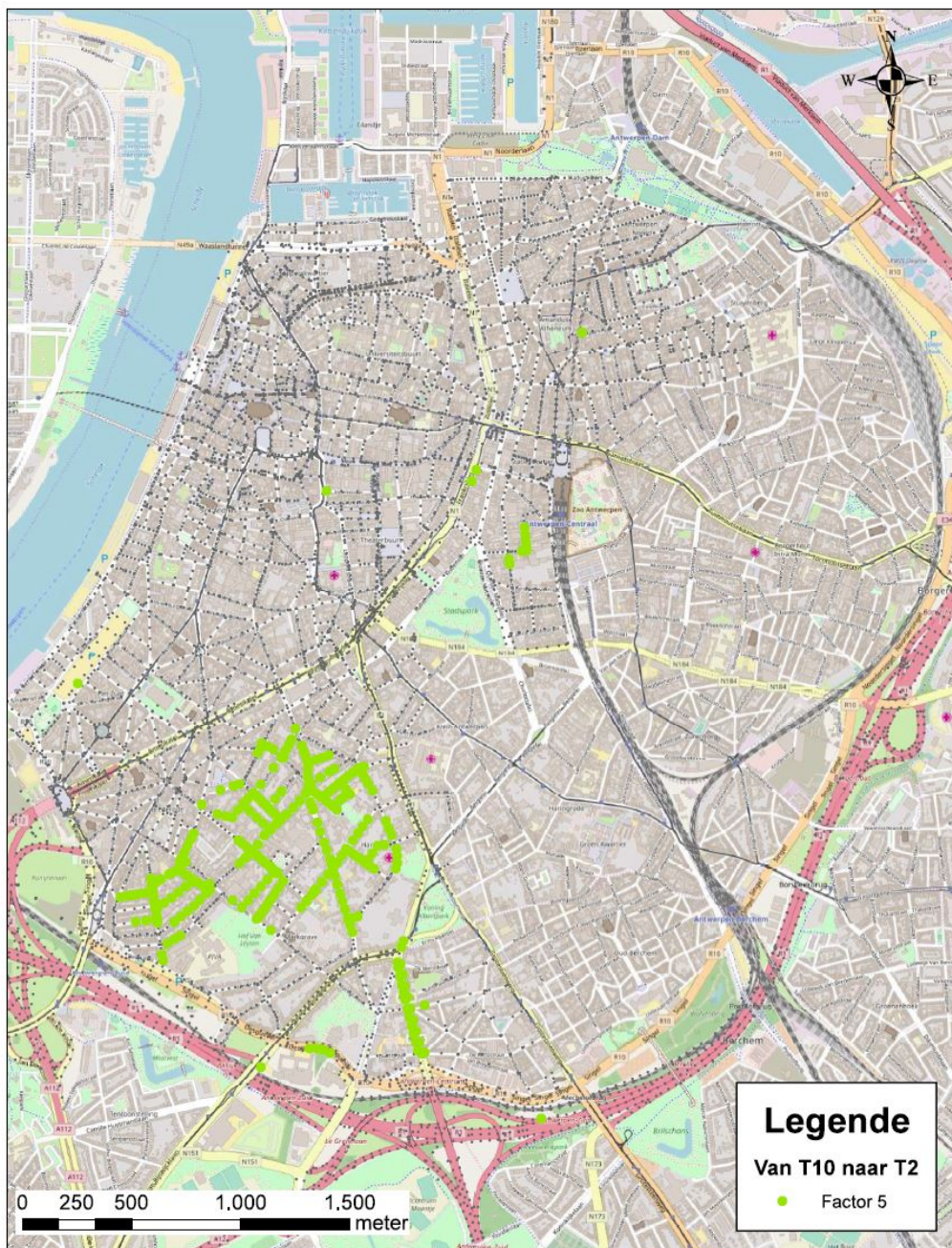
Figuur C.8: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Van T25 naar T10

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T100 naar T25**



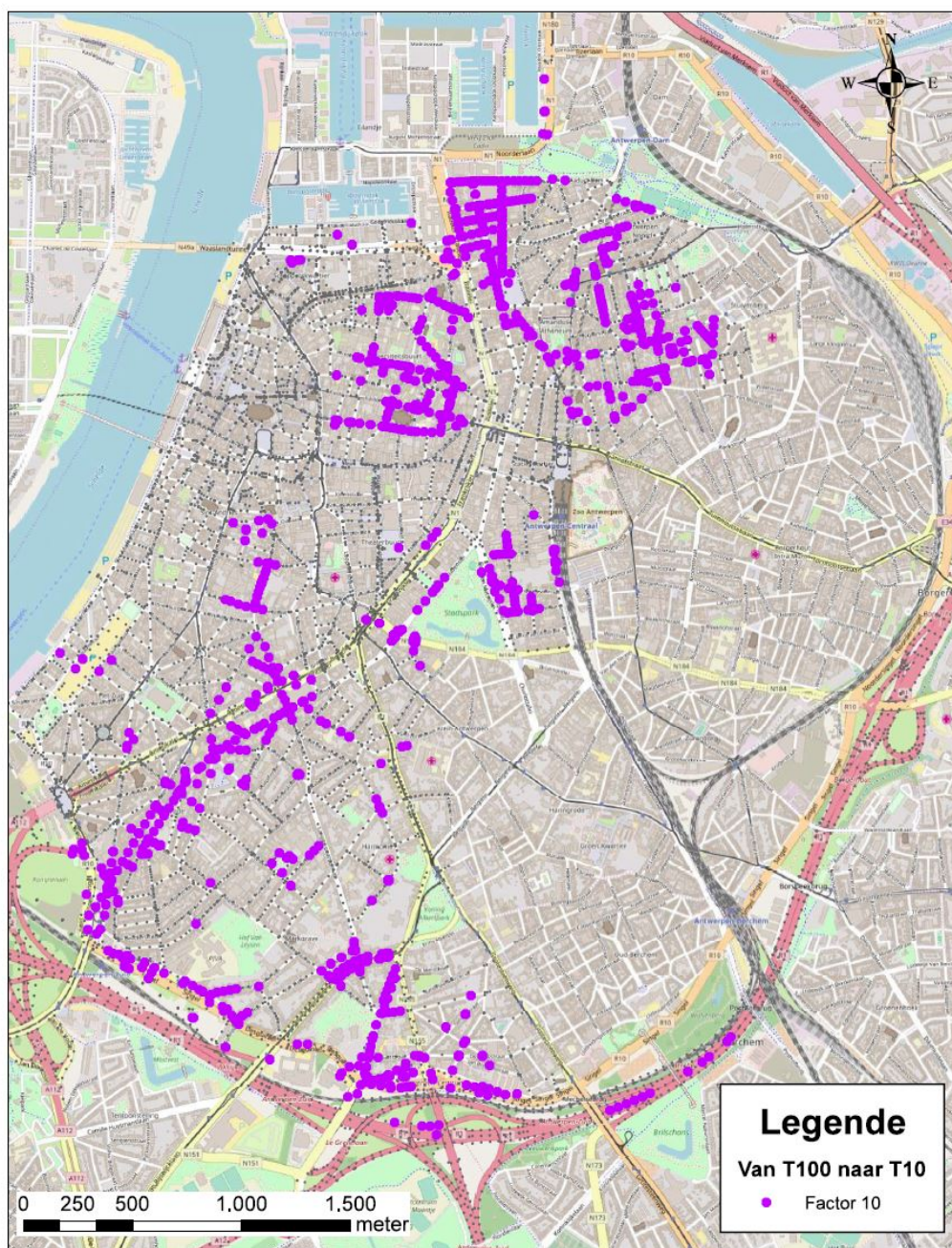
Figuur C.9: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Van T100 naar T25

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T10 naar T2**



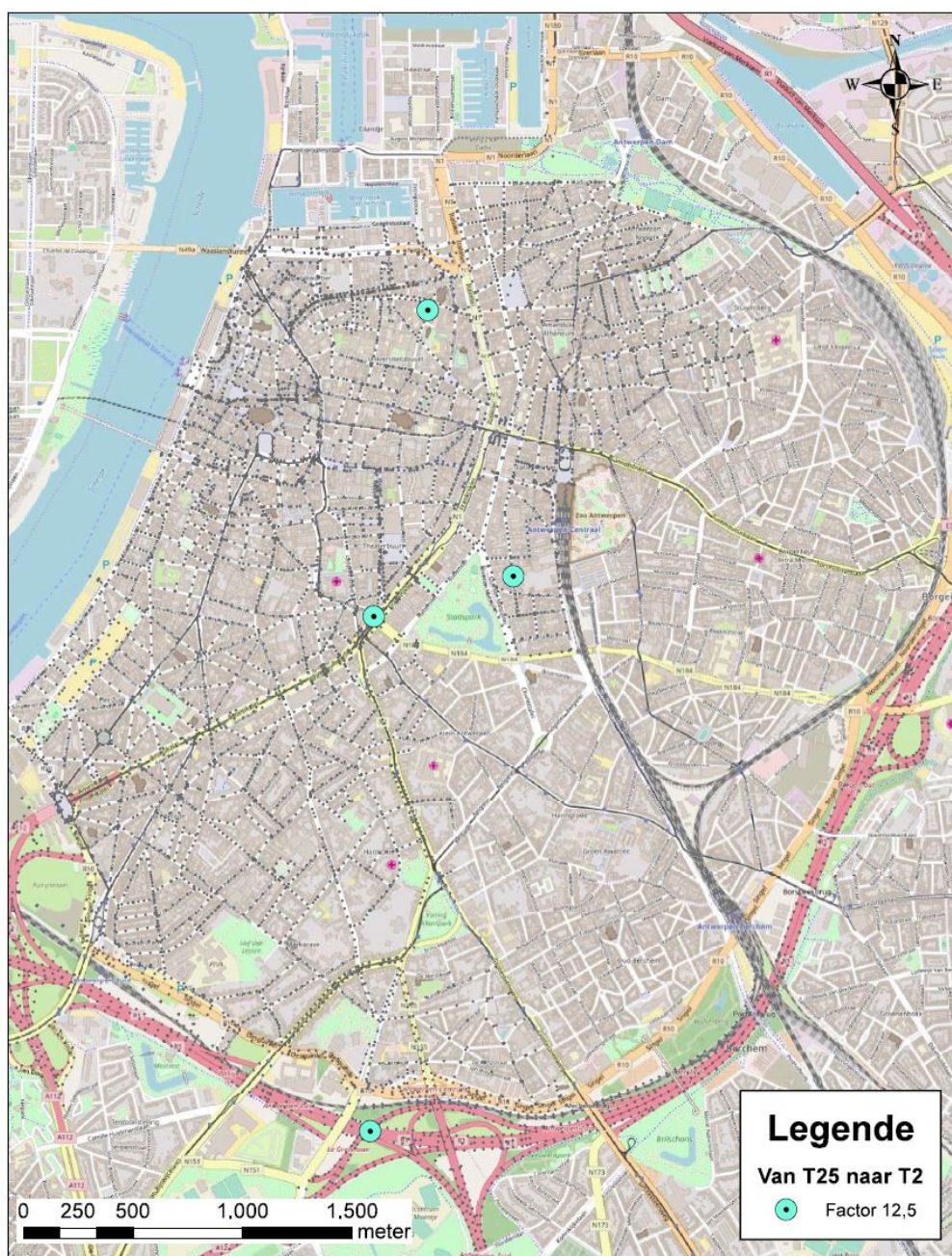
Figuur C.10: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Van T10 naar T2

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T100 naar T10**



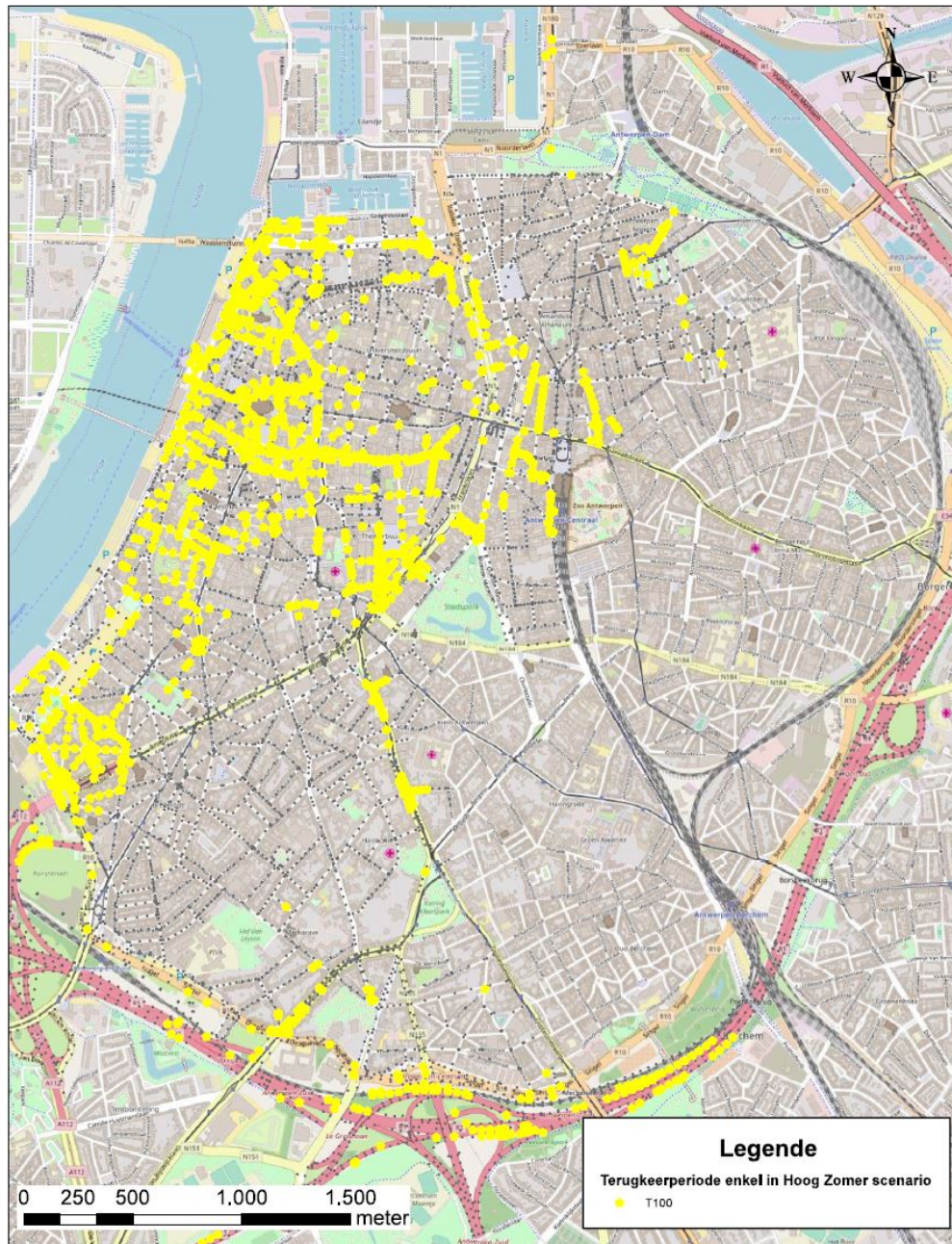
Figuur C.11: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Van T100 naar T10

**Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat
en Hoog Zomer scenario in 2100 gebaseerd op Ukkeldata:
van T25 naar T2**



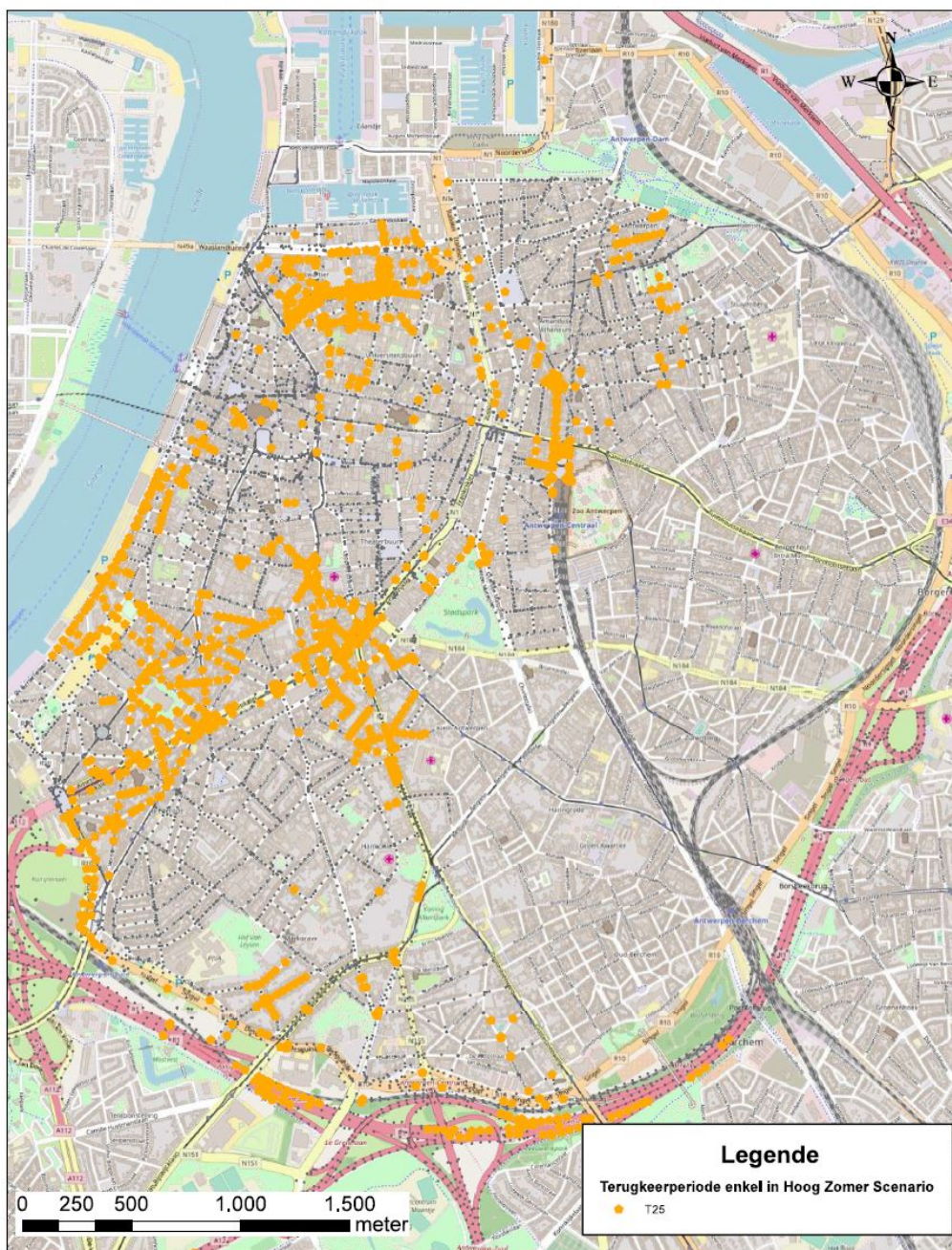
Figuur C.12: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaat-scenario in 2100: Van T25 naar T2

**Frequentieverschuiving gebaseerd op Ukkeldata:
Geen overstrooming in huidige klimaat,
T=100j in Hoog Zomer scenario in 2100**



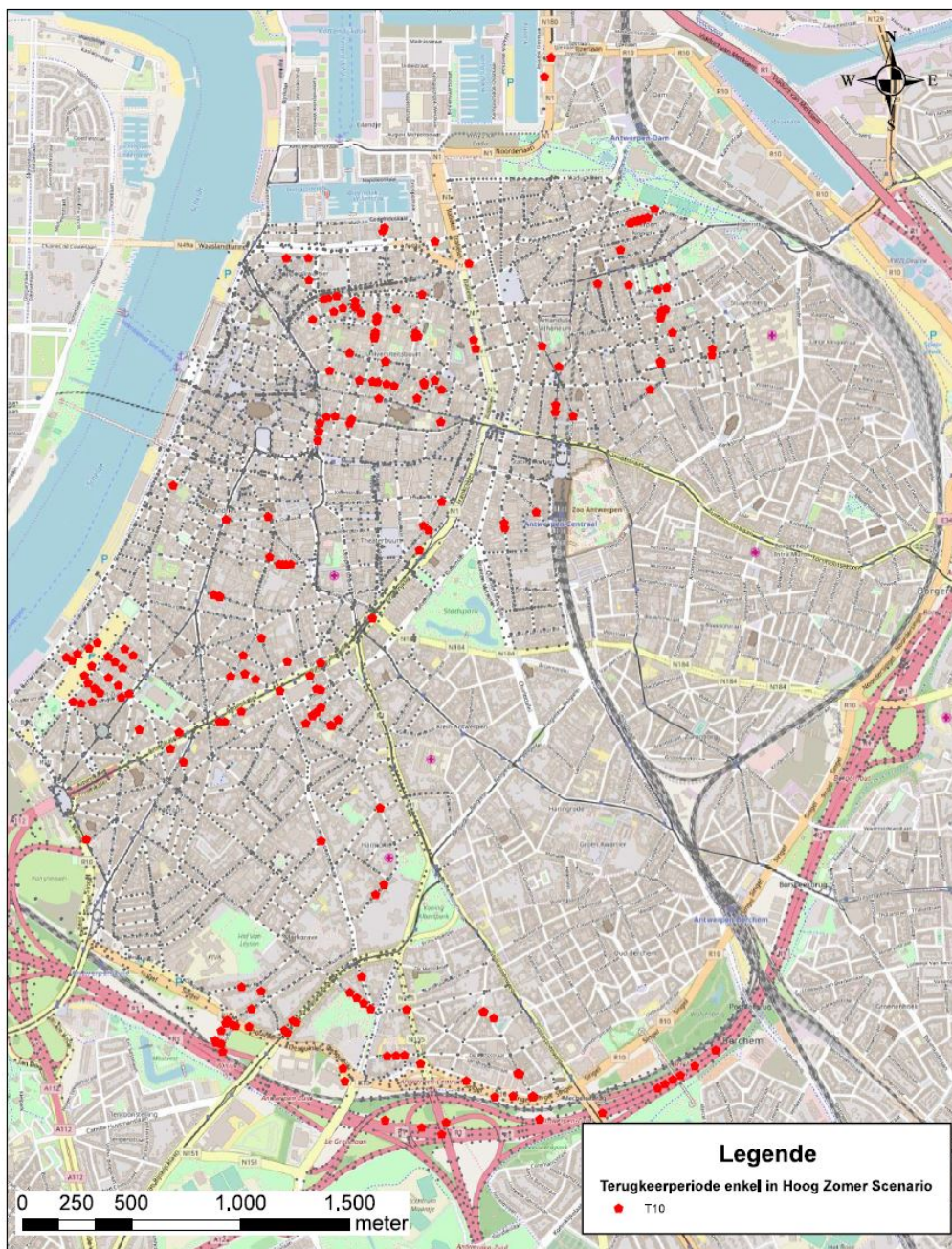
Figuur C.13: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100: Geen overstrooming in huidige klimaat, T100 in Hoog Zomer scenario

**Frequentieverschuiving gebaseerd op Ukkeldata:
Geen overstrooming in huidige klimaat,
T=25j in Hoog Zomer scenario in 2100**



Figuur C.14: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100: Geen overstrooming in huidige klimaat, T25 in Hoog Zomer scenario

**Frequentieverschuiving gebaseerd op Ukkeldata:
Geen overstrooming in huidige klimaat,
T=10j in Hoog Zomer scenario in 2100**



Figuur C.15: Frequentieverschuiving tussen huidige klimaat en Hoog Zomer klimaatsscenario in 2100: Geen overstrooming in huidige klimaat, T10 in Hoog Zomer scenario

Bijlage D

Voorbeeld van een Matlab-file voor het opstellen van de heatmaps

Een voorbeeld wordt gegeven van de opgestelde Matlab-file voor het opstellen van de heatmaps. Het voorbeeld omvat de file voor de heatmap tussen het huidige klimaat en het Hoog Zomer scenario.

```

%%Impact van Klimaatverandering op stedelijke overstromingen (Antwerpen)
%%Masterproef
%%Céline Van Havere

clear, clc
close all

%% Heatmaps voor frequentieverschuiving tussen huidig klimaat en Hoog Zomer
% De frequentieverschuiving van de terugkeerperiode van overstromen van een
% knooppunt wordt weergegeven met behulp van heatmaps.
% De inputfiles van dit algoritme zijn csv-files met x- en y-coördinaat van
% het knooppunt, ID en een 4e kolom met 0 of 1 die aangeeft of de knoop een
% bepaald verschuiving in frequentie kent (0 =false, 1= true).
% Het algoritme kent een gewicht toe aan de verschillende punten (hoe
% sneller overstroming optreedt, hoe hoger het gewicht). Dit gewicht geeft
% aan dat een punt x aantal keer gekopieerd moet worden. Na het aanmaken
% van alle nieuwe CSV files wordt 1 globale CSV-file gemaakt die de input
% vormt voor QGIS voor het maken van de heatmap.

%% Gewichten voor elke factor
factor10=45;      %Van T100 naar T10
factor4=20;       %Van T100 naar T25
factor12_5=50;    %Van T25 naar T2
factor2_5=10;     %Van T25 naar T10
factor5=30;       %Van T10 naar T2
factor1=1;        %Geen verandering
factorGroter1=5;  %Enkel T100 in scenario, geen overstroming in huidige
                  %klimaat (T>T100)
factorGroter4=25; %Enkel T25 in scenario, geen overstroming in huidige
                  %klimaat (T>T100)
factorGroter10=50;%Enkel T10 in scenario, geen overstroming in huidige
                  %klimaat (T>T100)
%% Inladen van CSV-files

M1=readtable('VanT100naarT10HS.csv'); %CSV-file met gegevens van T100
                                     % naar T10
M1.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M2=readtable('VanT100naarT25HS.csv'); %CSV-file met gegevens van T100
                                     % naar T25
M2.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M3=readtable('VanT25naarT2HS.csv'); %CSV-file met gegevens van T25
                                     % naar T2
M3.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M4=readtable('VanT25naarT10HS.csv'); %CSV-file met gegevens van T25
                                     %naar T10
M4.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M5=readtable('VanT10naarT2HS.csv'); %CSV-file met gegevens van T10
                                     % naar T2
M5.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M6=readtable('GeenVeranderingHS.csv');%CSV-file met gegevens indien
                                     %geen verandering in terugkeerperiode
M6.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

```



```

M7=readtable('T100inHS.csv'); %CSV-file met gegevens indien T100 in
                                % scenario, niet in huidige klimaat
M7.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M8=readtable('T25inHS.csv'); %CSV-file met gegevens indien T25 in
                                %scenario, niet in huidige klimaat
M8.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

M9=readtable('T10inHS.csv'); %CSV-file met gegevens indien T10 in
                                %scenario, niet in huidige klimaat
M9.Properties.VariableNames = {'X','Y','ID','FrequencyShift'};

%% Verwijderen van knopen met waarde 0
% Alle knopen die geen verandering ondergaan voor een specifieke
% frequentieverschuiving (alle knopen die waarde 0 hebben) worden
% verwijderd

for i=size(M1,1):-1:1
    if M1{i,4} == 0;
        M1(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M2,1):-1:1
    if M2{i,4} == 0;
        M2(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M3,1):-1:1
    if M3{i,4} == 0;
        M3(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M4,1):-1:1
    if M4{i,4} == 0;
        M4(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M5,1):-1:1
    if M5{i,4} == 0;
        M5(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M6,1):-1:1
    if M6{i,4} == 0;
        M6(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M7,1):-1:1
    if M7{i,4} == 0;

```

```

        M7(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M8,1):-1:1
    if M8{i,4} == 0;
        M8(i,:)=[];
    end
end

for i=size(M9,1):-1:1
    if M9{i,4} == 0;
        M9(i,:)=[];
    end
end

%% Gewichten toekennen
% De knoop een aantal kopiëren overeenkomstig het toegekende gewicht

M1_new=repmat(M1,[factor10, 1]);
M2_new=repmat(M2,[factor4, 1]);
M3_new=repmat(M3,[factor12_5, 1]);
M4_new=repmat(M4,[factor2_5, 1]);
M5_new=repmat(M5,[factor5, 1]);
M6_new=repmat(M6,[factor1, 1]);
M7_new=repmat(M7,[factorGroter1, 1]);
M8_new=repmat(M8,[factorGroter4, 1]);
M9_new=repmat(M9,[factorGroter10, 1]);

%% Alle tabellen samenvoegen tot 1 inputfile (csv-file)
% De output file is gesorteerd zodanig dat alle gelijke ID's samen staan in
% de csv-file

C=[M1_new;M2_new;M3_new;M4_new;M5_new;M6_new;M7_new;M8_new;M9_new];
M=sortrows(C,3);

writetable(M,'input_heatmapsHS.csv','Delimiter',';');

```

Bijlage E

1D naar 2D-visualisatiemethode: Overstromingskaarten per klimaatscenario en terugkeerperiode

Deze bijlage toont de resultaten van het 1D naar 2D-uitspreidingsalgoritme zoals beschreven in hoofdstuk 5.

De schaal van de figuren is op elke overstromingskaart gelijk genomen om een goede vergelijking toe te laten. Er is gekozen om de maximale schaalwaarde gelijk te nemen aan 0,5 m. Echter kunnen waterdieptes groter dan 0,5 m wel optreden. Deze grote waterdieptes zijn allen omvat in de kleur horende bij 0,5 m.

De eerste vier overstromingskaarten voor respectievelijk terugkeerperiode 2 jaar, 10 jaar, 25 jaar en 100 jaar geven de situatie aan in het huidige klimaat. Overstromingskaarten 5 tot 8 geven de toestand aan in het geval van het Midden klimaatscenario in 2100 voor dezelfde vier terugkeerperiodes. De laatste vier overstromingskaarten weerspiegelen de toestand onder het Hoog Zomer scenario in 2100.

1D naar 2D-overstromingskaart: T2 jaar - Huidig klimaat



Figuur E.1: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat

1D naar 2D-overstromingskaart: T10 jaar - Huidig klimaat



Figuur E.2: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het huidige klimaat

1D naar 2D-overstromingskaart: T25 jaar - Huidig klimaat



Figuur E.3: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het huidige klimaat

1D naar 2D-overstromingskaart: T100 jaar - Huidig klimaat



Figuur E.4: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het huidige klimaat

1D naar 2D-overstromingskaart: T2 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur E.5: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T10 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur E.6: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T25 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur E.7: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T100 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur E.8: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T2 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



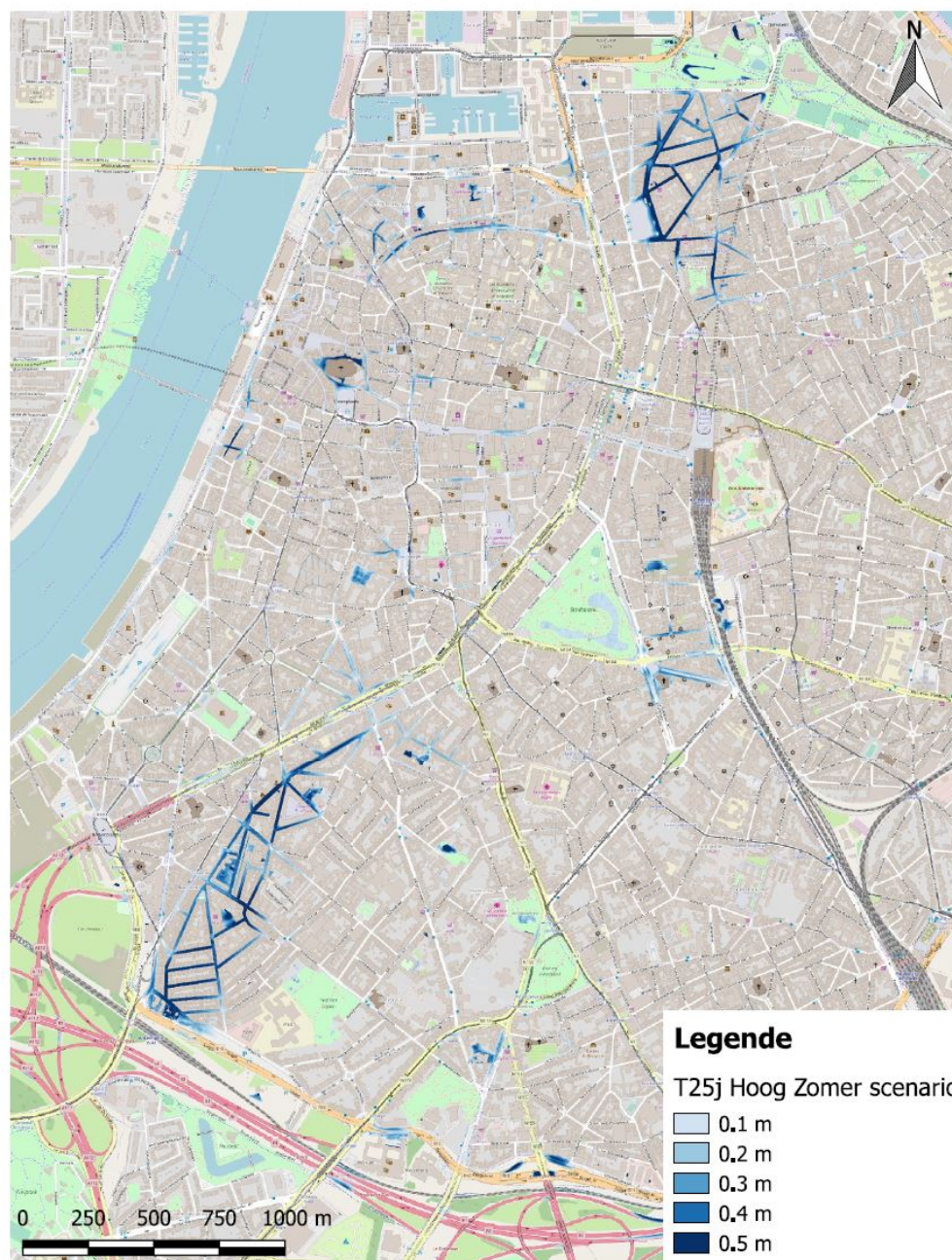
Figuur E.9: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T10 jaar - Hoog Zomer



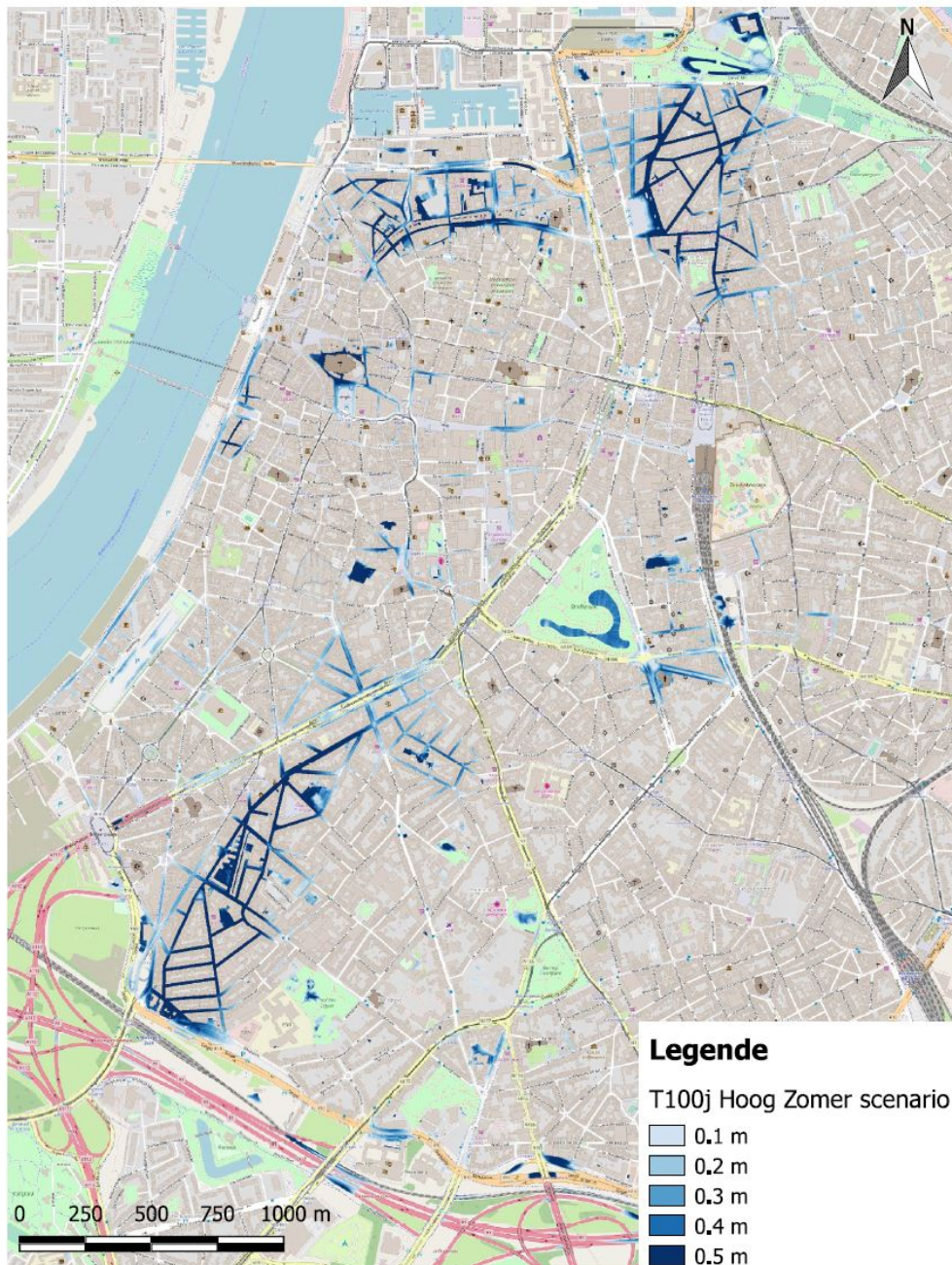
Figuur E.10: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T25 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur E.11: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

1D naar 2D-overstromingskaart: T100 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur E.12: 1D naar 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

Bijlage F

2D-visualisatiemethode: Overstromingskaarten per klimaatscenario en terugkeerperiode

Deze bijlage toont de resultaten van de 2D-simulaties zoals beschreven in hoofdstuk 5.

De schaal van de figuren is op elke overstromingskaart gelijk genomen om een goede vergelijking toe te laten. Er is gekozen om de maximale schaalwaarde gelijk te nemen aan 0,5 m. Echter kunnen waterdieptes groter dan 0,5 m wel optreden. Deze grote waterdieptes zijn allen omvat in de kleur horende bij 0,5 m.

De eerste vier overstromingskaarten voor respectievelijk terugkeerperiode 2 jaar, 10 jaar, 25 jaar en 100 jaar geven de situatie aan in het huidige klimaat. Overstromingskaarten 5 tot 8 geven de toestand aan in het geval van het Midden klimaatscenario in 2100 voor dezelfde vier terugkeerperiodes. De laatste vier overstromingskaarten weerspiegelen de toestand onder het Hoog Zomer scenario in 2100.

2D-overstromingskaart: T2 jaar - Huidig klimaat



Figuur F.1: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat

2D-overstromingskaart: T10 jaar - Huidig klimaat



Figuur F.2: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het huidige klimaat

2D-overstromingskaart: T25 jaar - Huidig klimaat



Figuur F.3: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het huidige klimaat

2D-overstromingskaart: T100 jaar - Huidig klimaat



Figuur F.4: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het huidige klimaat

2D-overstromingskaart: T2 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur F.5: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T10 jaar - Midden scenario in 2100



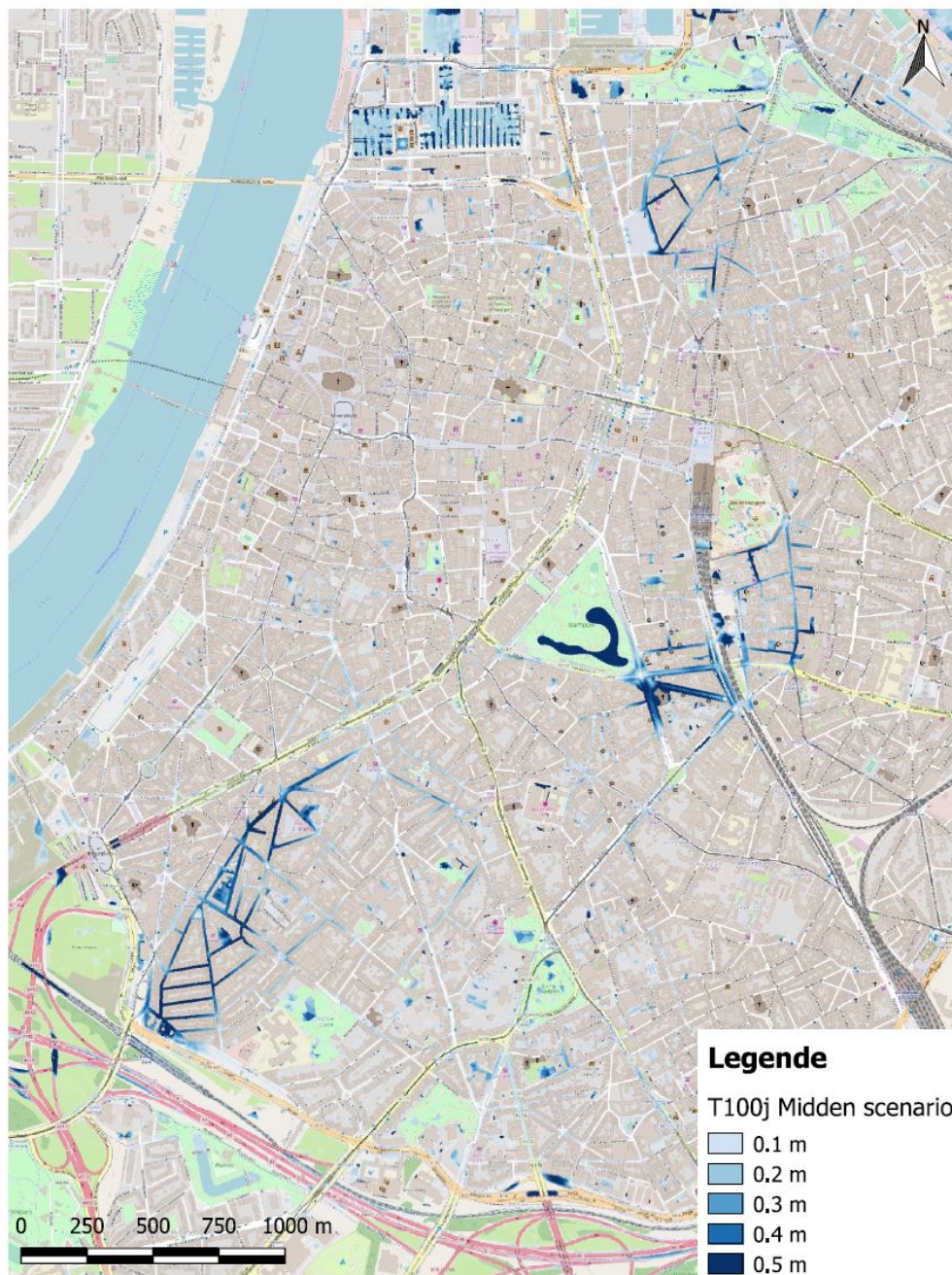
Figuur F.6: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T25 jaar - Midden scenario in 2100



Figuur F.7: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T100 jaar - Midden scenario in 2100



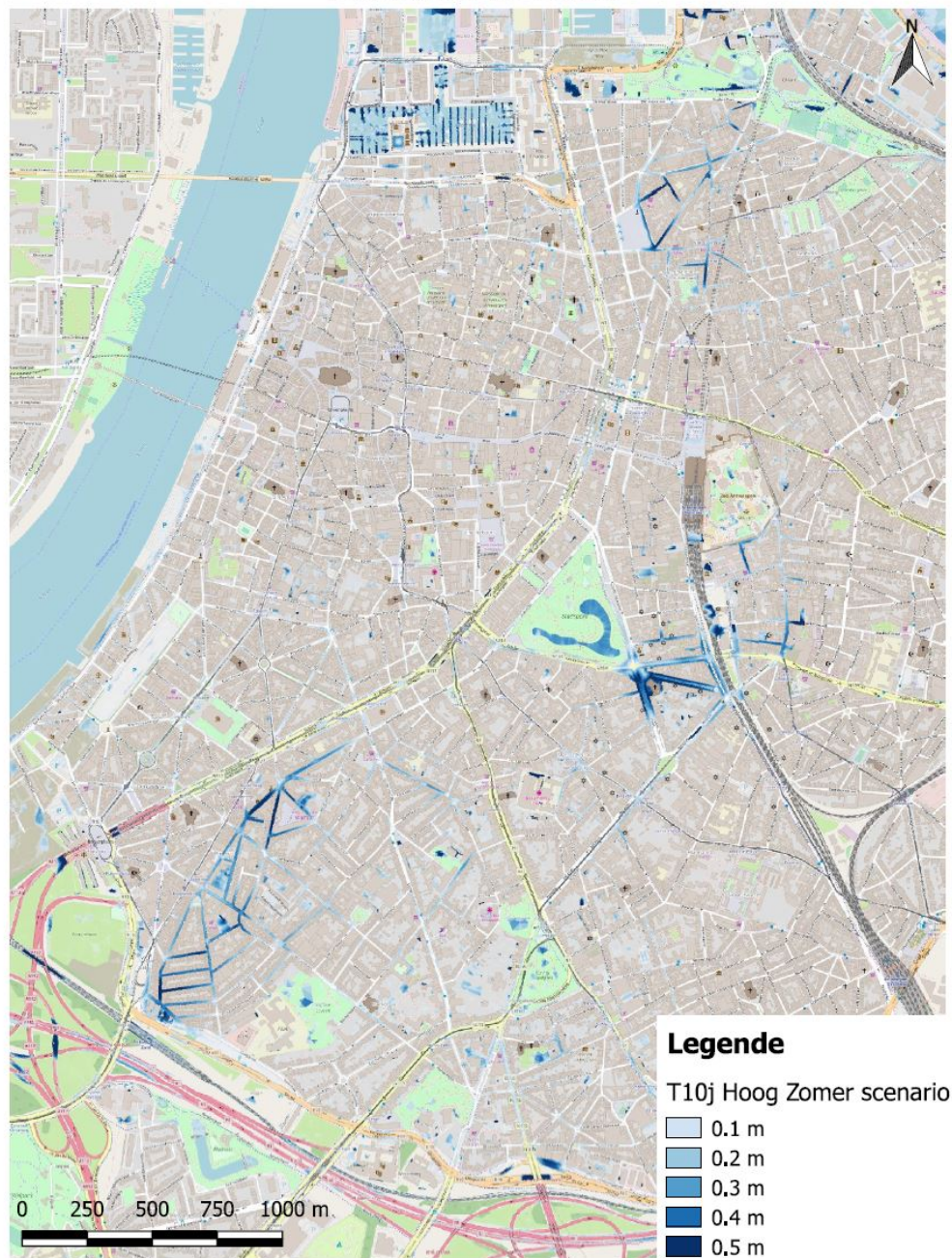
Figuur F.8: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Midden klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T2 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



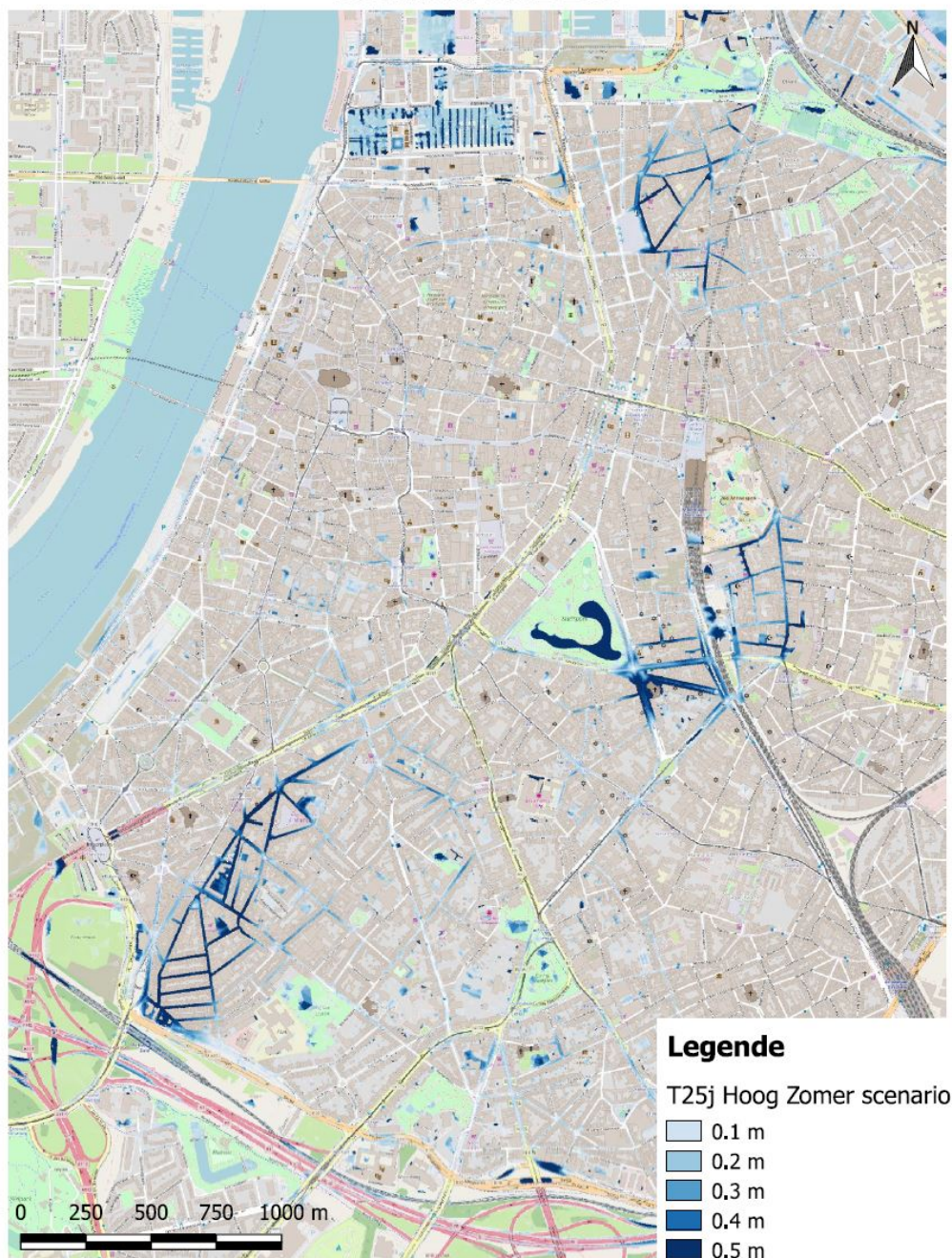
Figuur F.9: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T10 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



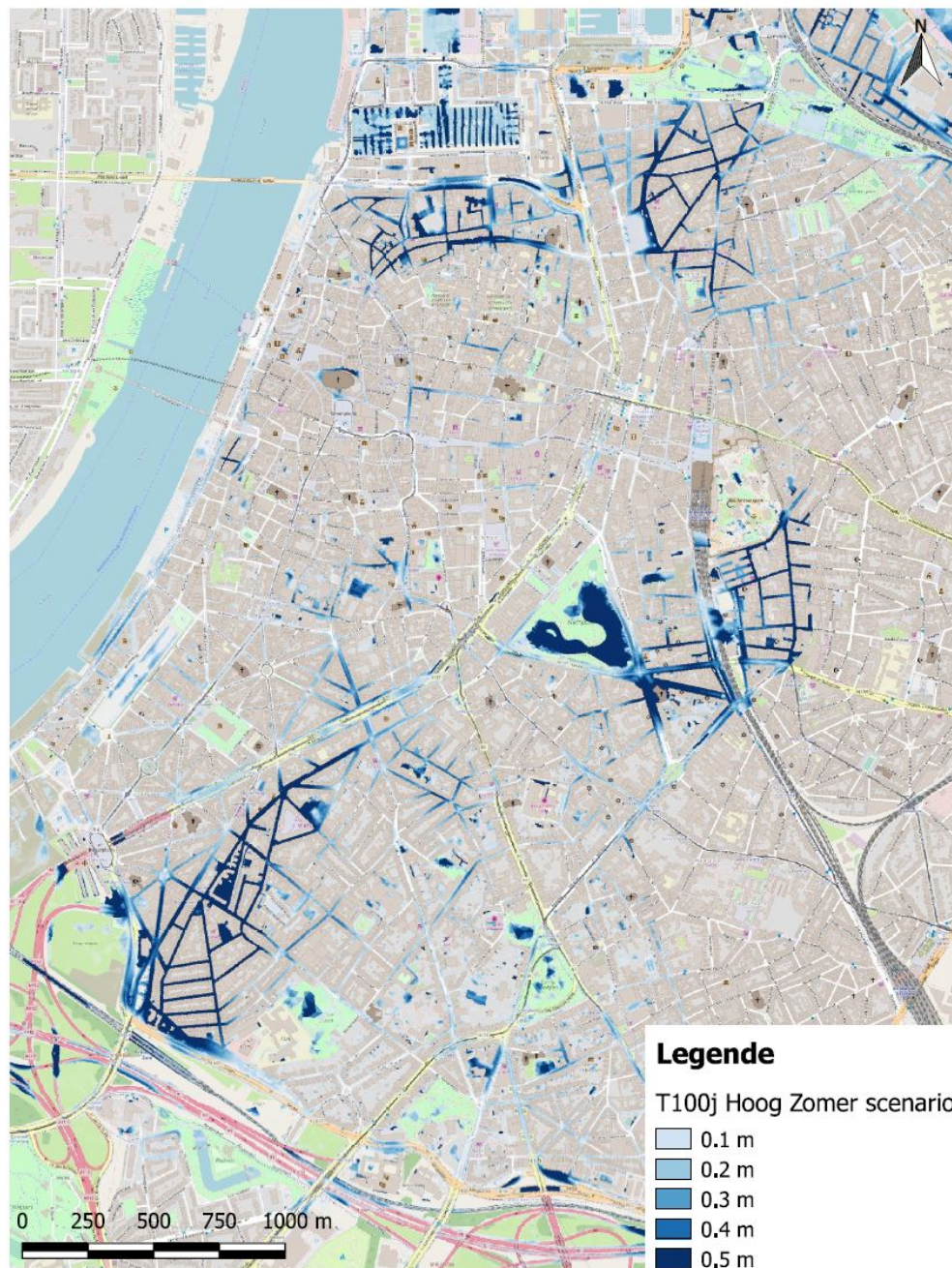
Figuur F.10: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 10 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T25 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur F.11: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 25 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

2D-overstromingskaart: T100 jaar - Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur F.12: 2D-overstromingskaart voor terugkeerperiode 100 jaar in het Hoog Zomer klimaatscenario in 2100

Bijlage G

Voorbeeld van het
uitspreidingsalgoritme met in
rekening name van het ponding
effect

1D naar 2D-overstromingskaart met Ponding (Huidige klimaat - T100)



Figuur G.1: Voorbeeld van het uitspreidingalgoritme met in rekening name van het ponding effect (10 mm) voor het huidige klimaat onder een terugkeerperiode van 100 jaar

Bijlage H

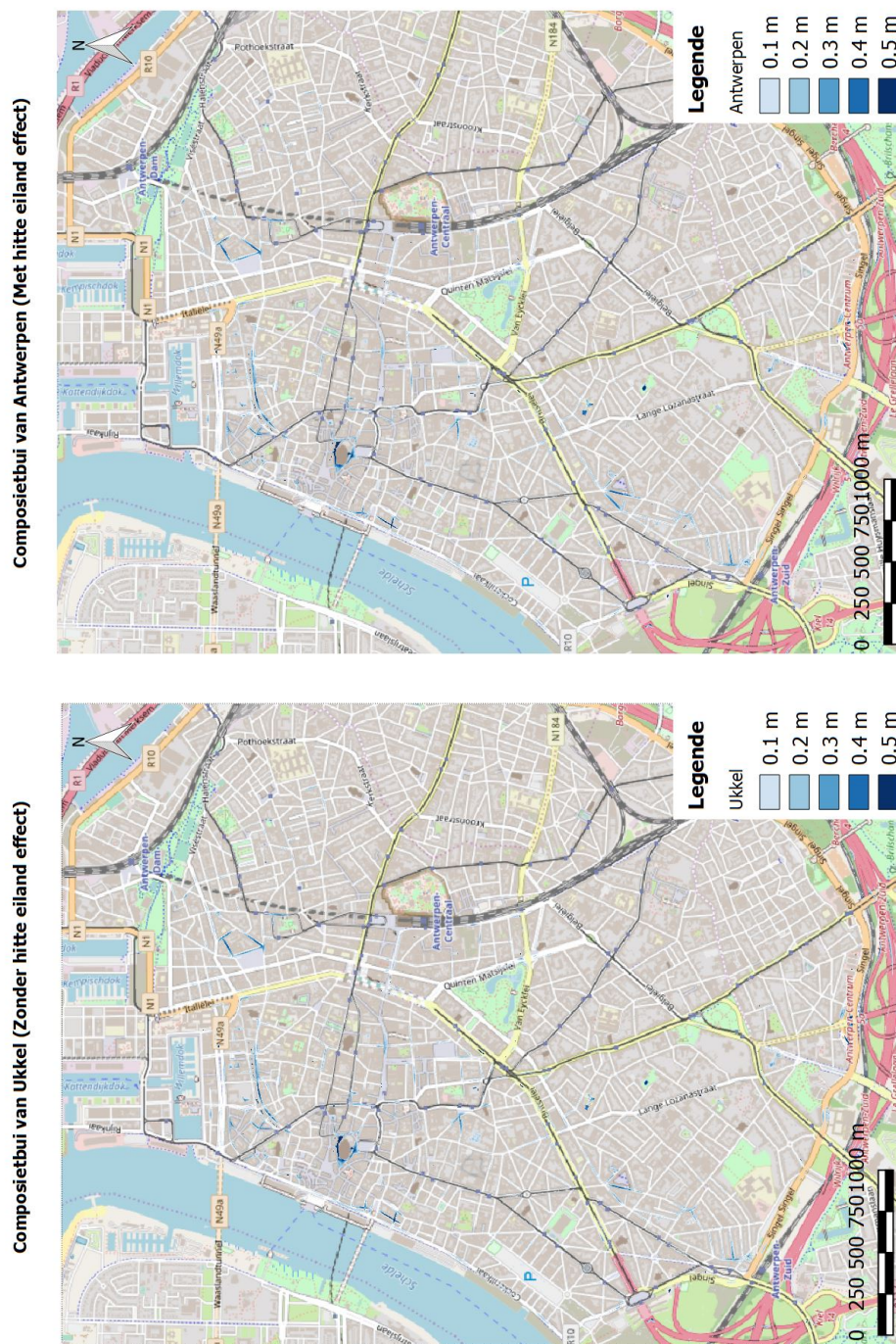
Hitte eiland effect

Deze bijlage toont de vergelijking in overstromingskaarten van de composietbuien van Ukkel en de composietbuien van Antwerpen om het hitte eiland effect aan te tonen. De overstromingskaarten zijn opgesteld door het 1D naar 2D-uitspreidingsalgoritme te gebruiken zoals beschreven in hoofdstuk 5. De overstromingskaarten tonen voor de verschillende klimaatscenario's en terugkeerperiodes het effect van het hitte eiland effect. Telkens gaat de linkerkant uit van de composietbuien van Ukkel waarin geen hitte eiland effect is ingerekend. De rechterkant gaat uit van de composietbuien van Antwerpen waarin wel het hitte eiland effect vervat zit. Vergelijking van beide kaarten geeft de invloed op de overstromingen door het hitte eiland effect.

De schaal van de figuren is op elke overstromingskaart gelijk genomen om een goede vergelijking toe te laten. Er is gekozen om de maximale schaalwaarde gelijk te nemen aan 0,5 m. Echter kunnen waterdieptes groter dan 0,5 m wel optreden. Deze grote waterdieptes zijn allen omvat in de kleur horende bij 0,5 m.

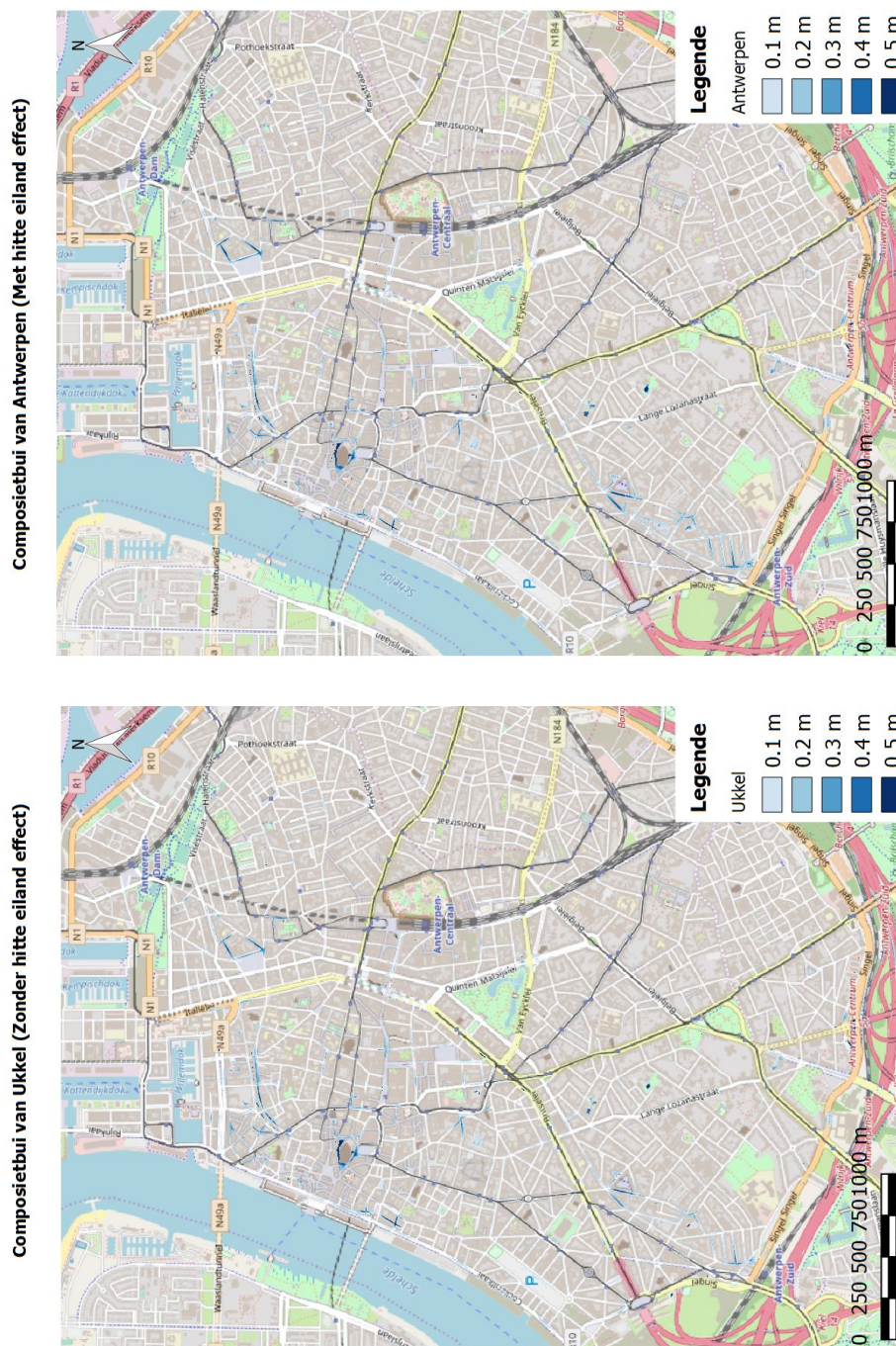
De eerste drie vergelijkende overstromingskaarten geven respectievelijk de situatie weer voor een terugkeerperiode van 2 jaar, 5 jaar en 20 jaar in het huidige klimaat. Vergelijkende overstromingskaarten 4 tot 7 geven de toestand aan in het geval van het Midden klimaatscenario in 2100 voor dezelfde drie terugkeerperiodes in het jaar 2100. De laatste drie overstromingskaarten weerspiegelen de toestand onder het Hoog Zomer scenario in het jaar 2100.

Hitte eiland effect - Vergelijking van T2j Huidig klimaat



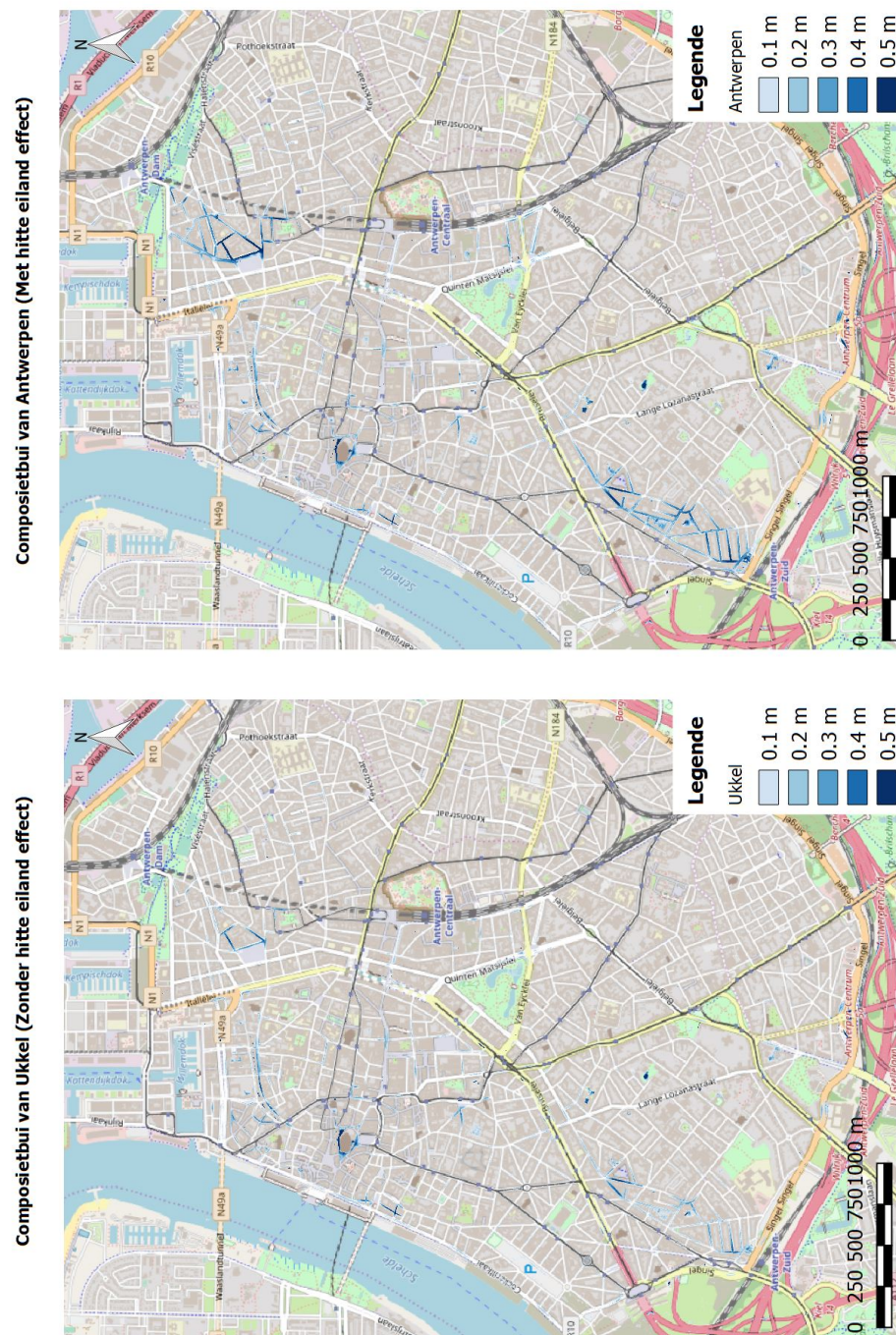
Figuur H.1: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het huidige klimaat

Hitte eiland effect - Vergelijking van T5j Huidig klimaat



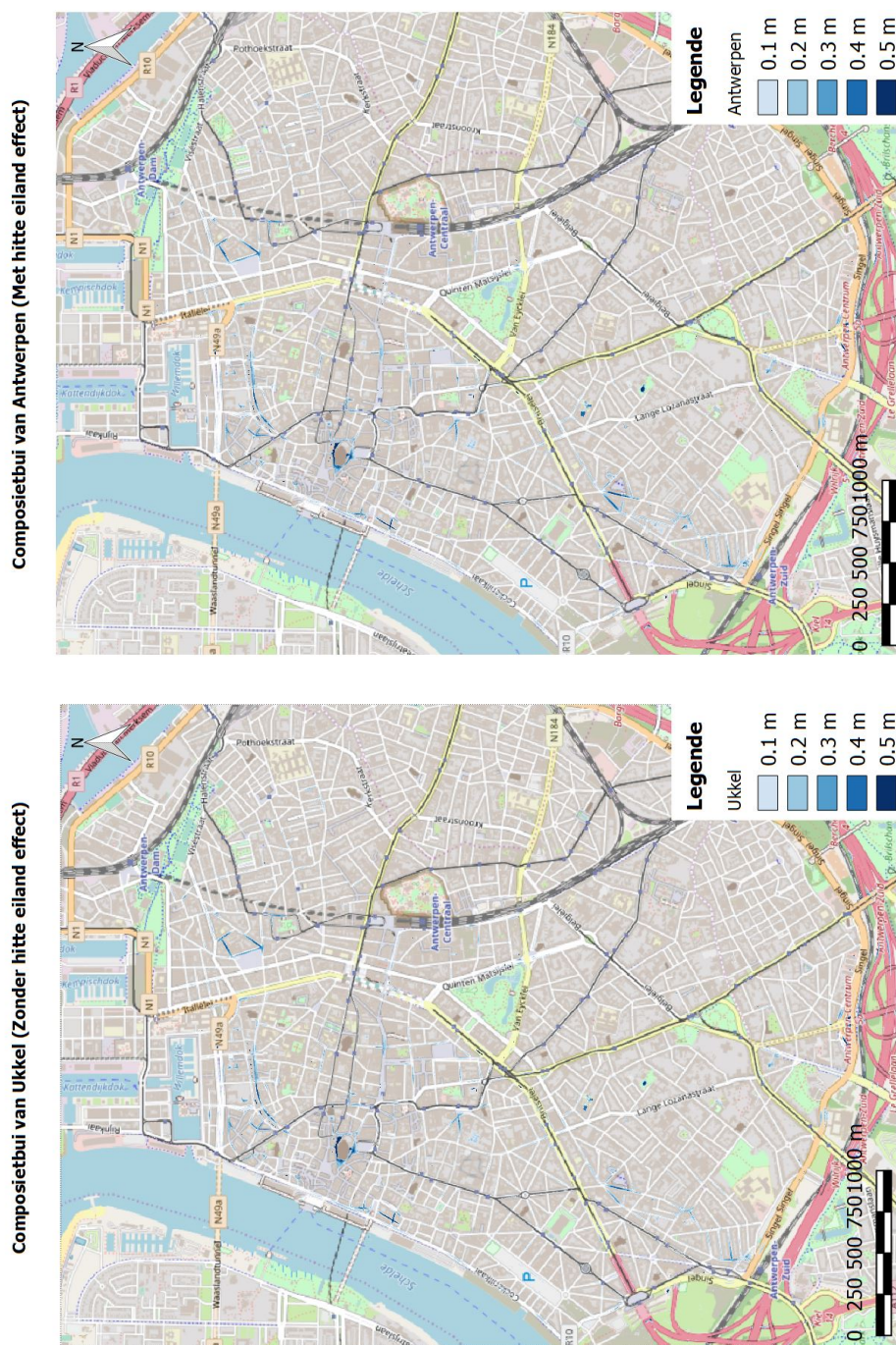
Figuur H.2: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het huidige klimaat

Hitte eiland effect - Vergelijking van T20j Huidig klimaat



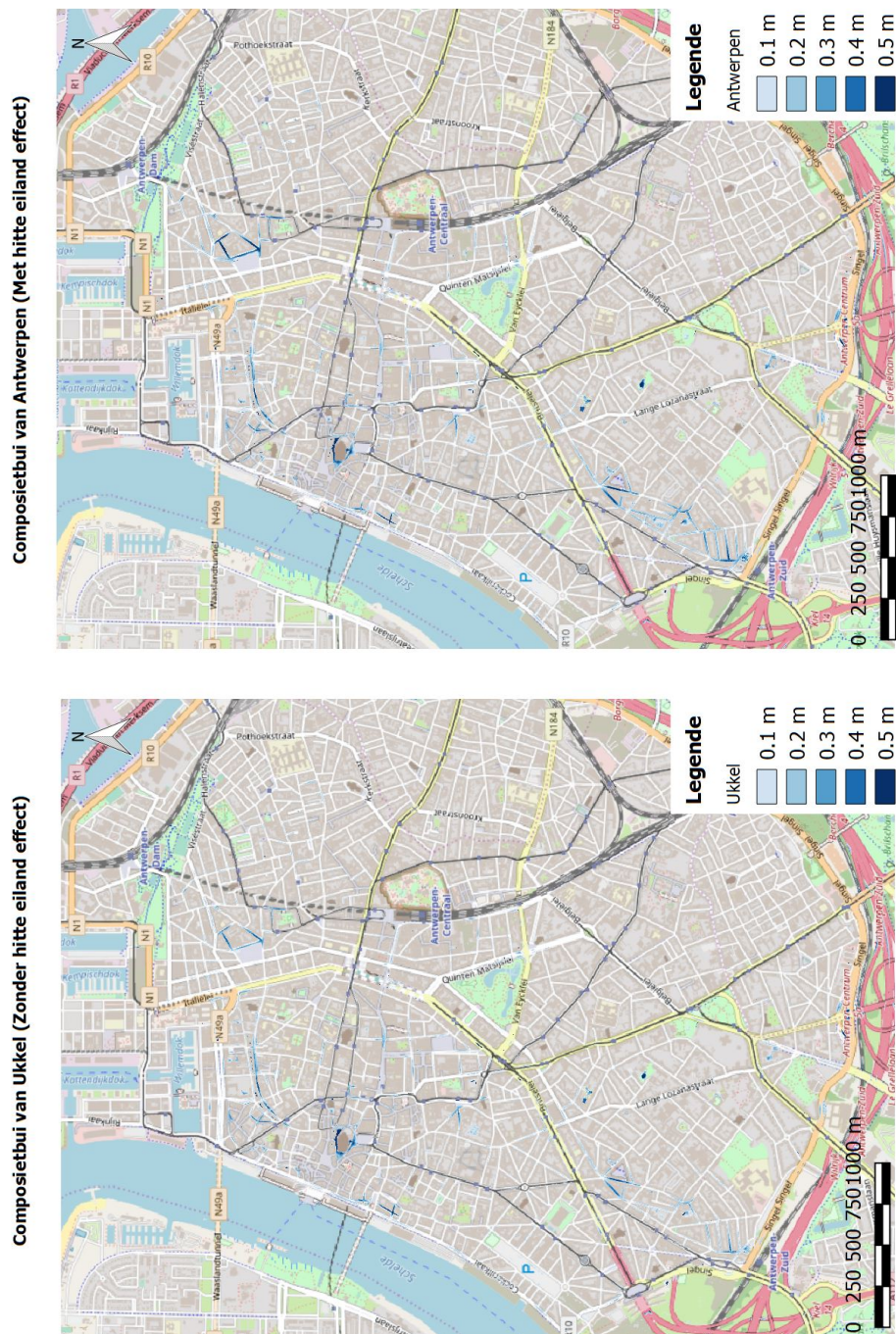
Figuur H.3: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het huidige klimaat

Hitte eiland effect - Vergelijking van T2j Midden scenario in 2100



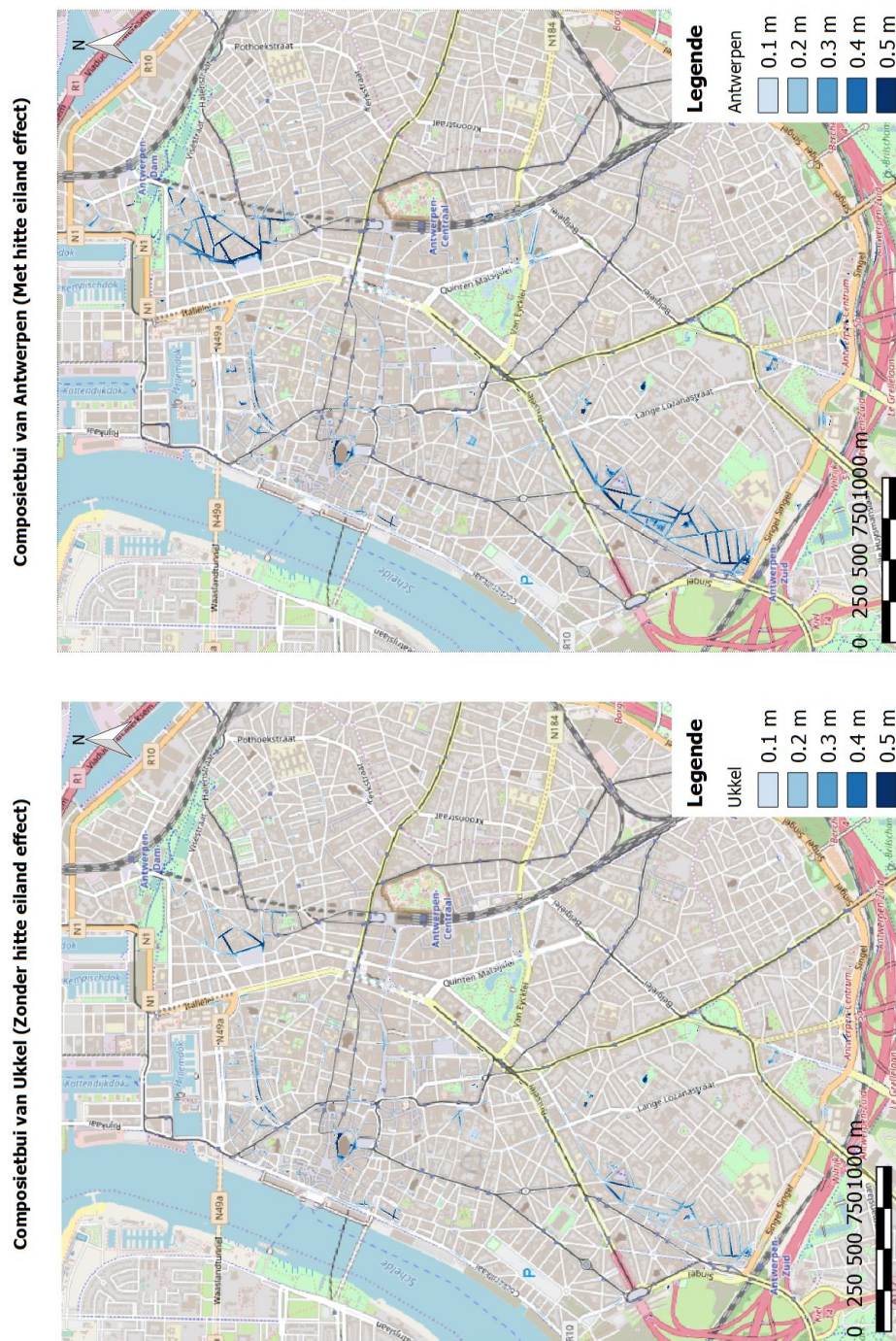
Figuur H.4: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het Midden scenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking van T5j Midden scenario in 2100



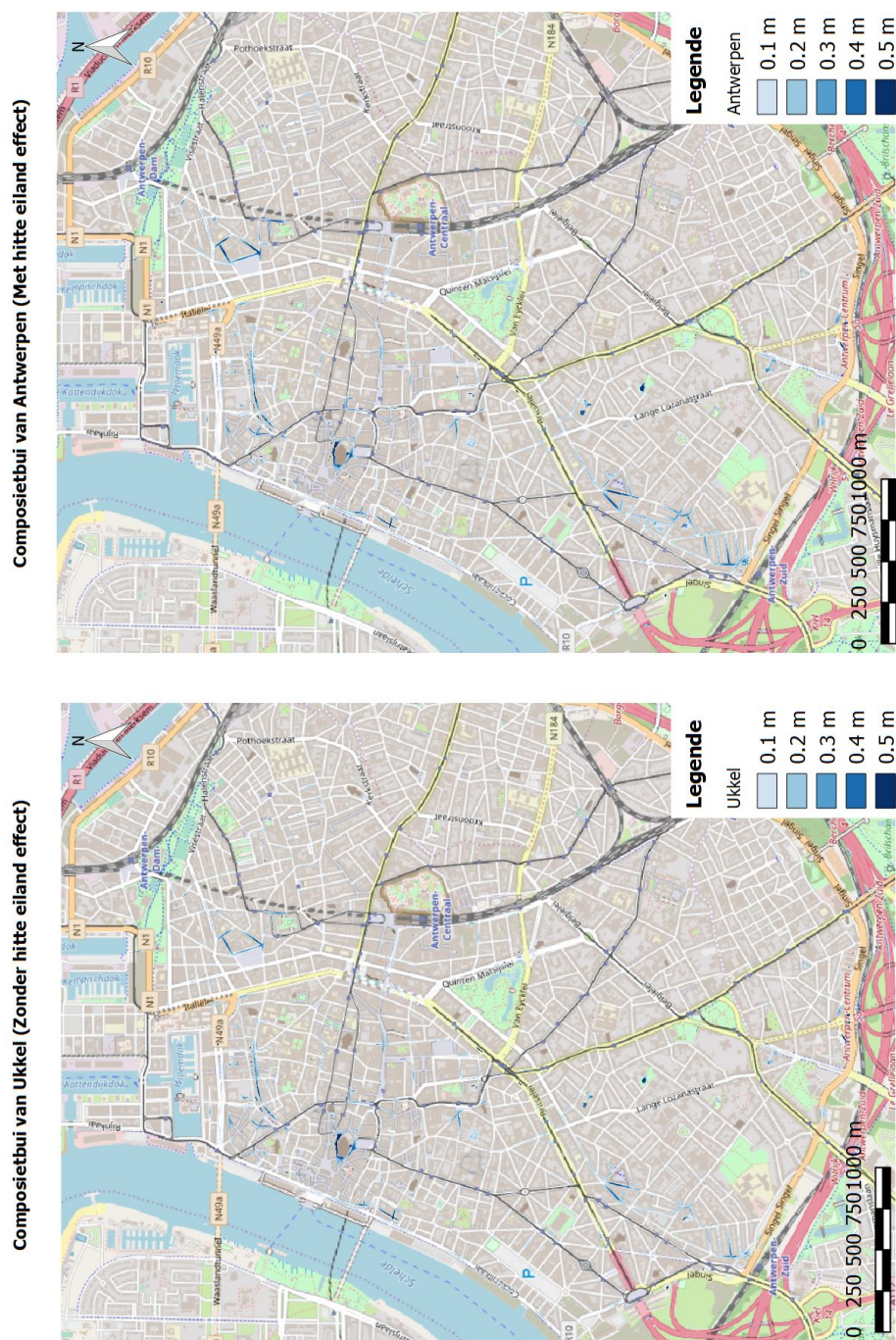
Figuur H.5: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het Midden scenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking van T20j Midden scenario in 2100



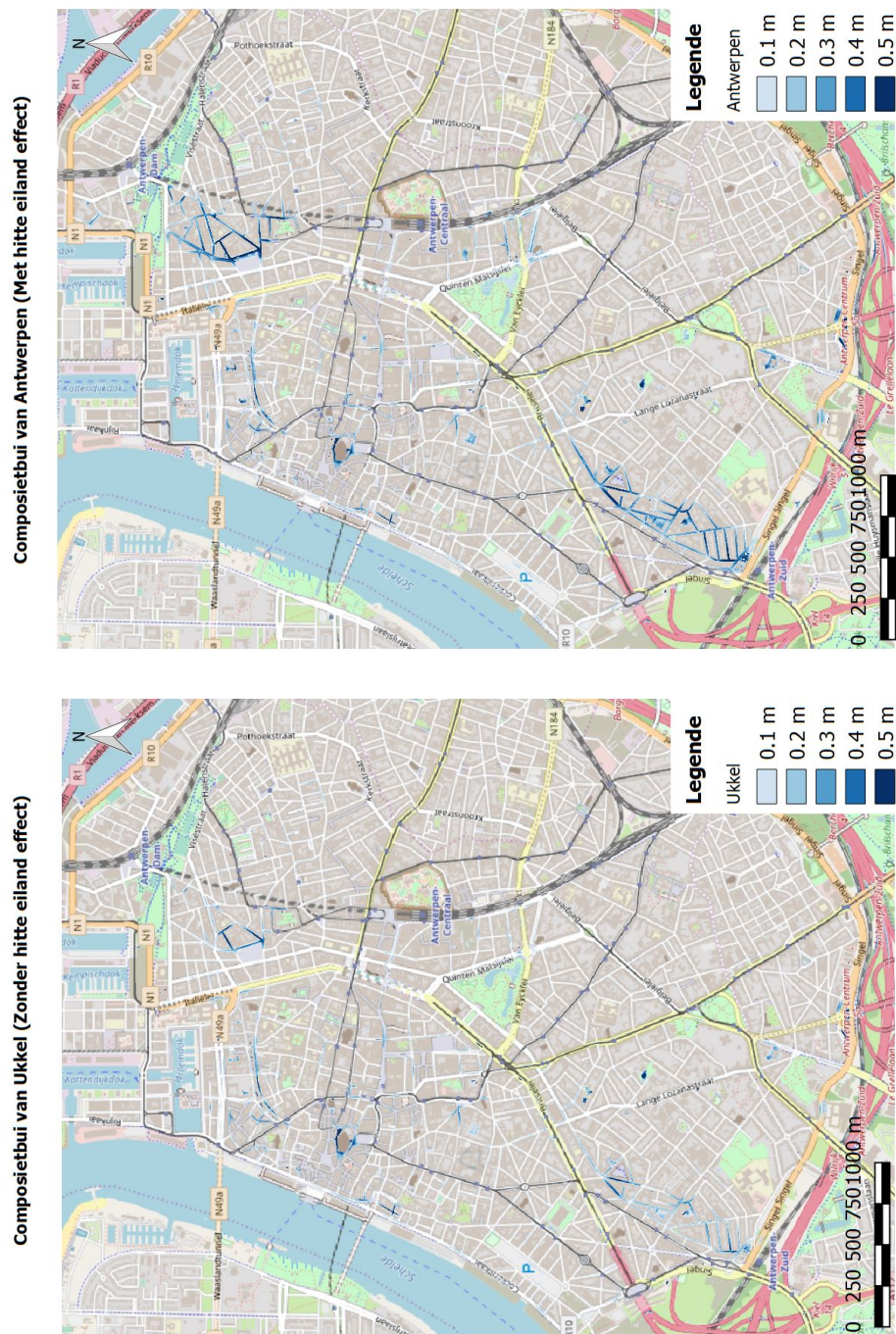
Figuur H.6: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het Midden scenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking van T2j Hoog Zomer scenario in 2100



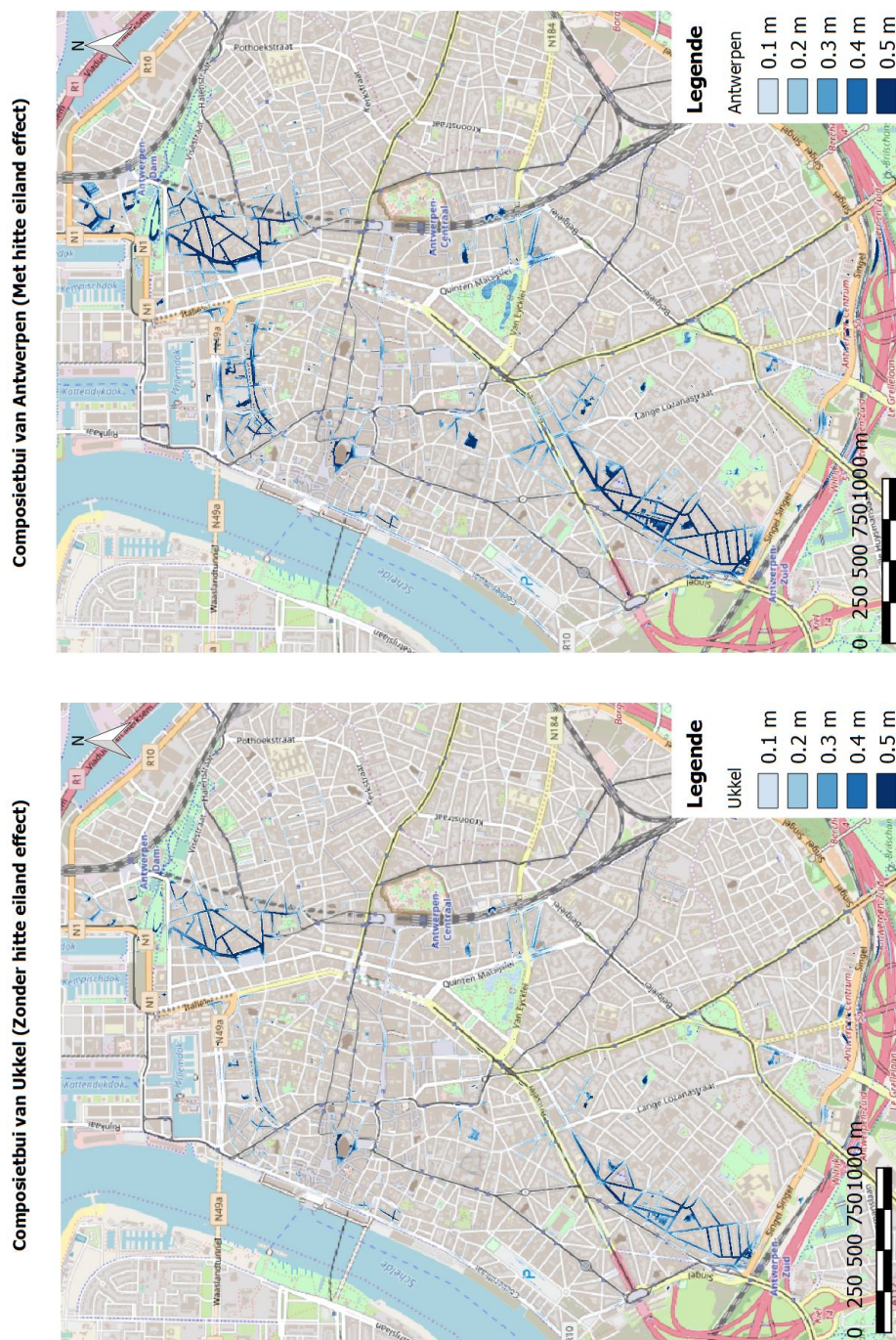
Figuur H.7: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 2 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking van T5j Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur H.8: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 5 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100

Hitte eiland effect - Vergelijking van T20j Hoog Zomer scenario in 2100



Figuur H.9: Vergelijking van de toestand zonder en met hitte eiland effect voor terugkeerperiode 20 jaar in het Hoog Zomer scenario in 2100

Bibliografie

- [1] Willems, P., De Niel, J., Tabari, H., (2015), *Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in Antwerpen*, KULeuven voor stad Antwerpen, september 2015, 153 p.
- [2] Brandweer Antwerpen, Foto's van wateroverlast, Interne communicatie, KULeuven.
- [3] Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, (2012), *Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen - Deel 5: Ontwerpneerslag*, p.18, [<http://www.integraalwaterbeleid.be/nl/publicaties/code-goede-praktijk-rioleringssystemen/Deel%205%20-%20ontwerpneerslag.pdf>], geraadpleegd op 3/11/2017].
- [4] Willems, P., (2016), *Cursus Sanitaire Bouwwerken - Maatgevende neerslag*, Presentatie Sanitaire Bouwwerken, KULeuven.
- [5] IPCC, (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- [6] van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., (2011), *The Representative Concentration Pathways: an overview*, Climatic Change 109 (2011) p.5-31.
- [7] Tabari, H., Taye, M.T., Willems, P., (2015), *Water availability change in central Belgium for the late 21st century*, Global and Planetary Change 131 (2015) p.115-123, Elsevier Journal.
- [8] IPCC, (2013), *What is a GCM?*, [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html], geraadpleegd op 11/10/2017].
- [9] Tetra Tech ARD, (2014), *A review of downscaling methods for climate change projections*, Tetra Tech ARD for United States Agency for International Development, september 2014, 42 p., [http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf], geraadpleegd op 11/10/2017].

-
- [10] Brouwers, J., Peeters, B., Van Steertegem, M., van Lipzig, N., Wouters, H., Beullens, J., Demuzere, M., Willems, P., De Ridder, K., Maiheu, B., De Troch, R., Termonia, P., Vansteenkiste, Th., Craninx, M., Maetens, W., Defloor, W., Cauwenberghs, K., (2015), *MIRA Klimaatrapport 2015, over waargenomen en toekomstige klimaatveranderingen*, Vlaamse Milieumaatschappij i.s.m. KU Leuven, VITO en KMI., Aalst, Belgium, 147 p.
- [11] Willems, P., *Impact van klimaatverandering op Antwerpen*, Waterproef - Naar een klimaatbestendig Antwerpen, Presentatie, KULeuven.
- [12] Poelmans, L., (2011), *The relative impact of climate change and urban expansion on river flows: a case study in central Belgium*, PhD Thesis, KULeuven.
- [13] Willems, P., (2016), *Cursus Sanitaire Bouwwerken - Inleiding*, Presentatie Sanitaire Bouwwerken, KUleuven.
- [14] Vlaamse Overheid, *Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen*, [<https://www.vlaanderen.be/nl/bouwen-wonen-en-energie/bouwen-en-verbouwen/witboek-beleidsplan-ruimte-vlaanderen>], geraadpleegd op 28/5/2018].
- [15] Stad Gent, (2018), *Kwetsbaarheidsanalyse bij wateroverlast in Gent: impact, risico's en remediërende maatregelen*, Rapport Arcadis, UGent en KULeuven in opdracht van stad Gent, Persoonlijke communicatie via promotor.
- [16] Kaspersen, P.S., Ravn., N.H. Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., Drews, M., (2017), *Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding*, Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.
- [17] Hunt, A., Watkiss, P., (2011), *Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature*, Climatic Change 104 (2011) p.13-49.
- [18] Schreider, S.YU., Smith, D.I., Jakeman, J., (2000), *Climate Change impacts on urban flooding*, Climatic Change 47 p.91-115.
- [19] IPCC, (2013), *About stochastic weather generators*, [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/weather_generators.html], geraadpleegd op 31/1/2018].
- [20] eWater, (2013), *IHACRES*, [<https://toolkit.ewater.org.au/Tools/IHACRES>], geraadpleegd op 31/1/2018].
- [21] London Climate Change Partnerschip, (2002), *A Climate Change Impacts in London - Evaluation Study*, UK Climate Impacts Programme (UKCIP), p.293.
- [22] Duffield, C., Clerk, T., Firth, J., (2010), *Rising to the Challenge - The City of London Climate Change Adaptation Strategy*, First Published May 2007, Revised and Updated January 2010.

-
- [23] WSP, (2017), *City of London - Strategic Flood Risk Assessment*, City of London Corporation.
 - [24] Willems, P., De Cruz, L., Delobbe, L., Reyniers, M., Van Ootegem, L., Mahy, G., Li, X., Muñoz Lopez, C., Murla Tuyls, D., Wang, L-P., Ntegeka, V., Wolfs, V., Foresti, L., Lebeau, J., Marechal, J., Bogaert, J., Van Herck, K., Creten, T., Van Balen, K. (2017), *PLURISK - Forecasting and management of extreme rainfall induced risks in the urban environment*, Belgian Science Policy 2017 (Research Programme Science for a Sustainable Development), 110 p.
 - [25] ESRI, (2016), *What is Lidar data?*, [<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>], geraadpleegd op 31/1/2018].
 - [26] Van Ackere, S., Glas, H., Vandenbulcke, A., Stal, C., Decock, M., Deruyter, G., De Wulf, A., De Maeyer, P., (2016), *4D Coastal Flood Analysis and Visualisation for Urban Areas*, UGent.
 - [27] Van Ackere, S., Glas, H., Deruyter, G., De Wulf, A., De Maeyer, P., (2016), *Development of a 3D dynamic flood WebGIS visualisation tool*, UGent.
 - [28] Stad Antwerpen, (2017), *Stad in Cijfers: Dashboard*, [<https://stadincijfers.antwerpen.be/dashboard/>], geraadpleegd op 20/12/2017].
 - [29] KMI, (2017), *Klimaatstatistieken van de Belgische gemeenten - Toelichting*, [http://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climateCity_info_nl.pdf], geraadpleegd op 21/12/2017].
 - [30] KMI, (2017), *Klimaatstatistieken van de Belgische gemeenten, Antwerpen*, [http://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate_INS11002_ANTWERPEN_nl.pdf], geraadpleegd op 21/12/2017].
 - [31] De Niel, J., *Composietbuien van Antwerpen*, KULeuven, Interne communicatie.
 - [32] Belga/RR, (2016), *Zware wateroverlast in Antwerpen en West-Vlaanderen*, [<http://www.knack.be/nieuws/belgie/zware-wateroverlast-in-antwerpen-en-west-vlaanderen/article-normal-710173.html>], geraadpleegd op 3/11/2017].
 - [33] Huirne, J., (2016), *Noodweer bracht regen voor anderhalve maand*, [<https://nieuws.meteovista.be/31-05-2016-noodweer-bracht-regen-voor-een-maand/1>], geraadpleegd op 3/11/2017].
 - [34] Deboosere, F., (2016), *Nieuws 2016*, [<https://www.frankdeboosere.be/nieuws/news2016/news2016.php>], geraadpleegd op 23/12/2017].
 - [35] Deboosere, F., (2016), *Nieuws 2014*, [<https://www.frankdeboosere.be/nieuws/news2014/news2014.php>], geraadpleegd op 24/12/2017].

-
- [36] Brandweer Antwerpen, *Meldingen van wateroverlast*, Excel files, Interne communicatie, KULEuven.
- [37] VRT, (2012), *Slecht weer veroorzaakt wateroverlast en ongevallen op de weg*, [<http://deredactie.be/cm/vrtnieuws/videozone/nieuws/binnenland/1.1753675>, geraadpleegd op 23/12/2017].
- [38] Rio-Link, (2018), *Antwerpen Overkoepelend deel*, Rio-Link, Antwerpen, Persoonlijke communicatie, Intern document Rio-Link.
- [39] Innovyze, (2013), *Flood Cone Calculations*, [http://blog.innovyze.com/wp-content/uploads/2013/02/Flood_cone_calculations.pdf, geraadpleegd op 14/12/2017].
- [40] Wolfs, V., (2017), *Intro InfoWorks software*, Presentatie, KULEuven.
- [41] Iniguez, A., Wolfs, V., Willems, P., (2018), *Technical note: Urban drainage modelling City of Antwerp - InfoWorks ICM model set up*, Technisch document, KULEuven.
- [42] Bertels, D., Janssen, L., (2018), *Duurzame maatregelen tegen wateroverlast in stedelijke omgeving*, Masterthesis, KULEuven.
- [43] Willems, P., Van Uytven, E., (2016), *Climate Perturbation Tool - Manual*, KULEuven.
- [44] Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., (2013), *Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments*, Journal of Hydrology 508 (2014) p.307-321, Elsevier Journal.
- [45] Berlamont, J., (2004), *Rioleringen*, Acco Uitgeverij Leuven, p.434.
- [46] Willems, P., (2013), *Waterloopmodellering*, Acco Uitgeverij Leuven, p.272.
- [47] Gonzalez Iniguez, A.A, (2017), *Figuur - Thiessen polygoon methode toegepast op Antwerpen*, KULEuven, Interne Communicatie.
- [48] Coördinatiecomissie Integraal Waterbeleid, (2012), *Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen*, p.56, [<http://www.integraalwaterbeleid.be/nl/publicaties/code-goede-praktijk-rioleringssystemen/Code%20Van%20Goede%20Praktijk%20Rioleringssystemen.pdf>, geraadpleegd op 13/12/2017].
- [49] Shapiro, M., Westervelt, J., (1992), *R.MapCalc - An Algebra for GIS and Image Processing*, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Illinois, USA.
- [50] Shook, K., Armstrong, R., Sharomi, O., Spiteri, R., Pomeroy, J., (2014), *The WDPM User's Guide*.

- [51] Ntegeka, V., (2017), *Flood Mapping report methodology*, Interne nota, p.3, dd. 1/12/2017.
- [52] ICTS KULeuven, (2018), *FTP*, [<https://admin.kuleuven.be/icts/services/ftp>, geraadpleegd 9/5/2018].
- [53] Wix.com, Inc, (2006-2018), *Alles begint met een geweldige website*, [<https://nl.wix.com/>, geraadpleegd 9/5/2018].