KU LEUVEN

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN

Duurzame maatregelen tegen wateroverlast in de stedelijke omgeving, casestudie Antwerpen

Daan Bertels
Lars Janssen

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

Promotor:
Prof. dr. ir. P. Willems

Begeleider:
Dr. ir. V. Wolfs

Academiejaar 2017 – 2018

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteurs 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

Na een jaar van hard werken kunnen we u met trots onze masterproef presenteren. Zonder de hulp van vele anderen waren we er zeker niet in geslaagd om dit werk te voltooien en we willen graag de tijd nemen om hen daarvoor te bedanken. In de eerste plaats bedanken we onze promotor prof. dr. ir. Patrick Willems, voor het aanreiken van dit interessante onderwerp, de suggesties en om ons zo de kans te geven deze thesis te voltooien. Daarnaast hadden we dit werk niet tot een goed einde kunnen brengen zonder de uitstekende begeleiding van dr. ir. Vincent Wolfs. Hij stond op elk moment klaar om onze vragen en twijfels te bespreken en ons verder op weg te helpen. Het is dankzij zijn hulp dat we trots kunnen zijn op ons werk. We would also like to thank ir. Andres Alfonso Gonzalez Iniguez for his help with the building of our 1D-2D-model. Without his contribution, we would probably still be struggling to get it working.

Persoonlijk wil ik graag nog mijn vrienden en familie bedanken, en in de eerste plaats mijn ouders. Gedurende dit eindwerk, maar zeker ook mijn volledige studies hebben ze in mij geloofd en me gesteund. Tenslotte wil ik graag mijn vriendin bedanken, voor het nalezen, het relativeren wanneer de computer of de modellen het weer lieten afweten, maar vooral om er altijd voor mij te zijn.

Veel dank gaat uit naar mijn familie. Enerzijds naar mijn ouders, meter en nonkel voor de steun doorheen mijn studies. Anderzijds naar mijn broer voor het advies en de hulp bij de finalisering van dit eindwerk. Tot slot wil ik graag mijn vrienden bedanken waar ik altijd terecht kon om stoom af te blazen.

Daan Bertels
Lars Janssen

Inhoudsopgave

Voorwoord **i**

Samenvatting **iv**

Lijst van figuren en tabellen **v**

Lijst van afkortingen en symbolen **xiv**

1 Inleiding **1**
1.1 Onderzoek naar bronmaatregelen in het centrum van Antwerpen . . 1
1.2 Methodologie 2

2 Literatuurstudie **7**
2.1 Bronmaatregelen 7
2.2 Studiegebied Antwerpen 19
2.3 Besluit 23

3 Bespreking van de simulatiegegevens en validatie van het Infoworksmodel **25**
3.1 Simulatiedata en randvoorwaarden 25
3.2 Infoworksmodel voor Antwerpen 28
3.3 Besluit 42

4 Selectie en implementatiewijze van bronmaatregelen **45**
4.1 Selectie van bronmaatregelen 45
4.2 Implementatiewijze van de gekozen bronmaatregelen in een Infoworks ICM-model 47
4.3 Implementatie van bronmaatregelen als 'SUDS control' in Infoworks uit GIS-informatie 56
4.4 Besluit 60

5 Opstellen van het gekoppeld 1D-2D-model **61**
5.1 Inleiding 61
5.2 Opbouw en implementatie van het 2D-model 62
5.3 Evaluatie van het 2D-model 67
5.4 Vergelijking tussen het 1D en 2D model 73
5.5 Besluit 77

6 Evaluatie van bronmaatregelen tegen lokale wateroverlast met Infoworks ICM **79**

6.1 Inleiding 79
6.2 Locatie 1 79
6.3 locatie 2 84
6.4 Locatie 3 86
6.5 Resultaat 89
6.6 Besluit 90

7 Evaluatie van grootschalige toepassing van bronmaatregelen op de wateroverlast met Infoworks ICM 91
7.1 Inleiding 91
7.2 Scenario's 92
7.3 Resultaten 98
7.4 Sensitiviteitsanalyse groendaken 100
7.5 Besluit 104

8 Opstellen van een conceptueel rioleringsmodel 107
8.1 Inleiding 107
8.2 Methodologie 108
8.3 Configuratie en calibratie van de deelmodellen 112
8.4 Modelprestaties en resultaten van lange termijn simulaties 127
8.5 Besluit 137

9 Algemeen Besluit 141
9.1 Hoofddoelstelling van het onderzoek 141
9.2 Evaluatie van de subdoelstellingen 142
9.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek 144

A Bespreking van het Infoworks ICM netwerk 149
A.1 Analyse van de gegeven netwerken 149

B Verduidelijkende figuren bij de validatie van het netwerk 157
B.1 Neerslagintensiteiten 157
B.2 Overstromingspunten 162

C Aanpassingen aan het model 167

D Overstromingskaarten gebruikt bij de evaluatie van het gekoppeld 1D-2D-model 171

E Verduidelijkende figuren bij de oplossingsvoorstellen van de lokale wateroverlast 177

Bibliografie 181

Samenvatting

De hoge mate van verharding, de hoge bevolkingsdichtheid en het veranderende klimaat plaatsen beheerders van water in de stedelijke omgeving voor een grote uitdaging. Pluviale overstromingen ontstaan als gevolg van een versnelde regenwaterafvoer en een overbelasting van de rioleringen, en kunnen grote schade aanrichten. Een interessante oplossingsstrategie is het op grote schaal implementeren van bronmaatregelen. Deze kleinschalige en flexibele installaties bufferen het water voor dat het de rioleringen in stroomt, zijn efficiënt in meerdere toekomstige klimaatsveranderingen en zijn bovendien in staat om ook andere negatieve effecten van verstedelijking op de waterhuishouding aan te pakken.

Deze masterproef beschrijft een onderzoek naar overstromingen in de stedelijke omgeving als gevolg van extreme regenval, en naar de mogelijke impact van het implementeren van zulke bronmaatregelen. Als casestudie wordt er gekeken naar het centrum van Antwerpen, meer bepaald de westelijke helft van het gebied binnen de ring. De focus zal voornamelijk liggen op een grootschalige toepassing van groendaken, maar ook doorlatende verhardingen en groene infiltratiebekkens komen aan bod. Om de positieve effecten te begroten, wordt een bestaand 1D-hydrodynamisch model gevalideerd aan historische overstromingsgegevens en vervolgens gekoppeld aan een nieuw 2D-oppervlakte overstromingsmodel. Een ander model dat wordt opgesteld, is een conceptueel rioleringsmodel dat de verschillende fysische processen in het gebied aggregeert om zo veel kortere rekentijden te behalen. Zo kunnen ook lange termijn simulaties uitgevoerd worden.

De wateroverlast wordt systematisch aangepakt door in een eerste fase drie gebieden te identificeren die volgens de modellen gevoelig zijn aan rioleringsoverstromingen. Vervolgens worden negen locaties gekozen waar de drie bestudeerde bronmaatregelen worden toegepast. Het resultaat is een vermindering van de overstromingsvolumes in het volledige gebied met 18%, voor de historische bui van 30 mei 2016. In een tweede fase wordt een kaart opgesteld van het potentieel aan groendaken voor het studiegebied. Op basis van deze kaart worden strategische scenario's van implementatie van deze daken opgesteld en worden simulaties uitgevoerd, zowel in het gedetailleerde 1D-2D model, als met het conceptueel model. Hieruit blijkt dat deze bronmaatregelen in staat zijn om de overstromingen met een belangrijke factor te reduceren. Ook de frequentie waarmee overstromingen of bepaalde piekvolumes in de rioleringen zullen voorkomen, nemen af door het toepassen van groendaken.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

1.1 Schema dat de opbouw van dit rapport weergeeft. 4

2.1 Groendaken in stedelijke omgeving [15]. 10
2.2 Mill Creek Park (Beardsley, 1998) [33]. 11
2.3 Infiltratiestrook (atelier Groenblauw) [8]. 12
2.4 Voorbeeld van grasbetontegels als doorlatende parkeerplaats [16]. 13
2.5 Schematisering groendaksystemen [21]. 16
2.6 Overzicht van de verschillende wijken die zich in het studiegebied bevinden. 19
2.7 Overzicht afstromingsrichtingen zuiveringsgebied Antwerpen-Zuid met belangrijkste pompstations. De rode lijnen geven Aquafin infrastructuur aan, de paarse zijn rio-link projecten. [31] 21
2.8 Infiltratiegevoeligheid van de bodem in het studiegebied [36]. 22
2.9 Wateroverlast Antwerpen (BELGA) [4]. 22
2.10 Overzicht van historische overstromingen uit de data van de brandweer. 23

3.1 Kaart die het verschil geeft tussen simulaties met verschillende waterpeilen en voor een T5 en T20-bui. De punten geven de locaties weer die overstromen bij springtij, maar niet tijdens het gemiddelde hoogwater. 27
3.2 Correctiefactor op de constante DWA, zoals gebruikt in het gedetailleerde model in Infoworks ICM. 28
3.3 Locaties van de gebruikte pluviografen. 31
3.4 Overstroming op 11 juli 2012. 32
3.5 Overstroming op 21 juni 2013. 33
3.6 Overstroming op 27 juli 2013. 33
3.7 Overstroming op 9 september 2013. 33
3.8 Overstroming op 30 mei 2016. 34
3.9 Situering van deelnetwerken 2 en 3. 36
3.10 Voorbeeld van een leiding waarvan het afwaartse kruinpeil boven het maaiveld uitsteekt. Dit duidt zeer waarschijnlijk op een fout in het netwerk. 37

3.11 Voorbeelden van leidingen met een negatieve gradiënt. Situatie (a) stelt een duiker voor onder een dok in het noorden van het studiegebied. Situatie (b) bevindt zich in het centrum van de stad en duidt mogelijks op een fout in het netwerk. 37
3.12 Kaart met overzicht van de verschillende brandweeroproepen(zuidelijke deel). 39
3.13 Kaart met overzicht van de verschillende gesimuleerdeoverstromingsgebieden (zuidelijke deel). 39
3.14 Kaart met overzicht van de verschillende brandweeroproepen(noordelijke deel). 40
3.15 Kaart met overzicht van de verschillende gesimuleerdeoverstromingsgebieden (noordelijke deel). 40
3.16 Grafiek die het aantal historische overstromingen weergeeft in verschillende zones volgens 'kriticiteit' [48]. 41

4.1 Conceptueel model van een bronmaatregel zoals voorgesteld in de Infoworks ICM SUDS-controlmodule [18]. 48
4.2 Conceptueel model van een groendak zoals voorgesteld in Infoworks ICM [18]. 49
4.3 Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van een groendak, T5. 50
4.4 Uitstroom van water uit het groendak via de drainagemat onder een sterk doorlatende grondlaag. Bui van 27-28 juli 2013. In het rood wordt de waarde gegeven voor een drainagemat van 5mm dikte, alle andere diktes vallen samen onder de dunne lijn. 52
4.5 Uitstroom van water uit het groendak via de drainagemat voor verschillende grondtypes. Bui van 27-28 juli 2013. 53
4.6 Schematische voorstelling van een infiltratiebekken in Infoworks. 53
4.7 Opstelling van de test-modellen in Infoworks. 54
4.8 Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van een infiltratiebekken. 55
4.9 Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van doorlatende verharding. 56
4.10 Stroomdiagram van de verschillende stappen in de implementatieprocedure. 59
4.11 Afstroming van subcatchment 23104 bij een T5-bui. Met(blauw) en zonder(groen) aanwezigheid van het groendak. 60

5.1 Schematische voorstelling van de invoer van neerslag in het 1D-2D model volgens de gebruikte methode. Water stroomt het systeem binnen via de subcatchments, waar het volgens een routingmodel vertraagd en afgevlakt wordt om vervolgens het 1D-model in te stromen. Via de mangaten kan er water overstromen of terugvloeien van en naar het 2D-model. 64

5.2 Schematische voorstelling van de invoer van neerslag in het 1D-2D model volgens de alternatieve methode. Neerslag valt op de 2D-elementen waar de stroming berekend wordt volgens de SWE-vergelijkingen. Gedetailleerde inlaten worden best toegevoegd opdat dit water zo realistisch mogelijk het 1D-model kan instromen. Hoewel deze werkwijze dus beter de realiteit nabootst vraagt hij een zeer gedetailleerde kennis van de inlaten en landgebruik. Bovendien worden zeer hoge rekentijden verwacht omdat alle elementen van het 2D-model tegelijk belast worden. 64
5.3 Voorbeeld van een vereenvoudiging van de dataset van de verschillende gebouwen. Een volgende vereenvoudiging bestaat erin om de "gaten" in de verschillende gebouwblokken op te vullen om de grootte van het 2D-model nog verder te beperken. Dit wordt hier niet getoond. 65
5.4 Voorbeeld van het aanpassen van de subcatchments voor het model waar neerslag rechtstreeks in het 2D-model zal werken. 67
5.5 Kaart die de verschillende 2D-elementen op de kaart van Antwerpen weergeeft. 68
5.6 Schematische voorstelling van de opbouw van de verschillende gebieden binnen het 2D-model. 68
5.7 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Rechts wordt een detail van de linse figuur gegeven, namelijk de overstrmingen rond het gebouw 'Den Bell' (zie verder). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 71
5.8 Legende van de 2D-overstromingskaarten, waterdieptes in [m]. 71
5.9 Overstromingskaart met rechtstreekse neerslag in het 2D mesh. 71
5.10 Detail overstromingskaart met rechtstreekse neerslag in 2D mesh. 72
5.11 Waterhoogte in cel 1. 72
5.12 Waterhoogte in cel 2. 72
5.13 Overstromingskaart 1D-model voor 27 en 28 juli 2013. 75
5.14 Overstromingskaart 1D-2D model voor 27 en 28 juli 2013. 75
5.15 Overstromingskaart 1D-model voor 30 mei 2016. 76
5.16 Overstromingskaart 1D-2D model voor 30 mei 2016. 76

6.1 Links: Satellietbeeld locatie 1 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh. 80
6.2 Satellietbeeld van de Colruyt Antwerpen-Zuid [17]. 81
6.3 Satellietbeeld van het Cashwell gebouw in Antwerpen [17]. 81
6.4 Satellietbeeld van het complex 'Zuidervelodroom' in Antwerpen [17]. . . 82
6.5 Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de Colruyt-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 83
6.6 Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de Zuiderveldroom-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 84

6.7 Links: Satellietbeeld locatie 2 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh. 85
6.8 Satellietbeeld van de parking Vlooienmarkt in Antwerpen [17]. 85
6.9 Satellietbeeld van het CVO provinciaal instituut PIVA in Antwerpen [17]. 86
6.10 Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de campus van het CVO provinciaal instituut PIVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25] 87
6.11 Links: Satellietbeeld locatie 3 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh. 87
6.12 Satellietbeeld van Den Bell in Antwerpen [17]. 88
6.13 Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de campus van het CVO provinciaal instituut PIVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 89
6.14 Geborgen volume in het bufferbekken gelegen aan Den Bell voor de bui van 27-28 juli 2013. 90

7.1 Situering van de voorgestelde oplossingen. 93
7.2 Waterpeil in de Schelde voor 2016, tegenover de gemiddelde, relatieve onderschrijdingstijd. Gegevens van Waterinfo [26]. 94
7.3 Vergelijking van de zelf opgestelde kaart 'potentiële groendaken' in het groen, met de oorspronkelijke kaart van Stad Antwerpen in het blauw. Achtergrondkaart OSM [25]. 96
7.4 Satellietbeeld van de campus Sint-Vincentius in Antwerpen, Google Maps [17]. 96
7.5 Kaart van het scenario groendak_brederode_100%: potentiële groendaken worden groen gekleurd. 97
7.6 Kaart van het scenario parking_brederode_75%: potentiële doorlatende verhardingen worden oranje gekleurd. 99
7.7 Overstromingsoppervlaktes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 27 en 28 juli 2013. 101
7.8 Overstromingsoppervlaktes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 30 mei 2016. 101
7.9 Overstromingsvolumes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 27 en 28 juli 2013. 102
7.10 Overstromingsvolumes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 30 mei 2016. 102
7.11 Verloop overstortdebiet. 104

8.1 Schematische voorstelling van de structuur van het totale conceptueel model en de verschillende deelstructuren. 110
8.2 Opbouw van het conceptueel groendakmodel volgens [27]: figuur 1a. . . 114
8.3 Cumulatief uitstromend debiet van het conceptueel groendakmodel (blauw), het groendak in Infoworks (oranje) en de neerslag (grijs) voor de configuratie zonder (a) en met (b) evaporatie. 115

8.4 Uitstromend debiet van het conceptueel groendakmodel (blauw) en het groendak in Infoworks (oranje). 116
8.5 Uitstromend debiet van het conceptueel afstromingsmodel (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw). 117
8.6 Cumulatief uitstromend volume van het conceptueel afstromingsmodel (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw). . . 118
8.7 Cumulatief uitstromend volume van het conceptueel afstromingsmodel met factor 0.9 (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw). 118
8.8 Schets van het concept van het neerslagafstromingsmodel. 119
8.9 Situering van de verschillende SC's in het studiegebied. 121
8.10 Schematisch overzicht van de structuur van het riolerings-CM: SC's, (sub)fluxen en randvoorwaarden. 121
8.11 Voorbeeld van gelijkaardig gedrag van de leidingen in subflux. 122
8.12 Statische component van de stromingsrelatie voor de flux tussen SC1 en SC5. 123
8.13 Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en SC5 voor de bui van 30 mei 2016. De NSE waarde bedraagt 0.98. 123
8.14 Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en SC2 voor de T20 composietbui. De NSE waarde bedraagt 0.99. 123
8.15 Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en de Schelde voor de T20 composietbui. De NSE waarde bedraagt 0.20. . . 124
8.16 Hysterese in het verband tussen het volume in SC4 en het overstroomd volume in SC4 voor een T20 composietbui. 126
8.17 Kwadratisch overstromingscriterium voor SC4. In het blauw worden voor verschillende neerslaggebeurtenissen de maximale overstromingsvolumes en de maximale SC-volumes getoond. 127
8.18 Vergelijking van gesimuleerde overstromingen in SC3 voor de verschillende afstromingsmodellen. 129
8.19 Percentielplot van het volume in een groendak voor de 100-jarige reeks. 130
8.20 Exponentiële en Pareto-QQ-plot voor de piekvolumes in SC3. 132
8.21 Helling van de regressierechte in de Exponentiële en Pareto-QQ-plot voor de piekvolumes in SC3, als functie van het aantal weerhouden piekwaarden. 133
8.22 Pareto-QQ-plot van de piekvolumes in SC4: vergelijking tussen de scenario's basis en g100. 134
8.23 Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC3. 135
8.24 Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC4. 135
8.25 Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC3: Daling van de overstromingsfrequentie. 136
8.26 Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC4: Daling van de overstromingsdrempel. 136
8.27 Verandering van de gesimuleerde piek-overstromingsvolumes in SC3 voor de verschillende groendakscenario's. 138

8.28 Verandering van de gesimuleerde piek-overstromingsvolumes in SC4 voor de verschillende groendakscenario's. 138

A.1 Verschil in totale uitstroming (T2 Eilandje). 153
A.2 Verschil in totale uitstroming (T2 Markgrave). 153
A.3 Verschil in totale uitstroming (T2 Ring). 154
A.4 Verschil in totale uitstroming. 155

B.1 Neerslagintensiteiten 11 Juli 2012 (Wilrijk). 157
B.2 Neerslagintensiteiten 11 Juli 2012 (Melsele). 157
B.3 Neerslagintensiteiten 21 Juni 2013 (Wilrijk). 158
B.4 Neerslagintensiteiten 21 Juni 2013 (Melsele). 158
B.5 Neerslagintensiteiten 27-28 Juli 2013 (Melsele). 158
B.6 Neerslagintensiteiten 9-12 September 2013 (Wilrijk). 159
B.7 Neerslagintensiteiten 9-12 September 2013 (Melsele). 159
B.8 Neerslagintensiteiten 10 Augustus 2014 (Wilrijk). 159
B.9 Neerslagintensiteiten 10 Augustus 2014 (Melsele). 160
B.10 Neerslagintensiteiten 26 Augustus 2014 (Wilrijk). 160
B.11 Neerslagintensiteiten 26 Augustus 2014 (Melsele). 160
B.12 Neerslagintensiteiten 30 Mei 2016 (Wilrijk). 161
B.13 Neerslagintensiteiten 30 Mei 2016 (Melsele). 161
B.14 Overstromingspunten 11 Juli 2012 (Wilrijk links; Melsele rechts). 162
B.15 Overstromingspunten 21 Juni 2013 (Wilrijk links; Melsele rechts). . . . 162
B.16 Overstromingspunten 27-28 Juli 2013 (Melsele). 163
B.17 Overstromingspunten 9-12 September 2013 (Wilrijk links; Melsele rechts). 163
B.18 Overstromingspunten 10 Augustus 2014 (Wilrijk links; Melsele rechts). . 164
B.19 Overstromingspunten 26 Augustus 2014 (Wilrijk links; Melsele rechts). . 164
B.20 Overstromingspunten 30 Mei 2016 (Wilrijk links; Melsele rechts). 165

D.1 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het basismodel met fijne mesh ($15m^2$-$3.75m^2$). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 171
D.2 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het volgens het basismodel met fijne mesh ($15m^2$-$3.75m^2$). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 172
D.3 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 172
D.4 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 173

D.5 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met halvering van de debietscoëfficiënten (0.25). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 173
D.6 Overstromingskaart van de Brederodewijk bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met halvering van de debietscoëfficiënten (0.25). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 174
D.7 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met verdubbeling van de debietscoëfficiënten (1). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 174
D.8 Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met verdubbeling van de debietscoëfficiënten (1). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8. 175

E.1 Overzicht van de voorgestelde oplossing bij de speeltuin in de Balansstraat. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 177
E.2 Overzicht van de voorgestelde oplossing bij de Caswell-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 178
E.3 Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij het woonerf aan de Haantjeslei. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 178
E.4 Overzicht van de voorgestelde oplossingen voor de parking Vlooienmarkt aan de Desguinlei. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 179
E.5 Overzicht van de voorgestelde oplossingen voor de parking en het gebouw van de AVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]. 179

Lijst van tabellen

3.1 Verschillende netwerkelementen in het basis-Infoworksmodel. 30
3.2 Berekende terugkeerperioden voor de verschillende validatiebuien en verschillende aggregatieniveau's. 32
3.3 Onafhankelijke deelnetwerken zoals bepaald met de 'connectivity'-tool in ICM. 36
3.4 Overstromingslocaties in de werkelijke en gesimuleerde situatie. 38

4.1 Nodige (x) en optionele (o) lagen per type bronmaatregel zoals gebruikt in de Infoworks Suds control [18]. 48
4.2 Verschillende geteste implementaties van groendaken. 50

4.3 Verschillende geteste grondlagen in een groendak als SUDS-control. . . . 52

5.1 Resultaten van de vergelijking van berekeningsresultaten bij verschillende modellen, bui van 27 en 28 juli 2013 69
5.2 Resultaten van de vergelijking van berekeningsresultaten bij verschillende modellen, bui van 30 mei 2016. 70
5.3 Resultaten van simulaties met verschillende 2D netwerken. Voor de bui van 30 mei worden steeds de resultaten voor Melsele links en Wilrijk rechts getoond. 73
5.4 Maximale overstromingsvolumes. 74

6.1 Resultaten lokale oplossingen. 90

7.1 Scenario's voor het begroten van het effect van groendaken, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële groendaken die in rekening worden gebracht. 96
7.2 Scenario's voor het begroten van het effect van groendaken in de Brederodewijk, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële groendaken die in rekening worden gebracht. 97
7.3 Scenario's voor het begroten van het effect van het aanleggen van doorlatende parkeerstroken in de Brederodewijk, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële stroken die in rekening worden gebracht. 98
7.4 Resultaten scenario's 27-28 juli 2013. 100
7.5 Resultaten scenario's 30 mei 2016. 100
7.6 Resultaten sensitiviteitsanalyse 27-28 juli 2013. 103

8.1 Waarden van de parameters van het conceptueel groendakmodel, eenheden zijn mm/m^2 en minuten. 114
8.2 Waarden van de parameters van het aangepaste conceptueel groendakmodel, eenheden zijn mm/m^2 en minuten. 115
8.3 Waarden van de parameters van het conceptueel runoff-model, eenheden zijn mm/m^2 en minuten. 117
8.4 Overzicht van de effectieve oppervlakte en de populatie per deelstroomgebied van het CM. 119
8.5 Overzicht van de verschillende fluxen (en subfluxen) die de verbindingen vormen tussen de verschillende SC's. 122
8.6 NSE waarden van de vergelijking tussen de volumes voor de Infoworks en de CM simulaties in de verschillende SC's bij verschillende neerslaggebeurtenissen. Tussen haakjes wordt aangegeven of het event voor de calibratie of validatie werd toegepast. 125
8.7 Totale oppervlakte aan groendaken per SC en percentage van de verharde oppervlakte in dat SC dat ingenomen wordt door groendaken voor de gebruikte groendakscenario's. 130
8.8 Parameters van de EV-procedure voor SC3. 134
8.9 Parameters van de EV-procedure voor SC4. 134

A.1 Vergelijking tussen omvang van de verschillende netwerken. 149
A.2 Vergelijking tussen netwerken van verschillende subcatchments. 151
A.3 Vergelijking tussen netwerken van verschillende subcatchments. 152

C.1 Manuele aanpassingen van de leidingen. 169

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

CM	Conceptueel model
CMD	Conceptual model developper
DEM	Digital elevation model
DSM	Digital surface model
DWA	Droogweerafvoer
GIS	Geografisch informatiesysteem
ICM	Integrated catchment system
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SC	Subcatchment
SHE	Stedelijk hitte-eiland effect
SUDS	Sustainable urban drainage system
SWE	Shallow water equations

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Onderzoek naar bronmaatregelen in het centrum van Antwerpen

Het beheren van water in een stedelijke omgeving is geen eenvoudige opdracht. Steden worden gekenmerkt door een hoge mate van verharding waardoor verhinderd wordt dat regenwater in de bodem indringt. Om dit water tijdens hevige neerslag toch af te voeren, wordt er gebruik gemaakt van een rioleringsstelsel, al dan niet gescheiden van een afvoersysteem van (huishoudelijk) afvalwater. De snelle afvoer van regenwater kan afwaarts dan leiden tot rioleringsoverstromingen wanneer de intensiteit van de neerslaggebeurtenis de capaciteit van het voorziene rioleringsstelsel overschrijdt. Een logisch neveneffect van de snelle afvoer van hemelwater is het verdrogen van de ondergrond. De verharding verhindert dat water in de bodem kan insijpelen en zo de grondwaterlagen kan aanvullen. In een dichtbevolkt gebied als Vlaanderen kan dit leiden tot problemen met watervoorziening [38]. Nog een ander gevolg van de grote mate van verharding is de afwezigheid van vegetatie. In combinatie met de snelle afvoer van regenwater zorgt dit ervoor dat er veel minder water kan verdampen dan in een natuurlijke omgeving. Het resultaat is dat de vrijgekomen energie van dit verdampen kan leiden tot het opwarmen van de omgeving en zo bijdraagt tot het 'stedelijk hitte-eilandeffect' of SHE. Volgens een rapport van het VITO [22], waarin dit effect voor de Stad Antwerpen werd begroot, heeft dit stijgen van de temperatuur in de stad negatieve gevolgen voor de gezondheid en het welzijn van de inwoners, maar worden ook het gemiddelde energiegebruik en de goede werking van infrastructuur negatief beïnvloedt.

Een bijkomende complexiteit van al deze problemen is hun variabiliteit in tijd en ruimte. Zo wordt in [11] begroot dat als gevolg van de klimaatwijziging de toename in rioleringsoverstromingen erg groot kan zijn. Als gevolg van de stijgende temperatuur zal de verdamping kunnen toenemen met als gevolg een veel hevigere neerslagintensiteit bij zomerstormen. Daar tegenover staat de grote onzekerheid op de gebruikte klimaatscenario's waardoor de mogelijke effecten op lange termijn maar moeilijk te voorspellen vallen. In de studie werd ook aangetoond dat er een grote

ruimtelijke variabiliteit kan bestaan in de maatgevende neerslag in de stedelijke omgeving. Als gevolg van een samenspel van verschillende factoren (het SHE, verhoogde luchtvervuiling, topografie) kunnen steden te kampen krijgen met hogere neerslagintensiteiten dan het omliggende platteland. Naast de onzekerheid op het klimaat is ook de toekomstige ruimtelijke ontwikkeling van de stad geen gegeven. Hoewel deze gestuurd kan worden via ruimtelijke verordeningen en andere beleidsmaatregelen, valt er niet met zekerheid te zeggen hoe bijvoorbeeld de oppervlaktes verharding naar de toekomst zullen evolueren. Ook hier kunnen modellen gebruikt worden [28] om een inschatting te maken van de toekomstige veranderingen en hun gevolgen.

Om te verhinderen dat rioleringsoverstromingen schade veroorzaken in de stad kan men gebruik maken van klassieke oplossingen. Voorbeelden zijn het vergroten van leidingsdiameters, het plaatsen van bufferbekkens of het verhogen van de capaciteit van pompstations om met de neerslagintensiteiten van het meest negatieve klimaatscenario rekening te houden. Zoals hierboven beschreven is er een grote onzekerheid op deze toekomstige intensiteiten waardoor de kans groot is dat deze 'worst-case scenario' oplossingen helemaal niet economisch zijn. Bovendien ontstaan met het simpelweg vergroten van de capaciteit ook andere technische uitdagingen zoals het risico op bezinking door de lage stroomsnelheden in grote leidingen bij droog weer. Ook is het nu eenmaal niet mogelijk, zeker in de stedelijke omgeving, om leidingen te blijven vergroten. Deze zouden niet meer passen binnen de wegstructuur of conflicteren met bestaande nutsleidingen. Een andere strategie is inzetten op lokale, kleinschalige en flexibele bronmaatregelen die water opvangen, infiltreren of doen verdampen. Ze zijn niet alleen effectief onder elk scenario van ruimtelijke en temporele verandering van neerslag, maar gaan bovendien de andere negatieve effecten van verstedelijking tegen zoals het SHE door toelaten van verdamping of verdroging van het grondwater door infiltreren van opgevangen neerslag. Ze kunnen ook eenvoudig gecombineerd worden met andere stedelijke functies zoals parken, pleinen of parkeerplaatsen en zijn in staat de leefbaarheid van de stad te verhogen. Tenslotte zal een oplossing voor de verschillende problemen niet bestaan uit een enkele maatregel maar uit een combinatie van veel verschillende, lokale toepassingen die aan de oorzaak van de problemen werken.

1.2 Methodologie

1.2.1 Doelstellingen

Uit de voorgaande voorbeelden blijkt duidelijk de nood aan een nieuwe en duurzame bouwpolitiek voor het centrum van Antwerpen. Daarom heeft dit onderzoek als hoofddoelstelling het voorstellen van een mogelijke methodologie voor, en het kwantificeren zelf van het effect van bronmaatregelen op de stedelijke wateroverlast. Meer specifiek zal de focus liggen op de wateroverlast door rioleringsoverstromingen, als gevolg van korte maar hevige (zomer)buien. Het studiegebied bedraagt ruwweg de westelijke helft van het Antwerpse grondgebied binnen de ring en staat verder in detail beschreven in het volgende hoofdstuk. De effecten worden grotendeels begroot

aan de hand van computersimulaties met gedetailleerde modellen van de rioleringen en water op de straatoppervlakte van het studiegebied. Het gebruikte softwarepakket hiervoor is Infoworks ICM (Integrated Catchment Modelling), ontwikkeld door Innovyze [19]. Daarnaast wordt er ook een conceptueel model opgebouwd om het effect op langere tijdreeksen te berekenen.

Om deze probleemstelling systematisch aan te pakken, wordt ze verder verdeeld in verschillende subdoelstellingen. Deze worden afzonderlijk aangepakt maar reiken samen ook het antwoord op de hoofdvraag aan. Een eerste subdoelstelling bestaat erin een gegronde keuze te maken van enkele veelbelovende bronmaatregelen voor de specifieke case van Antwerpen-centrum. Door een literatuurstudie uit te voeren rond zowel het state-of-the-art onderzoek naar bronmaatregelen als naar het studiegebied en haar randvoorwaarden, kan een grondige keuze gemaakt worden van maatregelen die verder beschouwd worden in dit onderzoek. Door het aantal beschouwde opties te beperken wordt een gerichte en efficiënte aanpak mogelijk.

Een tweede deelvraag zal zich toespitsen op de hydraulische modellen waarmee de effecten van bronmaatregelen later gekwantificeerd kunnen worden. Naast een ééndimensionaal netwerkmodel van de rioleringen in het studiegebied zal er ook gewerkt worden met een oppervlaktemodel van het stadscentrum waarmee de overstromingen zelf beter berekend kunnen worden. De tweede subdoelstelling houdt dus in dat dit gekoppelde 1D-2D model voor Antwerpen zal worden opgesteld en gevalideerd. Ook het opstellen en calibreren van een conceptueel model voor de hemelwaterhuishouding van Antwerpen behoort tot deze doelstelling.

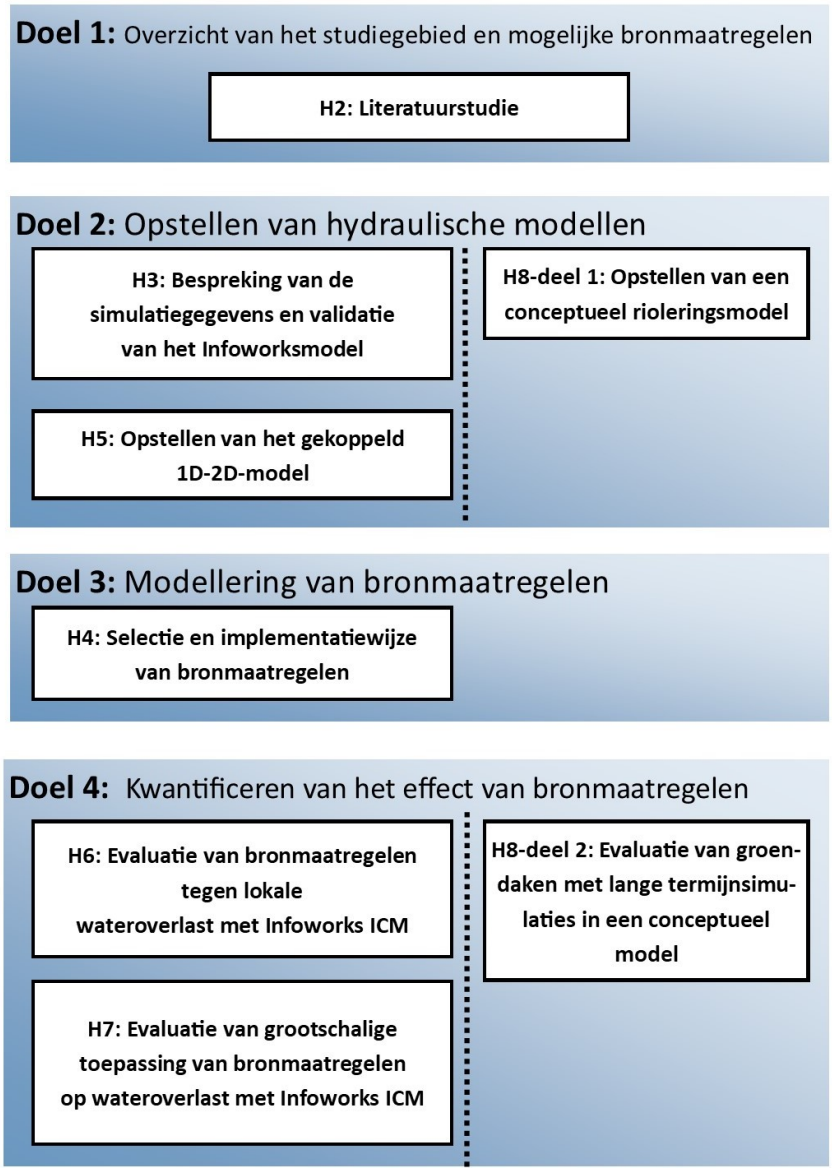
De derde subdoelstelling gaat dieper in op de implementatie van de verschillende bronmaatregelen in het computermodel. Voor elke maatregel die verder beschouwd wordt, zijn er verschillende opties en technieken om ze in het model in te geven. De verschillen liggen onder andere in het gebruik van andere modelelementen en in de mate waarin verschillende fysische processen die een rol spelen bij de werking van de infrastructuur, gemodelleerd worden. Als er meer fysische processen worden meegenomen in de berekening, kan meer inzicht gewonnen worden in de efficiëntie van de maatregel. Echter hoe meer gedetailleerd deze worden beschreven, hoe meer parameters er nodig zijn en dus ook hoe groter de onzekerheid op het eindresultaat door een cumulatief effect van de onzekerheden op de individuele parameters. Bij de implementatie van bronmaatregelen spelen ook nog andere factoren. Zo moet het mogelijk zijn om de maatregelen eenvoudig in te geven of mogen er geen numerieke fouten optreden bij de berekening. De derde doelstelling is dus het bepalen van de optimale methode om de geselecteerde bronmaatregelen in de modellen te gebruiken.

In de vierde en laatste subdoelstelling wordt er gefocust op de waterproblematiek zelf. De resultaten van de voorgaande deelstappen worden hier gebruikt om de overstromingsproblematiek aan te pakken. De verschillende taken houden onder andere in dat er een inventaris wordt opgemaakt van overstromingsgevoelige locaties. Vervolgens worden bronmaatregelen ingevoerd die in staat moeten zijn om deze

hinder te verminderen. Het effect dat ze hebben op de overlast wordt zorgvuldig gedocumenteerd.

1.2.2 Inhoud

Het onderzoek kan opgedeeld worden volgens de vier vermeldde subdoelstellingen. Deze indeling komt terug in de opbouw van de verschillende hoofdstukken die deze thesis bevat. Figuur 1.1 toont een schema dat de verdeling van de hoofdstukken over deze doelstellingen verduidelijkt.



Figuur 1.1: Schema dat de opbouw van dit rapport weergeeft.

Hoofdstuk 2
In dit hoofdstuk worden de resultaten van een literatuurstudie beschreven. De reeds bestaande en gebruikte bronmaatregelen worden onderzocht en geëvalueerd aan de hand van verschillende casestudies. Tijdens de literatuurstudie wordt de nodige voorkennis opgedaan in verband met de mogelijk toe te passen bronmaatregelen om de finale doelstelling van het onderzoek te voltooien. Verder worden de eigenschappen van het beschouwde studiegebied toegelicht.

Hoofdstuk 3
Doorheen het onderzoek wordt gebruik gemaakt van een Infoworks ICM-model van het studiegebied. Dit model is een transformatie van een Infoworks CS-model opgesteld door Rio-link. In hoofdstuk 3 zal een validatiestudie beschreven worden die uitgevoerd werd aan de hand van het ICM-model. De inconsistenties binnen het model worden geïdentificeerd en er wordt bepaald in welke mate het model waargebeurde overstromingen weet te voorspellen. Ook de nodige invoergegevens en randvoorwaarden die gebruikt zullen worden voor de simulaties doorheen het onderzoek zullen in dit hoofdstuk aangehaald worden.

Hoofdstuk 4
Aan de hand van enkele criteria worden de best passende bronmaatregelen (zoals onderzocht in hoofdstuk 2) geselecteerd om toegepast te worden in het beschouwde studiegebied. Vervolgens wordt er in dit hoofdstuk ook gekeken naar de verschillende implementatiewijze die toepasbaar zijn voor deze bronmaatregelen in de software Infoworks ICM. Aan de hand van testnetwerken wordt bepaald welke implementatiewijze de meest realistische resultaten met zich meebrengt.

Hoofdstuk 5
Om het effect van de bronmaatregelen correct te evalueren, wordt het gegeven model (een 1D-model) getransformeerd tot een 1D-2D model. Dit soort model is in staat de overstromingen realistischer weer te geven door rekening te houden met de topologie van het studiegebied. In dit hoofdstuk wordt de methode beschreven die gebruikt wordt om het 1D-2D model op te stellen in infoworks ICM. Ten slotte wordt het model geëvalueerd en vergeleken met zijn voorganger.

Hoofdstuk 6
Op basis van simulaties met het nieuwe 1D-2D model worden enkele locaties geïdentificeerd die gevoelig zijn voor overstromingen. Vervolgens worden de oorzaken voor deze problemen bepaald. Voor deze sites worden voorstellen gemaakt om de eerder geselecteerde bronmaatregelen lokaal toe te passen. Vervolgens worden deze oplossingen mee opgenomen in de simulaties en hun reducerend effect op de overstromingen begroot.

Hoofdstuk 7
In dit hoofdstuk wordt een alternatieve methode beschreven die gebruikt wordt om de bronmaatregelen toe te passen in een stedelijke omgeving. In tegenstelling tot

de methode beschreven in hoofdstuk 6 zal nu het volledige studiegebied beschouwd worden in plaats van enkele lokale sites. Er worden verschillende scenario's opgesteld die bestaan uit het grootschalig implementeren van de bronmaatregelen, verspreid over het hele studiegebied (of grote delen ervan). Vervolgens worden de resultaten van de simulaties besproken om te bepalen wat de mogelijke impact is van deze grootschalige toepassing van bronmaatregelen in stedelijke gebieden.

Hoofdstuk 8

Een nadeel van het werken met een gedetailleerd 1D-2D model is het feit dat enkel specifieke neerslaggebeurtenissen met beperkte duurtijd gesimuleerd kunnen worden. Om toe te laten dat ook lange neerslagreeksen toegepast kunnen worden, wordt er een bijkomend conceptueel model opgesteld. Dit hoofdstuk beschrijft de methode die gehanteerd wordt om aan de hand van het gedetailleerde Infoworks ICM-model een conceptueel rioleringsmodel op te stellen van het beschouwde netwerk. Tot slot wordt een fictieve 100-jarige neerslagreeks (gebaseerd op de 100-jarige neerslagreeks van Ukkel) gesimuleerd om de performantie van het nieuwe model te testen en de effecten van het toepassen van groendaken te illustreren.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

In dit tweede hoofdstuk worden verschillende vormen van bronmaatregelen besproken. Naast hun algemene werkingsprincipe worden ook de belangrijkste randvoorwaarden voor een goede werking vermeld. Om te kunnen beoordelen welke bronmaatregelen beter geschikt zijn dan andere in bepaalde situaties en om hun algemene doeltreffendheid in te schatten, worden voorafgaand een aantal prestatievereisten voor bronmaatregelen opgelijst. Verder komen ook verschillende studies aan bod die in het kader van dit onderzoek belangrijke inzichten en ideeën kunnen bevatten en die ook een beeld geven van het huidig onderzoek rond bronmaatregelen. Ten slotte wordt ook kort de situatie van het studiegebied geschetst.

2.1 Bronmaatregelen

2.1.1 Algemeen

Er bestaan zoals aangehaald verschillende oplossingen om wateroverlast in de stedelijke omgeving tegen te gaan. In de inleiding werd al geduid dat de klassieke technische oplossingen niet altijd de meest efficiënte oplossingen zullen zijn. Bronmaatregelen zijn daarentegen in staat om onder verschillende toekomstscenario's effectief te zijn en maken daarom het onderwerp uit van dit onderzoek. Een opmerking is wel dat ook bronmaatregelen op zichzelf waarschijnlijk niet in staat zijn om de volledige problematiek van wateroverlast in de stedelijke omgeving tegen te gaan. De optimale oplossing zal bestaan uit een combinatie van klassieke technieken zoals het verhogen van de capaciteit van pompstations of leidingen, het op grote schaal installeren van verschillende bronmaatregelen, maar ook uit nieuwe technologieën zoals gedetailleerde real-time voorspellingen en intelligente sturing.

De volgende paragraaf zal een overzicht geven van de belangrijkste prestatie-eisen waarop bronmaatregelen kunnen worden beoordeeld. Het is geen complete lijst van alle mogelijke eisen aan bronmaatregelen maar probeert toch een inzicht te geven van de voornaamste aandachtspunten bij de keuze van geschikte maatregelen. Verder wordt dan een opsomming gegeven van veelgebruikte maatregelen en hun werking. Ten slotte worden in de laatste paragraaf van deze sectie een aantal voorbeelden en

projecten rond bronmaatregelen aangehaald, samen met de voornaamste bevindingen en mogelijkheden tot verder onderzoek.

2.1.2 Prestatie-eisen van bronmaatregelen

Zoals vermeld worden in de volgende paragraaf verschillende eisen voorgesteld waaraan bronmaatregelen moeten voldoen. De oplijsting is niet overgenomen uit andere boeken of artikels maar probeert een bondige samenvatting te geven van verschillende richtlijnen betreffende het goed gebruik van bronmaatregelen, zoals de code van goede praktijk in Vlaanderen [9] en de toelichting [40] en de internationaal bekende CIRIA SUDS-manual [3]. Eenmaal verschillende ontwerpscenario's moeten vergeleken worden, kan men beter een numerieke uitwerking van de criteria gebruiken om het finaal ontwerp te kiezen. Een voorbeeld van zo'n methode is voorgesteld in [44].

Impact op riooloverstromingen en -overstorten

Dit beoordelingsaspect focust op het minimaliseren van de negatieve effecten van hemel- en oppervlaktewater in de stedelijke omgeving. In het licht van doelstellingen van dit onderzoek is het ook de belangrijkste.

In geval van hevige (zomer)buien kan het voorkomen dat het afvoerstelsel niet meer voldoet om al dit water af te voeren met als gevolg (afval)water op straat of vervuiling door riooloverstorten. Door water opwaarts tegen te houden, te hergebruiken, te infiltreren, te laten verdampen of vertraagd af te voeren, kunnen bronmaatregelen in staat zijn om deze negatieve effecten te minimaliseren.

Impact op grondwatertafel, hitte-eilandeffect en leefomgeving

Dit beoordelingsaspect focust op het maximaliseren van de positieve effecten van hemel- en oppervlaktewater in de stedelijke omgeving. Steden hebben meestal een verstorend effect op de natuurlijke weg van water: door de intensieve verharding wordt de grondwatertafel niet meer aangevuld. Het verdwijnen van vegetatie heeft gevolgen voor de evapotranspiratie en beïnvloedt zo het hitte-eilandeffect. Door de natuurlijke afwateringssituatie te herstellen of na te bootsen spelen goede bronmaatregelen positief in op deze effecten.

Kosten

Een volgend criterium is niet meteen prestatiegericht, maar is wel belangrijk voor beleidsmakers die de opdracht tot het gebruiken van bronmaatregelen kunnen geven. Aspecten die een rol spelen bij de kosten van bronmaatregelen zijn naast de gebruikte materialen en de constructietijd ook de ingenomen ruimte, het onderhoudsgemak en het gebruik van pompen of andere stroomverbruikers. In dit kader past de trend van het multifunctioneel karakter van bronmaatregelen. Zo kan een infiltratiekom gecombineerd worden met een park of speeltuin om zo tot een efficiënt ontwerp te komen. Dit koppelt dan weer terug naar het aspect leefomgeving en naar de duurzaamheid van het ontwerp.

Gebruikscontinuïteit

Dit criterium houdt verband met het vorige, maar houdt rekening met meerdere aspecten. Het is belangrijk dat maatregelen die gebouwd worden om een bepaalde functie te vervullen deze ook blijven vervullen. Zo zullen ondergrondse infiltratiekratten snel dichtslibben en kan men slechts op de infiltratieoppervlakte van de zijwanden rekenen, niet op de bodem. Ook de vullingsgraad kan een belangrijke rol spelen bij het effect van de bronmaatregel. Voorbeelden zijn bufferbekkens of regenwaterputten die focussen op hergebruik. Deze zijn dus bij voorkeur zo vol mogelijk, maar dit komt in conflict met andere functies als verminderen van overstromingen. Hiermee moet rekening gehouden worden bij het bepalen van de werkelijke effecten van de gebruikte maatregelen.

Duurzaamheid

Een laatste beoordelingsaspect is de duurzaamheid van de maatregelen. Dit slaat minder op het onderhouds- en materialenaspect maar focust op de ecologische impact. Soms hebben bronmaatregelen een vervuilende impact, zoals bijvoorbeeld infiltratie van vervuild water. Andere hebben dan weer een zuiverende werking dankzij bepaalde vegetatie. Voor de bouw van bronmaatregelen kunnen dure en energie-intensieve materialen nodig zijn. Ook het continu gebruik van pompen heeft een negatief effect op de milieu-impact. Daar tegenover staat dat bepaalde maatregelen, door infiltratie en verdamping, de totale afgevoerde waterhoeveelheid doen dalen zodat pompen en zuiveringsinstallaties afwaarts van het stelsel minder water moeten verwerken en dus minder energie moeten gebruiken.

Een interessante studie in dit kader wordt voorgesteld in [35]. Hier wordt voor een bepaalde case de balans gemaakt tussen hoger energiegebruik en uitstoot van broeikasgassen voor de bouw en het materiaalgebruik enerzijds, en de verminderde energievraag en uitstoot door de werking van bepaalde doorlatende verhardingen anderzijds. Men komt tot de conclusie dat de balans wel voordelig is, maar een zeer lange 'terugbetaal'-periode heeft (70 tot 110 jaar voor het energiegebruik, 100 tot 150 jaar voor uitstoot). Hoewel de effecten waarschijnlijk sneller positief zijn wanneer ook de vermeden schade door wateroverlast in rekening wordt gebracht, laat dit voorbeeld toch zien dat men voorzichtig moet zijn om zomaar elke genomen maatregel "duurzaam"te noemen.

2.1.3 Voorbeelden van bronmaatregelen

Groendaken

Groendaken zijn (meestal) platte daken die bedekt zijn met vegetatie. Afhankelijk van de dikte van de grondlaag op het dak groeien er kleine planten als grassen en mossen tot grotere struiken en zelfs bomen [41].

Het voornaamste doel van een groendak is het opvangen, bufferen en deels doen verdampen van regenwater. Water dat op het dak valt, wordt tegengehouden door de wortelstructuur van de planten. Door de bodemstructuur op het dak wordt het water vervolgens vertraagd afgevoerd. Bovendien zullen de planten een deel van het water vasthouden, opnemen en later doen verdampen. Zo zijn ze in staat om een significant effect te hebben op de piekbelasting bij intensieve zomerbuien. Belangrijk is om hierbij op te merken dat de buffercapaciteit van groendaken, net zoals bij oppervlakteafstroming, sterk afhankelijk is van de voorgaande toestand. Zo zal een groendak na een lange droge periode meer water kunnen opnemen dan na een vochtige, regenachtige periode [3].

Naast het bufferen van regenwater heeft een groendak het bijkomend voordeel dat het een natuurlijke koeling voorziet voor het gebouw waarop het wordt aangebracht [41]. Door verdamping onttrekt het water warmte, wat een besparing op airconditioning kan betekenen. Daarbij helpt het ook om het hitte-eiland effect van de stad tegen te gaan en brengt het meer groen in het straatbeeld wat de leefbaarheid ten goede komt.

Nadelen van groendaken zijn de vrij hoge investeringskost, de kost van een groendak ligt ongeveer tussen de 45 en 200 euro per m^2 [10], afhankelijk van de eigenschappen van het dak. Naast de duurdere materialen zijn ze ook zwaarder dan een klassieke dakstructuren en kunnen ze niet toepast worden zonder een structurele controle en eventuele versteviging. Groendaken zijn tenslotte beperkt tot platte daken. In principe is het wel mogelijk om ook op schuine daken vegetatie aan te brengen, maar door de helling zal het vertragend effect op de regenwaterafvoer teniet worden gedaan.

Figuur 2.1: Groendaken in stedelijke omgeving [15].

Infiltratiekommen en -bekkens

Infiltratiekommen zijn kleine bekkens in onverhard terrein waar hemelwater kan infiltreren in de bodem. Ze nemen vrij veel ruimte in maar door slim te combineren met andere functies kunnen ze geïntegreerd worden in andere openbare ruimtes

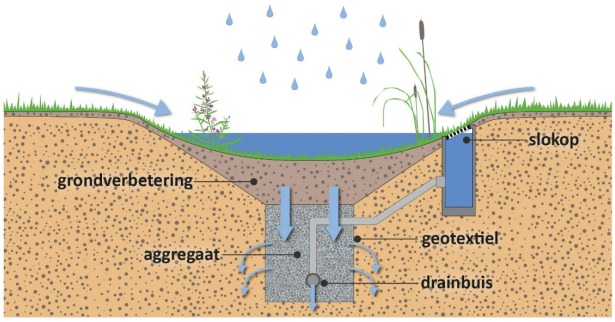
zoals parken en speelterreinen, zie bijvoorbeeld figuur 2.2. Water afkomstig van omliggende verhardingen wordt afgevoerd naar het bekken waar het kan infiltreren. Een overstort naar het rioleringsstelsel wordt voorzien om te verhinderen dat het waterpeil te hoog wordt. Het bekken is begroeid met gras of andere planten omdat het goed infiltratie toelaat en weinig onderhoud vraagt.

Voorwaarden voor het kunnen plaatsen van infiltratiekommen zijn een goede infiltratiecapaciteit van de ondergrond en de beschikbaarheid van voldoende ruimte. Om veiligheidsredenen wordt het maximale waterniveau best kleiner dan 30 à 40 cm gehouden. Dit is zeker belangrijk in geval van gecombineerde functie met bijvoorbeeld een speelterrein. Hellingen blijven best beperkt tot 50% [9].

Figuur 2.2: Mill Creek Park (Beardsley, 1998) [33].

Infiltratiestroken en wadi's

Een met zand of grind gevulde greppel die water kan vasthouden en infiltreren noemt men een wadi [9]. Wadi's worden toegepast wanneer de infiltratiecapaciteit van de bodem niet voldoende hoog is voor het aanleggen van infiltratiebekkens. Dankzij de infiltratiekoffer van goed doorlatend materiaal onder een laag teelaarde en begroeiing wordt een buffer en infiltratievoorziening gecreëerd omdat er een groter contactoppervlak is met de bodem en omdat eventueel beter infiltreerbare lagen worden bereikt. Eventueel kan in het grindbed een drainbuis worden voorzien om overtollig water naar beter te infiltreren grond af te voeren. Een overstort voorkomt dat de wadi overstroomt en uiteindelijk mondt de greppel of drainbuis uit in een afvoerende gracht of regenwaterriool.



Figuur 2.3: Infiltratiestrook (atelier Groenblauw) [8].

Grachten

Ook klassieke grachten kunnen gerekend worden bij de bronmaatregelen. Ze vervangen daarbij een klassiek regenwaterriool. Omdat ze onverhard worden uitgevoerd, laten ze toe dat water infiltreert en de vegetatie zal het water bijkomend bufferen en opnemen. Eventueel kunnen ook tussenschotten met beperkte openingen worden voorzien om een nog grotere buffering te bekomen. Het nadeel van grachten is dat ze erg veel plaats innemen die geen andere functie heeft omdat er bijna permanent water in de gracht staat. Ze worden daarom weinig toegepast in de stedelijke omgeving.

Doorlatende verhardingen

In vergelijking met klassieke ondoorlatende verhardingen zullen deze verhardingen toelaten dat het regenwater naar onderliggende lagen of reservoirs stroomt waar het kan infiltreren en het grondwater kan aanvullen. Deze verhardingen kunnen bestaan uit straatstenen met doorlatende voegen, plastieken rastersystemen opgevuld met grind of zelfs doorlatend beton of asfalt.[13] Deze materialen zijn geschikt voor beperkte belasting en lenen zich ideaal voor het gebruik in parkeerplaatsen en -stroken. Een toepassing gelijkaardig aan die van de doorlatende verharding is het aanbrengen van een infiltratieruimte onder een verhoogde (parkeer-)strook. Hier infiltreert dan water dat neerkomt op de strook zelf en dat afstroomt van de langsliggende weg. Dit wordt bijvoorbeeld voorgesteld in het inspiratieboek voor hemelwater in Antwerpen [32], met als voornaamste voordeel dat het het straatbeeld aanpast van een brede weg met een smalle stoep naar een smalle weg met brede stoep en parkeerplaatsen.

Figuur 2.4: Voorbeeld van grasbetontegels als doorlatende parkeerplaats [16].

Bij het toepassen van doorlatende verharding zonder drainagelaag moet men wel opletten voor de vervuiling van de grond en het grondwater door het volledig infiltreren van vervuild regenwater, bijvoorbeeld afkomstig van parkeerplaatsen. Over het algemeen moeten verstoppingen vermeden worden. Het regelmatig onderhouden van dit soort verhardingen is dus van zeer groot belang. Deze verhardingen hebben wel het voordeel goed te presteren in koude klimaten. Op een poreuze oppervlakte zal sneeuw sneller smelten door de snelle drainage onderaan de sneeuwlaag. Hierdoor zullen ijsvlaktes niet snel gevormd worden op dit soort verhardingen. De hoge porositeit van de verharding zorgt er ook voor de vorstschade zeer beperkt blijft omdat het water veel plaats heeft om uit te zetten.[13]

Hemelwaterputten

De verordening Hemelwater van de Vlaamse regering verplicht de aanleg van een hemelwaterput (infiltratievoorziening) voor het hergebruik van regenwater bij elke nieuwbouw of grondige renovatie van gebouwen [5]. Dit opgevangen water kan dan gebruikt worden als niet-drinkbaar water voor bijvoorbeeld sanitair, wassen, groenonderhoud enz. Het past in de visie dat hemelwater eerst zoveel mogelijk hergebruikt moet worden, vervolgens geïnfiltreerd en gebufferd om ten slotte vertraagd te worden afgevoerd.

Het grote voordeel van een individuele hemelwaterput is een verminderd verbruik van kostbaar drinkwater. Ook is er de buffering die dus in theorie de piekafvoerbelasting van de riolering tijdens hevige buien verminderd. Een belangrijk nadeel echter is dat er geen zicht is op de vulling van al die individuele putten. Voor de doelstellingen van dit onderzoek zou het logisch zijn de putten zo leeg mogelijk te houden. Met het oog op hergebruik is dit echter helemaal geen goede strategie.

Een mogelijke maatregel zou zijn om de bouw van hemelwaterputten te versnellen door bijvoorbeeld verplichtingen of subsidies. Ook het plaatsen van grotere putten

voor aansluiting met verschillende huizen is een mogelijkheid. Omwille van het hiervoor vermelde nadeel wordt er toch niet verder naar de hemelwaterput gekeken als mogelijke bronmaatregel.

Ondergrondse infiltratievoorzieningen

Onder normale omstandigheden worden infiltratievoorzieningen best bovengronds aangebracht. Dit heeft als voornaamste redenen het vermijden van verstoppingen, eenvoudigere en goedkopere aanleg en inspectiemogelijkheden. Soms is er, bijvoorbeeld door plaatsgebrek, geen mogelijkheid voor het aanbrengen van een infiltratiekom of dergelijke en moet overgeschakeld worden op ondergrondse voorzieningen.

Het gaat onder andere over infiltratieputten of -kolken. Dit zijn verticale elementen met poreuze wanden waarlangs het water langzaam in de bodem indringt. Andere voorzieningen zijn horizontale infiltratieleidingen of infiltratiekratten. Voor al deze maatregelen geldt wel de noodzaak aan regelmatige reiniging: omdat het water maar langzaam infiltreert, heeft slib de mogelijkheid om te bezinken waardoor de poreuze openingen geblokkeerd kunnen worden. Hier moet ook rekening mee gehouden worden bij de berekening van de infiltratieoppervlakte, waarvoor meestal alleen het horizontale deel als infiltrerend genomen mag worden [9].

2.1.4 Projecten en studies rond bronmaatregelen

In de volgende paragraaf komen tenslotte enkele studies aan bod waarin bronmaatregelen een rol spelen. De inzichten of besluiten uit deze studies kunnen dan meegenomen worden naar het onderzoek in dit werk.

Turnhout: Source Control versus End-of-Pipe solutions

In 2014 heeft KULeuven onderzoek gedaan naar het effect van verschillende maatregelen die theoretisch toegepast werden in de omgeving van Turnhout [12]. Er werd gekeken naar drie verschillende maatregelen. De prestaties van deze maatregelen werden vervolgens vergeleken om te kijken welke impact ze hebben op het rioleringssysteem en de wateroverlast ten gevolge van rivieroverstromingen. Volgende drie maatregelen werden gemodelleerd:

- Bergingsbekkens in groene zones in het stadscentrum met toelating van infiltratie
- Bufferbekkens, geplaatst net stroomopwaarts van de overstort naar de rivieren
- Overstromingsreservoirs stroomafwaarts van de overstorten op de rivier

Om de impact te bestuderen werd een conceptueel riool-riviermodel opgesteld. Op dit model werden drie soorten simulaties uitgevoerd: met composietbuien, met historische gebeurtenissen en met een 100 jaar lange tijdsreeks aan regendata.

Bergingsbekkens in groene zones
Eerst werden gunstige locaties geselecteerd waar men de bergingsbekkens zou kunnen plaatsen. De selectie werd gemaakt op basis van overstromingslocaties (uit simulaties), aard van eigendom (privaat of publiek) en mogelijkheid tot herontwerp (mogelijk bestaande toekomstige plannen). Voor de studie heeft men gekozen voor groene zones die publiek domein zijn en zich stroomopwaarts bevinden van overstromingslocatie met terugkeerperiode van 20 jaar. Er bleek dan dat er een oppervlakte van 10365 m^2 geselecteerd werd om te gebruiken als bergingsbekken over het volledige gebied. Verdeeld over de verschillende afwateringsgebieden in de stad komt dit overeen met percentages tussen 0.31% en 1.04% van hun respectievelijke totale verharde oppervlakte.

In het model werden deze bergingsbekkens opgenomen als opslagreservoirs langsheen het rioleringsnetwerk. Deze reservoirs zouden dan gevuld worden met regenwater die afkomstig is van geconnecteerde oppervlaktes. Bovendien bevatten deze reservoirs een overstort naar de stormriolering. Er werd ook een infiltratiemogelijkheid voorzien in het model van 20 mm/h.

Voor stormen met een terugkeerperiode kleiner dan 5 jaar werd geen reductie van overstromingsvolume waargenomen, dit komt omdat het rioleringssysteem zelf al ontworpen is om dit soort stormen aan te kunnen. Voor stormen met een terugkeerperiode van 10 tot 20 jaar werd echter een reductie van 50% tot 57% waargenomen. De impact op de piekdebieten ter hoogte van de overstort naar de rivieren bleek wel vrij gelimiteerd te zijn. Om ook deze piekdebieten te verlagen moet er veel meer groene oppervlakte ter beschikking zijn om als bergingsbekken te gebruiken. In een stad met een hoog niveau aan verharding is dit vaak een onmogelijke realisatie.

Bufferbekkens stroomopwaarts van overstorten
In totaal zijn er 80 overstorten naar de nabijgelegen rivieren. Hieruit werden aan de hand van simulaties met composietbuien 6 overstorten geselecteerd die samen verantwoordelijk zijn voor 80% van het totale overstortvolume. De bufferbekkens werden in de nabijheid van deze 6 overstorten gemodelleerd.

Deze bekkens werden gemodelleerd als offline opslagreservoirs. Ze werden gedimensioneerd zodat de terugkeerperiode voor het optreden van overstorting gelijk is aan 20 jaar. Met dit criterium kwam men tot een totaal opslagvolume van 58000 m^3. Het model is zo opgesteld dat de bekkens enkel zullen vullen bij hevige regenval via een interne overstort in het systeem. Elk bekken is voorzien van een terugslagklep en een noodoverstort naar de rivieren.

In tegenstelling tot de bergingsbekkens in groene zones hebben deze bufferbekkens een significante impact op het piekdebiet aan de overstorten. Een grote reductie van piekdebiet is waarneembaar voor stormen met een terugkeerperiode kleiner of gelijk aan 20 jaar (waar de bufferbekkens ook voor ontworpen zijn). Voor stormen met een hogere terugkeerperioden is de reductie minder maar toch nog steeds vrij significant.

De bekkens zorgen ook voor een reductie van maximaal 5% van de piekdebieten in de rivieren, wat vrij teleurstellend is. Dit komt omdat de tijdsverschuiving die ze veroorzaken de piek van riooloverstortdebieten doet samenvallen met de piekdebieten in de rivieren.

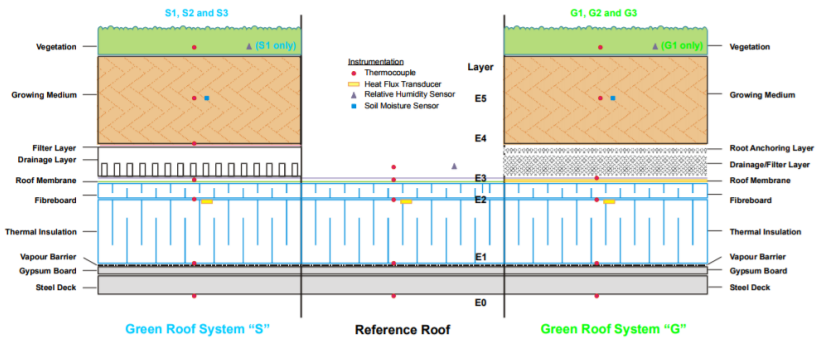
Overstromingsreservoirs stroomafwaarts van overstorten
Deze maatregel werd op de zelfde manier gemodelleerd als de bufferbekkens stroomopwaarts van de overstorten. In het model werden de reservoirs voorzien van een stuw met een hoogte gelijk aan de waterhoogte stroomafwaarts waarbij overstroming optreedt. Deze hoogte kwam overeen met een rivierdebiet van 11 m^3/s.

Deze maatregel heeft natuurlijk geen impact op het rioleringssysteem en de bijhorende stedelijke overstromingsvolumes en piekoverstortdebieten. De reservoirs zorgde enkel voor een grotere reductie in piekrivierdebieten dan werd waargenomen bij de bufferbekkens stroomopwaarts van de overstorten.

Groendaken in de stad Toronto, Ontario

Dit project had als doel technische data te verzamelen in verband met de prestatie van groendaken in stedelijke omgeving [21]. In 2002 werd een groendaksysteem geïnstalleerd op het dak van het gymnasium van de Eastview Neighbourhood Community Centre in Toronto. Een totale oppervlakte van 460 m^2 werd in de lengte opgedeeld in twee evenwaardige oppervlaktes. Op deze oppervlaktes werden twee verschillende systemen geïnstalleerd: systeem G en systeem S. Naast het gymnasium bevindt zich een gebouw waarvan het dak werd gebruikt als referentie waarmee de groendaken vergeleken zouden worden.

Beide systemen verschillen in opbouw van de filtersystemen die zich onder de vegetatie bevinden. Systeem G bestaat uit een semi-stijve drainagelaag uit composietpolymeer en een filtermat. Systeem S bestaat uit geëxpandeerde polystyrene drainagepanelen en een filter uit geotextiel en bevatten een dunnere laag van groeimedium. Volgende figuur geeft een schematische weergave van de systemen:



Figuur 2.5: Schematisering groendaksystemen [21].

De systemen zijn eveneens voorzien van magnetische stromingsmeters die meten hoeveel water er wordt afgevoerd op een bepaald moment. Er werden ook sensoren aangebracht om de thermische activiteiten te meten. De meters zijn verbonden met een data-acquisitie systeem dat men op afstand kan raadplegen via een modem voor continue monitoring. Het verzamelen van stormwater data begon in maart 2003, de vegatatie was in deze periode echter nog minimaal ontwikkeld. Het is ook belangrijk in acht te nemen dat deze systemen helemaal geen infiltratie toelaten. Al het water dat op het dak terechtkomt en niet afstroomt, wordt opgenomen door de planten of gaat verdampen. Daardoor is er geen aanvulling van het grondwater.

Resultaten

Algemeen werd een gemiddelde jaarlijkse reductie van 57% waargenomen op het gebied van stromingsvolume in vergelijking met het referentiedak. In de zomer werd een maximale reductie van 100% waargenomen bij zekere regenbuien van minder dan 15 mm/m^2. Deze regenbuien werden echter voorafgegaan door zes droge dagen. Beide systemen hadden gelijkaardige resultaten. Systeem S had echter een kleinere reductie naargelang de tussenliggende droge periodes korter werden. Tijdens de typische lente- en herfstperiodes zorgde systeem G voor consistente reductie van stromingsvolume terwijl systeem S periodiek verzadigd werd en als gevolg hetzelfde als het referentiedak presteerde. Dit fenomeen werd toegewijd aan het feit dat systeem S een dunnere laag van groeimedium bevatte. In de zomer werd een vertraging van 20 à 40 minuten waargenomen tussen de afstroming van het referentiedak en de groendaken. Deze vertraging was korter in de late herfstmaanden door de hogere verzadigingsgraad van de groendaksystemen.

Over het algemeen toonde deze studie dat de groendaken een significante reductie van afstromingvolume kunnen veroorzaken. Ook de reductie van de piekstromingen en de vertraagde afvoer zijn gunstig op het gebied van stormwatermanagement waardoor een gereduceerde hoeveelheid capaciteit voor stormwaterinfrastructuur nodig is.

Naast de impact op het stormwater werd er ook gekeken naar de temperatuur en de warmtestroming door het daksysteem. Over het algemeen kon men concluderen dat in de zomer de groendaken zorgden voor een gereduceerde warmtestroming door het dak (zowel winst als verlies). Bij systeem G was er minder warmtestroming dan bij systeem S. Dit komt eveneens door het diepere groeimedium. Ook in de winter was er een reductie aan warmteverlies, in dit geval was er een grotere reductie van warmtestroming bij systeem S. Dit komt omdat het systeem een polystyreen drainagepaneel bevat dat zich gedeeltelijk als isolatielaag gedraagt. Het dieper groeimedium van systeem G zorgde niet langer voor een goede isolerende werking omdat deze laag volledig bevroren was. Systeem G is dus thermisch effectiever in de zomer, terwijl systeem S thermisch effectiever is in de winter. Door de lagere warmtestromingen zal er dus minder energieverbruik zijn voor koeling in de zomer en voor verwarming in de winter.

Onder de groendaksystemen bevindt zich een dakmembraam (zie figuur 2.5). Doorheen de studie werd de temperatuur van het membraam gemeten. Voor de groendaken geïnstalleerd waren, nam men maximum temperaturen van 70 tot 80 graden Celsius weer. Eens de daksystemen opgebouwd waren, vielen deze waarden terug tot ongeveer 40 graden Celsius. Ook het verschil tussen dagelijks minimum en maximum temperatuur was verkleind. Hoge temperaturen zorgen voor een snellere veroudering van het dak en de grote fluctuaties zorgen voor ongewenste thermische spanningen. Omdat beide factoren verkleind worden door het installeren van groendaken, kan men concluderen dat de systemen ook bijdragen aan de duurzaamheid van het dak.

Michel Van Lierde: Effect van bronmaatregelen langs rioleringen: Casestudie Oostakker en Sint-Amandsberg

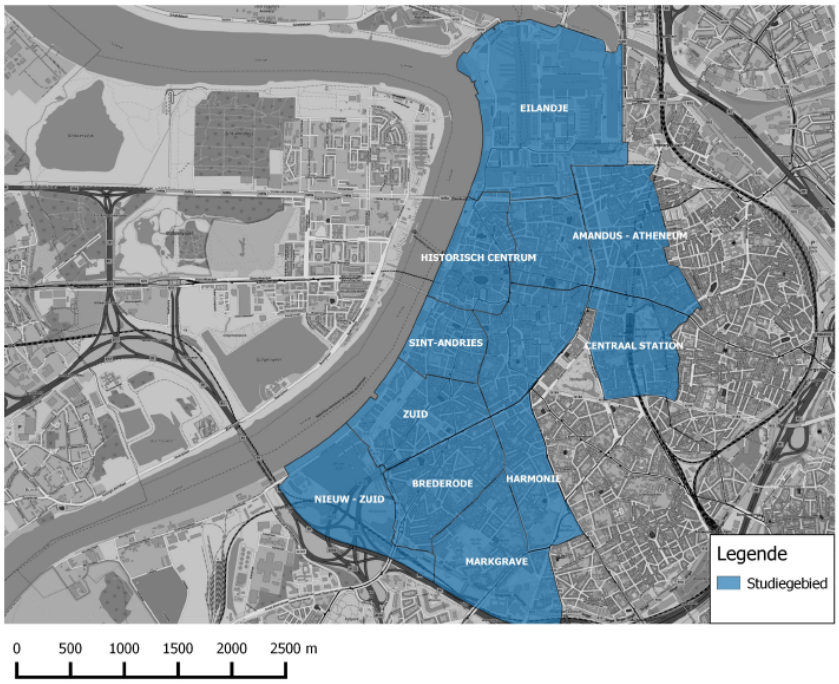
Een laatste studie die hier zeker vermeld moet worden is die van Michel Van Lierde in het kader zijn masterproef [42]. Hij onderzocht het effect van bronmaatregelen op rioleringsoverstromingen in de wijken Oostakker en Sint-Amandsberg in Gent, wat een zeer gelijkaardig onderwerp is als dat van dit onderzoek.

Ook hier werd gebruik gemaakt van een simulatiemodel in Infoworks ICM voor het begroten van het effect van bronmaatregelen. De maatregelen die in de studie aan bod kwamen, waren groene zones, doorlatende bestratingen en infiltratiebuizen. In totaal werden er twaalf groene zones, twee doorlatende verhardingen en acht infiltratiebuizen geïmplementeerd.

Uit de resultaten bleek dat groene zones de overstromingsvolumes kunnen doen afnemen met 3 tot 51%, afhankelijk van de plaats en oppervlakte van de zone en de terugkeerperiode van de bui. Ook doorlatende bestratingen blijken een groot potentieel te bezitten, wat sterk afhankelijk is van de afgekoppelde oppervlakte. De infiltratiebuizen bleken ook een significant effect te hebben, namelijk tot 20% minder water op straat bij rioleringsoverstromingen. Ten slotte was een belangrijk besluit dat de maatregelen veel effectiever bleken wanneer ze samenwerken om overstromingen in een bepaald gebied te vermijden.

Belangrijkste aanbevelingen en besluiten voor verder onderzoek zijn de volgende: in de casestudie van Gent werd er geen rekening gehouden met de initiële condities in het netwerk. De vulling van de leidingen op het moment dat de (composiet)bui plaatsvindt, kan nochtans een belangrijk effect hebben op de resultaten. Daarom wordt er beter met een initiële vulling gewerkt in het model, of nog beter worden langetermijnsimulaties uitgevoerd om een meer realistisch resultaat op te leveren.

Ook blijkt het 1D-model waarbij de overstroomde volumes in een enkel punt worden verondersteld, een te grove benadering voor het correct in kaart brengen van overstromingen. Het opstellen en valideren van een 1D-2D-model zal waarschijnlijk een realistischer beeld scheppen van de gevolgen van een overstroming.



Figuur 2.6: Overzicht van de verschillende wijken die zich in het studiegebied bevinden.

2.2 Studiegebied Antwerpen

Voor het onderzoek naar mogelijke maatregelen tegen wateroverlast is het belangrijk eerst de context te schetsen. De volgende paragrafen worden dan ook gebruikt om een beschrijving te geven van het studiegebied. Hierbij wordt aandacht geschonken aan de algemene situering, landgebruik en oppervlaktewater. Ook de bestaande afwatering en het rioleringsstelsel worden beschreven. Ten slotte komt ook de huidige problematiek van wateroverlast aan bod.

2.2.1 Situering

In dit onderzoek naar mogelijke maatregelen tegen wateroverlast wordt gefocust op het centrum van de stad Antwerpen gelegen binnen de ring. Specifiek wordt er gekeken naar het gebied op de rechteroever van De Schelde, gelegen tussen Het Eilandje in het noorden van de stad tot en met de wijk Nieuw-Zuid in het zuiden, en ongeveer tot aan het Centraal Station in het oosten. Zie figuur 2.6 voor een overzicht van de verschillende wijken die ongeveer overeenkomen met het studiegebied. Hier komt nog de regenwaterafvoer bij die terechtkomt op het zuidelijk deel van de Ring, ter hoogte van Berchem. De totale oppervlakte van het studiegebied bedraagt ongeveer 10.2 km^2.

De bebouwing in dit gebied is grotendeels stedelijk woongebied, met uitzondering van een kmo-zone in het noorden en ruimte voor gemeenschapsvoorzieningen in het

zuiden. Dit gebied wordt dus gekenmerkt door een praktisch volledige verharding.

2.2.2 Regenwaterafvoer

De zeer hoge mate van verharding in de stad vraagt om een uitgebreide afvoer van al dit hemelwater. In het bestudeerde gebied is de voornaamste afvoerweg het gemengde rioleringsstelsel. Het stelsel in dit gebied behoort tot het zuiveringsgebied van de RWZI Antwerpen-Zuid: Kielsbroek 5, bouwjaar 2004 en met een basiscapaciteit van 171000 IE [2].

Er zijn in het studiegebied twee deelgebieden te onderscheiden die op zichzelf functioneren. Deze worden beschreven in de studie 'Antwerpen overkoepelend deel' waaruit het volgende kan worden samengevat [31]. Een eerste deelgebied is aangesloten op het pompstation Herbouvillekaai en bestaat uit het gebied in het westen en zuiden van het studiegebied. Water stroomt via verschillende collectoren van oost naar west. Deze monden op hun beurt uit in de ruiencollector: een grote leiding die van noord naar zuid, evenwijdig aan de Schelde, naar de RWZI stroomt. Volgens de studie is in dit deel de meest kritische collector diegene uit de Brederodewijk in het zuiden. De leidingen zijn minder ruim gedimensioneerd terwijl het gebied meer hellingen kent en enkele lage punten.

Het tweede deelgebied is aangesloten op een enkele collector naar het pompstation Siberiastraat. Dit verloopt onder andere via de Noorderlaan en onder Park Spoor-Noord. Het gedrag van dit gebied is voornamelijk afhankelijk van de werking van het pompstation, aangezien er geen andere regelende structuren aanwezig zijn. De volledige afwateringssituatie van het studiegebied wordt geschetst in figuur 2.7.

Belangrijk voor de afwatering zijn de randvoorwaarden die worden opgelegd aan het stelsel. In deze studie gaat het voornamelijk om het waterpeil van de Schelde dat bepaalt of de overstorten al dan niet in werking zullen treden. Een bespreking van het belang van deze randvoorwaarde volgt in het volgende hoofdstuk.

2.2.3 Bodem en grondwater

Met het oog op bronmaatregelen is het interessant om ook de bodem en infiltratiecapaciteit in het gebied te bespreken. Voor de stad Antwerpen werd een studie uitgevoerd door het studiebureau ABO op basis van grondboringen en peilmetingen van het jaar 2014, samen met data uit de DOV. De resultaten worden samengevat in kaarten die vrij beschikbaar zijn en die hier kort worden samengevat. [36]

De bodem in het studiegebied bestaat uit zand of zandleem. Op enkele plaatsen is ook klei terug te vinden maar dit is eerder beperkt. Dit zijn bodems dus die zeker infiltratie kunnen toelaten.

Het grondwater bevindt zich vrij diep, met een gemiddelde van 1 tot 3m onder het maaiveld. Het peil wordt in de stad gemonitord met een meetnet van ongeveer 150 peilbuizen (verspreid over het volledige grondgebied, dus niet allen in het studiegebied).

Rekening houdend met de verschillende factoren kan besloten worden dat het studiegebied zeker gevoelig is voor infiltratie, zie ook figuur 2.8. Dit is een zeer

Figuur 2.7: Overzicht afstromingsrichtingen zuiveringsgebied Antwerpen-Zuid met belangrijkste pompstations. De rode lijnen geven Aquafin infrastructuur aan, de paarse zijn rio-link projecten. [31]

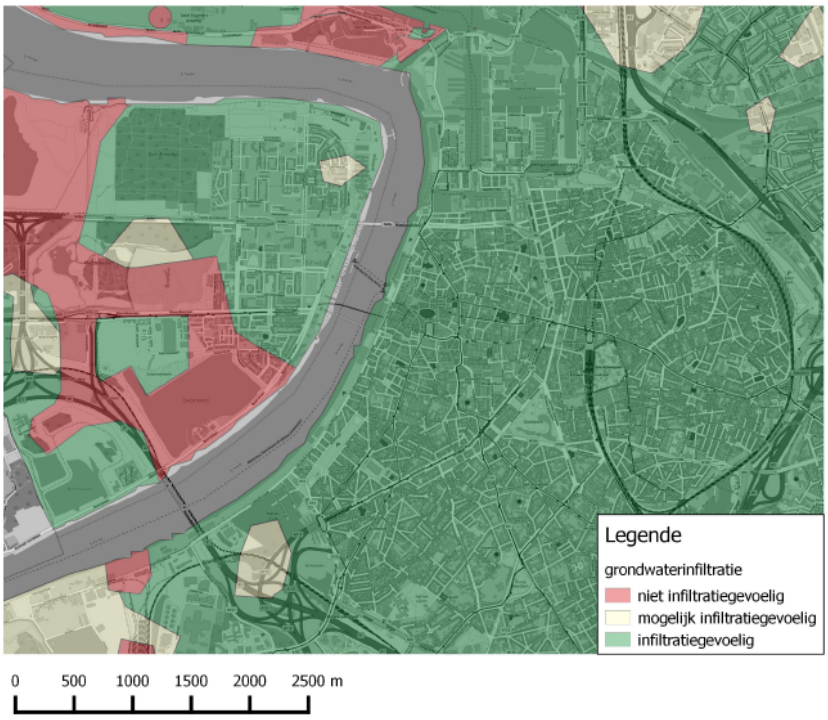
belangrijke voorwaarde voor verschillende bronmaatregelen zoals infiltratiekommen of doorlatende verhardingen.

2.2.4 Huidige problematiek van wateroverlast

Aangezien dit onderzoek zoekt naar maatregelen om wateroverlast te beperken, is het noodzakelijk om een goed beeld van de omvang van dit probleem te krijgen. Zonder te zeer in detail te treden over de precieze oorzaak van bepaalde overstromingen wordt in de volgende paragraaf toch al een beeld geschetst van de problematiek.

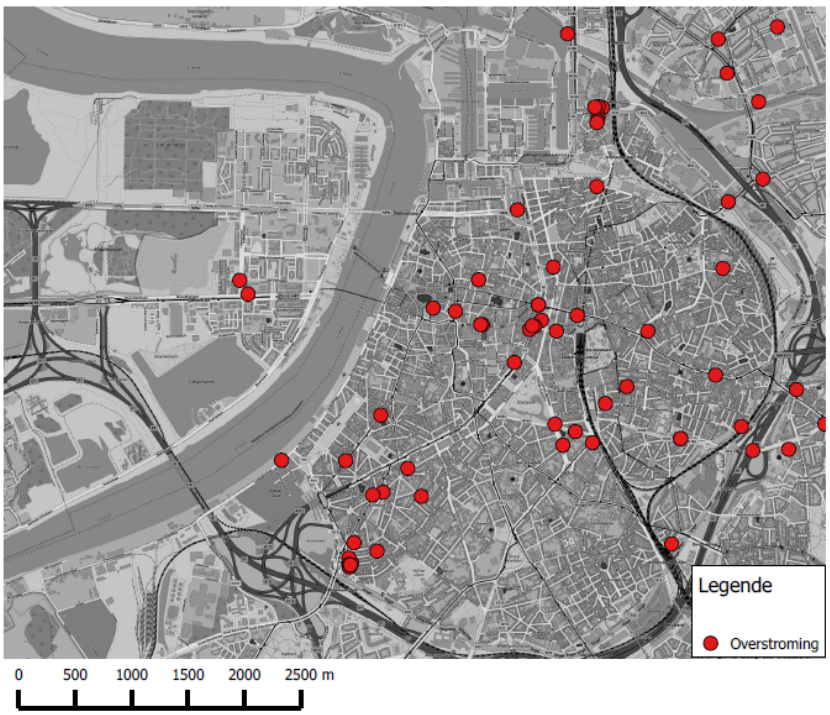
Zo werd, vrij recent, op 30 mei 2016 de stad Antwerpen getroffen door hevige regenval wat ertoe leidde dat bepaalde delen van de stad met ernstige wateroverlast in aanraking kwamen. Op sommige plaatsten werden zelfs waterdieptes van een halve meter geobserveerd. Deze dag werden er ongeveer 1500 oproepen ontvangen door de brandweerzone Antwerpen. Niet enkel de binnenstad, maar ook in de omgeving van het station Antwerpen-Berchem, in Wilrijk en in Deurne stond het water op straat.

In het kader van een studie van de KU Leuven, in opdracht van de stad Antwerpen [11] werden door de brandweerzone Antwerpen een lijst ter beschikking gesteld van 7168 oproepen over de periode januari 2012 t.e.m. januari 2016. Uit deze lijst werd voor de studie een selectie van 219 oproepen gemaakt die als pluvïale overstroming konden worden geïdentificeerd. Een overzicht van deze overstromingen die zich in het studiegebied bevinden wordt voorgesteld in figuur 2.10.



Figuur 2.8: Infiltratiegevoeligheid van de bodem in het studiegebied [36].

Figuur 2.9: Wateroverlast Antwerpen (BELGA) [4].



Figuur 2.10: Overzicht van historische overstromingen uit de data van de brandweer.

De overstromingen lijken erg verspreid over het studiegebied. Toch zijn er enkele zones te identificeren die blijkbaar vaker met wateroverlast te kampen hebben. Zo blijkt de Brederodewijk in het zuiden zeker een probleempunt.

2.3 Besluit

De items die in dit hoofdstuk werden besproken, vormen een basis voor het vervolg van het onderzoek. Er werd besproken wat de voornaamste criteria zijn waaraan bronmaatregelen moeten voldoen, waarbij kosten en duurzaamheid in rekening worden gebracht naast het effect van de maatregelen op de waterproblematiek. Vervolgens werd een overzicht gegeven van de voornaamste en meest toegepaste maatregelen.

Er werden enkele studies besproken die een beeld geven van het huidig onderzoek naar bronmaatregelen. Belangrijke besluiten zijn bijvoorbeeld de veelbelovende resultaten die geboekt kunnen worden met groendaken en infiltratiezones. Ook de aanbeveling om bij ontwerp gebruik te maken van gekoppelde 1D-2D-modellen wordt onthouden.

Ten slotte werd ook het studiegebied nader bekeken. Onder andere de situering, de werking van de hemelwaterafvoer, de potentie van de bodem op vlak van infiltratie en de problematiek van wateroverlast werden beschouwd.

Hoofdstuk 3

Bespreking van de simulatiegegevens en validatie van het Infoworksmodel

In dit hoofdstuk zal het gedetailleerd hydraulisch model nader bekeken worden. Er wordt een inschatting gemaakt van de representativiteit van de overstromingssituaties zoals voorspeld door het model. In een eerste stap worden de randvoorwaarden en invoergegevens besproken die tijdens de verschillende simulaties worden gebruikt. Vervolgens wordt er naar de opbouw van het Infoworksmodel gekeken en naar de eventuele inconsistenties die hier in kunnen voorkomen. Het vervolg van deze validatie bestaat uit de simulatie van verschillende historische buien, waarvoor er ook gegevens beschikbaar zijn wat betreft de voorgekomen overstromingen en waarmee ingeschat kan worden hoe goed dit model de werkelijkheid weergeeft.

3.1 Simulatiedata en randvoorwaarden

In de volgende sectie wordt een kort overzicht gegeven van de condities die aan de modellen worden aangelegd bij het uitvoeren van simulaties. De belangrijkste randvoorwaarde bij het ontwerp is de ogenblikkelijke neerslagintensiteit maar ook andere randvoorwaarden bij de simulaties worden besproken.

3.1.1 Ontwerpneerslag

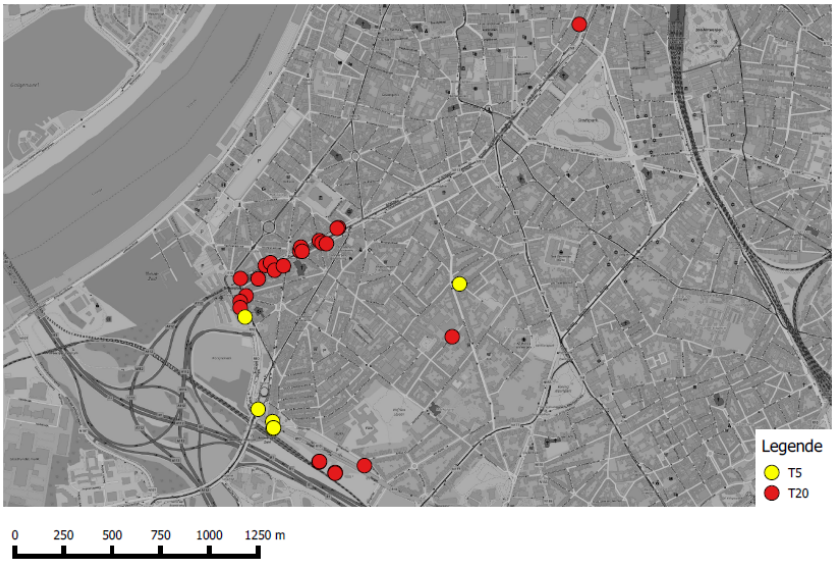
Om het effect van bronmaatregelen na te gaan, worden simulaties uitgevoerd in het hydraulisch model. Om een goed beeld te krijgen van de werking van het stelsel worden best lange-termijnsimulaties uitgevoerd met neerslagreeksen van enkele decennia. Enkel zo wordt op een correcte manier rekening gehouden met tijdsafhankelijke randvoorwaarden zoals bijvoorbeeld de vullingsgraad van de leidingen en bufferbekkens. Dit zou voor een gedetailleerd model in Infoworks echter te grote rekentijden vragen en daarom worden discrete neerslaggebeurtenissen gebruikt. Voor het ontwerp van rioleringen worden de composietbuien gebruikt zoals voorgeschreven in de code van

goede praktijk voor het ontwerp van rioleringsstelsels [9]. De reden is dat deze fictieve gebeurtenissen een zelfde terugkeerperiode kennen voor elk aggregatieniveau van 10 minuten tot de duur van de bui waardoor met een enkele gebeurtenis het volledige stelsel gedimensioneerd kan worden. Het probleem is dat deze buien een zeer lange periode met weinig neerslag voor en na de piek van de bui kennen, met als gevolg dat bronmaatregelen als groendaken en infiltratiebekkens langzaam gevuld worden. Dit is geen realistische situatie en ze zal de werking van bronmaatregelen in de simulaties vertekenen. Om rekening te houden met de antecedente condities worden reële buien gebruikt met een voldoende lange droge periode vooraf om de werking van bronmaatregelen maximaal te illustreren. Om dan later ook met nattere perioden rekening te kunnen houden, wordt er van een conceptueel model gebruik gemaakt.

3.1.2 Waterpeil in de Schelde

Naast de maatgevende neerslag is er nog andere belangrijke randvoorwaarde die een invloed heeft op de overstromingen, namelijk het waterpeil in de Schelde. Langs verschillende overstorten kan overtollig water geloosd worden in de rivier om zo overstromingen te vermijden. De werking van deze overstorten is echter afhankelijk van het waterpeil in de Schelde om te vermijden dat water uit de rivier terugstroomt in het rioleringsstelsel. Daarom kan er enkel met laagwater geloosd worden. In het onderzoek voor het Hemelwaterplan Antwerpen [31] werd ervoor gekozen om te werken met slechts één situatie, namelijk een springtij waarbij de schuiven dus dicht gaan enkele uren voor de piek van de bui en pas enkele uren na de piek weer open gaan. Het is belangrijk op te merken dat dit in feite een erg negatieve aanname is die zeker minder frequent voorkomt dan de terugkeerperiode van de bui aangeeft. Het is dus belangrijk om de gevoeligheid van het netwerk voor deze randvoorwaarde in te schatten.

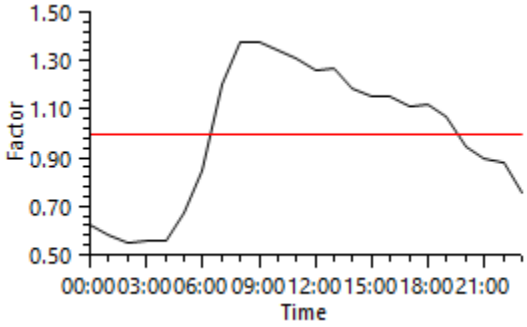
De gevoeligheid van deze aanname blijkt volgens de studie met betrekking tot hemelwater in Antwerpen [31] belangrijk in de Brederodewijk waar de gesimuleerde overlast hoger lijkt dan de werkelijke. In deze studie wordt echter enkel de situatie 'springtij' vergeleken met de situatie 'vrije uitstroom', dus zonder Scheldepeilen. Dit laatste is dus helemaal geen realistische situatie omdat zelfs met laagtij het peil door de getijden een zekere hoogte bereikt. Daarom wordt hier nog een vergelijking uitgevoerd met een ander peil: voor de metingen van 22 december 2016 t.e.m. 22 december 2017 [26] wordt het gemiddelde waterpeil bepaald. Dit bedraagt 2.69m T.A.W.. Vervolgens wordt een nieuwe tijdsreeks opgesteld door de reeks 'springtij' te verlagen volgens het verschil tussen het gemiddelde peil van de lange meetreeks, en het gemiddelde peil tijdens springtij (zoals berekend uit de tijdsreeks in het model). Dit verschil bedraagt slechts 21cm. De simulatieresultaten van composietstormen met beide peilen worden vervolgens vergeleken om de invloed van dit peil te bepalen. Het blijkt dat deze invloed slechts miniem is, zoals blijkt uit figuur waar de resultaten voor een T5 en een T20 bui worden vergeleken. Voor een T5-storm is het verschil verwaarloosbaar (slechts 7 knopen) in vergelijking met andere onzekerheden in het model. Voor een T20-bui is het verschil groter (25 knopen) maar blijft het



Figuur 3.1: Kaart die het verschil geeft tussen simulaties met verschillende waterpeilen en voor een T5 en T20-bui. De punten geven de locaties weer die overstromen bij springtij, maar niet tijdens het gemiddelde hoogwater.

al bij al beperkt. Vooral een groep knopen ter hoogte van de Amerikalei bij het gerechtsgebouw blijkt gevoelig.

Het effect van de absolute waterhoogte op de overstromingen is dus beperkt, maar dit is zeker niet de enige factor: het is eenvoudig in te zien dat het niet alleen de gemiddelde waterhoogte, maar net het tijdstip van het hoogwater ten opzichte van het moment van de piekneerslagintensiteit is die bepaalt of er water kan worden overgestort. Als de schuiven net gesloten worden op het moment dat het grootste afvoerdebiet bereikt wordt, kan er geen water overgestort worden wat een groot verschil maakt in het overstromingsgedrag van de Brederodewijk (zie de vergelijking uit [31] hierboven). Dit is ook een tweede belangrijke reden waarom composietbuien niet geschikt zijn voor het onderzoek naar bronmaatregelen in dit studiegebied. Het is tevens een goed argument voor het inzetten op bronmaatregelen: omdat ze het water net zoveel mogelijk opwaarts zullen tegenhouden, zal de afhankelijkheid van het stelsel van de peilen in de Schelde dalen en wordt er een robuuster en meer flexibel systeem gecreëerd. In de simulaties wordt rekening gehouden met deze peilen door de opgemeten waterhoogtes, beschikbaar op waterinfo.be [26], te gebruiken per historische bui. Omdat dit maar momentopnamen zijn die niet alle mogelijke situaties dekken (piekneerslagafvoer tijdens hoogwater, laagwater of tussenin), wordt er in een latere fase van het onderzoek een lange termijn simulatie uitgevoerd met een conceptueel model.



Figuur 3.2: Correctiefactor op de constante DWA, zoals gebruikt in het gedetailleerde model in Infoworks ICM.

3.1.3 Afvalwater

Ten slotte wordt in de simulaties ook een DWA of droogweerafvoer toegevoegd. Dit is het afvalwater dat door de inwoners wordt geloosd in het rioleringsstelsel en bedraagt ongeveer 150 liter per persoon per dag. Dit debiet wordt in de gedetailleerde simulaties niet constant genomen, maar geschaald volgens een correctiefactor (zie figuur 3.2) om het werkelijke gedrag te benaderen. In het conceptueel rioleringsmodel wordt wel een constant debiet van 150 l/(persoon dag) gebruikt. Er wordt niet verwacht dat deze kleine debieten een belangrijke invloed hebben op het resultaat.

3.2 Infoworksmodel voor Antwerpen

In de volgende sectie word het hydraulisch model toegelicht dat later wordt gebruikt voor het inschatten van de impact van bronmaatregelen. Na een korte uitleg over de werking van het gebruikte type van model zal het netwerk onderzocht worden. Dit wordt een validatie genoemd en is belangrijk om in te schatten hoe de gesimuleerde impact van bronmaatregelen in werkelijkheid kan geïnterpreteerd worden.

3.2.1 Infoworks ICM

Infoworks ICM is een softwarepakket voor zogenaamde stroomgebiedmodellering (ICM staat voor integrated catchment modelling), ontwikkeld door Innovyze [19]. Het laat toe om in een geïntegreerd model zowel rioleringen en rivieren te modelleren, waarbij ook tweedimensionale stromingen kunnen worden gesimuleerd.

Het originele rioleringsmodel waar in dit onderzoek mee wordt gewerkt, is geen geïntegreerd model, maar een zuiver 1D rioleringsmodel. Er zijn dus enkel eendimensionale netwerkelementen aanwezig en de gebruikte modelvergelijkingen zijn de de Saint-Venantvergelijkingen die het behoud van massa en van momentum in één dimensie in de leidingen beschrijven. Met een impliciet numeriek schema worden de waterhoogtes en debieten in verschillende locaties en op verschillende tijdstappen berekend met eindige differentievergelijkingen. Zo kunnen nauwkeurige resultaten bekomen worden binnen een behoorlijke rekentijd. Een belangrijk gebrek aan deze

1D modellering is de manier waarop het model omgaat met overstromingen. Van zodra een knooppunt overstroomt, wordt het water in het model opgeslagen in een zogenaamde 'floodcone'. Dit is een virtueel reservoir dat de opslag van water op straat voorstelt. Een overstromingsdiepte van 1m neemt standaard 10% van dit reservoirvolume in, een overstromingsdiepte van 100m het overige volume. Deze dieptes kunnen aangepast worden om beter het volume-hoogteverband van de omgeving weer te geven, maar het is duidelijk dat dit een omslachtige en intensieve procedure zou worden. Bovendien is het resultaat niet realistisch omdat er geen enkele koppeling bestaat tussen de verschillende floodcones, waar het water op straat in werkelijkheid natuurlijk wegstroomt en naar depressies vloeit. Ten slotte kunnen bij zeer brede kegels, waar een kleine verandering in overstromingsdiepte een groot verschil in volume betekent, numerieke problemen optreden. Daarom worden de floodcones niet aangepast, maar wordt er in een volgende fase gewerkt met een 1D-2D-model.

3.2.2 Beknopt overzicht van het basismodel

In deze studie wordt gewerkt met een hydrodynamisch model van de riolering in Antwerpen dat werd opgesteld in Infoworks CS door Rio-link. Dit werd getransformeerd naar een ICM-model. In feite werden er twee netwerken ter beschikking gesteld, die beiden dezelfde situatie zouden voorstellen. In bijlage A worden de twee netwerken met elkaar vergeleken en wordt geargumenteerd waarom het ene te verkiezen is boven het andere voor gebruik in verdere berekeningen.

In tabel 3.1 wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende elementen die aanwezig zijn in het gebruikte netwerk. In totaal stelt het model 347.2km aan leidingen voor, met afmetingen van 70mm tot 12m. Een totale oppervlakte van 1119.23ha wordt er door afgewaterd, waarvan 82% verhard. In de validatie hierna wordt onderzocht of deze elementen ook met elkaar verbonden zijn en of een realistisch beeld geven van de bestaande rioleringsstelsel. Ook wordt onderzocht of het model in staat is om het werkelijk hydraulisch gedrag voor te stellen.

3.2.3 Validatiecriteria

Om in te schatten of de gesimuleerde effecten van bronmaatregelen ook in de realiteit hun nut hebben, is het belangrijk dat het netwerk gevalideerd wordt. Dit betekent dat onderzocht wordt of het model de werkelijke hydraulische situatie kan simuleren of dat vastgesteld wordt op welke vlakken het model afwijkingen vertoont met de werkelijkheid. De validatie gebeurt in twee stappen:

1. In een eerste fase worden **inconsistenties** in het netwerk opgespoord. Deze kunnen erop wijzen dat het netwerk niet exact de bestaande situatie voorstelt. Meer precies wordt nagegaan of er netwerksecties zijn die niet verbonden zijn met elkaar of secties die niet bijdragen omdat ze nergens neerslag opvangen. Ook wordt nagegaan of de leidingen stroomafwaarts niet verkleinen of onder een negatieve helling liggen.

Tabel 3.1: Verschillende netwerkelementen in het basis-Infoworksmodel.

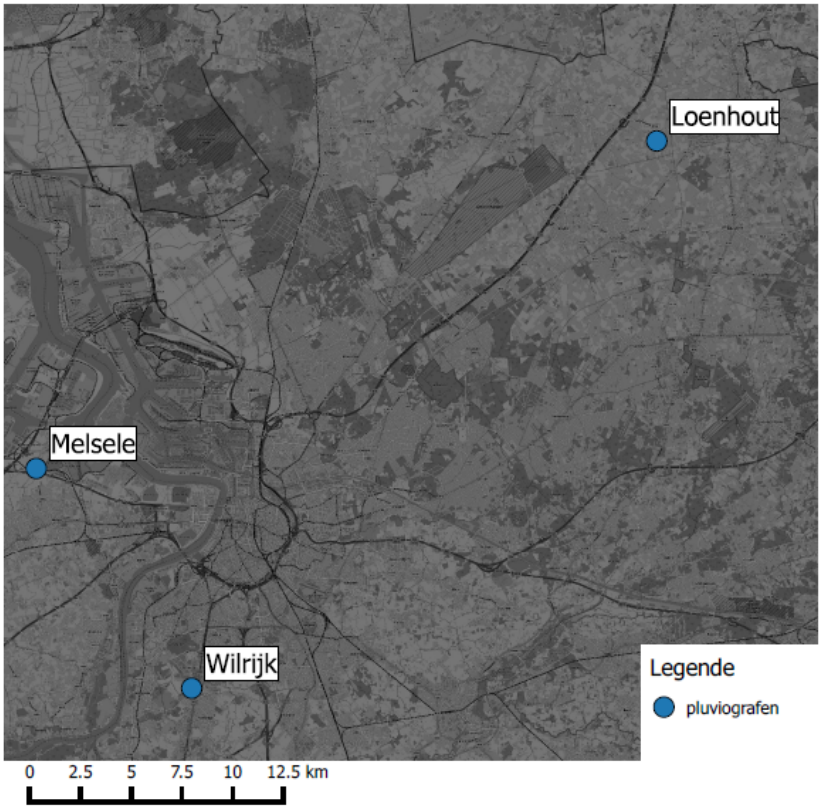
Netwerkelement	Aantal aanwezig in model
Mangat	8547
Opslagknoop	4
Uitlaat	53
Leiding	9875
Vaste opening	17
Vaste pomp	15
Rotodynamische pomp	10
Vaste sluis	14
Variabele sluis	11
Vaste overstort	212
Terugslagklep	20
Deelstroomgebied	5795

2. Vervolgens worden simulaties uitgevoerd waarbij **historische buien** opgelegd worden aan het stelsel, zie ook 2.2.4. Wanneer de resultaten vergeleken worden met gegevens over historische overstromingen, kan de modelnauwkeurigheid ingeschat worden. Het model moet in staat zijn om de werkelijke overstromingen te voorspellen, maar mag ook geen grote overschatting geven van het overstroomde gebied en volume omdat dit het moeilijk maakt om de efficiëntie van mogelijke bronmaatregelen in te schatten. Een laatste opmerking betreft de beperkingen van het 1D-model: de overstroomde volumes zullen in het model ter plaatse van de overstroomde knoop geconcentreerd zijn. In werkelijkheid zal het water zich door stroming in de straten concentreren in lagere zones waardoor een verkeerd beeld van de overstromingslocatie gevormd wordt. Dit probleem wordt opgelost bij het opstellen van het 1D-2D-model.

3.2.4 Validatieneerslag

In eerste instantie wordt pluviograafdata gebruikt om buien op te stellen in Infoworks ICM. Neerslagdata gemeten in het centrum van Antwerpen is echter niet beschikbaar en daarom wordt data gebruikt van drie nabijgelegen pluviografen, die bovendien publiek beschikbaar is op waterinfo.be [26]. De pluviograafdata die gehanteerd wordt, is deze van Wilrijk, Melsele en Loenhout, zie ook figuur 3.3.

Deze metingen geven de neerslagintensiteit, gemeten met een interval van 15 minuten. De gebruikte buien zijn dezelfde als die gebruikt worden in het rapport van de validatiestudie Hemelwater in Antwerpen [48]. Hier werd nagegaan of de historische overstromingen plaatsvinden in gebieden die volgens simulatie met composietbuien gevoelig zijn voor overstromingen. In de studie werd niet eerst gevalideerd dat de historische buien ook volgens de simulaties in Infoworks wateroverlast aangeven. Het is deze stap die hier wel wordt uitgevoerd. Om een onderlinge vergelijking te kunnen maken tussen de ernst van de buien, worden in tabel 3.2 de berekende



Figuur 3.3: Locaties van de gebruikte pluviografen.

terugkeerperioden getoond, voor drie verschillende aggregatieniveaus (15 minuten, 30 minuten en 1 uur). Deze terugkeerperiode wordt berekend volgens (Willems 2013 [46]). Hieruit kan men inschatten hoe ernstig de gebruikte buien in werkelijkheid zijn, en ook voor welk aggregatieniveau ze van belang zijn. Dit bepaalt namelijk de zone van het netwerk die het zwaarst belast zal worden door de bui.

Om zeker te zijn dat er daadwerkelijk een overstroming plaats heeft gevonden, worden er enkel buien gebruikt waarvan er fotografisch bewijs is dat er water op straat stond of waarvan er gearchiveerde brandweeroproepen in verband met wateroverlast bestaan. Deze gegevens werden gebruikt in [48] en werden voor dit onderzoek beschikbaar gesteld. Natuurlijk worden ook enkel buien gebruikt waarbij de overstroming zich binnen het beschouwde netwerk voordeed. De gebruikte buien worden hieronder opgelijst samen met de foto's van de wateroverlast. Er wordt ook een kaart opgesteld waarop de overstromingslocaties aangeduid worden, weergegeven in figuren 3.12 en 3.14.

11 Juli 2012

Deze bui veroorzaakte wateroverlast in het noorden van het centrum. Foto's van de overstromingen worden getoond in figuur 3.4:

De foto's zijn genomen in de Bredastraat, net ten oosten van het Eilandje. Ver-

Tabel 3.2: Berekende terugkeerperioden voor de verschillende validatiebuien en verschillende aggregatieniveau's.

Bui	**T [jaar] 15'**	**T [jaar] 30'**	**T [jaar] 60'**
11 juli 2012 Melsele	0.8351	1.522	1.237
11 juli 2012 Wilrijk	0.0634	0.0759	0.0484
21 juni 2013 Melsele	0.0529	0.123	0.458
21 juni 2013 Wilrijk	0.453	1.282	6.421
27-28 juli 2013 Melsele	3.548	18.432	15.918
9-12 september 2013 Melsele	0.0817	0.240	0.538
9-12 september 2013 Wilrijk	0.0759	0.162	0.333
10 augustus 2014 Melsele	0.331	0.793	0.664
10 augustus 2014 Wilrijk	0.253	0.358	0.340
26 augustus 2014 Melsele	0.0520	0.101	0.271
26 augustus 2014 Wilrijk	0.133	0.464	1.895
30 mei 2016 Melsele	2.517	2.635	2.564
30 mei 2016 Wilrijk	0.943	3.159	5.864

Figuur 3.4: Overstroming op 11 juli 2012.

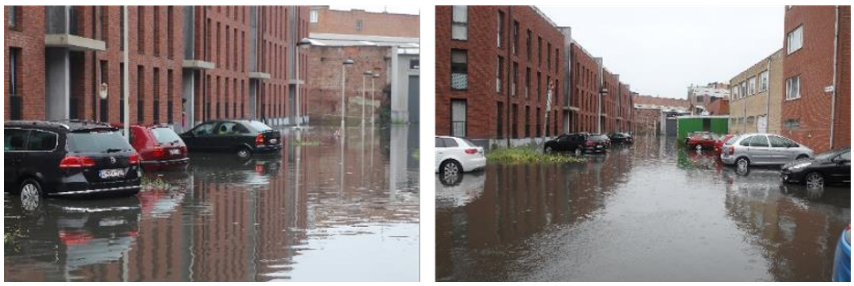
der is er nog een brandweeroproep gemeld in verband met een overstroming in de Ledeganckkaai in het zuidwesten van het centrum.

21 Juni 2013

Ook bij deze bui stond water op straat in het noorden van het centrum. Bijhorende foto's zijn eveneens genomen in de Bredastraat. Bovendien werden er nog tal van brandweeroproepen genoteerd met betrekking tot overstromingen verspreid over het studiegebied (zie figuren 3.12 en 3.14).

27-28 Juli 2013

De wateroverlast vond plaats aan de oostelijke zijde van het centrum ter hoogte van de N184. Verder is er ook 1 gearchiveerde brandweeroproep over een overstroming in het zuiden van de Brederodewijk.



Figuur 3.5: Overstroming op 21 juni 2013.

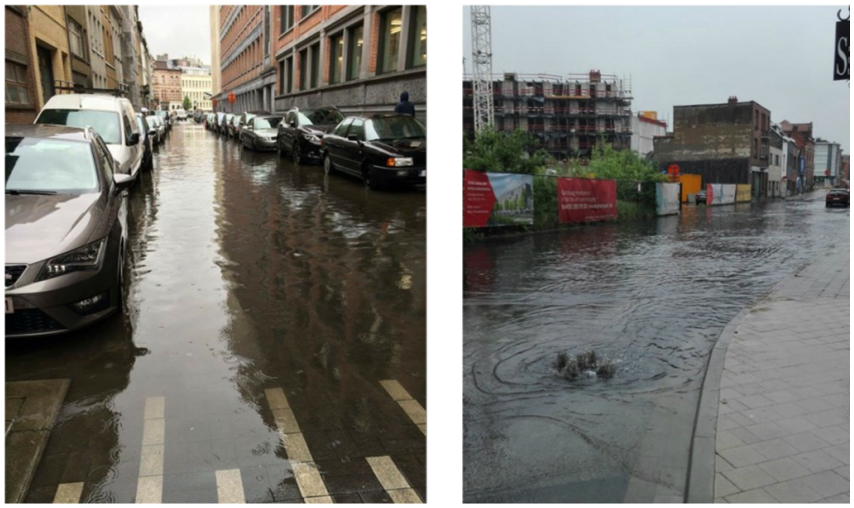
Figuur 3.6: Overstroming op 27 juli 2013.

Figuur 3.7: Overstroming op 9 september 2013.

9-12 September 2013
Gearchiveerde brandweeroproepen zijn beschikbaar in verband met overstroming in de Paleisstraat in het zuidwesten van het centrum en in de Bredastraat. Onderstaande foto's duiden ook op een overstroming in de Slachthuislaan gelegen in het noorden, langs het Lobroekdok.

10 Augustus 2014
Voor deze bui zijn er enkel foto's beschikbaar van overstroming in Zwijndrecht. De reden dat deze bui toch in rekening wordt genomen, zijn de tal van brandoproepen die binnengekomen zijn in verband met wateroverlast in de Brederodewijk gelegen in het zuidwesten van het centrum. Verder is er nog 1 brandweeroproep beschikbaar over wateroverlast in de IJzerlaan ten oosten van het Eilandje.

26 Augustus 2014



Figuur 3.8: Overstroming op 30 mei 2016.

Ook voor deze bui zijn er enkel foto's buiten het centrum beschikbaar. Er is echter wel een brandoproep te vinden van deze datum in verband met wateroverlast in de Meir midden in het centrum van de stad.

30 Mei 2016

Er zijn tal van brandweeroproepen gearchiveerd in verband met wateroverlast op deze datum. De locatie van deze oproepen zijn echter verspreid over het gehele studiegebied. Toch is er wederom sprake van overstromingen in de Brederodewijk en de Bredastraat.

Nadat alle nodige data voor elk van de drie pluviografen verzameld is, wordt het cumulatief neerslagvolume bepaald per neerslaggebeurtenis en per pluviograaf. Hieruit blijkt dat er toch grote verschillen in neerslag zijn tussen de meetlocaties. Er zal dus moeten bepaald worden welke data het meest relevant is of hoe deze uitgemiddeld kunnen worden om ze als eenvoudige, uniforme neerslag te hanteren.

Eerst wordt de Thiessen-polygoonmethode gebruikt. Het gebied wordt hierbij ingedeeld in zones waarvan elk punt het dichts bij bijhorende pluviograaf ligt. Dan wordt er gekeken in welke mate het netwerk binnen de verschillende zones ligt. Op basis van deze verdeling kan men dan een gewogen gemiddelde opstellen tussen de pluviograafdata om de simulatieneerslagintensiteiten te bekomen. Na uitzetten van de verschillende zones blijkt echter dat het netwerk zich volledig binnen de zone van de pluviograaf in Wilrijk bevindt. De simulatieneerslagintensiteiten zouden dus gelijk genomen moeten worden aan de gemeten intensiteiten in Wilrijk.

Hoewel uitmiddeling volgens de polygoonmethode niet nodig is, wordt er toch niet enkel met de waarden uit Wilrijk gesimuleerd maar zullen de simulaties ook met metingen uit Melsele uitgevoerd worden. De reden hiervoor is dat het hier gaat om zeer lokale, zomerse buien. Het is dus moeilijk te bepalen welk van de twee

pluviografen de meest nauwkeurige neerslag gaat geven voor het centrum van de stad. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat een hevige lokale bui in het centrum van de stad nauwelijks neerslag gaat veroorzaken in Wilrijk, maar wel merkbaar is in Melsele. Uit een studie in verband met klimaatverandering en hemelwater in Antwerpen [11] blijkt ook dat er een grote variabiliteit is in neerslag in het gebied rond de stad Antwerpen. Dit is ook een reden waarom er gewerkt wordt met data afkomstig van beide pluviografen. Ook al uit de verschillen in terugkeerperioden tussen de buien in Melsele en Wilrijk (tabel 3.2) blijkt de grote ruimtelijk variabiliteit van de neerslag. Zo bedraagt de terugkeerperiode voor een aggregatieniveau van 1 uur van de bui van 21 juni 2013 in Melsele slechts 0.5 jaar, terwijl ze voor Wilrijk maar liefst 6.4 jaar bedraagt. Bovendien is er geen systematische afwijking te vinden die aantoont of de pluviograaf van Melsele of Wilrijk steeds onder- of overschattingen voorspelt ten opzichte van de andere. De data afkomstig van de pluviograaf in Loenhout wordt niet gebruikt aangezien dit meettoestel op veel verdere afstand gelegen is van de stad.

3.2.5 Resultaten van de validatie

Inconsistenties van het netwerk

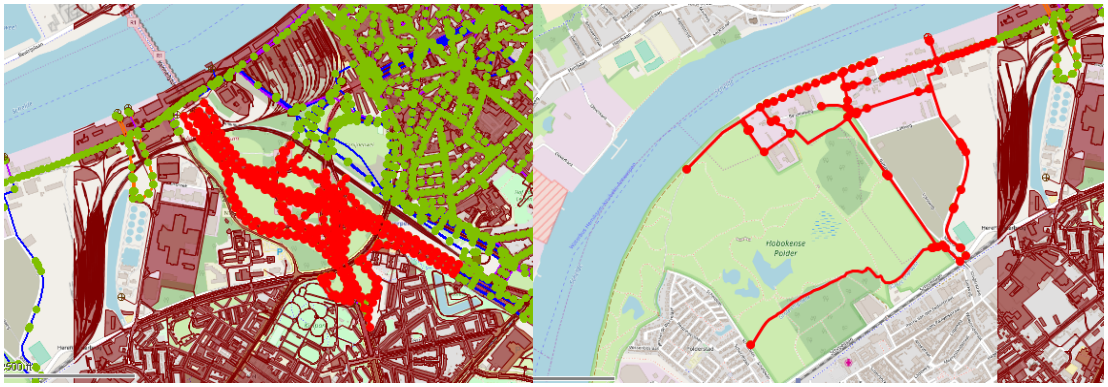
Inspectie van het netwerk met de 'connectivity' tool wordt gebruikt om na te gaan of het volledige netwerk wel 1 geheel vormt. Dit blijkt niet het geval te zijn. In tabel 3.3 worden verschillende deelnetwerken weergegeven die onafhankelijk zijn van elkaar. Ze hebben geen enkele gemeenschappelijke knoop, link of deelstroomgebied. Het grootste deelnetwerk is het belangrijkste, en stelt eigenlijk de volledige riolering voor in het studiegebied. Het tweede deelnetwerk bevat ook een groot aantal knopen en verbindingen, en beslaat het op-en afrittencomplex van de ring rond Antwerpen in het zuiden, zie ook figuur 3.9a. Het derde deelnetwerk beslaat een stelsel van regenwaterafvoer ter plaatse van de Hobokense Polder (figuur 3.9b). Belangrijk is dat met beide stelsels geen enkel deelstroomgebied is verbonden. Dit betekent dat ze ook geen neerslag zullen afvoeren bij simulaties en ze voor deze studie dus geen bijdrage betekenen voor het model. Ook voor de andere deelnetwerken kan eenvoudig worden nagegaan dat ze niet zijn verbonden met de rest van het model en ook geen deelstroomgebieden afwateren.

Vervolgens wordt nagegaan of er leidingen verkleinen hoewel ze meer stroomafwaarts gelegen zijn. Dit kan eenvoudig door gebruik te maken van de SQL-functionaliteit binnen Infoworks ICM. Met de selectieopdracht `us_links.conduit_width > ds_links.conduit_width` worden knopen opgespoord waar de afwaartse leiding kleiner is dan de opwaartse. Er blijken 1628 van dergelijke knopen in het netwerk aanwezig. Dit grote aantal is vooral te verklaren uit de grote variatie aan leidingvormen. Naast de cirkelvormige leiding zijn veel links boog of eivormig, rechthoekig of zelfs van totaal arbitraire vorm. Toch kan dit ook op fouten in het netwerk wijzen.

Uit inspectie van het netwerk blijkt dat er 1 knooppunt (knoop 44640) aanwezig is waar het overstromingspeil niet overeenkomt met het maaiveldpeil. Er wordt dus

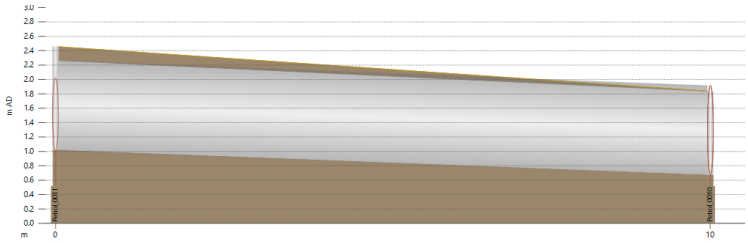
Tabel 3.3: Onafhankelijke deelnetwerken zoals bepaald met de 'connectivity'-tool in ICM.

Deelnetwerk	Nodes	Links
1	7907	9148
2	335	590
3	88	87
4	34	54
5	34	41
6	27	26
7	24	38
8	23	38
9	22	27
10	21	32
11	18	27
12	15	18
13	8	11
14	8	7
15	8	7
16	7	6
17	7	6
18	6	8
19	6	5
20	6	5



(a) Deelnetwerk 2 (b) Deelnetwerk 3

Figuur 3.9: Situering van deelnetwerken 2 en 3.

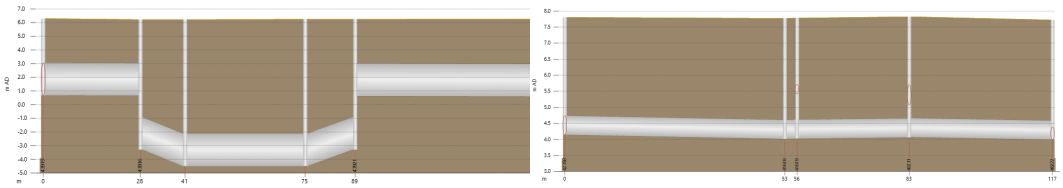


Figuur 3.10: Voorbeeld van een leiding waarvan het afwaartse kruinpeil boven het maaiveld uitsteekt. Dit duidt zeer waarschijnlijk op een fout in het netwerk.

verwacht dat voor deze knoop in elke simulatie een overstroming wordt gevonden.

Verder blijken er 15 leidingen te zijn waarvan de kruin minstens gedeeltelijk boven het maaiveld uitkomt. Een voorbeeld wordt gegeven in figuur 3.10. Dit duidt zeer waarschijnlijk op fouten aangezien een minimum dekking moet voorzien worden om de belastingen op het maaiveld te verspreiden in de grond.

Ten slotte wordt nagegaan of er leidingen zijn met een negatieve gradiënt, of dus waar het afwaarts peil hoger ligt dan het opwaartse. Dit wordt gedaan met de SQL zoekterm `gradient < 0 AND solution_model = "FULL"`. Er blijken 775 leidingen in het netwerk onder negatieve helling te liggen. Een voorbeeld waar dit gerechtvaardigd is staat in figuur 3.11a waar de leidingen onder de dokken bij Het Eilandje lopen. Een ander voorbeeld, van een gewone leiding in de Breydelstraat in figuur 3.11b, is minder eenvoudig te verklaren en kan mogelijk op een fout wijzen.



(a) (b)

Figuur 3.11: Voorbeelden van leidingen met een negatieve gradiënt. Situatie (a) stelt een duiker voor onder een dok in het noorden van het studiegebied. Situatie (b) bevindt zich in het centrum van de stad en duidt mogelijks op een fout in het netwerk.

Historische overstromingen

In deze paragraaf wordt gekeken naar de resultaten van de simulaties die uitgevoerd worden aan de hand van historische neerslagdata die als uniforme neerslag over het hele netwerk toegepast wordt. Zoals eerder al aangehaald, zullen alle buien zowel gesimuleerd worden met de data van Wilrijk als deze van Melsele. Tabel 3.4 geeft een samenvatting weer van de gevonden overstromingslocaties zowel voor de werkelijke gebeurtenissen (zie sectie 3.2.4) als voor de simulaties met Infoworks ICM. Een grafische vergelijking wordt mogelijk met behulp van figuren 3.12 tot en met 3.15.

Tabel 3.4: Overstromingslocaties in de werkelijke en gesimuleerde situatie.

Datum	**Werkelijke overstromingen**	**Gesimuleerde overstromingen**
11 juli 2012	• Bredastraat • Ledeganckkaai	• Sint-Laureisstraat
21 juni 2013	• Bredastraat • Boudewijnstraat • Paleisstraat • Volkstraat • Groenplaats	• Sint-Laureisstraat • Boudewijnstraat • Brederodewijk
27-28 juli 2013	• Brederodewijk • N184	• Brederodewijk • Paleisstraat • Haantjeslei • Pyckestraat • Sint-Laureisstraat • Rudolfstraat • Boudewijnstraat • Jozef de Bomstraat • Generaal Lemanstraat • Dahliastraat • Oudesteenweg
9-12 september 2013	• Bredastraat • Paleisstraat • Slachthuislaan	*Geen overstroming*
10 augustus 2014	• Brederodewijk • IJzerlaan	*Geen overstroming*
26 augustus 2014	• Meir	• Brederodewijk • Sint-Laureisstraat
30 mei 2016	• Bredastraat • Brederodewijk • Amerikalei • Bervoetstraat • Hessenplein	• Brederodewijk • Haantjeslei • Pyckestraat • Sint-Laureisstraat • Rudolfstraat • Boudewijnstraat • Jozef de Bomstraat • Waalsekaai • Entrepotkaai

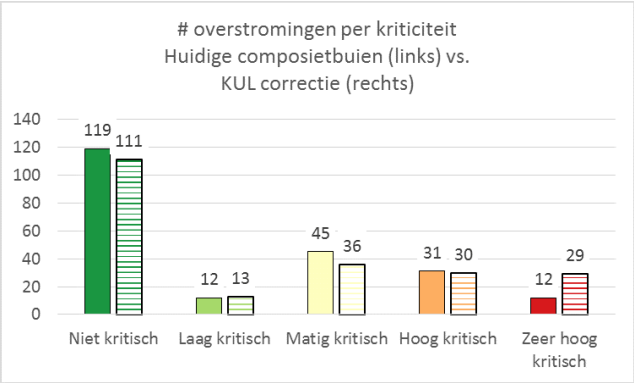
Voornamelijk in de de overstromingsgevoelige gebieden van de Brederodewijk lijken ze overeen te komen. Zeker de bui van 30 mei 2016 vertoont een goed overeenkomst, in acht genomen dat de precieze locatie van het water door de beperking van de floodcones wat kan verschillen. De bui van 10 augustus 2014 daarentegen vertoont geen overstromingen in deze wijk voor de simulatie, waar er historisch duidelijk wel overlast werd gemeld. Een mogelijke verklaring is een slechte overeenkomst tussen de puntneerslag in deze wijk, en de opgemeten intensiteiten in Wilrijk en Melsele. Ook voor andere buien lijkt er zeker een overeenkomst te bestaan tussen de historische en gesimuleerde overstromingen. De grootste verschillen treden op in het noorden van het studiegebied. Hier worden nauwelijks overstromingen gesimuleerd hoewel ze historisch toch vrij vaak voorkomen. Mogelijke verklaringen worden hieronder beschreven.

Figuur 3.12: Kaart met overzicht van de verschillende brandweeroproepen (zuidelijke deel).

Figuur 3.13: Kaart met overzicht van de verschillende gesimuleerde overstromingsgebieden (zuidelijke deel).

Figuur 3.14: Kaart met overzicht van de verschillende brandweeroproepen (noordelijke deel).

Figuur 3.15: Kaart met overzicht van de verschillende gesimuleerde overstromingsgebieden (noordelijke deel).



Figuur 3.16: Grafiek die het aantal historische overstromingen weergeeft in verschillende zones volgens 'kriticiteit' [48].

Validatie met composietbuien

Uit de validatieresultaten blijkt dat de buien die verantwoordelijk waren voor de historische overstromingen niet altijd even goed vervat zitten in de puntneerslag van Melsele of Wilrijk. Het is dus moeilijk om te besluiten of overstromingsgevoelige zones ook overstromingsgevoelig zijn in het model. Een andere benadering is om simulaties uit te voeren met composietbuien en na te gaan of de gebieden die hier zullen overstromen, ook in werkelijkheid al overstroomden.

Deze validatie werd al uitgevoerd in het kader van de hemelwaterstudie Antwerpen ([48]). Hier werden Thiessenpolygonen opgesteld rond overstroomde knopen in het netwerk, en ingedeeld volgens de volgende categorieën: 'zeer hoog kritisch' voor overstromingen bij een T2-bui, 'hoog kritisch' voor overstromingen bij een T5 bui, 'matig kritisch' bij T20, 'laag kritisch' bij een vrijboord < 0.2m bij T20 en niet kritisch bij een vrijboord > 0.2m bij T20. Vervolgens werden deze ploygonen met de historische overstromingslocaties (voor het hele grondgebied van de stad Antwerpen) vergeleken. Het doel was om een vergelijking te kunnen maken tussen de prestatie van de klassieke composietbuien en de gecorrigeerde buien (zie verder) voor Antwerpen.

Uit de grafiek in figuur 3.16 die het aantal overstromingen geeft per zone, blijkt dat het model wel in staat is om overstromingsgevoelige gebieden als dusdanig aan te geven. Toch is ook duidelijk dat de prestaties van het netwerk niet optimaal zijn. Er zijn nog behoorlijk veel overstromingen gelokaliseerd in niet-kritische zones wat betekent dat de overstroomde gebieden eerder onderschat worden met deze werkwijze. Natuurlijk worden maar een beperkt aantal historische overstromingen beschouwd en zijn ook de 'kritische' gebieden zeer ruw afgebakend.

3.2.6 Besluit van de validatie

Tabel 3.4 toont dat bij de simulaties de Brederodewijk vaak als overstroomt gebied voorkomt. Bij stijgende neerslagintensiteit blijkt deze overstroming zich dan verder

uit te breiden naar het noorden (Sint-Laureisstraat, Boudewijnstraat,...). Dit komt goed overeen met de werkelijke gebeurtenissen: Op figuur 3.12 is te zien dat er in dit gebied voor een aantal gebeurtenissen een aantal brandweeroproepen gedaan werden. De overstromingen van andere oproepen en foto's die meer centraal en noordelijk gelegen zijn worden echter niet altijd waargenomen bij de simulaties.

Hoewel er dus overeenkomsten zijn, zijn er ook tal van gebeurtenissen die niet in de simulaties tot uiting komen. Hierbij is het belangrijk om de gebreken van deze validatiestudie even aan te halen:

- In de simulaties met Infoworks ICM wordt geen rekening gehouden met de initiële situatie van het rioleringsnetwerk. Er wordt verondersteld dat de leiding en mangaten leeg zijn. In werkelijkheid is het mogelijk dat er een bepaalde hoeveelheid water al aanwezig was voor de aanvang van de bui. Dit kan een bijdrage hebben tot het optreden van de waargenomen overstromingen.
- Het is mogelijk dat de overstromingen waarvan historisch bewijs gevonden is niet veroorzaakt werden door een hoge neerslagintensiteit. Zo kan een overstroming bijvoorbeeld te wijten zijn aan een defect van de riolering, een gesprongen leiding of een verstopt afvoerrooster.
- De overstromingen rondom de Bredastraat worden zelden waargenomen in de simulaties. In het Infoworks-model blijkt deze zone echter ruw gemodelleerd te zijn. Er zijn hier niet veel knopen aanwezig wat op een slechte representatie van de werkelijkheid kan duiden.
- De puntneerslag van Wilrijk en Melsele wordt aangelegd in het volledige studiegebied. Deze bevat vervat niet goed de sterke variabiliteit van zulke zomerbuien en is hoogstwaarschijnlijk niet voor alle buien even representatief.

Uit de figuren van de simulatieresultaten gegeven in bijlage B.2 is af te leiden dat er een groot overstromingsgebied wordt waargenomen indien de neerslagintensiteiten van 27-28 juli 2013 en 30 mei 2016 gebruikt wordt. Hierbij krijgt de volledige Brederodewijk te maken met wateroverlast. In verdere hoofdstukken van dit onderzoek zullen deze historische buien nog meermaals gebruikt worden in het begroten van het effect van bronmaatregelen. Ook zal er een focus gelegd worden op de reductie van wateroverlast in de Brederodewijk aangezien dit gebied zowel bij de simulaties als in de werkelijkheid als overstromingsgevoelig gebied wordt waargenomen.

3.3 Besluit

In dit hoofdstuk werd een evaluatie gemaakt van de middelen die verder in dit onderzoek gebruikt zullen worden voor het begroten van de effecten van bronmaatregelen op de waterproblematiek. In een eerste sectie werd een algemene beschrijving gegeven van de gegevens die in de verschillende simulaties gebruikt worden. Vervolgens werd het gegeven model, een 1D-hydraulisch model in Infoworks CM en voorzien door

Stad Antwerpen, geanalyseerd. Ook een korte bespreking van het netwerkmodel van Antwerpen-Centrum komt aan bod.

Het model werd gevalideerd aan de hand van verschillende criteria. Inconsistenties in het netwerk kunnen de prestatie van het model negatief beïnvloeden en daarom werden deze opgespoord. Om de prestatie van het model te evalueren, werden ook historische neerslaggebeurtenis aan het model opgelegd waarna een vergelijking tussen de gesimuleerde overstromingen, en de historische overstromingsgegevens gemaakt werd. Hoewel het resultaat van deze validatie niet voor elke bui optimaal lijkt, is dit grotendeels te wijten aan de gebrekkige invoergegevens van de neerslaggebeurtenissen, zowel op vlak van intensiteit als van ruimtelijke verdeling. Ook op de overstromingsgegevens is een grote onzekerheid van toepassing.

Hoofdstuk 4

Selectie en implementatiewijze van bronmaatregelen

In dit hoofdstuk wordt onderzocht hoe de gewenste bronmaatregelen zo nauwkeurig en efficient mogelijk kunnen worden ingevoerd in het model. Zonder een goed model, waarin de bronmaatregelen zich gedragen zoals in de werkelijkheid, is het niet mogelijk om goede voorstellen te doen om overstromingen te verminderen. Naast een selectie van de maatregelen die verder behandeld worden, staat ook het verslag van het zoeken naar de beste methode voor het weergeven van deze bronmaatregelen in het model beschreven. Ten slotte wordt kort toegelicht hoe een nieuwe procedure werd opgesteld om een koppeling te maken tussen GIS-informatie enerzijds, en een Infoworksmodel anderzijds.

4.1 Selectie van bronmaatregelen

4.1.1 Criteria

Zoals duidelijk werd in de literatuurstudie zijn er veel verschillende soorten van bronmaatregelen. In dit onderzoek wordt er gefocust op enkele van die maatregelen die veelbelovend zijn voor de specifieke case van de stad Antwerpen.

Een eerste doelstelling van de bronmaatregelen is het tegengaan van riooloverstromingen. Dit betekent dat de maatregelen voldoende buffercapaciteit moeten bezitten om de piekafstroming van grote stormen significant te verminderen. Maatregelen die dit niet kunnen verzekeren worden niet verder beschouwd. Zo zal bij hemelwaterputten nooit controleerbaar zijn welke vullingsgraad ze hebben. Wanneer de putten bijna vol zitten door weinig gebruik zullen ze bij extreme neerslaggebeurtenissen vollopen en op het moment van de piekintensiteit geen water meer kunnen bufferen. Ze worden dus niet verder beschouwd.

Een tweede doelstelling die belangrijk is voor de case Antwerpen is het verbeteren van de leefkwaliteit, bijvoorbeeld het tegengaan van de nadelen van de intensieve

verharding in het centrum. Zo heeft onderzoek van VITO aangetoond dat de luchttemperatuur in de stad zo'n 4°C hoger kan liggen dan op het omliggende platteland [22]. Op warme dagen loopt dit op tot 8°à 9°C. Een oplossing is het nabootsen van de natuurlijke situatie met ruimte voor infiltratie en evaporatie van water. Er wordt hierbij de voorkeur gegeven aan bovengrondse voorzieningen, met een multifunctioneel karakter.

Ten slotte wordt er ook rekening gehouden met het beleid dat de stad Antwerpen voert op vlak van bouwen en bouwvergunningen. Specifiek wordt rekening gehouden met de Bouwcode [6] die ook voorziet in het verplicht plaatsen van duurzame maatregelen om wateroverlast en hitte-stress te vermijden.

4.1.2 Keuze

Rekening houdend met deze criteria kan nu een keuze gemaakt worden van verschillende maatregelen die verder voor de case Antwerpen worden onderzocht.

Een eerste duidelijke keuze is die voor het begroten van het effect van **groendaken**. Uit de literatuurstudie blijkt dat ze een groot potentieel hebben om neerslagafvoer te reduceren. Bovendien zijn ze in staat de hitte-stress in de stad te verminderen door verminderde absorptie van warmte-energie en het doen verdampen van regenwater door de vegetatie. Ten slotte is de aanleg van groendaken volgens artikel 38 van de bouwcode [6] verplicht voor nieuwe gebouwen met een dak van helling kleiner dan 15°en een oppervlakte groter dan 20m^2. Het zou dus interessant zijn om het effect van deze maatregel na te gaan in verschillende scenario's waarin groendaken worden geplaatst.

Een tweede maatregel waarvan het effect wordt onderzocht is die van **groene zones en infiltratiekommen**. Ook zij hebben de potentie van het sterk verminderen van neerslagafstroming, zoals aangetoont in de casestudie van Turnhout [12], en het verbeteren van de leefomgeving. Bovendien kunnen ze heel goed tot multifunctionele ruimtes worden uitgebouwd zoals stadsparken of sport-, speel- en ontmoetingsruimtes.

Ten slotte worden ook **doorlatende verhardingen** bekeken. Zij laten eveneens infiltratie toe en verminderen zo de afstroming van regenwater. In de stad zijn er zeer veel parkeerstroken langs de weg. Door enkele van deze om te bouwen naar infiltratiestroken kan mogelijk een groot effect bekomen worden. Het is ook deze strategie die wordt voorgesteld in het inspiratieboek van het hemelwaterplan Antwerpen [29]. Hierin worden voor verschillende typedoorsneden van wegen in Antwerpen voorstellen gemaakt van een betere wegindeling en gebruik van verharding. Het gebruik van doorlatende verharding voor parkeerstroken komt er uitgebreid in aan bod. Bovendien wordt ook in de bouwcode [6] opgelegd dat parkeerplaatsen in de open lucht maximaal moeten gebruik maken van water- en grasdoorlatende materialen, of van open voegen die minstens 30% van de oppervlakte uitmaken.

4.2 Implementatiewijze van de gekozen bronmaatregelen in een Infoworks ICM-model

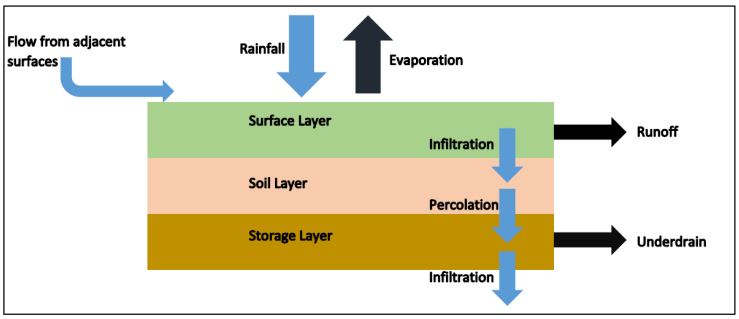
4.2.1 Overzicht van implementatiewijzen

In de volgende sectie wordt onderzocht hoe de gekozen maatregelen kunnen worden vertaald naar een Infoworks ICM-model. Hier zijn verschillende benaderingen voor, afhankelijk van de complexiteit en de hoeveelheid parameters die in rekening worden gebracht.

Een eerste benadering is om de maatregelen in te bouwen in het netwerk door ze te vereenvoudigen tot standaard netwerk-elementen. Zo kan een groendak vereenvoudigd worden door de dakoppervlakte van een subcatchment te verminderen en in de plaats een bijkomend landgebruik toe te voegen met een veel lagere afvoercoëfficiënt die een vaste fractie van de regen naar het afvoerstelsel voert. Een doorlatende verharding wordt op dezelfde manier gemodelleerd. Een groene zone of infiltratiekom kan dan voorgesteld worden als een extra knooppunt, type 'pond', waarheen het water van een bepaald subcatchment afstroomt en dat infiltratieverliezen kent naar de bodem. Een voorbeeld van toepassing van deze methode is die in de masterproef van Michel Van Lierde voor het onderzoek naar het effect van bronmaatregelen tegen wateroverlast in Gent [42].

Een complexere methode maakt gebruik van een 1D-2D model. Zulke modellen maken een koppeling tussen een 1-dimensionaal netwerk voor simuleren van de stroming in de rioleringen en een 2-dimensionaal stromingsmodel voor het simuleren van water dat na rioleringsoversstromingen over het landoppervlak stroomt. Deze modellen bestaan uit een fijn netwerk van oppervlakte-elementen waarvoor de stromingsvergelijkingen worden opgelost en waaraan ook eigenschappen zoals infiltratie kunnen worden toegekend. Een groene of doorlatende verharding kan dan gemodelleerd worden als een depressie in het land met een bepaald infiltratiemodel voor de waterverliezen. Het nadeel van deze werkwijze is dat nu aan elk element in het netwerk een neerslagintensiteit moeten worden toegekend. Dit vereist ook dat de instroom van water in het rioleringsstelsel ook via het 2D-model verloopt, en niet via een neerslagafstromingsmodel op niveau van de subcatchments. Het gevolg is een gevoelige toename van het vereiste rekenwerk [24].

Een laatste methode die hier beschouwd wordt, werkt op het niveau van de subcathments. Infoworks ICM heeft sinds versie 6.5 een ingebouwde toepassing voor het modelleren van bronmaatregelen: 'SUDS control'. In deze methode worden eerst verschillende type-maatregelen gedefinieerd per eenheid van oppervlakte. Hier worden algemene eigenschappen per maatregel gedefinieerd, zoals grondtype, dikte van bepaalde lagen enz. Vervolgens worden per subcatchment maatregelen toegevoegd samen met plaatsspecifieke parameters zoals oppervlakte en initiële condities. De basisstructuur van deze 'SUDS' wordt hierna uitgelegd.



Figuur 4.1: Conceptueel model van een bronmaatregel zoals voorgesteld in de Infoworks ICM SUDS-controlmodule [18].

Tabel 4.1: Nodige (x) en optionele (o) lagen per type bronmaatregel zoals gebruikt in de Infoworks Suds control [18].

Type maatregel	Oppervlakte	Verharding	Grond	Opslag	Drainage	Draineermat
Bio-bufferbekken	x		x	x	o	
Regentuin	x		x			
Groendak	x		x			x
Wadi	x			x	o	
Doorlatende verharding	x	x	o	x	o	
Hemelwaterput				x	x	
Dakafkoppeling	x					
Greppel	x					

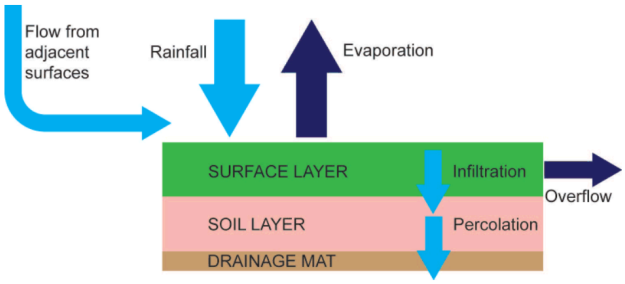
SUDS control in Infoworks ICM

De basisstructuur van een bronmaatregel in de SUDS control in Infoworks bestaat uit een variërend aantal verticale lagen, zoals voorgesteld in figuur 4.1. Zo zijn er lagen die de oppervlakte voorstellen, lagen voor verharding, grondlagen, draineerlagen enz. De gebruikte lagen hangen af van het type bronmaatregel, zoals weergegeven in tabel 4.1:

Elk van deze lagen slaan water op dat afkomstig is van neerslag, afstroming of de bovenliggende laag, en geeft het weer af via evaporatie aan de lucht, via infiltratie of percolatie aan de volgende laag of eventueel aan het rioleringsstelsel. De snelheid waarmee dit gebeurt is afhankelijk van eigenschappen van de lagen en van de waterhoeveelheid in die laag.

4.2.2 Groendak

Een zeer eenvoudige methode om groendaken voor te stellen in het Infoworks-model is om de dakoppervlakte van veronderstelde groendaken een verminderde afstroming toe te kennen. In plaats van een vaste afstromingscoëfficiënt van 0.8 of 0.9 wordt er één toegekend van bijvoorbeeld 0.08 of zelfs 0. Dit is een zeer grove vereenvoudiging van de werking van een groendak en wordt dus ook niet verkozen.



Figuur 4.2: Conceptueel model van een groendak zoals voorgesteld in Infoworks ICM [18].

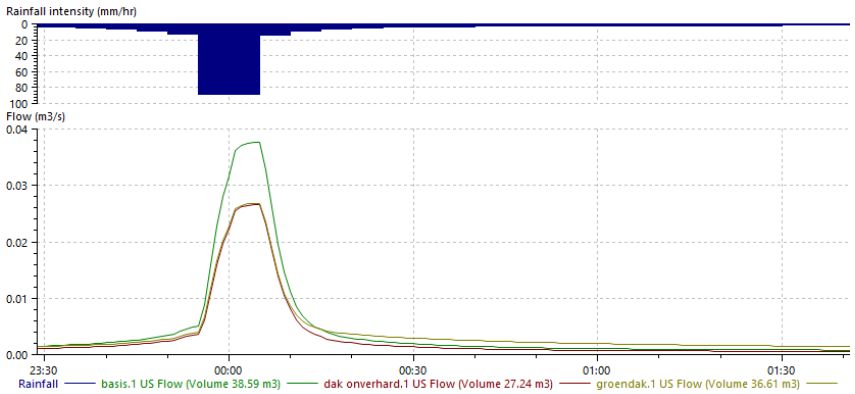
Een tweede methode maakt gebruik van de SUDS-control. In deze tool worden groendaken voorgesteld door drie verticale lagen, zoals voorgesteld in figuur 4.2. De oppervlaktelaag stelt de vegetatie voor die rechtstreeks regen ontvangt en kan opslaan in kleine depressie, of afvoeren via afstroming. Water kan infiltreren naar de grondlaag. Dit is het substraat waarop de planten groeien. Ten slotte is er een drainagemat aangebracht die overtollig water alsnog afvoert naar het afwateringsstelsel. Nodige parameters zijn de laagdiktes, opslagcapaciteiten (zoals porositeit of poriëngetal), en de Manningscoëfficiënt van de oppervlakte.

Het opmerking voor deze methodes is dat de werking van het groendakmodel sterk afhankelijk is van de voorafgaande situatie [13]. Hoewel deze methode wel toelaat een bepaalde saturatietoestand als initiële in te geven, is deze niet gekend. Een methode die dit verhelpt is het gebruiken van lange termijn simulaties. In een eerste fase wordt bepaald welk percentage van de verharding in het studiegebied als groendak wordt beschouwd. Dit wordt vertaald naar een conceptueel model waar voor de groendaken de eigenschappen als opslag, drainage en evaporatie worden ingegeven. Het resultaat een een invoerreeks die gebruikt kan worden bij een conceptueel rioleringsmodel waarmee de invloed van de groendaken bestudeerd kan worden. Door de snelle rekentijden kunnen eenvoudig verschillende scenario's doorgerekend worden. Deze techniek wordt verder besproken in hoofdstuk 8.

Er wordt besloten dat in het verder onderzoek in Infoworks zal worden gewerkt met de SUDS-controlmethode. Om de methode te testen en om een vergelijking te maken met de eenvoudige methode van verminderde afstroming werden in een fictief netwerk enkele tests uitgevoerd. Een subcatchment van **0.2**ha, met **0.03**ha onverhard, **0.12**ha straatoppervlakte en **0.05**ha dakoppervlakte werd opgesteld, gebruik makend van dezelfde parameters en afstromingscoeëfficiïten als in het netwerk van Antwerpen, zie ook figuur 4.7 waar dezelfde opstelling wordt gebruikt voor het testen van de implementatie van een infiltratiebekken. Er worden twee modellen opgesteld met verschillende implementatiewijzen van de groendaken, zie ook tabel 4.2. De verschillende laagdiktes zijn gebaseerd op de studie over groendaken in Toronto, systeem G [21]. Er worden vervolgens een composietbui T2, T5 en T20 op aangelegd.

Tabel 4.2: Verschillende geteste implementaties van groendaken.

Eigenschap	Geen groendak	Verminderde afstroming	Suds-control
Afstromingscoëfficiënt dakoppervlakte	0.9	0	n.v.t.
Dikte oppervlaktelaag	n.v.t.	n.v.t.	3cm
Type grondlaag	n.v.t.	n.v.t.	Zand
Dikte grondlaag	n.v.t.	n.v.t.	10cm
Dikte draineermat	n.v.t.	n.v.t.	3cm



Figuur 4.3: Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van een groendak, T5.

De neerslagafstroming van de subcatchments worden vervolgens vergeleken.

Op het eerste zicht gedragen het SUDS-control-groendak en het model met nul-afstroming zich zeer gelijkaardig. Dit betekent dat het groendak zich als onverhard gedraagt. Hoe extremer echter de bui, hoe meer er een verschil ontstaat tussen de twee gevallen. In figuur 4.3 bijvoorbeeld wordt voor een T5 composietbui duidelijk dat het dak vertraagd water afgeeft (na passage van de piekintensiteit). Dit wordt niet gemodelleerd volgens de methode van verminderde afstroming, waar het water op de dakoppervlakte gewoon verdwenen is. Bij een T20 is dit verschil nog groter. Daarom is de modellering via de SUDS-control-methode realistischer.

Optimalisatie van het groendak

In wat volgt, wordt de structuur van het groendak als SUDS-control nader bekeken om zo tot een optimale opbouw te komen. Er wordt weer van testmodellen gebruik gemaakt om de invloed van bepaalde keuzes op de werking van het groendak te onderzoeken. Zo zal uiteindelijk een keuze gemaakt worden over de verschillende laagdiktes (van de oppervlakte-opslag, grondlaag en draineermat), de vegetatie-volumefractie en tenslotte de grondsoort en de hieraan gekoppelde -eigenschappen.

Oppervlakte-opslag en vegetatiefractie Uit de help-topics [18] of de blog ivm. SUDS in Infoworks [20] blijkt niet wat de invloed van de volumefractie vegetatie op de werking van het groendak zal zijn. Na het uitvoeren van enkele testen met groendaken blijkt dat deze volumefractie in feite een vermindering inhoudt van de beschikbare wateropslag in de oppervlaktelaag. Met de 'Berm height' wordt namelijk aangegeven welke hoogte het water maximaal kan innemen boven de grondlaag van het groendak voor dat er oppervlakte-afstroming optreedt. Vermenigvuldigd met de oppervlakte van het groendak in planzicht wordt dus een opslagvolume gecreëerd. De volumefractie vegetatie vermindert dan dit opslagvolume.

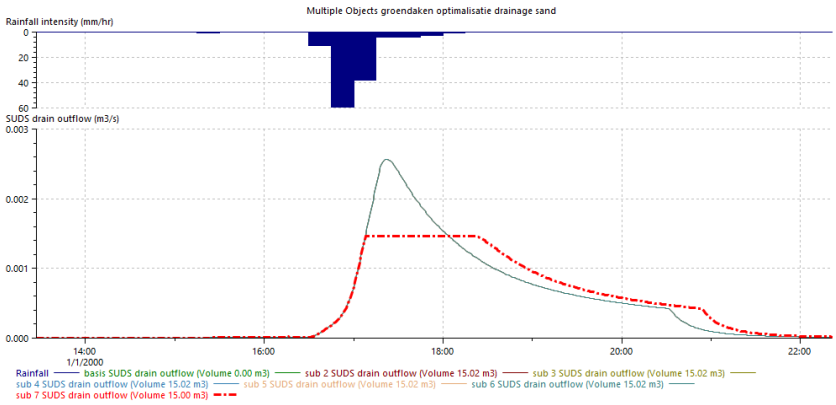
Omdat er dus geen echte 'optimalisatie' kan gemaakt worden (omdat een hogere bermhoogte meer volume toelaat maar ook een sterker dak vraagt, wat verschillend is voor elk afzonderlijk gebouw), wordt er gekozen om met 'redelijke' waarden te werken, namelijk een bermhoogte van 5cm, waarvan 1/3e of 33% van het volume wordt ingenomen door vegetatie. Zo wordt vermeden dat er een overschatting wordt gemaakt van de potentiële wateropslag door groendaken.

Dikte van de drainagemat De drainagemat vormt de voornaamste afvoerweg van water uit het groendak. Enkel wanneer er onvoldoende water kan worden afgevoerd door de grond en de draineermat zal er water langs het oppervlakte afstromen. Dit is natuurlijk te vermijden omdat het betekent dat het groendak geen water meer kan bufferen en het risico bestaat dat de piekneerslag gewoon naar de rioleringen stroomt.

Het simuleren van 6 testnetwerken met kleiner wordende dikte van drainagemat (van 50mm tot 5mm dik) maakt duidelijk dat enkel in het geval van de meest doorlatende grond (zand, zie ook de volgende sectie), alleen een zeer kleine mat een beperking (5mm dik) vormt voor het systeem (zie ook figuur 4.4). Zodra de grond iets minder doorlatend wordt, zal zelfs deze kleine dikte geen impact hebben op de werking van het groendak. Omdat veel voorkomende diktes rond de 2 tot 3cm liggen, maakt de gekozen waarde niet uit. In de verdere modellering wordt gewerkt met een laag van 3cm dik.

Keuze van de grondlaag De laatste keuze die hier besproken wordt is die van de grond- of substraatlaag waarop de vegetatie kan groeien. Omdat een volledige optimalisatie van alle parameters hier te ver zou leiden, wordt gekozen om enkel te kiezen voor één van de voorgedefinieerde grondlagen in de SUDS-control-tool, en zoals beschreven in tabel 2 van [20]. De grondeigenschappen zoals porositeit en doorlatendheid volgen hier dan uit. Bovendien wordt ook de dikte van de grondlaag hier vastgelegd op 100mm.

Uit simulatie met testmodellen kunnen duidelijk enkele grondtypes worden uitgesloten. Zo zullen de zandgrond en de lemige zandgrond te doorlatend zijn om het water te kunnen vertragen. De piek van het uitstromend debiet valt praktisch samen met die van de bui zodat de werking van het groendak verwaarloosbaar is. De



Figuur 4.4: Uitstroom van water uit het groendak via de drainagemat onder een sterk doorlatende grondlaag. Bui van 27-28 juli 2013. In het rood wordt de waarde gegeven voor een drainagemat van 5mm dikte, alle andere diktes vallen samen onder de dunne lijn.

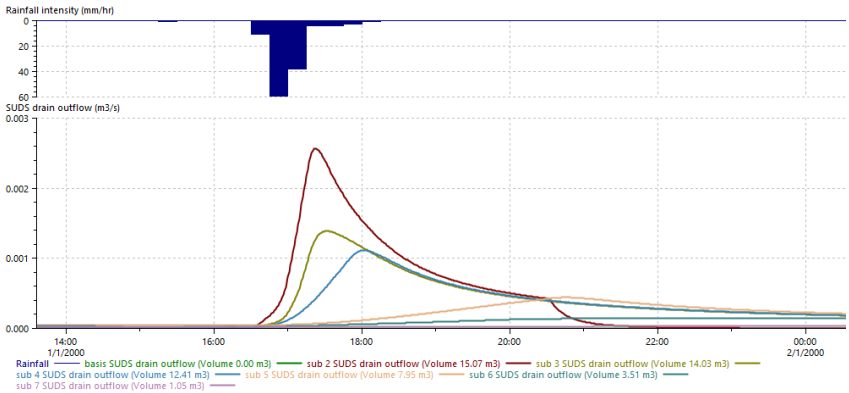
Tabel 4.3: Verschillende geteste grondlagen in een groendak als SUDS-control.

Groendak	Grondlaag	Doorlatendheid [mm/u]
2	zand	120.396
3	lemig zand	39.972
4	zandig leem	10.922
5	leem	3.302
6	siltige klei-leem	1.016
7	klei	0.254

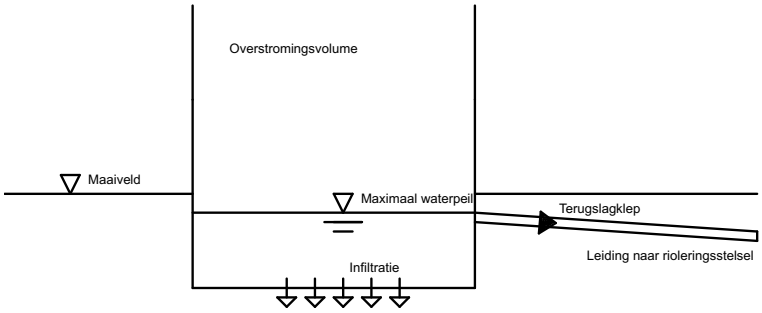
minst doorlatende gronden zoals klei, laten dan misschien weer veel te weinig water doorsijpelen waardoor de vegetatielaag zich vult en het risico bestaat een volgende bui volledig langs de oppervlakteafstroming van het groendak verloopt. Lagen 4 en 5, zandige leem en leem, lijken een goed compromis te bieden tussen het voldoende vertragen van de piekafvoer, en het toch ook ledigen binnen redelijke termijn. Om een definitieve keuze te maken moet echter ook rekening worden gehouden met de respons van het rioleringsstelsel op de regenbui, zodat vermeden wordt dat de piekafvoer van het groendak samenvalt met het moment van overstromen. Daarom zal de keuze tussen laag 4 of 5 pas gemaakt worden bij de implementatie in het volledige model. In figuur 4.5 wordt nog een voorbeeld gegeven van de testdebieten voor de bui van 27 en 28 juli 2013, voor de verschillende grondlagen uit tabel 4.3

4.2.3 Infiltratiekom

Bij berekeningen met Infoworks wordt voor het simuleren van infiltratiebekkens in Vlaanderen meestal gebruik gemaakt van een knoop type 'pond' [34]. Dit is een knoop die naast een opslagfunctie ook infiltratie-eigenschappen heeft, zowel door



Figuur 4.5: Uitstroom van water uit het groendak via de drainagemat voor verschillende grondtypes. Bui van 27-28 juli 2013.

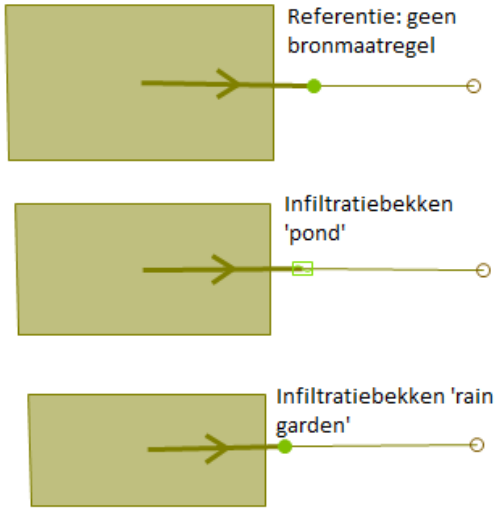


Figuur 4.6: Schematische voorstelling van een infiltratiebekken in Infoworks.

de bodem als door de wanden van het bekken. Aan de knoop kan dan de neerslag worden toegekend van 1 subcatchment. Het is mogelijk om complexe geometriën in te geven voor de bekkens. Ook kunnen verschillende infiltratiecapaciteiten worden ingegeven voor verschillende dieptes.

De volledige implementatie is als volgt, zie ook figuur 4.6: op een geschikte locatie voor een infiltratiebekken wordt een 'pond' ingevoerd. De neerslag die hier naar afstroomt is zowel de neerslag die rechtstreeks op de natte oppervlakte van het bekken valt (100% afstroming) als van het subcatchment dat er naar afwatert. Dit is meestal verharde oppervlakte in de omgeving waar geen doorlatende verharding mogelijk is. De 'pond' krijgt de geometrie van het bekken en watert af via een leiding met terugslagklep naar het rioleringsstelsel. De terugslagklep verhindert dat vuil rioleringswater naar het bekken stroomt en de leiding wordt 40cm boven het bodempeil geplaatst uit veiligheidsredenen.

Als alternatief voor deze werkwijze kan weer gebruik gemaakt worden van de SUDS-control op niveau van het subcatchment. Het type dat het meest aansluit bij

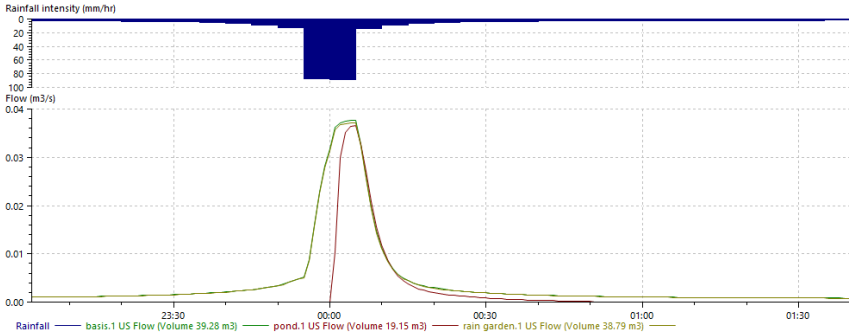


Figuur 4.7: Opstelling van de test-modellen in Infoworks.

een infiltratiebekken is de 'rain-garden'. Dit wordt in Infoworks voorgesteld door twee verticale lagen: een oppervlaktelaag en een grondlaag. De oppervlaktelaag kan een bepaalde hoeveelheid water opslaan en doen infiltreren naar de bodem. Aan de grondlaag kunnen dan ook infiltratiecapaciteiten worden toegekend. Belangrijk op te merken is dat bij een 'pond' er een verschillende infiltratiecapaciteit kan worden opgelegd voor de wanden en voor de bodem, wat belangrijk is wanneer de bodem door bijvoorbeeld slecht onderhoud niet meegerekend mag worden bij de infiltratieoppervlakte [9]. De functionaliteit van 'suds-control' is tweedimensionaal en kent dus enkel infiltratie via de bodem.

Om een vergelijking te maken tussen verschillende implementatievormen worden weer eenvoudige subcatchments opgesteld in Infoworks met dezelfde grootte en landgebruik als in de vorige paragraaf. Een eerste basis-subcatchment stroomt simpelweg af naar een leiding, een tweede naar een 'pond' met oppervlakte 25m^2, met vierkante doorsnede, infiltratiecapaciteit van 120mm/uur in zowel de bodem als wanden (tussen fijn en grof zand, [34]) en een uitgaande leiding op 40cm boven het bodempeil. Een derde model stroomt eveneens af naar een leiding maar heeft een rain-garden van dezelfde oppervlakte, diepte en infiltratiecapaciteit op zijn gebied liggen. Er moet opgemerkt worden dat de implementatie van het derde testmodel gepaard ging met technische problemen. Zo werden simulaties afgebroken omwille van foutmeldingen die later niet verschenen bij een nieuw testmodel met exact dezelfde parameters. Indien er in het grote model van Antwerpen verschillende groenzones worden geplaatst, kunnen zulke problemen best vermeden worden.

Uit de resultaten blijkt dat de implementatie van de 'rain garden' niet het gewenste resultaat geeft. Het effect van het implementeren van de bronmaatregel lijkt afwezig, terwijl dat bij het gebruik van het 'pond' wel is. Hier zal het bekken



Figuur 4.8: Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van een infiltratiebekken.

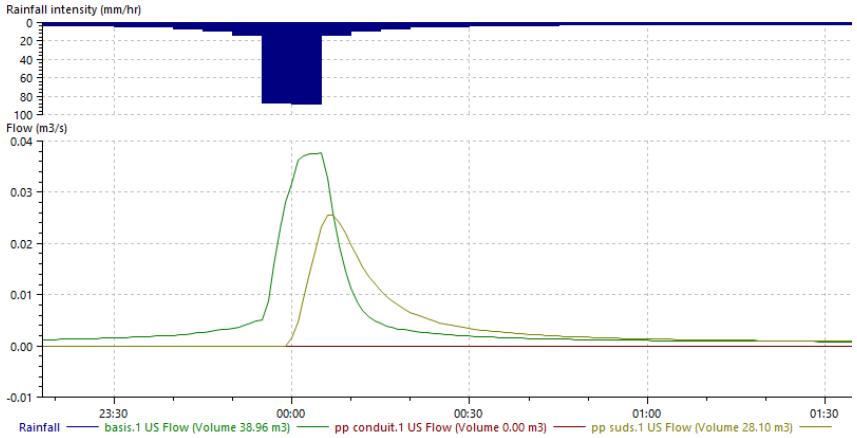
zich eerst langzaam vullen en zodra het niveau van de leiding bereikt wordt, is er ook afstroming. Er kan gecontroleerd worden dat het waterniveau niet boven de uitgaande leiding komt te staan en er treedt dus geen overstroming op. Natuurlijk is dit bekken niet geoptimaliseerd om voor dit subcatchment te werken maar toont het toch de goede werking van een knoop type 'pond' aan.

4.2.4 Doorlatende verharding

Een eenvoudige manier om doorlatende verhardingen te implementeren is om de afvoercoëfficiënt zeer laag of gelijk aan nul te nemen. Dit is echter een grove vereenvoudiging waarbij de afvoer van de verharding onafhankelijk is van de verzadigingsgraad. Wanneer de bui langer aanhoudt, zal er zich veel water in de structuur bevinden die meer afwatering veroorzaakt dan in de droge situatie.

Om dit probleem te omzeilen is er een andere mogelijkheid. De doorlatende verharding kan worden voorgesteld als een 'link'-element in Infoworks. Door het subcatchment waarin het zich bevindt te laten draineren naar deze link, door de link de geometrie van de grondlaag te geven en door de link infiltratie toe te wijzen, wordt het gedrag van de doorlatende verharding veel beter nagebootst.

Alternatief hiervoor is om weer gebruik te maken van de SUDS-control. Hier is ook een type 'Permeable pavement' dat hetzelfde gedrag voorstelt. Het voordeel van deze methode is dat het niet enkel lijnvormige verhardingen zoals parkeerstroken, maar ook bredere oppervlakken zoals bijvoorbeeld pleinen kan voorstellen. Ook kan het implementeren van veel extra links de complexiteit van het netwerk vergroten, zeker omdat in het netwerk van Antwerpen centrum de subcatchments met de percelen samenvallen, niet met de wegstructuur. Dit zou voor zelfs een enkele parkeerstrook al zeer veel extra leidingen betekenen, wat naast een grote kans op fouten ook de rekentijd zou verhogen. Daarom wordt de methode met SUDS-control op het subcatchmentniveau verkozen boven de andere methode. Om te verzekeren dat de resultaten realistisch zijn, wordt er een testnetwerk opgesteld waarin de verschillende implementatiewijzen worden vergeleken: In hetzelfde testgebied als in de vorige paragrafen wordt nu verondersteld dat een parkeerstrook van 2.5m breed en 150m



Figuur 4.9: Uitstroming van het subcatchment bij verschillende implementatiewijzen van doorlatende verharding.

lang uitgevoerd wordt als doorlatende verharding. De ondergrond wordt als zand verondersteld met een infiltratiecapaciteit van 120mm/uur. Hieraan worden composietbuien aangelegd en de uitstroom uit het subcatchment wordt bekeken. In figuur 4.9 wordt dit geplot voor een T5 composietbui. Hier is duidelijk de goede werking van de SUDS-control te zien (lichtgroene lijn): initieel zal er geen water afstromen omdat de doorlatende verharding in droge toestand voldoende infiltratiecapaciteit bezit. Naarmate de verharding meer gesatureerd raakt, zal er oppervlakteafstroming plaatsvinden. De werking van de permabele leiding lijkt minder goed (rode lijn). Er vindt geen afstroming plaats en wanneer het totale geïnfiltreerde volume wordt opgevraagd, blijkt dit hoger te liggen dan de totale hoeveelheid neerslag. Dit kan wijzen op numerieke problemen. Voor de andere composietbuien en met andere configuraties voor de leiding zijn de resultaten gelijkaardig. Er zal dus best verder gewerkt worden met de doorlatende verharding uit de SUDS-controlmodule.

4.3 Implementatie van bronmaatregelen als 'SUDS control' in Infoworks uit GIS-informatie

Procedure

In de vorige paragrafen werd onderzocht welke methode er het best in slaagt de werking van de bronmaatregel voor te stellen in een ICM-model. In de realiteit moeten de bronmaatregelen echter niet alleen gemodelleerd kunnen worden, maar moeten ze ook effectief gebouwd kunnen worden. Zo kunnen groendaken bijvoorbeeld enkel op platte of zeer licht hellende daken geplaatst worden.

In een Infoworksmodel is deze informatie niet beschikbaar en praktisch wordt er veel gewerkt met GIS-programma's zoals Arcgis (licentie) of Qgis (open source) om deze geografische informatie te beheren. In dit onderzoek wordt later bijvoorbeeld

gebruik gemaakt van een kaart met mogelijke locaties van groendaken in de stad Antwerpen [37]. Deze informatie uit GIS (bv. locatie en oppervlakte van een groendak) zou dan ingevoerd moeten worden in het hydraulisch model. Stel dat het nu om een groot aantal groendaken gaat, die bovendien niet netjes de contouren van de verschillende subcatchments volgen, wordt het handmatig ingeven zeer tijdrovend en is het bovendien gevoelig voor menselijke fouten. Daarom wordt hier een methode ontwikkeld die toelaat de GIS-informatie in zijn geheel te importeren in het model, zonder de individuele bronmaatregelen en subcatchments handmatig aan te passen.

De procedure bestaat uit verschillende stappen, opgedeeld naargelang het softwareprogramma waarmee ze worden uitgevoerd. Ze vertrekt van een bestaand netwerk met subcatchments enerzijds, en een shapefile met de data van verschillende te implementeren bronmaatregelen zoals groendaken anderzijds:

- Stappen in Infoworks ICM:
  - Exporteren van het netwerk naar een .csv-bestand.
  - Exporteren van de subcatchments naar een 'shapefile'.
- Stappen in GIS-software:
  - Verwijder dubbele subcatchments om te vermijden dat groendaken dubbel gerekend worden. Dit kan voor het netwerk van Antwerpen eenvoudig door de subcatchments van het type 'storm' te verwijderen, aangezien deze maar een kleine minderheid van alle subcatchments uitmaken. Hiermee wordt dus verondersteld dat de SUDS enkel inwerken op het gecombineerd stelsel.
  - Maak een intersectie van de subcatchments-laag en de SUDS-laag. Hiermee worden enkel de SUDS in het studiegebied behouden en worden deze bovendien gesplitst volgens de grenzen van de subcathments moesten deze niet exact samenvallen.
  - Verwijder alle attribuutkolommen van deze nieuwe laag, behalve de kolom die de naam van het subcatchment bevat.
  - Voeg de verschillende polygonen met hetzelfde id (dus per subcatment) samen tot één enkele 'multipart'.
  - Bereken de oppervlakte van elk van deze multiparts.
  - sla de attribuuttabel op in een Excel-bestand: de eerste kolom bevat een titel en dan de verschillende subcatchmentnamen, de tweede kolom een titel en vervolgens de verschillende oppervlaktes aan bronmaatregelen in de bijhorende subcatchments.
- Stappen in MATLAB:
  - Gebruik de MATLAB-functie 'insert_suds'. Deze zal de SUDS-structuren toevoegen op het niveau van de subcatchments in het geëxporteerde .csv-bestand.

  - De functie 'read_network' kan nu gebruikt worden om na te gaan of de verandering correct werd ingevoegd in de csv.

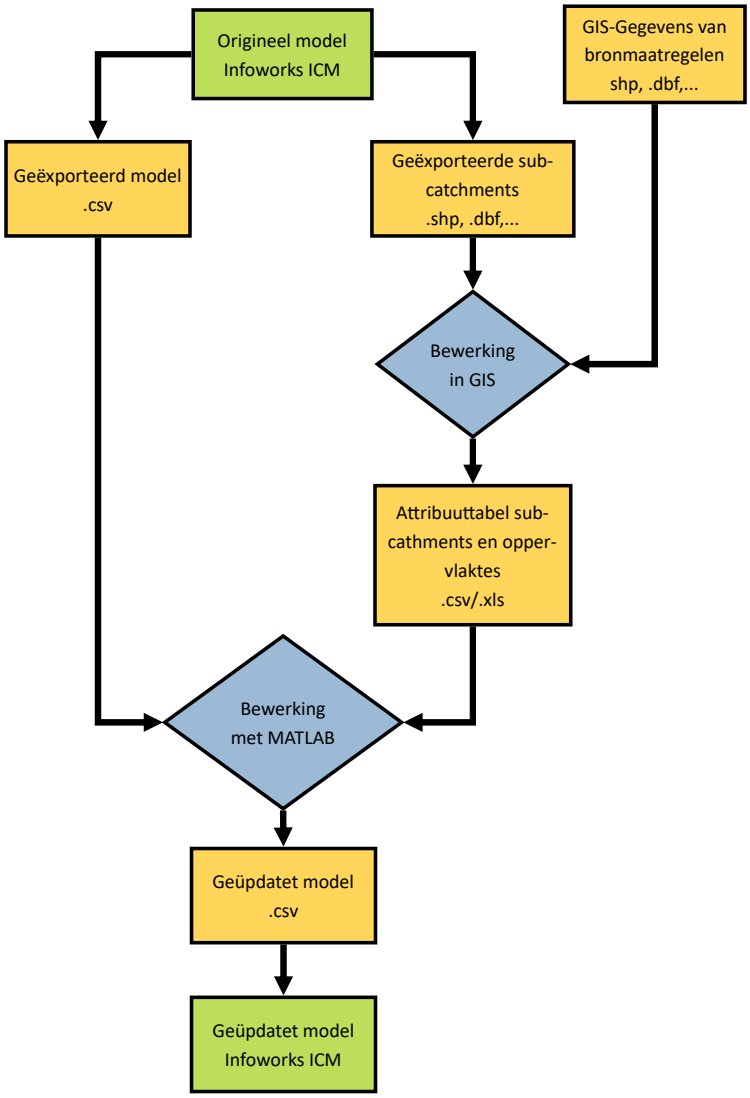
- Stappen in Excel/Infoworks:
  - Open het bestand 'network_updated' met Excel en converteer het naar een .cvs-formaat.
  - Update het originele netwerk in Infoworks door het importeren van deze nieuwe csv.

Een samenvatting van de hele procedure wordt gegeven in het stroomdiagram in figuur 4.10.

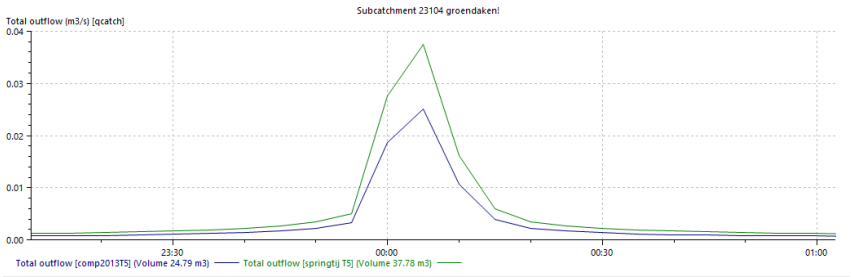
Naast de voorgestelde methode zijn er natuurlijk andere werkwijzen om SUDS op grote schaal te importeren in het model. Zo werd al vermeld dat groendaken impliciet geïmplementeerd kunnen worden door een aanpassing van de neerslaginvoer. Het voordeel van de nieuwe procedure is echter dat nu ook de locatie van de groendaken een invloed heeft op de resultaten, waar dit niet het geval is bij de impliciete methode. Een andere mogelijkheid is om de gebouwen die groendaken bevatten in Infoworks te vervangen door een gebied met een nieuw gedefinieerd landgebruik. Vervolgens worden nieuwe subcatchments opgesteld met de 'area take-off'-tool waarbij het dus de bedoeling is dat de karakteristieken van de nieuwe zones zodanig gekozen worden dat ze de werking van bijvoorbeeld groendaken voorstellen. De grootste onzekerheid met deze methode zijn de karakteristieken die moeten toegekend worden aan de bodem om een groendak correct te kunnen modelleren.

Resultaat

De procedure werd getest door de potentiële groendaken van [37] in te voeren in het model van Antwerpen. In totaal gaat het om 662 verschillende subcatchments die een nieuwe SUDS-structuur krijgen. Om problemen met het werkgeheugen te vermijden, moesten de verschillende polygonen uit het geëxporteerde netwerk verwijderd worden. Aangezien deze geen enkele invloed hebben op het hydraulisch gedrag, en ook eenvoudig terug toe te voegen zijn, vormt dit geen enkel probleem. Na het updaten van het netwerk in csv.-formaat wordt het terug ingevoerd in het Infoworksmodel. Vervolgens werden simulaties met composietbuien uitgevoerd om na te gaan of de groendaken correct werden ingegeven. De eerste simulaties werden afgebroken omdat 7 subcatchments een SUDS kregen toegewezen die groter was dan de bijdragende oppervlakte van het subcatchment. Dit kan voorkomen wanneer de bijdragende oppervlakte veel kleiner is dan de geometrische (bijvoorbeeld bij zowel storm als gecombineerde subcatchments op dezelfde locatie). Na verwijderen van deze 7 groendaken konden de simulaties wel uitgevoerd worden. In figuur 4.11 wordt de afstroming van subcatchment 23104 gegeven bij een T5-composietbui. De aanwezigheid van het groendak is duidelijk te merken. Opgemerkt moet worden dat hier geen aandacht werd geschonken aan het feit dat een composietbui geen goed beeld geeft van de werking van groendaken bij korte zomerbuien.



Figuur 4.10: Stroomdiagram van de verschillende stappen in de implementatieprocedure.



Figuur 4.11: Afstroming van subcatchment 23104 bij een T5-bui. Met(blauw) en zonder(groen) aanwezigheid van het groendak.

4.4 Besluit

In dit hoofdstuk werd er dieper ingegaan op de verschillende mogelijkheden om bronmaatregelen te modelleren met behulp van Infoworks ICM. Eerst werd er een selectie gemaakt van veelbelovende maatregelen die verder beschouwd gaan worden. Zo zal er in het vervolg van dit onderzoek voornamelijk gefocust worden op de invloed van groendaken, groene zones of infiltratiekommen en waterdoorlatende verhardingen.

In een tweede sectie werden dan de verschillende implementatiewijzen van deze maatregelen in Infoworks onderling vergeleken. Hieruit werd besloten om in het vervolg infiltratiekommen te modelleren als een 'pond', een standaard modelelement dat water kan opslaan en doen infiltreren naar de bodem. Voor de gevallen groendaken en doorlatende verharding bleken de 'SUDS-controls' de beste optie, waardoor deze bronmaatregelen in het model dus op het niveau van de subcatchments zullen werken.

Ten slotte werd een nieuwe procedure voorgesteld om op een efficiënte manier geografische informatie van bronmaatregelen, zoals ligging en opperakte maar eventueel ook types of andere parameters, in te geven in een bestaand Infoworksmodel. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een nieuwe functie in MATLAB.

Hoofdstuk 5

Opstellen van het gekoppeld 1D-2D-model

5.1 Inleiding

Zoals al vermeld, slaagt een eendimensionaal netwerkmodel er niet in om een goed beeld te schetsen van de optredende overstromingen, hun uitgestrektheid of tijdsduur. Het kan enkel aangeven welke knooppunten zullen overstromen, maar houdt geen rekening met het overstroomde water, noch is er sprake van interactie tussen overstromende knopen onderling. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe een gekoppeld 1D-2D-model wordt opgesteld voor het studiegebied in Antwerpen. Dit wordt gebruikt om een veel correcter beeld te krijgen van de impact van overstromingen en het dus van het plaatsen van bronmaatregelen.

In Infoworks ICM wordt 2D modellering ondersteunt door de Infoworks 2D module. De berekeningen zijn gebaseerd op de 'Shallow Water Equations' of SWE [18]. Dit zijn de Navier-Stokesvergelijkingen, uitgemiddeld over de waterdiepte, waarbij dus verondersteld wordt dat de variatie langs de verticale coördinaat verwaarloosbaar is. In feite stellen de vergelijkingen niets anders voor dan het behoud van massa en momentum bij tweedimensionale stroming, net zoals de de Saint-Venantvergelijkingen voor eendimensionale stroming:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = q_{1D} \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + \frac{gh^2}{2}) + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + Q_{1D}u_{1d} \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hv^2 + \frac{gh^2}{2}) + \frac{\partial (huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + Q_{1D}v_{1d} \tag{5.3}$$

Met:

h de waterdiepte

u en v de snelheden in de x- en y- richtingen respectievelijk

$S_{0,x}$ en $S_{0,y}$ de wrijvingshellingen in de x- en y- richtingen respectievelijk

q_{1D} het instromende debiet en

u_{1D} en v_{1D} de snelheidscomponenten van dit debiet in de x- en y- richtingen respectievelijk

De vergelijkingen worden opgelost voor een groot aantal eindige volumes of 2D-elementen in het studiegebied en voor een groot aantal tijdstappen om zo een beeld te krijgen van de stroming aan de oppervlakte. Elementen waar de waterhoogte kleiner is dan 0.001m worden verondersteld droog te zijn om fictieve, extreem hoge snelheden te vermijden in de resultaten bij het vullen of drogen van een element. Een belangrijk nadeel van tweedimensionale modellen is de veel grotere rekentijd die nodig is voor het uitvoeren van simulaties.

5.2 Opbouw en implementatie van het 2D-model

5.2.1 Onderdelen

In de volgende paragraaf worden de verschillende elementen van een 2D-model toegelicht, samen met hun specifieke parameterwaarden voor het opgestelde model. Omdat er voor het afwateringsgebied van de RWZI Deurne [30] al een 1D-2D-model bestaat, zijn veel waarden hierop gebaseerd om zo een optimale overeenkomst te verkrijgen tussen resultaten in beide gebieden.

2D-zone

Het basisonderdeel van het 2D-model is de 2D-zone. Dit bakent het gebied af waarvoor het model wordt gecreëerd, zie ook figuur 5.5. Zijn voornaamste te definiëren parameters zijn de maximale en minimale elementgroottes. Hoe groter de elementen, hoe minder dat er nodig zijn om het studiegebied te bedekken en hoe sneller dat de berekeningen zullen verlopen. Het nadeel is een grove benadering van het overstroomde gebied en het risico op onnauwkeurigheden. Een belangrijke indicator voor fouten in de berekeningen is de waterbalans of 'mass error balance' van het stelsel die zo dicht mogelijk bij nul moet liggen. In de studie over het opstellen van een 2D-model in Gent [24] werd deze indicator gebruikt, samen met het overstromingsvolume en uitgestrektheid van de overstromingen in vergelijking met de rekentijd. Voor de niet-overstromingsgevoelige gebieden (dus voor het basisrooster van de 2D-zone) werd een optimale elementgrootte gevonden van 75m^2-300m^2.

Bij een 2D-zones is het belangrijk om te werken met de correcte randvoorwaarde. Deze zal bepalen wat er met het water gebeurt aan de randen van het studiegebied. Zo wordt bij de voorwaarde 'vertical wall' veronderstelt dat de horizontale snelheid nul bedraagt op de rand waardoor het risico ontstaat dat er zich water ophoopt aan de randen, wat meestal niet realistisch is. Hier zal gewerkt worden met de 'normal condition' waarbij er normaalstroming verondersteld wordt op te treden aan de randen (wrijvingshelling gelijk aan de helling van het terrein). Aan de grens van het gebied met de schelde kan de 'critical condition' worden gebruikt, waarbij het uitstromend debiet berekend wordt zoals bij een overstort. Dit is mogelijk door op deze lijn een '2D-boundary' te plaatsen van het type 'critical depth'.

Het 'mesh' of raster wordt opgemaakt met een digitaal hoogtemodel. Dit werd verkregen via AGIV [43]. Er wordt ook gebruik gemaakt van 'terrain sensitive meshing' waar grote of steile variaties in het terrein gedetecteerd worden en er een fijnere elementdichtheid wordt voorzien om er nauwkeurigere resultaten te bekomen.

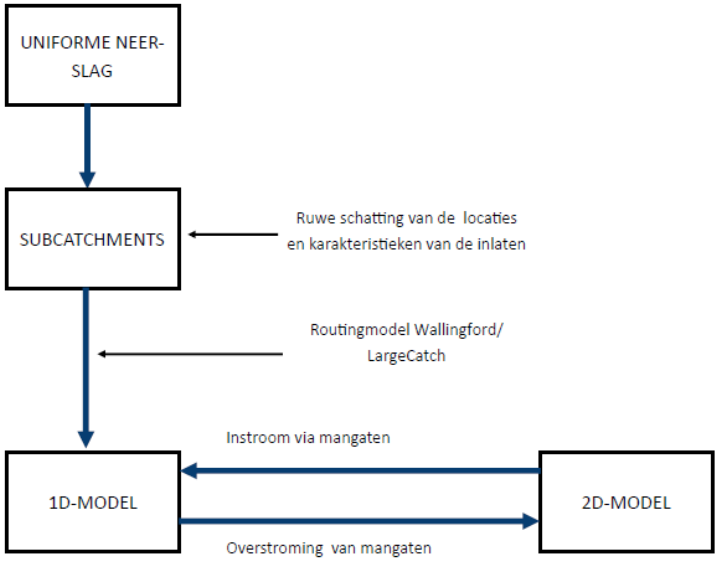
Water stroomt in het bestaande model enkel via de knopen van het 1D-netwerk, en niet door ruimtelijk verdeelde neerslag. In het model kan dus enkel water instromen via de subcatchments. Als alternatief ondersteunt Infoworks de toepassing van ruimtelijk verdeelde neerslag, rechtstreeks aan de 2D-elementen aangelegd. Dit zou wel tot zeer grote rekentijden kunnen leiden en bovendien vraagt het een grote aanpassing aan het netwerk door plaatsen van inlaten die de verschillende straatkolken en huisaansluitingen moeten voorstellen. Ook een gedetailleerde kaart van het precieze landgebruik is aangewezen om de afstroming over de verschillende oppervlakken te kunnen modelleren. Straten en parkings hebben namelijk een lagere ruwheid dan parken en groene zones, die op hun beurt dan weer infiltratie kunnen toelaten. Verduidelijkende schema's over de invoer van water in het model worden getoond in figuren 5.1 en 5.2.

Gebouwen

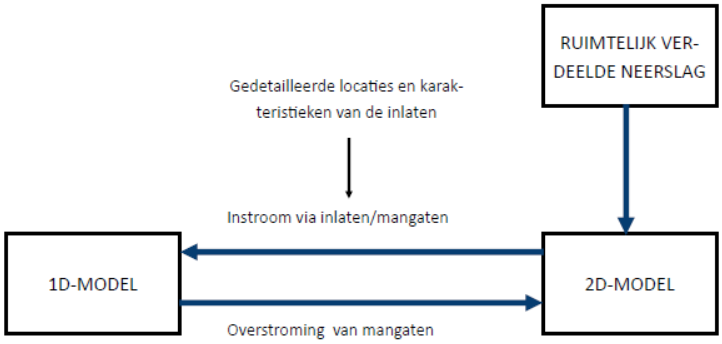
Gebouwen worden in het 2D-model voorgesteld door 'voids'. Dit zijn plaatsen in de 2D-zone waar er geen 2D-elementen worden voorzien. De gegevens voor het lokaliseren van deze voids werden verkregen via de AGIV-downloadtoepassing [43]. Voordat de data werd ingegeven in het Infoworksmodel werden de polygonen vereenvoudigd door aanliggende polygonen samen te voegen, zoals voorgesteld in figuur 5.3, en werden enkel ploygonen weerhouden die behoren tot het studiegebied. Dit is nodig om de hoeveelheid data en invoertijd te beperken.

Inspectieputten

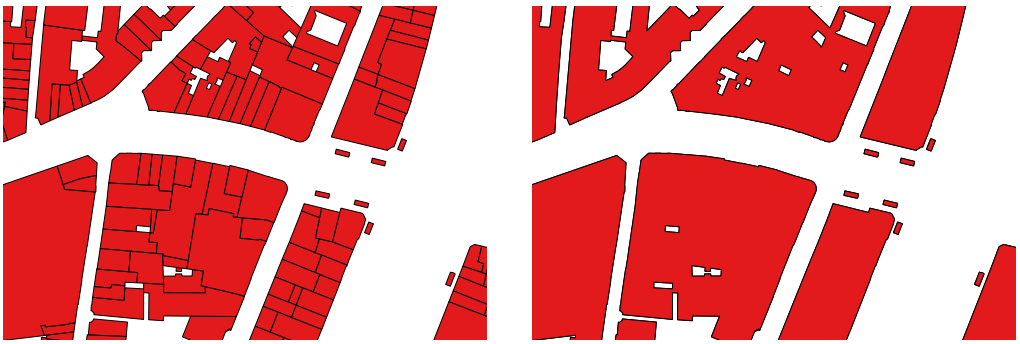
Water stroomt het 2D-model in via de inspectieputten ('manholes') van het 1D-model. Deze worden hiervoor aangepast naar overstromingstype 2D, waarbij uitstroom wordt berekend door te veronderstellen dat de knoop zich als een overstort gedraagt met een breedte gelijk aan die van de omtrek van de inspectieput. De debietscoëfficiënt bedraagt 0.5 en het model laat toe dat water weer terug in het rioleringsstelsel stroomt.



Figuur 5.1: Schematische voorstelling van de invoer van neerslag in het 1D-2D model volgens de gebruikte methode. Water stroomt het systeem binnen via de subcatchments, waar het volgens een routingmodel vertraagd en afgevlakt wordt om vervolgens het 1D-model in te stromen. Via de mangaten kan er water overstromen of terugvloeien van en naar het 2D-model.



Figuur 5.2: Schematische voorstelling van de invoer van neerslag in het 1D-2D model volgens de alternatieve methode. Neerslag valt op de 2D-elementen waar de stroming berekend wordt volgens de SWE-vergelijkingen. Gedetailleerde inlaten worden best toegevoegd opdat dit water zo realistisch mogelijk het 1D-model kan instromen. Hoewel deze werkwijze dus beter de realiteit nabootst vraagt hij een zeer gedetailleerde kennis van de inlaten en landgebruik. Bovendien worden zeer hoge rekentijden verwacht omdat alle elementen van het 2D-model tegelijk belast worden.



(a) Origineel (b) Vereenvoudigd

Figuur 5.3: Voorbeeld van een vereenvoudiging van de dataset van de verschillende gebouwen. Een volgende vereenvoudiging bestaat erin om de "gaten" in de verschillende gebouwblokken op te vullen om de grootte van het 2D-model nog verder te beperken. Dit wordt hier niet getoond.

Ook de overstromingshoogte waarbij water de put verlaat, wordt aangepast. De originele maaiveldpeilen worden verwijderd en vervangen door de lokale hoogte van het 2D-element. Een andere mogelijkheid is de plaatselijke hoogte van het grondmodel te nemen maar omdat deze nog kan afwijken van het eigenlijke 2D-model waarmee de berekening wordt uitgevoerd, wordt dit niet gekozen. Het aanpassen gebeurt met de 'inference'-tool in Infoworks ICM.

Ruwheidszones

Een belangrijke parameter in de SWE-vergelijkingen is de ruwheid (vervat in de wrijvingshellingen $S_{0,x}$ en $S_{0,y}$). In Infoworks worden deze berekend met de Manninscoëfficiënt n. Voor rioleringen wordt volgens de code van goede praktijk 0.013 genomen [9]. In een 2D-model wordt in Infoworks als standaardwaarde 0.25 genomen, wat te groot is om de straatoppervlakte te beschrijven. Daarom worden 'ruwheidszones' gedefinieerd, gebieden met een aangepaste Manninscoëfficiënt (0.0125 voor straten, gebasseerd op de waarde in het model Deurne). De gebieden worden analoog als de gebouwen na vereenvoudiging ingevoerd op basis van data van AGIV [43].

Overstromingsgevoelige zones

Uit de casestudie Gent van Ntegeka et al. [24] blijkt dat bij een te ruwe elementgrootte de uitgestrektheid van overstroomde zones onderschat kan worden. Dit wordt verklaard door het kleinere aantal mogelijke stroompaden van water bij te grote elementen. Om voldoende nauwkeurige resultaten te bekomen, kunnen zogenaamde 'mesh-zones' worden gedefinieerd: deelgebieden met een fijnere elementgrootte ($2m^2$-$8m^2$ in het model Deurne). Om de gebieden af te bakenen waar een fijner raster

gewenst is, zijn verschillende strategieën mogelijk: Een schatting voor locaties die in het 2D-model veel overstromingen zullen kennen, is het simuleren van buien met een hoge terugkeerperiode in het 1D-model. De subcatchments waarbinnen de overstroomde knopen liggen, kunnen een eerste schatting zijn voor de gebieden waar een meshverfijning gewenst is.

Een andere strategie is om zoals in de casestudie van Gent alle wegen voor te stellen als mesh-zone. Deze krijgen dan een elementgrootte tussen 3.75m^2 en 15m^2, wat het interval is waarvoor in de studie van Gent het optimale resultaat bekomen werd (op vlak van nauwkeurigheid en rekentijd). Het is deze methode die initieel wordt verkozen in deze studie. Eventueel kunnen later nog fijnere en meer lokale mesh-zones worden voorgesteld voor overstromingsgevoelige zones.

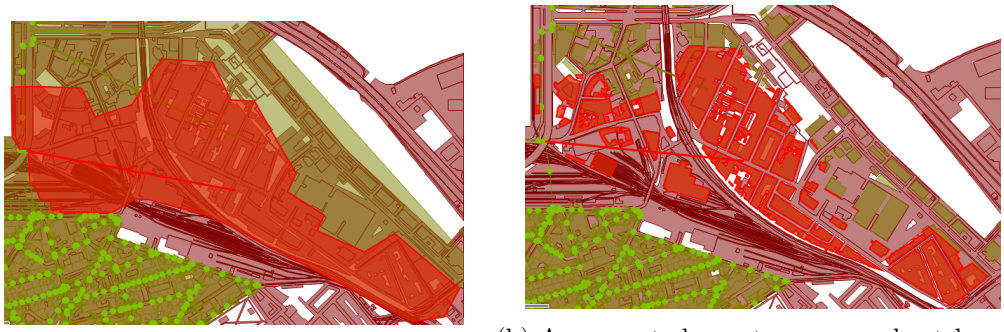
Infiltratiezone's

Wanneer water door parken of andere onverharde zones stroomt, zal het gedeeltelijk infiltreren. Wanneer dit niet in rekening wordt gebracht bij een 2D-simulatie, zo blijkt in de casestudie Gent [24], kan het resulteren in het overschatten van het overstromingsgebied, wat ook leidt tot hogere rekentijden dan nodig. In Infoworks gebeurt het inrekenen van onverharde zone's door zogenaamde infiltratiezone's. Deze werden opgesteld op basis van langebruikkaarten voor Vlaanderen [43]. Er wordt het studiegebied in dit onderzoek geen grote invloed verwacht van het toevoegen van deze zone's. In het geval Gent, waar de deelgemeenten Oostakken en Sint-Amandsberg werden bestudeerd, is de situatie wel anders dan in het stadscentrum van Antwerpen: Waar er in Gent zeer veel open en onbebouwde ruimtes zijn zoals (voor-)tuinen, weiden, enz., zal dat in Antwerpen al veel minder zijn.

5.2.2 Samenstellen van het 2D-model

Na opstellen van de verschillende geografische voorstellingen van 2D-zone, mesh-zone, gebouwen en ruwheidszones zoals aangegeven in de voorgaande paragraaf, kunnen deze worden ingevoerd in het Infoworksmodel. Uit verschillende pogingen blijkt echter dat het belangrijk is dat er geen fouten meer aanwezig zijn in deze lagen. Hiermee worden bijvoorbeeld extreem kleine, fictieve openingen bedoeld tussen gebouwen, tussen wegen en gebouwen of tussen gebouwen en de grens van de 2D-zone. Deze ontstaan uit kleine verschillen tussen locaties van de veelhoeken in de invoergegevens maar kunnen het opstellen van het raster onmogelijk maken. Met behulp van GIS-software kunnen deze problemen eenvoudig verholpen worden.

Een volgend probleem dat kan voorkomen bij het opstellen van het raster is het beëindigen van de berekening door gebrek aan werkgeheugen. De oorzaak hiervan is de erg complexe geometrie van de mesh- en ruwheids-zones (het stratenpatroon). Om dit te verhelpen, wordt de volgende strategie gehanteerd: in plaats van een ruwe elementgrootte te definiëren in de globale 2D-zone en een fijnere grootte in de mesh-zones, wordt voor de hele 2D-zone een kleine elementgrootte voorgesteld, samen met de Manninscoëfficiënt voor de wegen (0.0125). Ook werd in een ander model een ruw raster gebruikt voor de hele zone en een fijner voor een mesh-zone maar met



(a) Originele lay-out van een subcatchment

(b) Aangepaste lay-out van een subcatchment voor rechtstreekse neerslag

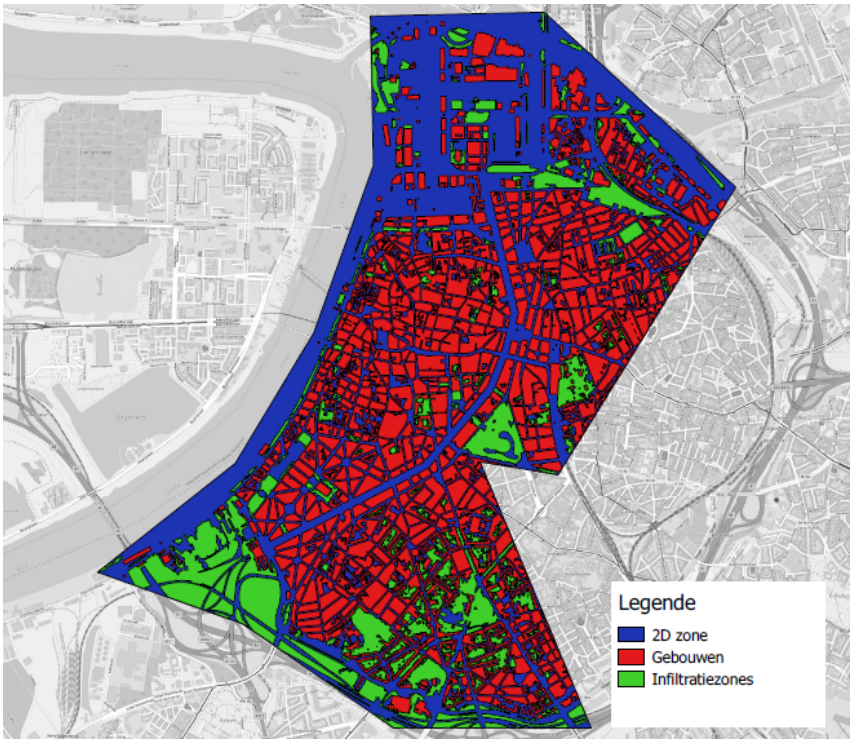
Figuur 5.4: Voorbeeld van het aanpassen van de subcatchments voor het model waar neerslag rechtstreeks in het 2D-model zal werken.

het verschil dat deze laatste een eenvoudige geometrie kreeg (de contouren van de Brederodewijk). In beide gevallen werd de berekening voldoende snel uitgevoerd wat dus de vermoedens bevestigd. Om nu toch rekentijden beperkt te houden, ondanks het zeer fijne raster, is het een mogelijkheid om in bepaalde gebieden nieuwe mesh-zones te definiëren met een ruwer mesh in plaats van een fijner. Ook kan het invoeren van infiltratiezones de rekentijd kunnen verlagen en de nauwkeurigheid verhogen, zoals al aangegeven in de casestudie van Gent [24]. Daarom wordt het model opgesteld met een fijne resolutie van het mesh in de globale 2D-zone (elementgrootte 15m^2-3.75m^2) en ruwere mesh in de groene gebieden (elementgrootte 50m^2-12.5m^2, ruwheid van 0.03). De groene zones werden geïdentificeerd met behulp van landgebruikkaarten van AGIV [43].

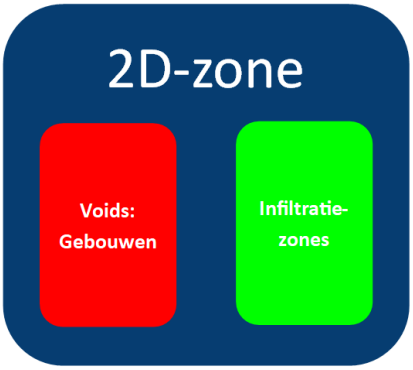
Voor het model waarbij de neerslag rechtstreeks in het 2D-raster wordt aangelegd, dienen de subcatchments te worden aangepast. In het originele model overlappen deze namelijk met de elementen van het 2D-raster. Het verwijderen van alle subcatchments of ze uitschakelen, lost dit probleem ook niet op omdat het model geen 2D-elementen bevat ter hoogte van de verschillende gebouwen (voids). De neerslag die hier valt, zou dan niet meegerekend worden. De oplossing ligt in het aanpassen van de subcatchments in een GIS-programma: van de polygonen die de verschillende subcatchments voorstellen, worden de delen afgetrokken die met de voids van het 2D-raster overeenkomen. Vervolgens worden de shapefiles terug ingelezen in het model, waarbij de totale oppervlakte en de oppervlakte die met wegen overeenkomt niet ingerekend worden. De totale oppervlakte wordt dan berekend uit het 'geoplan' en de straatoppervlakte blijft 0. Een voorbeeld van deze aanpassing van de subcatchments, ingegeven in Infoworks wordt gegeven in figuur 5.4.

5.3 Evaluatie van het 2D-model

Een overzicht van de opbouw van het 2D-model na samenvoegen van de deelcomponeneten wordt gegeven in figuren 5.5 en 5.6. Voor het uitgebreide 1D-2D-model



Figuur 5.5: Kaart die de verschillende 2D-elementen op de kaart van Antwerpen weergeeft.



Figuur 5.6: Schematische voorstelling van de opbouw van de verschillende gebieden binnen het 2D-model.

Tabel 5.1: Resultaten van de vergelijking van berekeningsresultaten bij verschillende modellen, bui van 27 en 28 juli 2013

Model: Elementgrootte 2D-zone [m^2]	Mass-error 2D-model [m^3]	Maximale overstroomde oppervlakte [ha]	Netto 2D instroom-volume [m^3]	Rekentijd 2D
15-3.75	7.3626	5.8709	858.8556	471.1"
20-5	1.3917	5.9585	981.8923	267.3"
60-15	0.8105	6.4055	827.3551	71.3"

worden de historische buien voor de validatie van het 1D-model opnieuw gesimuleerd. Er wordt nagegaan of de modellen beter in staat zijn om de werkelijke overstromingssituatie te voorspellen dankzij de 1D-2D-koppeling. Bovendien worden de simulatieresultaten van verschillende 2D-modellen onderling vergeleken opdat het meest efficiënte model weerhouden kan worden. Naast de verschillende meshfijnheden worden ook de invloeden van de aanwezigheid van infiltratiezones en van het rechtstreeks toepassen van neerslag in het 2D-model bestudeerd. Er wordt gezocht naar een compromis tussen rekentijd en kwaliteit van de resultaten. De simulaties worden uitgevoerd op een computer met i7 processor, 16GB RAM en een GTX 970 GPU.

5.3.1 Elementgrootte

Een eerste vergelijking wordt gemaakt tussen de simulaties met grovere en fijnere meshes. Voor twee historische buien, 27 en 28 juli 2013 en 30 mei 2016, worden de berekeningsresultaten vergeleken. Naast de mass-error worden ook overstromingsvolumes en -oppervlakte bekeken. De resultaten staan samengevat in tabellen 5.1 en 5.2. Er zijn verschillen tussen de resultaten maar toch is duidelijk dat de deze beperkt blijven. De massa-fout is telkens groter bij de fijnere netwerken wat misschien verrassend lijkt. Dit kan misschien veroorzaakt worden door het feit dat bij kleine elementen, de inspectieputten groter worden dan de mangaten waardoor er water uit de berekening verdwijnt. Het vergelijken van deze mass-error met het totale instromend volume in de 2D-zone maakt duidelijk dat de fouten toch erg klein zijn.

Ook de eerdere bewering dat de grovere netwerken de overstroomde oppervlaktes kunnen onderschatten, wordt door deze resultaten tegengesproken. Hoe fijner het netwerk, hoe kleiner de overstroomde oppervlaktes. Ook sluiten de resultaten van het medium-mesh en het fijnste mesh beter bij elkaar aan dan met het resultaat van het grofste mesh. Mogelijk convergeren de resultaten naar een limietwaarde bij kleinere elementgrootte. Door de beperkte winst hiermee in vergelijking met de andere modelleringsonzekerheden en de stijgende massa-fout bij fijnere netwerken, wordt hier niet verder op ingegaan.

Ten slotte is er een duidelijk verschil in de rekentijden: hoe fijner de elementgrootte, hoe langer de berekening duurt. Toch blijven de rekentijden voor deze buien zeer beperkt. Een betere test voor het vergelijken van rekentijden is het simuleren van composietstormen. Zoals gezien zal bij een T20-bui de overstroomde oppervlakte veel groter zijn, wat ook in een zwaardere berekening zou resulteren.

Tabel 5.2: Resultaten van de vergelijking van berekeningsresultaten bij verschillende modellen, bui van 30 mei 2016.

Model: Elementgrootte 2D-zone [m^2]	Mass-error 2D-model [m^3]	Maximale overstroomde oppervlakte [ha]	Netto 2D instroom-volume [m^3]	Rekentijd 2D
15-3.75	12.2926	4.1554	743.7986	678.1"
20-5	1.6566	4.1909	1014.7856	770.2"
60-15	0.3388	4.7454	752.3840	122.2"

Omwille van de grotere nauwkeurigheid en de toch voldoende kleine rekentijden, wordt verkozen om verder te werken met de fijnste elementgrootte. De verschillen blijven weliswaar beperkt zodat in het geval dat er onvoldoende rekenkracht beschikbaar zou zijn, ook de minder fijne rasters waarschijnlijk voldoende nauwkeurigheid bieden, in het licht van de andere modelonzekerheden die spelen.

5.3.2 Infiltratiezones

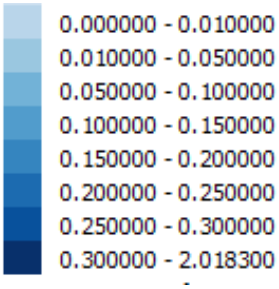
Een volgende vergelijking wordt gemaakt tussen de modellen met en zonder de implementatie van infiltratiezones. Simulaties met de historische buien van 27 en 28 juli 2013 en 30 mei 2016 laten niet duidelijk zien dat er een grote invloed is van de infiltratiezones. De overstroomde oppervlakte is slechts weinig verkleind en ook het maximale overstromingsvolume is niet veel verkleind. Resultaten worden samengevat in tabel 5.3. Ook een grafische inspectie van de overstromingskaarten toont aan dat er geen groot verschil is. In figuur 5.7 wordt wel duidelijk dat er in de zones die gevoelig zijn voor overstromingen, er ook niet veel groene zones aanwezig zijn die de volumes zouden kunnen beperken. Het is dus onduidelijk of de eerder minieme resultaten te wijten zijn aan een slechte werking van deze infiltratie in het model, of gewoon de afwezigheid van een voldoende doorlatende oppervlakte. Bovendien worden groene zones meegenomen in de deeloppervlakken van de verschillende subcatchments, waardoor zones die veel groen kennen ook al een mindere afstroming hebben dan gebieden die door veel verharding gekenmerkt worden. Het is dus waarschijnlijk niet toevallig dat er weinig infiltratiegebieden zijn in die stadsdelen die ook voor overstromingen gevoelig zijn. Een verdere vergelijking van de resultaten met de implementatie van infiltratiezones is mogelijk aan de hand van de figuren in bijlage D

Ondanks het eerder geringe effect van deze infiltratiezones op de overstromingen zullen ze toch worden gebruikt in de verdere berekeningen. Deze zones zijn in werkelijkheid ook doorlatend en dragen dus bij tot een betere representativiteit van de werkelijke situatie. Bovendien hebben ze het bijkomend voordeel dat ze de rekentijden bij simulaties van grote overstromingen verder kunnen verminderen omdat een deel van het water uit het 2D-model verdwijnt.

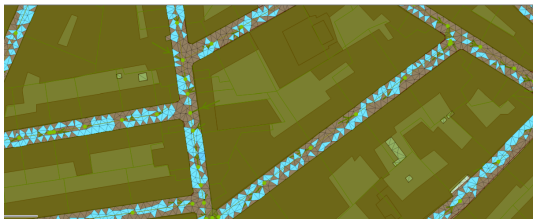
5.3.3 Rechtstreekse neerslag

In Infoworks is het, zoals vermeld, mogelijk om de neerslag rechtstreeks in het 2D mesh te laten toekomen. Vervolgens zal het regenwater via de mangaten instromen

Figuur 5.7: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Rechts wordt een detail van de linse figuur gegeven, namelijk de overstrmingen rond het gebouw 'Den Bell' (zie verder). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



Figuur 5.8: Legende van de 2D-overstromingskaarten, waterdieptes in [m].

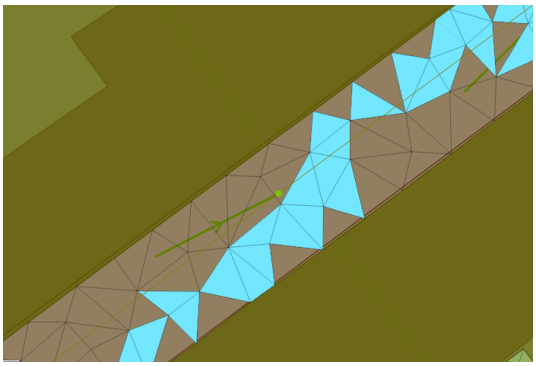


Figuur 5.9: Overstromingskaart met rechtstreekse neerslag in het 2D mesh.

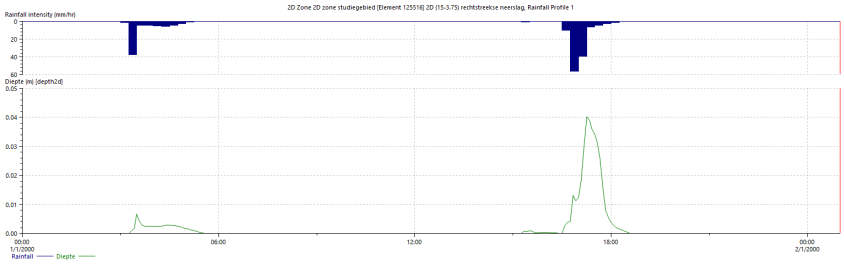
in het 1D rioleringsmodel. Om deze methode toe te passen, werden er aanpassingen gemaakt aan de subcatchments. Enkel de gebouwen moeten voorzien worden van een subcatchment aangezien deze niet opgenomen worden in de 2D mesh. De neerslag die op deze gebouwen terecht komt zal wel meteen in het 1D rioleringsmodel instromen.

Uit simulaties blijkt dat er onrealistisch veel regenwater op straat verzameld wordt dat niet naar de mangaten stroomt nadat de bui eindigt (zie figuur 5.9). De reden hiervoor is dat er een relatief groot verschil in hoogte kan bestaan tussen naburige elementen. Indien een hogergelegen element een mangat bevat, dan zal dit element zelf wel leegstromen maar zal er in de naastgelegen elementen een waterhoogte gelijk aan het hoogteverschil met het hogergelegen element aanwezig zijn.

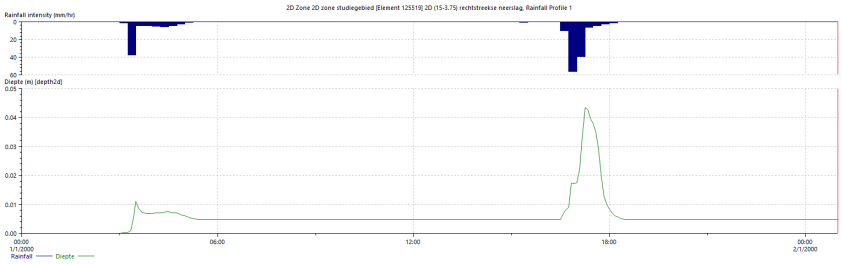
Een voorbeeld van het probleem van het hoogteverschil wordt getoond in figuur



Figuur 5.10: Detail overstromingskaart met rechtstreekse neerslag in 2D mesh.



Figuur 5.11: Waterhoogte in cel 1.



Figuur 5.12: Waterhoogte in cel 2.

5.10. In deze figuur is een element te zien dat een mangat bevat (element 1). Het naastgelegen element wordt als overstroomd weergegeven (element 2). De hoogte van element 1 en element 2 zijn 5.626m T.A.W en 5.622m T.A.W respectievelijk. Er is dus een waterhoogte van 5mm te verwachten in element 2 (4mm hoogteverschil + 1mm voor velocity threshold).

Figuren 5.11 en 5.12 tonen de grafiek van de waterhoogtes in functie van de tijd van element 1 en element 2 respectievelijk. Hieruit blijkt dat de waterhoogte in element 2 gelijk blijft aan 5mm in de droge periodes, zoals verwacht.

Om te voorkomen dat dit probleem zich voordoet, zou er gewerkt moeten worden met een nauwkeuriger grondmodel om de discontinuïteiten in de hoogte van naast elkaar gelegen elementen te vermijden of met een veel fijner mesh opdat het terrein beter gevolgd kan worden. Dit veroorzaakt echter geheugenproblemen met het

Tabel 5.3: Resultaten van simulaties met verschillende 2D netwerken. Voor de bui van 30 mei worden steeds de resultaten voor Melsele links en Wilrijk rechts getoond.

	Maximum overstromingsoppervlakte [ha]			**Massafout [m^3]**			**Netto instroom [m^3]**		
	30/5/'16	**30/5/'16**	**27-28/7/'13**	**30/5/'16**	**30/5/'16**	**27-28/7/'13**	**30/5/'16**	**30/5/'16**	**27-28/7/'13**
Referentie	7.8581	N/A	5.1795	18.0416	N/A	17.5827	1511.13	N/A	723.48
Infiltratie	7.8651	6.0076	5.2957	5.1573	1.8605	1.5746	1628.28	1065.77	854.99
C_d =1	7.531	5.6515	5.1009	23.0747	3.4043	8.7523	1468.93	963.83	716.99
C_d =0.25	8.1809	5.9807	5.401	1.2527	0.5936	0.3988	1577.33	1028.93	769.73

opstellen van het mesh in Infoworks. Omwille van de grote moeilijkheden die met een verder verfijnen van het model gepaard gaan, in combinatie met de onzekerheid op de inlaten, wordt er verder niet gewerkt met rechtstreekse neerslag.

5.3.4 Debietscoëfficiënt

Ten slotte wordt kort geëvalueerd wat de invloed is van de keuze van debietscoëfficiënt op de simulatieresultaten. Omdat het overstromingstype van de mangaten '2D' is, wordt de uitwisseling van water tussen het 1D en het 2D-model berekend volgens de standaard stuwvergelijkingen [18]. Dit betekent dat het uitstromend debiet Q_0 berekend wordt volgens de volgende vergelijking:

$$Q_0 = C_d B \sqrt{g} D_u^{3/2} \tag{5.4}$$

Waarbij de breedte B wordt berekend als de omtrek van het mangat, D_u de waterhoogte boven de schuif voorstelt en $C_d \leq 1$ de debietscoëfficiënt is die in principe experimenteel bepaald wordt en de ladingsverliezen inrekent bij de stroming over de stuw. In de modellen van Gent [24] en Deurne [30] worden deze steeds op 0.5 genomen. In deze paragraaf wordt kort nagegaan of deze waarde een grote invloed heeft op de eindresultaten. Moest dit het geval zijn, is het nodig dat ze nauwkeurig wordt bepaald. Anders bestaat het risico dat er een te grote onzekerheid rust op de resultaten, wat verhindert dat ze correct geïnterpreteerd kunnen worden. Uit enkele simulaties met telkens een zeer grote en kleine ($C_d = 1$ en $C_d = 0.25$, oftewel een verdubbeling en een halvering van de waarde) wordt duidelijk dat de invloed zeer beperkt is. In 5.3 worden enkele indicatoren vermeld waaruit dit blijkt. Ook een vergelijking van de figuren in bijlage D maakt duidelijk dat deze parameter geen significante invloed heeft op het resultaat en dat de modellen met waarde 0.5 gebruikt kunnen worden zonder bijkomende onzekerheid.

5.4 Vergelijking tussen het 1D en 2D model

Om na te gaan of het werken met een gedetailleerd 1D-2D netwerk wel een significante meerwaarde heeft, wordt er een vergelijking uitgevoerd tussen het 1D-model en het 1D-2D model met een fijne mesh (15 - 3.75 m^2). Eerst wordt er gekeken naar de overstromingsvolumes. Verder wordt ook de uitgestrektheid van het overstroomde gebied vergeleken, en de informatie die uit de resultaten kan worden afgeleid. Dit

Tabel 5.4: Maximale overstromingsvolumes.

	1D-model	**1D-2D model**
27-28 juli 2013	4016.6 m^3	6422.4 m^3
30 mei 2016	4088.0 m^3	6272.7 m^3

wordt toegepast voor de twee historische buien met de hoogste terugkeerperiodes: 27-28 juli 2013 en 30 mei 2016.

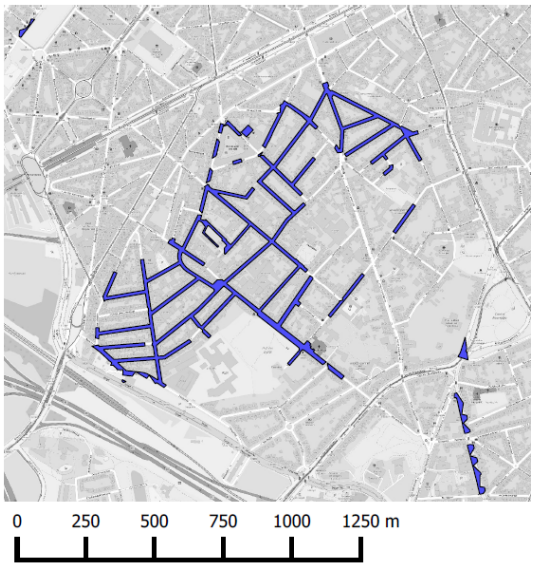
5.4.1 Overstromingsvolumes

Voor beide netwerken wordt het maximale overstromingsvolume berekend dat zich voordoet tijdens de simulatie. Deze zijn te vinden in een CSV-export van de resultaten. Vervolgens kan eenvoudig het maximum bepaald worden. Tabel 5.4 geeft de waarden van de overstromingsvolumes weer.

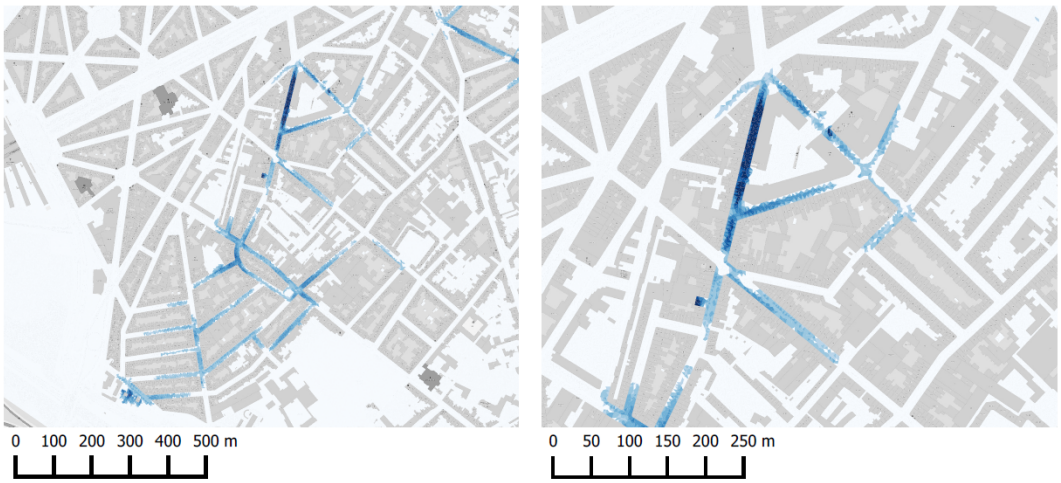
Het overstromingsvolume is in beide scenario's hoger bij het gebruik van het 1D-2D netwerk. Dit is voornamelijk te wijten zijn aan het feit dat bij het 1D-2D model het water over de straten kan stromen en zich in depressies kan opstapelen. Dit leidt tot grotere overstromingsvolumes bij lange overstromingstijden. In het 1D-model wordt er gewerkt met 'floodcones' waarbij al het water na overstroming terug in het rioolnetwerk terecht komt. Wanneer het maximale overstromingsvolume zich voordoet in het globale model, is er misschien al water vanuit de 'floodcones' in hoger gelegen gebieden terug in het netwerk gestroomd, waar dit bij het 2D-model over de oppervlakte al zou zijn weggevloeid. Ook de beschikbare oppervlakte voor overstroming is gelimiteerd en totaal niet representatief voor de werkelijke uitgestrektheid van het overstroomde gebied bij het gebruik van de floodcones.

5.4.2 Uitgestrektheid van de overstroming en opstellen van overstromingskaarten

De vergelijking zal uitgevoerd worden aan de hand van 'floodmaps' of overstromingskaarten, gemaakt met de maximumresultaten van de overstromingen per simulatie. Voor het 1D-2D model werden deze kaarten gegenereerd door een kleurcode toe te kennen aan de waterdiepte in de 2D elementen, waarvan de legende wordt gegeven in figuur 5.8. In het geval van een 1D-simulatie wordt de kaart gemaakt door het genereren van Thiessen polygonen tussen de verschillende knopen en dan enkel de overstroomde knopen in te kleuren. Vervolgens worden de polygonen die gebouwen voorstellen in het gebied hiervan 'afgetrokken' zodat enkel de gebieden overblijven die werkelijk kunnen overstromen. het is dus belangrijk in te zien dat hiermee enkel een ruwe indicatie kan bekomen worden van de overstroomde gebieden, maar zeker niet de gedetailleerde uitgestrektheid of bijhorende overstromingsdiepte. Wanneer een knoop bijvoorbeeld zeer licht overstroomt, maar ze toch een groot gebied krijgt toegewezen door de Thiessen-ploygoonmethode, lijkt het alsof er een groot gebied overstroomd waar dit totaal niet realistisch is. Ook informatie wat betreft de waterdiepte wordt niet getoond omdat de waterdieptes in de methode met floodcones niet



Figuur 5.13: Overstromingskaart 1D-model voor 27 en 28 juli 2013.



Figuur 5.14: Overstromingskaart 1D-2D model voor 27 en 28 juli 2013.

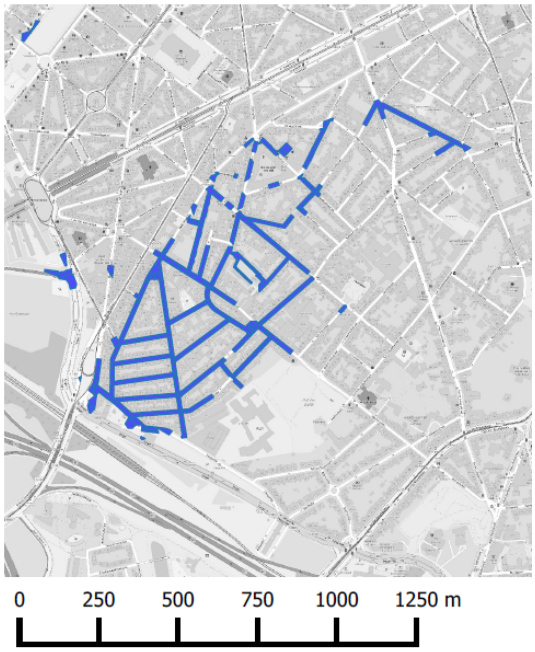
overeenstemmen met de werkelijkheid.

27-28 juli 2013

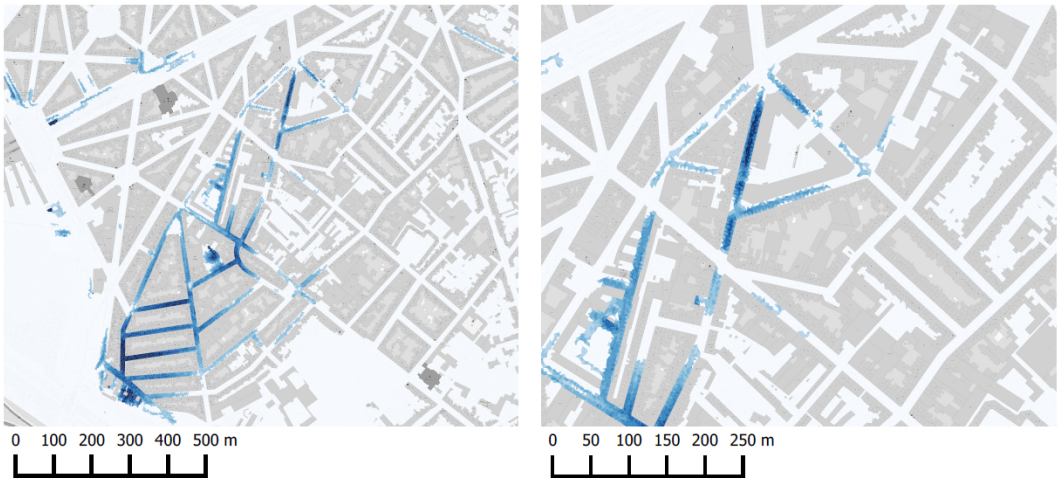
In figuren 5.13 en 5.14 worden de overstromingskaarten weergegeven voor zowel het 1D-model als het 1D-2D model voor de neerslaggebeurtenis van 27 en 28 juli 2013.

Uit de overstromingskaarten blijkt duidelijk dat het overstroomde gebied groter lijkt bij het hanteren van het 1D-model De uitgestrektheid van overstroomde gebieden wordt overschat met de vereenvoudigde kaart.

27-28 juli 2013



Figuur 5.15: Overstromingskaart 1D-model voor 30 mei 2016.



Figuur 5.16: Overstromingskaart 1D-2D model voor 30 mei 2016.

In figuren 5.15 en 5.16 worden de overstromingskaarten weergegeven voor zowel het 1D-model als het 1D-2D model voor de neerslaggebeurtenis van 30 mei 2016.

Ook bij deze bui blijkt dat het overstromingsgebied overschat wordt bij het gebruiken van de kaarten op basis van het 1D-model.

Conclusie

Bij beide neerslaggebeurtenissen lijkt het overstromingsgebied kleiner te zijn bij het gebruik van het 1D-2D netwerk. Het verschil is echter niet aanzienlijk groot. Het is belangrijk op te merken dat het opstellen van floodmaps van een 1D-netwerk met Thiessen polygonen veel onzekerheden met zich meebrengt. Indien er in 1 bijkomende knoop ook maar het kleinste beetje water overstroomt, zal er een volledige polygoon aan de floodmap toegevoegd worden wat voor een overschatting van het overstromingsgebied kan zorgen. Bovendien wordt de overstroming in een 1D-netwerk beschreven met identieke floodcones boven elke knoop, er wordt geen rekening gehouden met de lay-out van het wegdek. Deze effecten zullen de oorzaak zijn van de verschillen in uitgestrektheid. Het is vanzelfsprekend dat het 1D-2D netwerk de nauwkeurigste resultaten met zich meebrengt aangezien er rekening wordt gehouden met het werkelijke straatoppervlak. Ook informatie betreffende de overstromingsdieptes worden niet gegeven door de resultaten van het 1D-model, en wel voor het 2D-model. Deze informatie is nuttig om een onderscheid te kunnen maken tussen ernstige en eerder oppervlakkige overstromingen, waar er geen verschil is tussen verschillende overstroomde gebieden in de 1D-modelkaart. Een alternatieve en veel robuustere methode voor het opstellen van overstromingskaarten aan de hand van 1D-simulaties is het gebruik van algoritmes waarmee de volumes water in de floodcones 'uitgespreid' kunnen worden over het digitaal hoogtemodel. Met deze methode is men wel in staat om waterhoogtes en uitgestrektheid in te schatten zonder 2D-model. Hier wordt verder geen gebruik van gemaakt omdat het verschil in rekentijd tussen 1D en gekoppeld 1D-2D beperkt genoeg is om er gebruik van te maken.

5.4.3 Besluit van de vergelijking

In beide vergelijking treden er verschillen op. Eenvoudig gezegd zal een simulatie met het 1D-model een onderschatting geven van de overstromingsvolumes, en zullen de kaarten van het 1D-resultaat een overschatting geven van de uitgestrektheid van het overstroomde gebied. Dit duidt erop dat er wel degelijk een meerwaarde is aan het gebruik van een 1D-2D netwerk om de onnauwkeurigheden die gepaard gaan met de werking van de floodcones uit te schakelen. Er moet wel nog steeds een kritisch houding aangenomen worden ten opzichte van de nauwkeurigheid van het 1D-2D netwerk.

5.5 Besluit

In het voorgaande hoofdstuk wordt een methodologie beschreven en toegepast voor het opstellen van een gekoppeld 1D-2D-model in Infoworks. Hierbij wordt het rioleringsmodel dus uitgebreid met een oppervlaktemodel waar 2D-overstromingen mee gesimuleerd kunnen worden. In een eerste deel worden de verschillende deelcomponenten verklaard die nodig zijn bij het opstellen van zulke modellen. Vervolgens worden deze samengevoegd in het 2D-model en worden enkele veel voorkomende problemen

bij deze procedure besproken. Er worden simulatie uitgevoerd om de gevoeligheid van de resultaten op kleine parameterwijzigingen na te gaan en tenslotte worden de prestaties en nauwkeurigheid van dit model vergeleken met het oorspronkelijke 1D-rioleringsmodel. In de twee volgende hoofdstukken zal dit nieuwe model gebruikt worden om het effect van bronmaatregelen op de wateroverlast te kwantificeren.

Hoofdstuk 6

Evaluatie van bronmaatregelen tegen lokale wateroverlast met Infoworks ICM

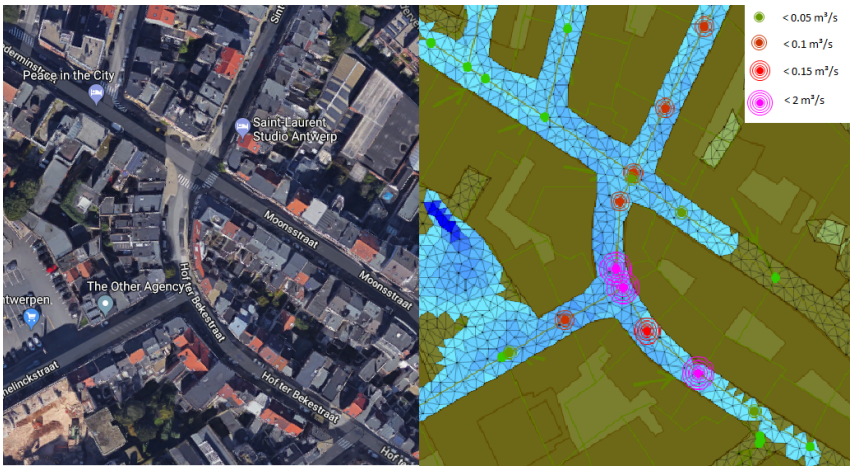
6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de problematiek van wateroverlast op een lokale schaal aangepakt. Het doel hiervan is om na te gaan of het uitvoeren van dure, gedetailleerde berekeningen om wateroverlast te voorspellen opweegt tegen de baten die kunnen gehaald worden door het kunnen identificeren van probleemsituaties. Het effect van deze gerichte maatregelen tegen overstromingsproblematiek kan dan vergeleken worden met maatregelen die algemeen geldig zijn voor het grondgebied.

Eerst zullen de locaties waar overstromingen optreden, opgelijst worden. Het gaat hier over knooppunten in het netwerk waar verschillende leidingen toekomen. Deze leidingen vangen bovendien veel water op van grote verharde oppervlaktes waardoor het knooppunt overbelast wordt. Bij elk van deze locaties zal vervolgens beschreven worden waar de oorzaken van deze lokale overlast gezocht moeten worden en welke maatregelen er rondom deze punten interessant en toepasbaar zijn. Ten slotte worden deze voorstellen geïmplementeerd in het Infoworksmodel om hun effect te kunnen begroten.

6.2 Locatie 1

De eerste overstromingsgevoelige locatie is het kruispunt waar de Moonsstraat, de Broederminstraat, de Hof ter Bekestraat en de Sint-Laureisstraat samenkomen, zie ook figuur 6.1.



Figuur 6.1: Links: Satellietbeeld locatie 1 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh.

6.2.1 Problematiek

Op dit kruispunt bevindt zich een knooppunt waar enkele leidingen toekomen die voor veel waterafvoer instaan. Uit simulaties blijkt dat deze locatie wateroverlast ondervindt voor de meeste buien. Het is een locatie die centraal ligt tussen verschillende subcatchments die telkens grote hoeveelheden water afvoeren (zie verder). Voornamelijk de knooppunten in de Hof ter Bekestraat zullen overstromen, maar er verzamelt zich ook water dat afstroomt uit de Sint-Laureistraat en de Jonghelinckstraat, waardoor dat er telkens een behoorlijk grote oppervlakte overstroomt, zie ook de figuur 6.1.

6.2.2 Oorzaken

Colruyt

Via de Hof ter Bekestraat komt er veel water binnen afkomstig van zowel de verharde parking als het dak van het warenhuis Colruyt Antwerpen-Zuid aan de Jonghelinckstraat, waarvan een satellietfoto wordt getoond in figuur 6.2. Het gaat dus om een grote dakoppervlakte en verharde parking die in geval van een hevige bui het netwerk snel zullen belasten.

Cashwell

De leiding gelegen in de Moonsstraat staat in verbinding met het oude Cashwell gebouw dat niet meer in gebruik is (figuur 6.3). Dit is een voormalige groothandel op een site tussen de Markgravelei en de Pyckestraat. Het gaat hier over grote dakoppervlaktes waarvan het water afgevoerd wordt via de Moonsstraat waar het het knooppunt zal belasten. Hoewel er plannen waren voor het opwaarderen van de site met het bouwen van woongelegenheden en een winkelcentrum, werden deze plannen

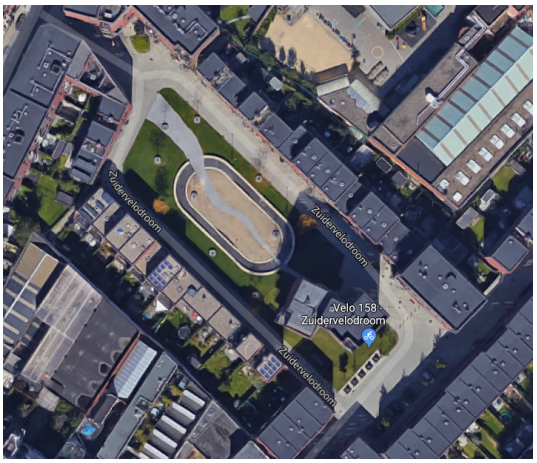
Figuur 6.2: Satellietbeeld van de Colruyt Antwerpen-Zuid [17].

Figuur 6.3: Satellietbeeld van het Cashwell gebouw in Antwerpen [17].

onder druk van buurtprotesten nog niet uitgevoerd [7]. Op vlak van wateroverlast en mogelijke verlichting van de druk op het rioleringsstelsel biedt deze site dus veel mogelijkheden.

Zuidervelodroom

Ten slotte komt er veel water binnen via de Sint-Laureisstraat. Dit water is voornamelijk afkomstig van het complex 'Zuidervelodroom'. Dit gebied bestaat uit verschillende appartementencomplexen gelegen rondom een centraal plein waarvan een groot deel van de oppervlakte verhard is. Bij hevige regenval zal dit het stelsel in de Sint-Laureistraat zwaar belasten.



Figuur 6.4: Satellietbeeld van het complex 'Zuidervelodroom' in Antwerpen [17].

6.2.3 Oplossingsvoorstellen

In het volgende worden oplossingen voorgesteld voor de hiervoor besproken wateroverlast. Ze worden opgesteld op basis van de vermelde probleemlocaties, maar ook naar andere, veelbelovende locaties die in hun buurt zijn gelegen, worden bestudeerd. In de tekst werden enkele figuren opgenomen van de oplossingsvoorstellen om deze te situeren, samen met hun werkzame oppervlakte. De overige figuren werden opgenomen in bijlage E.

Colruyt

De hoeveelheid water afkomstig van de Colruyt kan mogelijk sterk verminderd worden door het heraanleggen van de parking in doorlatende verhardingen. Ook het plaatsen van een groendak op het winkelgebouw zou mogelijk een groot deel van de overlast beperken. Tenslotte kunnen de twee parkeerstroken voor het Colruytgebouw ook worden uitgevoerd in doorlatende verhardingen. Een overzicht van de oplossingsvoorstellen wordt gegeven in figuur 6.5.

Speeltuin Balansstraat

Op het kruisspunt van de Balansstraat en de Lange Elzenstraat bevindt zich een kleine speeltuin. Deze zou eenvoudig heraangelegd kunnen worden in doorlatende verhardingen. Nog doeltreffender zou zijn om deze speeltuin te combineren met een groene infiltratiezone, maar daar wordt hier niet verder op ingegaan.

Cashwell en Sociale Werklaats De Sleutel

De Cashwell gebouwen met platte daken kunnen voorzien worden van een groendak. Aangezien het gebouw niet meer in gebruik is, kan men gebruik maken van nieuwe bouwprojecten om in bijkomende maatregelen te voorzien zoals doorlatende verhardingen, bufferzones of waterpleinen. Omdat er over de toekomst van deze site verder

Figuur 6.5: Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de Colruyt-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

niets bekend is, wordt er hier in eerste instantie niet verder op ingegaan. Ook de gebouwen van sociale werkplaats De Sleutel, gelegen vlak naast de Caswhell site, biedt mogelijkheden tot het plaatsen van groendaken.

Zuidervelodroom

Veel van de appartementsgebouwen hebben een plat dak waardoor er veel potentieel is voor het gebruiken van groendaken. Verder kan het groene gedeelte van het plein omgevormd worden tot een bufferbekken en kunnen de verharde wandelpaden vervangen worden door doorlatende verhardingen.

Plein Haantjeslei

Tenslotte wordt voorgesteld om ook het woonerf aan de Haantjeslei aan te pakken. Dit bestaat uit een aantal groene perken en een sportveld. Door een deel van deze zone te heraanleggen in doorlatende verhardingen, en door het plaatsen van een groene infiltratiezone, kan mogelijk een grote hoeveelheid water uit het rioleringsstelsel gehouden worden.

Figuur 6.6: Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de Zuiderveldroom-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

6.3 locatie 2

De volgende probleemlocatie die wordt beschreven en waarvoor oplossingen worden gezocht, is gelegen in de Kielsevest in het zuiden van de Brederodewijk, zie ook figuur 6.7.

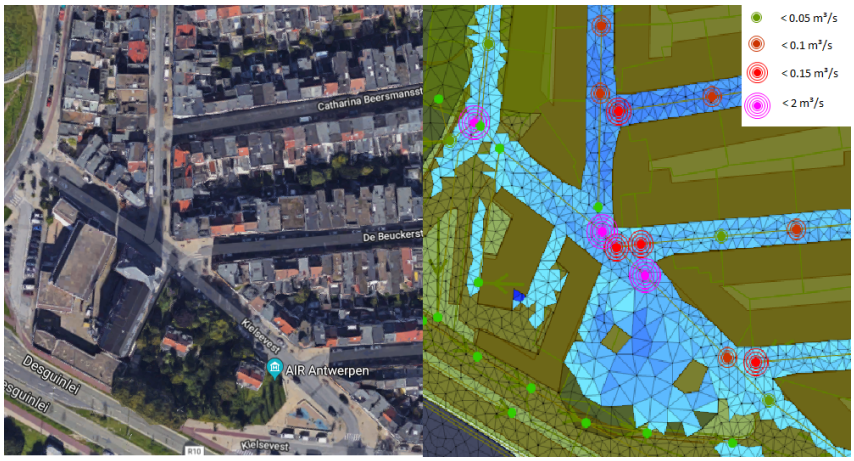
6.3.1 Problematiek

Het knooppunt gelegen in de Kielsevest is afwaarts gelegen van een erg groot gebied. Het voert water af afkomstig van de straten van een aanzienlijk deel van de Brederodewijk enerzijds en van de gebieden parallel gelegen aan de ring aan de Desguinlei anderzijds.

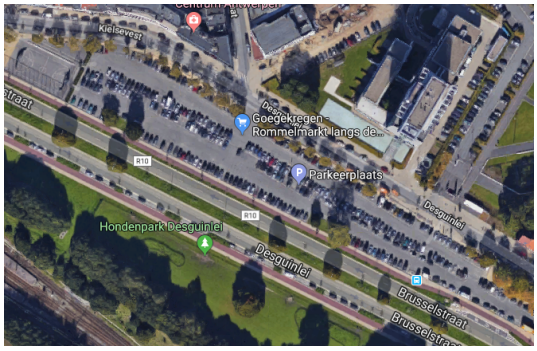
6.3.2 Oorzaken

Vlooienmarkt

Eén van twee gebieden gelegen aan de ring die voor veel waterafvoer zorgt, is de parkeerplaats Vlooienmarkt aan de Desguinlei 6.8. Het gaat hier om een grote verharde oppervlakte (ongeveer 11700m^2) die het rioleringsstelsel dan ook zwaar belast.



Figuur 6.7: Links: Satellietbeeld locatie 2 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh.



Figuur 6.8: Satellietbeeld van de parking Vlooienmarkt in Antwerpen [17].

CVO Provinciaal instituut PIVA

Het tweede gebied is de campus van het CVO Provinciaal Instituut PIVA. Deze campus bestaat uit een groot aantal verharde wegen en pleinen en uit een aantal gebouwen met grote dakoppervlaktes. Bijna de volledige site watert af naar de leidingen in de Desguinlei, waar het samen met de debieten afkomstig van de parking het knooppunt belast. Omdat dit in het knooppunt samenvloeit met water uit de Brederodewijk, zorgt dit voor overlast.

6.3.3 Oplossingsvoorstellen

Parking

De verharde parking zou vervangen kunnen worden door een doorlatende verharding. Een andere maatregel is het aanleggen van een groen bufferbekken ten zuiden van de parking maar dit zou betekenen dat er leidingen geboord moeten worden onder de Desguinlei, wat erg kostelijk kan zijn. Een alternatief is een groene zone bij het

Figuur 6.9: Satellietbeeld van het CVO provinciaal instituut PIVA in Antwerpen [17].

sportveld aan de westelijke kant van de parking.

CVO Provinciaal instituut PIVA

Verschillende gebouwen op de campus hebben grote, platte dakoppervlaktes die tot groendak kunnen worden omgebouwd. Op het terrein zelf kunnen enkele parkeerstroken en een zone met sportvelden en terrassen in het oostelijk deel van de campus uitgevoerd worden in doorlatende verhardingen. Tenslotte bevindt zich centraal op het campusterrein een groot grasveld waarvan een groene zone kan gemaakt worden, zie ook figuur 6.10. Eventueel kan een grotere groene zone nog worden voorgesteld in het provinciaal groendomein Hof Van Leysen, maar daar wordt hier nog niet verder op ingegaan.

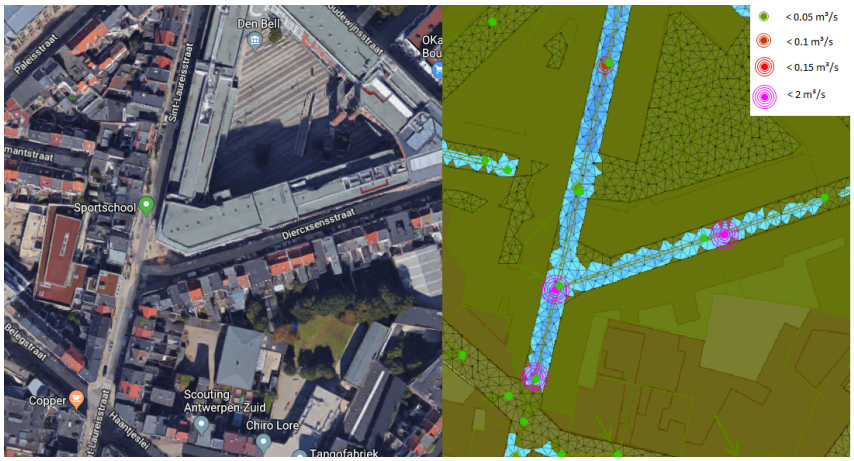
6.4 Locatie 3

De laatste probleemsituatie die hier wordt behandeld is gelegen in het noordelijke deel van de Sint-Laureisstraat en het kruispunt met de Diercxsensstraat. Hier bevindt zich het administratief centrum van Stad Antwerpen: 'Den Bell'.

6.4.1 Problematiek

Er zijn een aantal punten in dit gebied die veel water ontvangen afkomstig van Den Bell. De simulaties tonen waterhoogtes gelegen rond de 30 cm in het meest noordelijke deel van de Sint-Laureisstraat.

Figuur 6.10: Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de campus van het CVO provinciaal instituut PIVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25]



Figuur 6.11: Links: Satellietbeeld locatie 3 [17]; Rechts: Overstromingspunten met debiet van 1D netwerk naar 2D mesh.

Figuur 6.12: Satellietbeeld van Den Bell in Antwerpen [17].

6.4.2 Oorzaken

Den Bell

Het administratief centrum Den Bell bestaat uit een groot gebouw gelegen rondom een volledig verhard binnenplein. De neerslag die op deze grote oppervlakte valt, wordt afgevoerd naar de Sint-Laureisstraat.

6.4.3 Oplossingsvoorstellen

Den Bell

Het gebouw van Den Bell heeft een aantal platte daken die van een groendak kunnen worden voorzien. Verder kan het binnenplein van Den Bell mogelijk ook omgevormd worden tot een doorlatende verharding. In de straten rond het gebouw kunnen de verschillende parkeerstroken die aanwezig zijn, omgevormd worden tot doorlatende verhardingen. Ten slotte biedt ook het woonerf in de Boudewijnssteeg mogelijkheden. In het centrale perk kan een groene infiltratiezone worden voorzien. De omliggende weg kan eventueel als doorlatende verharding worden uitgevoerd, zie ook figuur 6.13.

AVA

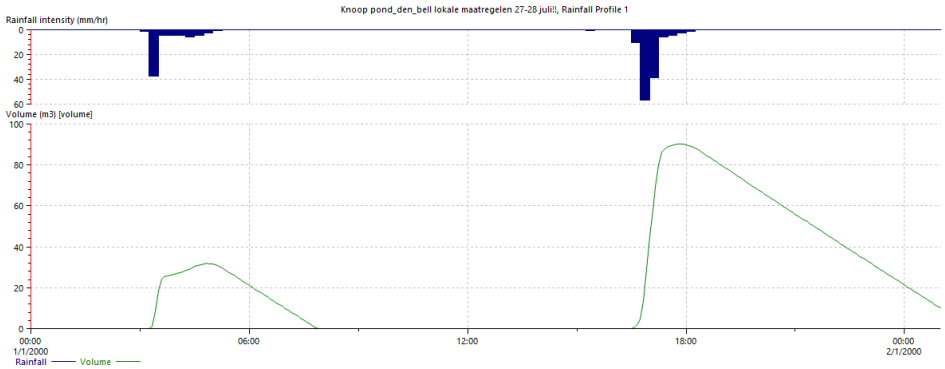
Vlak ten noorden van Den Bell bevindt zich het warenhuis AVA. Dit bestaat uit een groot gebouw met een plat dak, dat van een groendak kan worden voorzien. Ook heeft deze winkel een parkeerterrein dat in doorlatende materialen kan worden heraangelegd.

Figuur 6.13: Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij de campus van het CVO provinciaal instituut PIVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

6.5 Resultaat

Alle oplossingsvoorstellen worden samen in één netwerk geïmplementeerd. Vervolgens worden beide buien (27-28 juli 2013 en 30 mei 2016) gesimuleerd om het totale effect van de maatregelen te begroten. De resultaten van deze simulaties worden weergegeven in tabel 6.1. Deze tabel bevat ook de simulatieresultaten van het basisnetwerk waarin geen enkele bronmaatregel is opgenomen. Dit basisnetwerk wordt hier als referentie gebruikt net zoals gedaan wordt in hoofdstuk 7.

Uit deze resultaten blijkt dat er een vermindering van 17 à 18 procent plaatsvindt op gebied van overstromingsvolume. Ook in verband met overstromingsoppervlakte worden significante reducties waargenomen. Indien deze reducties vergelijkt worden met de resultaten weergegeven in tabellen 7.4 en 7.5, dan kan hieruit afgeleid worden dat deze lokale bronmaatregelen voor meer reductie zorgen dan in het scenario waarin 25% van alle daken in Antwerpen vervangen worden door groendaken. Zelfs het vervangen van alle daken in de Brederodewijk brengt een kleinere reductie met zich mee.



Figuur 6.14: Geborgen volume in het bufferbekken gelegen aan Den Bell voor de bui van 27-28 juli 2013.

Tabel 6.1: Resultaten lokale oplossingen.

Scenario	**Maximale overstromingsoppervlakte** [ha]	**Reductie overstromingsoppervlakte**	**Netto instroom naar 2D** [m^3]	**Reductie instroom**	**overstortvolume** [m^3]
Basis 27-28 juli 2013	8.12	0%	1280.58	0%	160723.0
Basis 30 mei 2016	6.00	0%	965.58	0%	187583.2
Bronmaatregelen 27-28 juli 2013	7.33	9.73%	1060.78	17.16%	158939
Bronmaatregelen 30 mei 2016	5.16	14.00%	788.29	18.36%	185872.7

Ook de bufferbekkens die toegevoegd worden, blijken goed werk te leveren. Niet één van de vier geïmplementeerde bekkens vertoont overstorting naar het rioolnetwerk. Ter illustratie wordt het verloop van het volume dat geborgen wordt in het bekken gelegen aan Den Bell voor de bui van 27-28 juli 2013 weergegeven in figuur 6.14.

6.6 Besluit

In dit hoofdstuk werden enkele zones geïdentificeerd die een grote bijdrage leveren tot de wateroverlast. Rondom deze zones werden vervolgens enkele lokale bronmaatregelen voorzien om de neerslagafvoer van deze grote verharde oppervlaktes te beperken.

Uit de resultaten blijkt dat deze gerichte implementatiewijze van bronmaatregelen voor significante reducties kan zorgen op gebied van overstromingsvolumes, hoewel de oppervlakte waarover ze worden toegepast beperkt blijft. Dit toont aan dat de wateroverlast sterk verminderd kan worden met behulp van enkele goed geplaatste projecten binnen het stadscentrum.

Hoofdstuk 7

Evaluatie van grootschalige toepassing van bronmaatregelen op de wateroverlast met Infoworks ICM

7.1 Inleiding

In het volgende hoofdstuk wordt getracht te begroten wat het effect kan zijn van stedenbouwkundige verordeningen op de waterproblematiek in Antwerpen. In plaats van gedetailleerde studies uit te voeren naar de optimale strategie om overstromingen tegen te gaan, kunnen beleidsmakers uit financiële of tijdsoverwegingen besluiten om simpelweg algemene (bouw)regels op te leggen voor het volledige grondgebied van de gemeente. Een voorbeeld is de verplichting tot het plaatsen van groendaken zoals opgenomen in de Antwerpse Bouwcode [6].

De intentie is niet om hier een gedetailleerde analyse te maken van de toekomstige veranderingen op het vlak van waterhuishouding als gevolg van bepaalde verordeningen. Ook wordt er geen schatting gemaakt van de snelheid waarmee deze scenario's zouden geïmplementeerd (kunnen) worden, of bekeken welke beleidsmaatregelen dit proces zouden bespoedigen. Ten slotte wordt er ook geen inschatting gemaakt van de kosten die zulke grootschalige toepassing van bronmaatregelen met zich mee zouden brengen. Wel wordt er hier geprobeerd om een eerste inzicht te krijgen in de potentie op vlak van bronmaatregelen voor de stad Antwerpen, en wat deze 'brute kracht'-werkwijze van grootschalige toepassing kan betekenen voor de waterhuishouding.

7.2 Scenario's

7.2.1 Referentieoplossing: Overstorten naar de Schelde

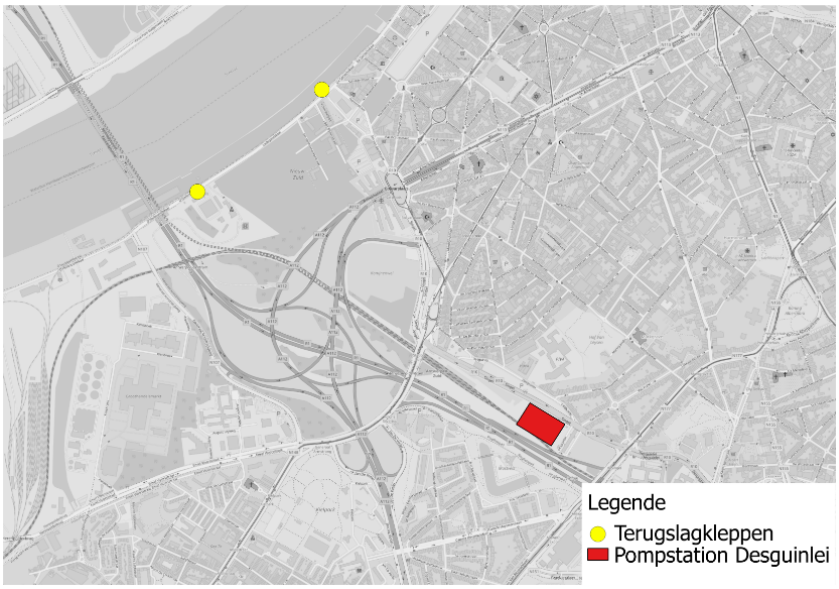
In dit onderzoek staan bronmaatregelen centraal omdat ze naast het verminderen van wateroverlast ook vele andere voordelen met zich meebrengen. Deze zijn bijvoorbeeld het scheppen van een flexibeler systeem dat met verschillende klimaatscenario's om kan gaan en ook erg aanpasbaar is, het bevorderen van een leefbare en aangename stad, het aanvullen van de grondwaterspiegel enzovoort. Omdat de focus echter ligt op het reduceren van wateroverlast, wordt hier kort geschetst wat de andere mogelijkheden zijn om dit probleem aan te pakken.

In het Hemelwaterplan Antwerpen [31] wordt een analyse gemaakt van de wateroverlast en de mogelijke oplossingen per wijk. Omdat in het gebruikte model de wateroverlast geconcentreerd is in de Brederodewijk, worden de gemaakte suggesties van dit rapport voor deze wijk hier kort samengevat.

De suggesties in [31] zijn gebaseerd op de waarnemingen dat de plaatselijke wateroverlast in deze wijk voornamelijk ontstaat door een gebrek aan afvoer (naar een RWZI of door overstorten naar de Schelde) en de hiermee samenhangende ontoereikende buffering in de leidingen, dan met een tekort aan capaciteit in de leidingen: Wanneer het af te voeren debiet naar het RWZI groter wordt dan 200l/s wordt het debiet naar het pompstation beperkt door een schuifafsluiter en zal er water worden opgeslagen in de leidingen. Als het peil in de rioleringen te hoog wordt, kan er geloosd worden op de Schelde onder de voorwaarde dat het rivierpeil er voldoende laag staat. Wanneer het Scheldepeil te hoog staat, moet het water gebufferd worden in de leidingen. Door in te spelen op deze fenomenen, kan de wateroverlast gereduceerd worden [31]:

- **Quickfix:** In de huidige situatie wordt de overstort naar de Schelde geregeld met gestuurde schuifafsluiters (zie ook figuur 7.1): indien het waterpeil in de rivier 50cm onder het bodempeil van de uitstroomleiding zit, zal de schuif openen. Dit is een erg veilig systeem maar zorgt er dus voor dat er niet geloosd wordt in de Schelde op momenten dat dit theorethisch wel mogelijk is. Het vervangen van de veilige schuiven door eenvoudige terugslagkleppen is dus een snelle oplossing voor een deel van het probleem. Kanttekening is wel dat het geloosde water sterk vervuild is.

- **Pompen:** Om het systeem onafhankelijk te maken van het Scheldepeil is een mogelijke oplossing het voorzien van een bijkomend pompstation. Dit zou dan overtollig water afvoeren naar de Schelde om overstromingen bij extreme buien te voorkomen. Een mogelijkheid ligt in het aansluiten van de Brederodewijk op het pompstation aan de Desguinlei dat water van de ring R1 afvoert. Nadelig aan deze methode is wel het feit dat de pompcapaciteit voldoende groot moet zijn omdat dit namelijk de kritische component vormt bij een extreme bui,



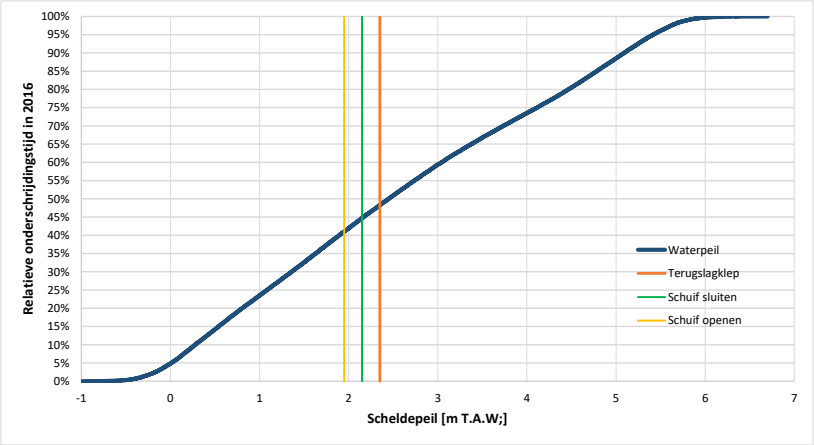
Figuur 7.1: Situering van de voorgestelde oplossingen.

maar wel slechts enkele keren per jaar moet werken. Om de risico's klein te houden zou het wel permanent onderhouden moeten worden.

- **Bufferen:** Een laatste optie voor het overbruggen van de hoogtijperiode, waaronder er dus niet naar de Schelde kan geloosd worden, is het voorzien van grote buffers die het overtollige water tijdelijk opvangen. Deze oplossing is wel erg duur, en ze vormt ook een grote technische uitdaging omwille van de dichte, stedelijke omgeving.

Omwille van de eenvoudige implementatie in een Infoworksmodel, en vanwege de economische haalbaarheid, wordt hier enkel de 'quickfix' oplossing als referentie voor bronmaatregelen uitgewerkt. In figuur 7.2 worden de scheldepeilen van 2016 weergegeven tegenover de relatieve tijd dat het peil lager was dan deze waarden. Ook worden de peilen van de terugslagkleppen in de quickfixoplossing, en de open- en sluitpeilen van het huidige systeem aangeduid. Hiermee wordt duidelijk wat het gemiddelde effect van de aanpassing kan zijn: waar in de huidige situatie gemiddeld ongeveer 40% van de tijd geloosd kan worden, is dat in de situatie met terugslagkleppen zo'n 50 % van de tijd. Voor een individuele bui hangt het effect er uiteraard volledig van af of dat de piekafvoer van het stelsel samenvalt met hoog- of laagwater.

Het Infoworksmodel wordt eenvoudig aangepast door de drie schuiven 40009.2, 40022a.2 en PS Krijgsverlaat_002.2 te vervangen door terugslagkleppen.



Figuur 7.2: Waterpeil in de Schelde voor 2016, tegenover de gemiddelde, relatieve onderschrijdingstijd. Gegevens van Waterinfo [26].

7.2.2 Groendaken

Een eerste beleidsmaatregel die een belangrijke invloed kan hebben op de wateroverlast is het inzetten op groendaken. In de Bouwcode van Stad Antwerpen [6] wordt de aanleg van groendaken dan ook verplicht voor gebouwen met een dakhelling kleiner dan 15° en een oppervlakte groter dan 20m^2. De volgende scenario's willen dan ook een inschatting geven van de te halen verbeteringen op vlak van wateroverlast wanneer er op grote schaal groendaken worden geïnstalleerd.

Opstellen van een potentiële-groendakenkaart

Het is nu nodig dat er een goede inschatting kan gemaakt worden van alle daken die potentieel tot groendak kunnen worden omgebouwd. Stad Antwerpen heeft zelf zo een kaart opgesteld in het kader van het DECUMANUS-project. De gebruikte methode vertrekt van het DSM (digital surface model) wat hetzelfde is als een digitaal hoogtemodel maar met inbegrip van alle structuren en gebouwen. Uit dit hoogtemodel werden de gebouwencontouren afgezonderd en voor elk 'gebouwblok' werd het histogram van de hoogte bepaald. Horizontale oppervlakken kennen in hun histogram scherpe pieken voor hun hoogte, waar gehelde oppervlakken een vloeiender histogram hebben. Zo werd een onderscheid gemaakt tussen platte en schuine daken om een inschatting te geven van de potentie van groendaken in Antwerpen. In de metadata van deze kaart staat echter vermeld dat bij deze methode alle daken

(gebasseerd op de gebouwencontouren) werden meegenomen die voor minstens 10% van hun oppervlakte een helling kleiner dan 15° hebben voor daken kleiner dan 100m^2, of zelfs vanaf 5% voor daken groter dan 100m^2. Er kan dus verwacht worden dat deze methode een grote overschatting geeft. Een inspectie van deze kaart, samen met bijvoorbeeld luchtfoto's of Google Earth [17] leert echter al snel dat dit niet het geval is. Integendeel, de kaart potentiële groendaken lijkt eerder veel platte daken niet te beschouwen als plat dak, zie ook figuur 7.3.

Om een meer nauwkeurige schatting te maken van de potentiële groendaken wordt hier een enigszins aangepaste methode toegepast. Ze vertrekt eveneens van het DSM Vlaanderen [43]. Ook hier worden de gebouwencontouren (GRB - Gbg - gebouw aan de grond, toestand 04-11- 2017, Gemeente Antwerpen, [43]) geclipped uit het raster. In dit hoogtemodel worden met behulp van QGIS [1] de gebieden afgebakend met een helling kleiner dan 15° door het berekenen van de gradiënt. De gebieden worden naar een vectorformaat omgezet (shapefile) en tenslotte worden de ruwe randen vereenvoudigd en worden te kleine gebieden (kleiner dan 50m^2 verwijderd).

Het voordeel van deze methode is dat niet langer meer de volledige dakoppervlakte wordt meegenomen indien slechts een deel van het dak plat is, zoals wel het geval is in de Antwerpse kaart. Zo kan dus een betere schatting gemaakt worden van de potentiële oppervlaktes van de groendaken, wat nodig is in het Infoworksmodel. Door de eerder ruwe afbakening van de vlakke oppervlakken uit het raster (resolutie van 1 op 1m) worden wel niet meer exact de contouren van de daken gevolgd in de nieuwe kaart. In de oorspronkelijke kaart beslaan de potentiële groendaken een oppervlakte van 166311.8m^2 in het studiegebied. In de nieuwe kaart is dit maar liefst 773994m^2. Dit is een erg grote oppervlakte, maar de verharde oppervlakte in het studiegebied, berekend uit het model, bedraagt 8433375.68m^2, wat betekent dat al deze groendaken nog geen 9.2% daarvan uitmaken. In figuren 7.3 en 7.4 wordt een vergelijking gemaakt tussen de oorspronkelijke en de nieuwe kaart. Ook wordt een satellietfoto getoond om een idee te geven van de platte daken in de omgeving.

Strategische scenario's

Natuurlijk is het bouwen van groendaken op zo'n grote schaal als in de kaart erg duur. Toch wil dit onderzoek proberen in te schatten wat de verbeteringen zijn die gehaald kunnen worden als er sterk wordt ingezet op groendaken, bijvoorbeeld door middel van nog strengere ruimtelijke verordeningen of subsidies. Uit de nieuwe kaart potentiële groendaken worden daarom at random een aantal daken geselecteerd, willekeurig verspreid over het volledige studiegebied. Het bepalen van snelheid waarmee deze aanpassingen gemaakt zouden kunnen worden, valt buiten het doel van dit onderzoek, maar de berekeningsresultaten kunnen wel helpen bij het nemen van beleidsbeslissingen in verband met het verplichten of sponsoren van groendaken. In tabel 7.1 worden de verschillende scenario's opgelijst.

Figuur 7.3: Vergelijking van de zelf opgestelde kaart 'potentiële groendaken' in het groen, met de oorspronkelijke kaart van Stad Antwerpen in het blauw. Achtergrondkaart OSM [25].

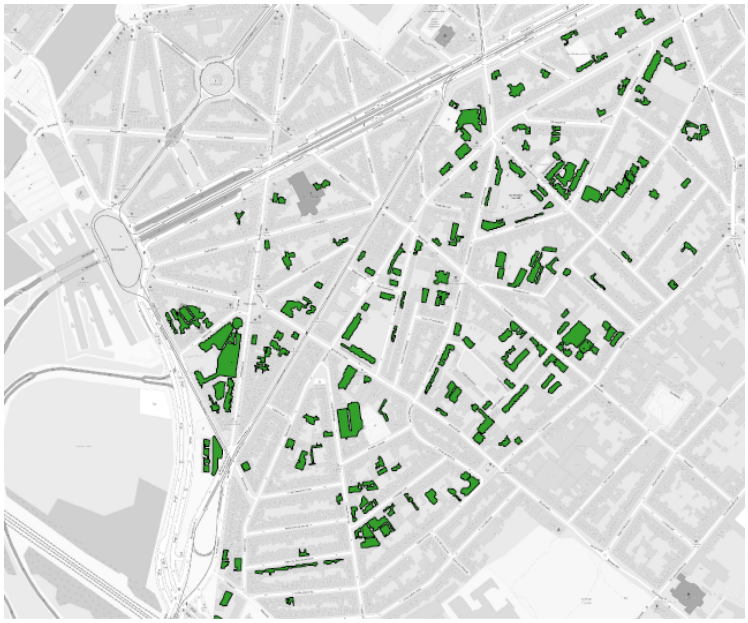
Figuur 7.4: Satellietbeeld van de campus Sint-Vincentius in Antwerpen, Google Maps [17].

Tabel 7.1: Scenario's voor het begroten van het effect van groendaken, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële groendaken die in rekening worden gebracht.

Scenario	Totale oppervlakte groendaken [m^2]	Aandeel van de totale potentiële oppervlakte aan groendaken	Aandeel van de totale verharde oppervlakte
groendak_100%	773994	100.00%	9.2%
groendak_75%	584036	75.46%	6.9%
groendak_50%	361192	46.67%	4.3%
groendak_25%	174244	22.51%	2.1%
groendak_12.5%	90510	11.69%	1.1%

Tabel 7.2: Scenario's voor het begroten van het effect van groendaken in de Brederodewijk, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële groendaken die in rekening worden gebracht.

Scenario	Totale oppervlakte groendaken [m^2]	Aandeel van de totale potentiële oppervlakte aan groendaken	Aandeel van de totale verharde oppervlakte
groendak_brederode_100%	54903	100.00%	0.65%
groendak_brederode_75%	43083	78.47%	0.51%
groendak_brederode_50%	24999	45.53%	0.30%
groendak_brederode_25%	14102	25.69%	0.17%
groendak_brederode_12.5%	7687	14.00%	0.09%



Figuur 7.5: Kaart van het scenario groendak_brederode_100%: potentiële groendaken worden groen gekleurd.

Omdat de groendaken in de voorgaande scenario's nog steeds erg grote oppervlaktes beslaan, wordt de oefening uitgebreid met scenario's die enkel groendaken beschouwen in de wijk met het meeste wateroverlast: Brederode. Zo kan worden nagegaan of het zin heeft om de wateroverlast wijk per wijk aan te pakken, beginnende met de goedkoopste winsten. In tabel 7.2 worden de bijkomende scenario's weergegeven. In figuur 7.5 wordt een grafische voorstelling gegeven van het scenario 'groendak_brederode_100%'.

7.2.3 Doorlatende verhardingen als parkeerstroken

Opstellen van een kaart voor potentiële doorlatende parkeerstroken

Analoog aan de strategische scenario's voor de groendaken, wordt er ook gekeken naar doorlatende verhardingen als oplossing voor de wateroverlast. Er wordt een kaart opgesteld die de wegen aanduidt waar het mogelijk moet zijn om een parkeerstrook

Tabel 7.3: Scenario's voor het begroten van het effect van het aanleggen van doorlatende parkeerstroken in de Brederodewijk, opgedeeld volgens relatief aandeel van alle potentiële stroken die in rekening worden gebracht.

Scenario	Totale oppervlakte parkeerstroken [m^2]	Aandeel van de totale potentiële oppervlakte aan doorlatende verharding	Totale lengte [km]	Aandeel van de totale verharde oppervlakte
parking_brederode_100%	24730	100.00%	12.37	0.29%
parking_brederode_75%	18891	76.39%	9.45	0.22%
parking_brederode_50%	11464	46.36%	5.73	0.14%
parking_brederode_25%	6388	25.83%	3.19	0.08%
parking_brederode_12.5%	2695	10.90%	1.35	0.03%

in doorlatende verharding aan te brengen. Wegen met veel en zwaar verkeer komen hier bijvoorbeeld niet in aanmerking. Deze kaart werd opgesteld, vertrekkende van het wegregister in Vlaanderen (AGIV, [43]). Vervolgens wordt een selectie toegepast zodat enkel de wegen behouden blijven:

- Die liggen in het studiegebied,
- waarvan Stad Antwerpen de wegbeheerder is,
- die enkel bestaan uit 1 rijbaan per rijrichting,
- van categorie 3 of waarvan de categorie onbekend is.

Met categorie 3 wordt verwezen naar de wegcategorisering van lokale wegen [14]. Dit zijn wegen met als voornaamste functie toegang verlenen tot de erven.

Ondanks deze criteria resulteert dit nog in een zeer uitgebreid wegennetwerk dat praktisch alle wegen in het Centrum van Antwerpen omvat. Bijkomende selectiepunten zouden bijvoorbeeld de aanwezigheid van een bestaande parkeerstrook kunnen zijn, niet liggen op routes gebruikt door het openbaar vervoer of geplande heraanleggingen van de rioleringen wegenis enzovoort. Het blijkt helaas erg moeilijk om een nauwkeurigere schatting te maken die rekening houdt met al deze factoren. Om te vermijden dat er daarom gerekend wordt met onrealistisch dure scenario's (nog meer dan voor de groendaken), zullen er enkel scenario's voorgesteld worden binnen de Brederodewijk.

Strategische scenario's

In de volgende tabel 7.3 wordt een overzicht gegeven van de verschillende scenario's die zullen worden berekend. Voor elke parkeerstrook wordt verondersteld dat ze een breedte heeft van 2m.

7.3 Resultaten

De verschillende scenario's worden doorgerekend in het Infoworksmodel voor de historische buien van 27 en 28 juli 2013 en 30 mei 2016. De voornaamste berekeningsresultaten voor de indicatoren van overstromingen worden samengevat in tabellen 7.4 en 7.5 samen met een visualisatie in figuren 7.7 tot en met 7.10, en zullen hier

Figuur 7.6: Kaart van het scenario parking_brederode_75%: potentiële doorlatende verhardingen worden oranje gekleurd.

worden besproken.

Een eerste, logische conclusie is dat de bronmaatregelen effectiever worden naarmate ze in grotere aantallen toegepast worden. Zo zijn er grote reducties van overstromingsoppervlaktes en -volumes te merken voor het scenario 'groendak_100%' (respectievelijk rond de 29% oppervlaktereductie en rond 35 % volumereductie). Ook de andere scenario's met grootschalige implementatie zijn blijkbaar goed in staat om de wateroverlast sterk te beperken. Het effect van de bronmaatregelen is duidelijk proportioneel met hun oppervlakte. Dit volgt ook uit de gebruikte werkwijze van het toekennen van een oppervlakte als bronmaatregel bij een subcatchment, en wordt hier nog bevestigd door de berekeningen. Dit systeem laat toe om eenvoudige vuistregels te gebruiken om als eerste schatting het effect van willekeurig verdeelde maatregelen te schatten, zonder dat er in feite gedetailleerde berekeningen vereist zijn.

Een tweede besluit uit de resultatentabellen is dat de bronmaatregelen duidelijk een erg lokaal effect hebben. Zo heeft het implementeren van 100% en 75% procent van de groendaken in Brederode een groter effect op de overstromingsreductie dan bijvoorbeeld 12.5% procent van de groendaken in het volledige studiegebied terwijl ze een veel kleinere oppervlakte vertegenwoordigen. Dit komt natuurlijk omdat het vooral de Brederodewijk is die door overstromingen wordt bedreigd en het laat zien dat het nuttig kan zijn om wateroverlast door middel van stedenbouwkundige voorschriften op wijkniveau te beschouwen, eerder dan voor het volledige grondgebied. Zo maken alle groendaken in de Brederodewijk slechts zo'n 0.65% uit van de verharde oppervlakte in het studiegebied, maar zijn ze wel in staat de overstromingsvolumes met 12 tot 14% terug te dringen.

Tabel 7.4: Resultaten scenario's 27-28 juli 2013.

Scenario	**Maximale overstromingsoppervlakte** [ha]	**Reductie overstromingsoppervlakte**	**Netto instroom naar 2D** [m^3]	**Reductie instroom**	**overstortvolume** [m^3]
Basis	8.12	0%	1280.58	0%	160723.0
Quick fix	5.24	35.47%	754.31	40.10 %	182420.9
groendak_100%	5.80	28.57%	818.00	36.12%	156646.7
groendak_75%	6.36	21.67%	925.81	27.70%	157405.1
groendak_50%	6.65	18.10%	1009.33	21.18%	159205.6
groendak_25%	7.49	7.76%	1141.19	10.88%	159467.0
groendak_12.5%	7.76	4.43%	1203.02	6.06%	160473.3
groendak_brederode_100%	7.48	7.88%	1121.47	12.42%	160300.1
groendak_brederode_75%	7.57	6.77%	1148.98	10.28%	160468.4
groendak_brederode_50%	7.78	4.19%	1198.81	6.39%	160538.6
groendak_brederode_25%	7.93	2.34%	1224.77	4.36%	160548.2
groendak_brederode_12.5%	8.02	1.23%	1253.24	2.13%	160709.3
parking_brederode_100%	7.81	3.82%	1191.66	6.94%	160190.1
parking_brederode_75%	7.92	2.46%	1210.62	5.46%	160341.7
parking_brederode_50%	7.95	2.09%	1233.94	3.64%	160478.4
parking_brederode_25%	8.04	0.99%	1255.68	1.94%	160590.9
parking_brederode_12.5%	8.09	0.37%	1270.21	0.81%	160689.0

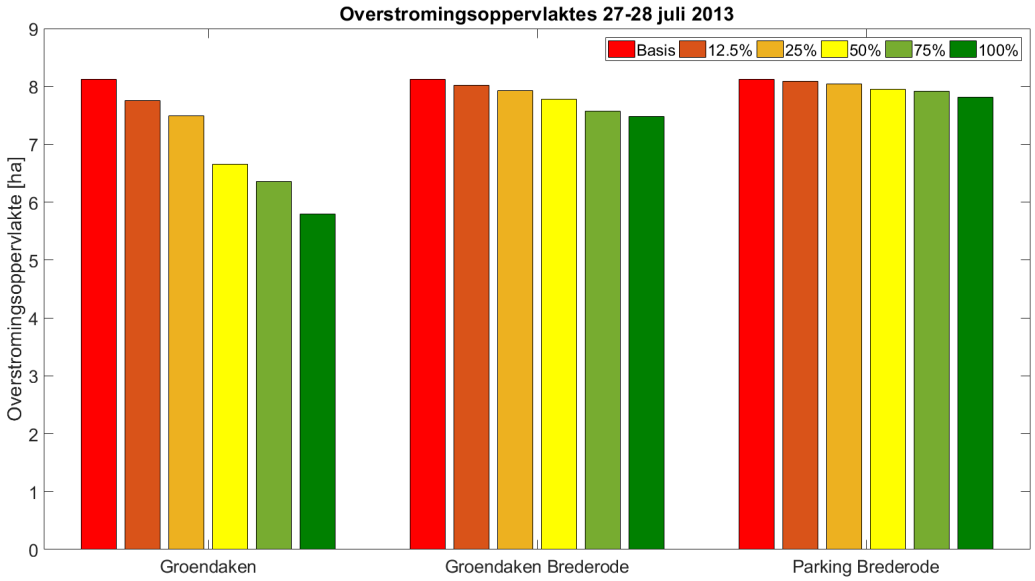
Tabel 7.5: Resultaten scenario's 30 mei 2016.

Scenario	**Maximale overstromingsoppervlakte** [ha]	**Reductie overstromingsoppervlakte**	**Netto instroom naar 2D** [m^3]	**Reductie instroom**	**overstortvolume** [m^3]
Basis	6.00	0%	965.58	0%	187583.2
Quick fix	2.00	66.67%	348.77	63.89%	196601.0
groendak_100%	4.23	29.50%	626.83	35.08%	182979.4
groendak_75%	4.63	22.83%	693.39	28.19%	184147.4
groendak_50%	5.09	15.17%	771.00	20.15%	186053.6
groendak_25%	5.50	8.33%	857.12	11.23%	186430.2
groendak_12.5%	5.83	2.83%	932.91	3.38%	187189.5
groendak_brederode_100%	5.34	11.00%	825.64	14.49%	187348.5
groendak_brederode_75%	5.52	8.00%	858.91	11.05%	187552.2
groendak_brederode_50%	5.68	5.33%	891.64	7.66%	187300.9
groendak_brederode_25%	5.85	2.50%	932.12	3.47%	187216.4
groendak_brederode_12.5%	5.92	1.33%	948.80	1.74%	187340.7
parking_brederode_100%	5.71	4.83%	900.60	6.73%	187063.4
parking_brederode_75%	5.77	3.83%	912.39	5.51%	187249.2
parking_brederode_50%	5.87	2.17%	936.32	3.03%	186596.7
parking_brederode_25%	5.98	0.33%	954.27	1.17%	187583.7
parking_brederode_12.5%	5.97	0.50%	956.70	0.92%	187483.9

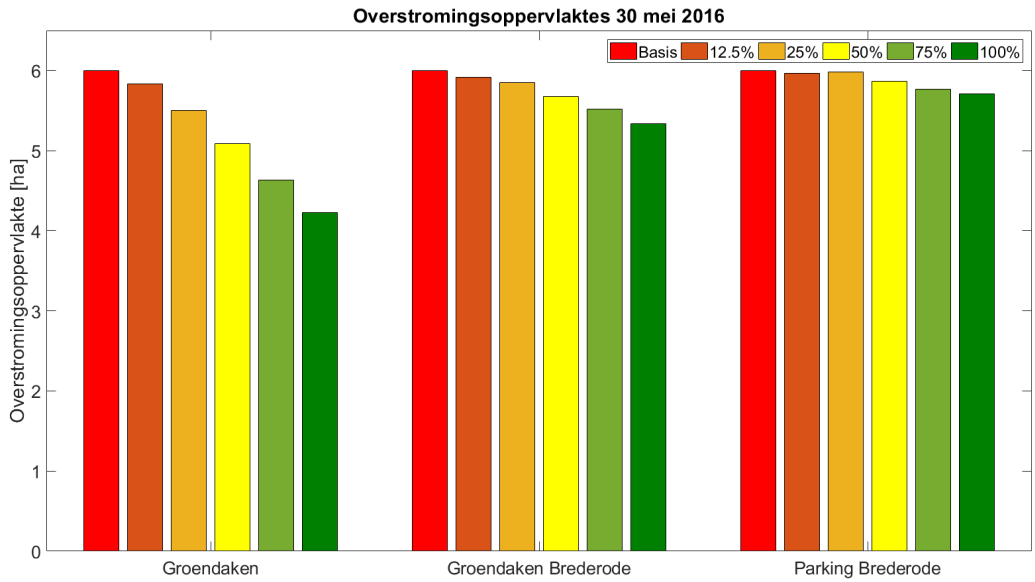
Ten slotte valt er een enorm grote reductie waar te nemen bij het toepassen van de 'quick fix' oplossing. Er is een daling van 40.10% en 63.89% op gebied van overstromingsvolume voor 27-28 juli 2013 en 30 mei 2016 respectievelijk. Dit zijn significante dalingen aangezien er maar drie schuiven naar de Schelde vervangen worden door terugslagkleppen. Deze grote reductie gaat echter gepaard met een stijging van het overstortvolume naar de Schelde. In dit scenario gaan ook de overige voordelen van het gebruik van bronmaatregelen verloren. Zo zal er geen vermindering van het hitte-eiland effect door het gebruik van groendaken plaatsvinden. Ook grondinfiltratie veroorzaakt door doorlatende verharding en bufferbekkens is afwezig.

7.4 Sensitiviteitsanalyse groendaken

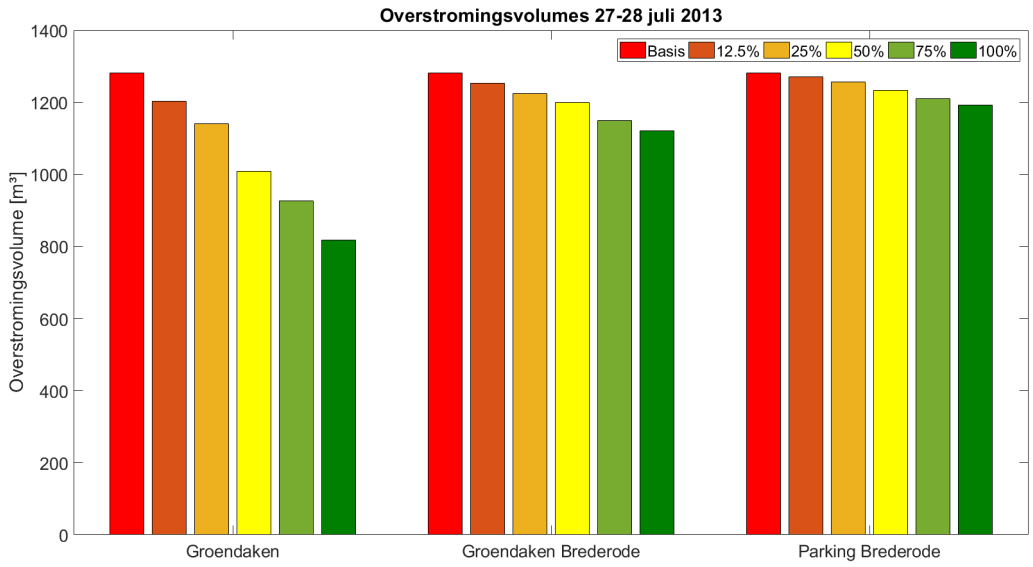
In hoofdstuk 4 werd reeds een analyse gemaakt van de verschillende parameters die het model van een groendak in Infoworks hanteert, en het effect van deze parameterwaarden op de werking van het gemodelleerde groendak. Omdat de kleinschalige testnetwerken die werden gebruikt in deze analyse niet representatief zijn voor de



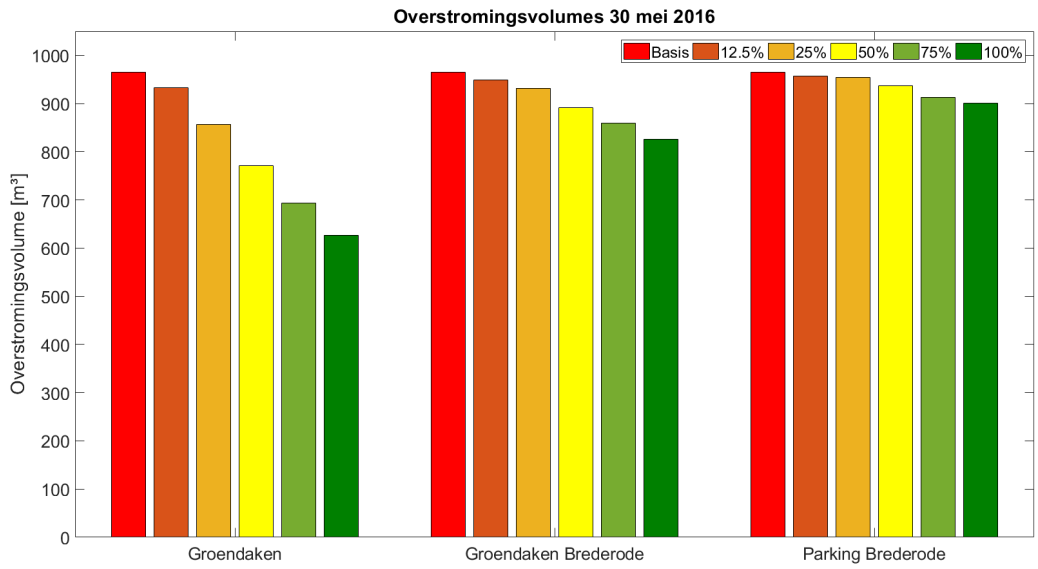
Figuur 7.7: Overstromingsoppervlaktes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 27 en 28 juli 2013.



Figuur 7.8: Overstromingsoppervlaktes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 30 mei 2016.



Figuur 7.9: Overstromingsvolumes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 27 en 28 juli 2013.



Figuur 7.10: Overstromingsvolumes bij de verschillende scenario's voor de neerslag van 30 mei 2016.

Tabel 7.6: Resultaten sensitiviteitsanalyse 27-28 juli 2013.

Scenario	**Maximale overstromingsoppervlakte** [ha]	**Reductie overstromingsoppervlakte**	**Netto instroom naar 2D** [m^3]	**Reductie instroom**	**overstortvolume** [m^3]
Basis	8.12	0%	1280.58	0%	160723.0
groendak_100%	5.80	28.57%	818.00	36.12%	156646.7
groendak_100_zand%	6.18	23.89%	912.44	28.75%	161892.5
groendak_100_leem%	5.64	30.54%	792.68	38.10%	151088.4
groendak_100_klei%	5.61	30.91%	783.76	38.80%	143210.8
groendak_100%_berm_1cm	5.83	28.20%	823.55	35.69%	156659.7

werking van een complex rioleringsnetwerk, worden hier enkele variaties op het groendak opgesteld en gesimuleerd.

Uit de voorgaande resultaten blijkt duidelijk de goede overeenkomst tussen de twee verschillende buien op vlak van overstromingsreductie. Ook is de invloed van de groendaken duidelijk proportioneel met hun oppervlakte. Om de hoeveelheid data beperkt te houden worden de analyses daarom enkel uitgevoerd voor het scenario groendak_100%, en voor de bui van 27 en 28 juli 2013. De resultaten kunnen dan eenvoudig herschaald worden naar de andere scenario's.

7.4.1 Invloed van de substraateigenschappen

Op gebied van substraat wordt het standaard 100% groendak scenario als referentie gebruikt waarbij het substraat in alle groendaken bestaat uit zandig leem.

Eerst wordt er een scenario opgesteld waarbij het substraat in alle groendaken vervangen wordt door zand. De grote doorlatendheidscoëfficiënt van zand zorgt ervoor dat er weinig vertraging van afvoer naar het rioleringsnetwerk plaatsvindt, wat resulteert in een lagere overstromingsreductie.

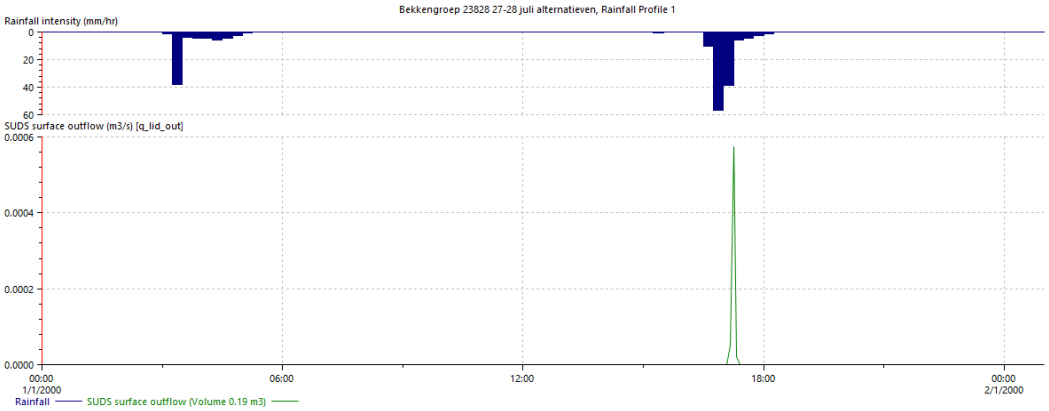
Ook een substraat dat bestaat uit klei wordt toegepast. In tegenstelling tot zand heeft klei een zeer kleine doorlatendheidscoëfficiënt. Dit betekent dat er meer water geborgen wordt in de oppervlaktelaag van het groendak. In het geval van deze bui is er geen probleem aangezien de bermhoogte van 5 centimeter voldoende is om het water te bergen. Indien een hevigere bui gebruikt wordt, kan het zijn dat er wel een overstorting over de berm plaatsvindt.

Ten slotte wordt er nog leem toegepast als substraat. Leem heeft een doorlatendheidscoëfficiënt lager dan deze van zandig leem, maar hoger dan deze van klei. Uit de resultaten blijkt dat de reductie maar iets kleiner is dan deze van het scenario met klei. Het gevaar voor overstorting over de berm is echter kleiner.

De doorlatendheid van de grond staat in direct verband met de vertraging van de afvoer van de neerslag. Er moet een juiste balans gevonden worden tussen het vertragen van de afvoer en het vermijden van overstorting over de berm. Daarom lijkt leem de beste oplossing te zijn.

7.4.2 Invloed van berging

Om het effect van de berging te testen wordt er een scenario opgesteld dat gelijk is aan het referentiescenario groendak 100% met als uitzondering dat de bermhoogte



Figuur 7.11: Verloop overstortdebiet.

gelijk is aan 1 centimeter. Uit de simulatie blijkt dat deze bermhoogte te klein is en er een overstorting over de berm plaatsvindt. Dit wordt geïllustreerd in figuur 7.11 die het overstortdebiet in functie van de tijd weergeeft voor een willekeurig groendak. Het overstortvolume blijft hier echter beperkt waardoor er maar een klein verschil in reductie waarneembaar is. Voor grotere buien zou dit verschil steeds groter worden omdat het overstortvolume zal stijgen. Er is dus nood aan een hogere berm.

7.5 Besluit

In dit hoofdstuk worden de resultaten uit voorgaande delen toegepast om een antwoord te proberen formuleren voor de hoofdoelstelling van dit onderzoek: het mogelijk effect kwantificeren van bronmaatregelen tegen wateroverlast in de stad Antwerpen. Als referentiemaatregel voor het plaatsen van bronmaatregelen werd besproken wat andere ogelijke maatregelen zijn voor het reduceren van overstromingen in de stad. Hiervan werd de zogenaamde quick-fix maatregel, het vervangen van de geautomatiseerde schuifoverstorten naar de Schelde door terugslagkleppen geïmplementeerd in het model.

Om het potentieel aan overstromingsreductie door het plaatsen van groendaken te begroten werd een nieuwe 'potentiële groendakenkaart' opgesteld voor het studiegebied. Op basis van deze kaart werden dan strategische scenario's opgesteld al naargelang het percentage van de potentiële groendaken die toegepast worden. Zo beslaan alle potentiële groendaken in het studiegebied 9.2% van de verharde oppervlakte. Analoog aan de nieuwe groendakenkaart werden een kaart voor potentiële doorlatende verhardingen en bijhorende scenario's opgesteld.

Uit de berekeningsresultaten blijkt voornamelijk het grote lokale effect van bronmaatregelen. Zo beslaan de mogelijke groendaken voor de Brederodewijk slechts 0.65% van de verharde oppervlakte in het studiegebied maar zijn ze in staat de netto instromende volumes met 12 tot 14% te verminderen voor de gesimuleerde

gebeurtenissen. Het blijkt dus belangrijk om zeker op wijkniveau na te gaan wat de overstromingsproblematiek is.

In een laatste sectie werd de gevoeligheid van de resultaten aan bepaalde parameters van de modellen getoetst. Zo lijkt de mogelijke overstromingsreductie nog groter met groendaken die een nog sterker vertragend effect hebben op de neerslagafvoer.

Hoofdstuk 8

Opstellen van een conceptueel rioleringsmodel

8.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken wordt besproken hoe de invloed van bronmaatregelen op rioleringsoverstromingen in de stedelijke omgeving kan begroot worden. Hiervoor werden gedetailleerde modellen gebruikt die voor elke tijdstap van de gesimuleerde gebeurtenis de waterhoogtes en debieten berekenen in een zeer groot aantal leidingen en knooppunten. Bovendien werd er gebruik gemaakt van een koppeling met een 2D-model dat in staat is om de stroming van overstroomd water in de straten nauwkeurig te berekenen. Deze modellen hebben als voordeel dat ze erg nauwkeurig kunnen zijn en dat er heel veel informatie beschikbaar is die de toestand van het netwerk beschrijft.

Het grote nadeel van deze modellen is de grote rekentijd die ze vragen om deze simulaties uit te voeren. Wanneer men enkel geïnteresseerd is in het gedrag na een specifiek neerslagevent is dit geen probleem, maar wanneer men langere neerslagreeksen wil simuleren om bijvoorbeeld extremewaardenanalyses te maken, zijn de rekentijden niet langer economisch. Een oplossing hiervoor is het gebruik van synthetische stormen zoals composietbuien die voor een bepaalde terugkeerperiode een goede inschatting kunnen geven van de verwachte overlast. Het probleem hiermee is dan weer dat dit geen realistische gebeurtenissen zijn, wat problematisch is voor structuren waarvan de antecendente condities bepalend zijn voor het gedrag. Zo is het uitstromend debiet van een groendak sterk afhankelijk van de initiële vullingsgraad van het medium.

Om deze problemen tegemoet te komen, wordt er in dit hoofdstuk beschreven hoe een conceptueel model kan worden opgesteld van hele systeem. Dit soort modellen aggregeren de verschillende processen die gaande zijn op zeer grote schaal en zijn zo in staat berekeningen uit te voeren in een fractie van de tijd van een gedetailleerde simulatie. Dit gaat natuurlijk ten koste van het aantal gekende variabelen die de toestand van het stelsel beschrijven maar door de gesimuleerde indicatoren goed te kiezen kan het nog steeds mogelijk zijn om goede voorspellingen te maken van

bijvoorbeeld het overstromingsgedrag.

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe zulk model kan worden opgebouwd om de invloed van bronmaatregelen op het gedrag van het rioleringsstelsel in Antwerpen te berekenen. Eerst wordt er een overzicht gegeven van de procedure die kan gevolgd worden bij het opstellen, en van de verschillende deelmodellen die samen het globale conceptueel model vormen. Vervolgens wordt beschreven hoe het voorgestelde model voor Antwerpen opgebouwd werd. Ten slotte worden simulaties uitgevoerd om te beoordelen wat de prestaties van het nieuwe model zijn en worden enkele voorbeelden van toepassingen aangehaald.

8.2 Methodologie

8.2.1 Procedure

In deze sectie wordt kort de procedure geschetst waarmee het conceptueel model (CM) wordt opgesteld, en vooral hoe het is opgebouwd. Deze methode is voor bepaalde stappen, namelijk de opbouw van het model dat het gedrag van het rioleringsstelsel simuleert of het riolerings-CM, gebaseerd op de methodologie beschreven in (Wolfs, [49]). Zowel de voorgestelde deelprocedures als de structuur van het conceptueel model zijn hierop gebaseerd. Bovendien wordt er gebruik gemaakt van software, 'Conceptuel Model Developer' of CMD, die werd ontwikkeld voor het onderzoek in [49] om het model op te bouwen.

De doelstelling van het opstellen van dit CM is het snel kunnen berekenen van een beperkt aantal relevante indicatoren die de toestand van het rioleringsstelsel weergeven. Zo is het voor deze studie belangrijk te weten of er al dan niet overstromingen plaatsvinden bij bepaalde neerslaggebeurtenissen. Deze indicatoren zijn watervolumes en -stromen, op een sterk geaggregeerde schaal, die zo het gedrag van het stelsel weergeven. Er worden dus geen waterhoogtes of andere toestandsvariabelen gesimuleerd.

Als invoer vraagt het CM meetreeksen van neerslag. Het gedrag van het rioleringsstelsel kan sterk afhankelijk zijn van bepaalde randvoorwaarden, zoals in Antwerpen de waterpeilen in de Schelde. Een bijkomende input is dan ook een meetreeks van deze externe voorwaarden. Het gedrag van het CM moet zo nauw mogelijk aansluiten bij het werkelijke gedrag van de rioleringen. Daarom zal de opbouw van een conceptueel model gebaseerd zijn op meetreeksen van de relevante parameters onder de ingevoerde neerslaggebeurtenissen. Bij afwezigheid van deze meetreeksen kan ook gebruik gemaakt worden van een gedetailleerd rioleringsmodel en bijhorende simulatieresultaten om het CM te calibreren. Dat is ook de methode die hier gevolgd wordt.

Nadat de nodige invoergegevens verzameld zijn, kan met de eigenlijke opbouw van het model begonnen worden. Dit bestaat uit het achtereenvolgens definiëren en calibreren van de verschillende modelcomponenten en hun parameters. Deze com-

ponenten worden hierna beschreven. Merk op dat in deze calibratie waarschijnlijk iteraties nodig zijn om een optimale modelstructuur te bekomen.

Het resultaat van deze procedure is een verzameling van relaties tussen de verschillende indicatoren (volumes en debieten) en de invoergegevens. Deze kunnen dan vertaald worden naar een rekenscript dat in staat is om zeer snelle berekeningen uit te voeren voor nieuwe meetreeksen. Op basis van de resultaten van die berekeningen kunnen dan uitspraken gemaakt worden met betrekking tot het gemiddelde gedrag van de rioleringen, en zoals in deze studie relevant is, met overstromingen.

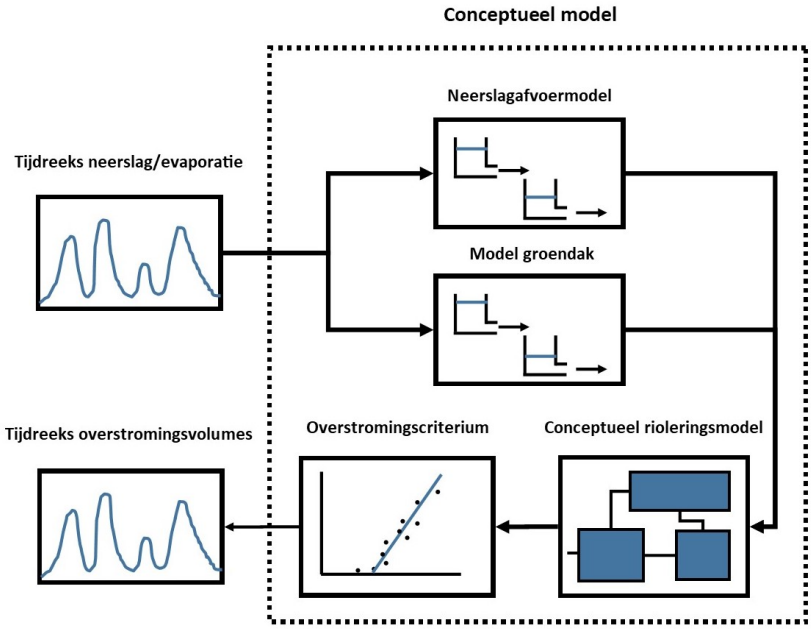
8.2.2 Modelcomponenten

In deze sectie worden de verschillende deelstructuren van het CM besproken. Door te begrijpen wat de verschillende componenten betekenen en hoe ze door het CM worden gebruikt, wordt het voor de modelleerder eenvoudiger om ze te zo optimaal mogelijk te definiëren zoals beschreven in de volgende sectie. Figuur 8.1 is een schets van de opbouw van het volledige CM om de onderlinge relatie van de verschillende componenten weer te geven. Hierin maken zowel de topologie, connectiviteit en de stromingsrelaties deel uit van het conceptueel rioleringsmodel.

Groendaken

De finale doelstelling van het CM is om binnen het kader van dit onderzoek uitspraken te kunnen maken over het mogelijk effect van bronmaatregelen op de overstromingsproblematiek in Antwerpen. Daarom moet het CM in staat zijn om verschillende scenario's van gebruik van bronmaatregelen correct te kunnen simuleren. In dit hoofdstuk worden enkel de mogelijkheden van groendaken bestudeerd. De reden hiervoor is dat ze erg goedkoop kunnen zijn voor beleidsmakers (eigenaars installeren ze op hun eigendom en dragen dus zelf de kosten i.p.v. de overheid). Bovendien kan er gewerkt worden met de groendakenkaarten die in het voorgaande hoofdstuk werden opgesteld. Implementatie van andere bronmaatregelen in dit CM kan omwille van zijn flexibiliteit later eenvoudig toegevoegd worden.

De impact van groendaken op het CM situeert zich bij de invoergegevens. Wanneer er in een bepaald gebied groendaken worden gebouwd, zal een deel van de neerslag die voorheen via de daken naar de riolering werd geleid, opgehouden worden, deels verdampen en later vertraagd afgevoerd worden door de groendaken. De implementatie van de bronmaatregelen op het niveau van een deelstroomgebied of subcatchment 'SC', zie verder, kan dus eenvoudig als volgt: de neerslag die binnen een bepaald gebied valt, wordt verdeeld volgens de relatieve oppervlakte van groendaken tot de effectieve afvoerende oppervlakte. Deze fractie zal niet langs het gewone runoff-model geleid worden, maar via een ander model dat de werking van een groendak nabootst. Vervolgens worden de twee stromen terug samengevoegd als invoer van het riolerings-CM.



Figuur 8.1: Schematische voorstelling van de structuur van het totale conceptueel model en de verschillende deelstructuren.

Neerslagafstroming

Een eerste stap bij het simuleren met het conceptueel model is het omzetten van de neerslagintensiteiten naar een instromend debiet in de deelstroomgebieden van het rioleringsmodel. Deze stap vindt in feite ook plaats in de gedetailleerde simulaties in Infoworks, waar hiervoor verschillende afstromingsmodellen beschikbaar zijn. Voor de verharde oppervlaktes wordt een neerslagafstromingsmodel opgesteld aan de hand van Infoworkssimulaties om het afstromingsgedrag te modelleren. Het opstellen van dit model wordt verder besproken in sectie 8.3.2.

Topologie en connectiviteit

De indicatoren die de toestand van het stelsel weergeven zijn geaggregeerde volumes en debieten. Dit zijn dus niet volumes of stromen in individuele leidingen of knooppunten, maar een som van deze parameters over een groot gebied of groot aantal leidingen. Zo wordt het studiegebied verdeeld in een aantal 'subcatchments' (verder SC's genoemd om de verwarring met de subcatchments of bekkengroepen in een Infoworksmodel te vermijden). Elk SC stelt dus een welomlijnd deel van het rioleringsstelsel voor en kent dan ook enkele eigenschappen zoals een oppervlakte of bevolking. Deze SC's zijn in het stelsel onderling verbonden via leidingen, pompen, schuiven,... die samen tussen twee bepaalde SC's een *flux* vormen. Dit is dus de som van alle debieten tussen twee SC's (of een SC en een uitstroom). Deze fluxen kunnen zelf onderverdeeld worden in *subfluxen*, wanneer het CM zo beter in staat is het gedrag van het stelsel

na te bootsen. Bij het uitvoeren van simulaties met het CM wordt in elke tijdstap de massabalans gesloten door de in- en uitstromen van elk SC te linken met zijn verandering van volume.

Stromingsrelaties

De essentie van het riolerings-CM is in feite de verzameling van stromingsrelaties die het verband geven tussen de verschillende (sub)fluxen en de volumes in de SC's. Deze relaties kunnen verschillende vormen aannemen die hier worden opgesomd, naar [49]. In deze lijst ontbreekt de methode van transferfuncties waarbij systeemtheorie gebruikt wordt om de relaties te bepalen. Omdat deze methode in dit onderzoek niet gehanteerd wordt, wordt ze niet verder verklaard.

- **Vast debiet** Een eenvoudige vorm van stromingsrelatie is het opleggen een vast debiet tussen twee SC's, samen met een aan/uit-criterium. Dit kan gebruikt worden om het gedrag van een pompstation voor te stellen in het CM. Zodra het volume in een SC een waarde overschrijdt, zal de pomp in werking treden en een bepaald debiet verpompen. Wanneer het volume daalt tot onder een tweede grenswaarde, zal de pomp stilvallen. Deze grenswaarden worden bepaald aan de hand van meet- of simulatiereeksen van volumes en pompdebieten.

- **Stuksgewijs lineair statisch/dynamisch** Een complexere stroomrelatie linkt een bepaald volume van het SC met een uitstromend debiet. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is een lineair reservoirmodel. In de praktijk is deze relatie vaak te eenvoudig om het gedrag van een geaggregeerd rioleringsstelsel voor te stellen en vertoont het systeem een hysterese waarbij het opgeslagen volume bij een bepaald debiet veel groter is bij het vullen van het systeem, dan het volume bij uitstromen. Dit probleem wordt opgelost door toevoegen van een 'dynamische' opslagcomponent in functie van het instromend debiet. Deze methode werd uitgewerkt door Vaes [39]. In de gebruikte CMD software kan de beschreven methode toegepast worden, maar is de keuze van stroomrelatie veel vrijer. Zo kunnen verschillende parameters (volumes maar ook (deel)stromen of neerslaginvoer) als invoer van de statische of dynamische component gebruikt worden. Bovendien is de gebruiker zelf in staat om een stuksgewijs lineaire relatie te definiëren op basis van meet- of simulatiereeksen.

- **Artificiële neurale netwerken** Wanneer het gedrag van het stelsel sterk niet-lineair is en er geen duidelijke statische en dynamische opslagcomponent kunnen worden onderscheiden, wordt in de methode gebruik gemaakt van artificiële neurale netwerken. Dit zijn modellen die een bepaalde input (maximaal 3, analoog aan de invoer van het stat./dyn.-model) verbinden met een uitvoer, namelijk de (sub)flux. De modelstructuur wordt opgesteld op basis van een optimalisatie van interne variabelen door minimalisatie van het verschil tussen gesimuleerde en gemeten waarden van de debietsreeks van zo veel mogelijk events. Hoewel deze modellen in staat kunnen zijn zeer complexe gedragingen te vatten, moet er opgepast worden met het overparametriseren van de relaties,

met als gevolg een zeer goede prestatie voor de calibratie-events, maar een slechte modelprestatie voor nieuwe gebeurtenissen. Ook kunnen deze modellen maar moeilijk overweg met zeer plotse veranderingen in de stroming die kunnen optreden als het gevolg van pompen die in werking treden. Eventueel kunnen deze netwerken wel gecombineerd worden met een aan/uit-criterium om deze problemen tegemoet te komen.

Overstromingscriterium

De resultaten van de hierboven opgesomde berekeningen en procedures zijn tijdreeksen van volumes en debieten die een indicatie geven van de toestand van het rioleringsstelsel. Om nu hiermee uitspraken te kunnen doen over de mogelijke verbeteringen op vlak van wateroverlast bij het bouwen van groendaken, moet er nog een verband gezocht worden tussen deze indicatoren en de optredende overstromingen. Met zulk overstromingscriterium worden de uitvoerdata van het CM dan getransformeerd naar overstromingsvolumes waar bijvoorbeeld extremenwaarde-analyses op kunnen worden uitgevoerd.

De overstromingsvolumes waarop dit criterium zal worden gebaseerd, worden bekomen uit simulatieresultaten van gedetailleerde Infoworksberekeningen. Bij het opstellen van dit criterium worden enkel 1D-simulaties gebruikt. De reden hiervoor is dat deze overstromingsvolumes al deel uitmaken van de totale volumes van de SC's, en zich niet in een apart reservoir bevinden. In een volgende fase van het CM kan de oppervlakte als een bijkomend reservoir gemodelleerd worden, dat gecalibreerd kan worden aan de hand van 1D-2D simulaties. Verdere verduidelijking volgt hieronder.

8.3 Configuratie en calibratie van de deelmodellen

8.3.1 Groendaken

Het groendakmodel transformeert de neerslaggevens van de invoer naar een uitstromend debiet dat naar de verschillende SC's stroomt. Om de invloed van deze groendaken op de wateroverlast correct in te schatten, is het belangrijk dat dit model dus zo goed mogelijk het werkelijke gedrag van een groendak nabootst. Een eerste en logische mogelijkheid is dan ook om dit model te baseren op meetreeksen van deze debieten bij experimentele groendaken. Zulke reeksen waren helaas niet beschikbaar binnen dit onderzoek. In plaats hiervan wordt het model gebaseerd op de gesimuleerde uitstromende debieten van de SUDS-controlsgroendaken in Infoworkssimulaties. Omwille van de flexibiliteit van het CM kan deze schakel later eenvoudig aangepast worden om andere en eventueel meer realistische groendaken voor te stellen.

De werking van het groendak in Infoworks is al geïllustreerd in hoofdstuk 4. Deze gaat uit van 3 lagen: een oppervlaktelaag, een grondlaag en een drainagelaag, waaraan verschillende eigenschappen worden toegekend die gebruikt worden in de stromingsvergelijkingen van het model. Die vergelijkingen stellen in feite de massa-

balans voor van elke laag om te verzekeren dat er geen water verloren gaat/gecreëerd wordt. De stromen tussen deze lagen variëren dan in functie van de hoeveelheid water en de parameters in elke laag. Het eenvoudigst op te stellen model lijkt misschien een rechtstreekse implementatie van deze vergelijkingen in het CM. Infoworks geeft echter niet alle vergelijkingen vrij zodat dit niet mogelijk is. Een andere optie is om de ontbrekende vergelijkingen zelf op te stellen op basis van de fysische verschijnselen die ze voorstellen, en ze dan te calibreren aan de simulatiereeksen, maar ook dit is geen goede mogelijkheid. In totaal zijn er in Infoworks 14 parameters te kiezen per groendakmodel, wat erg veel is met dus het risico op overparametrisatie en een weinig robuust model als resultaat.

Onder de voorgaande bedenkingen werd er in de litaratuur gezocht naar bestaande conceptuele modellen van groendaken. Een voorbeeld is het model voorgesteld door Palla et. al. in [27]. Hier wordt uitgegaan van drie eenvoudige, lineaire reservoirs, I, II en III, zoals getoond in figuur 8.2. Neerslag wordt opgevangen door reservoir I en vertraagd afgegeven aan de andere twee, verdeeld volgens een fractie β. Hier is reservoir II een traag reservoir, en III een snel. De stromingsvergelijkingen zijn dan de volgende voor reservoirs I en II:

$$q_I^t = \begin{cases} 0 & h_I^t < s_I \\ C_I(h_I^t - s_I) & h_I^t \geq s_I \end{cases} \tag{8.1}$$

$$h_I^t = i^t + h_I^{t-1} - q_I^{t-1} \tag{8.2}$$

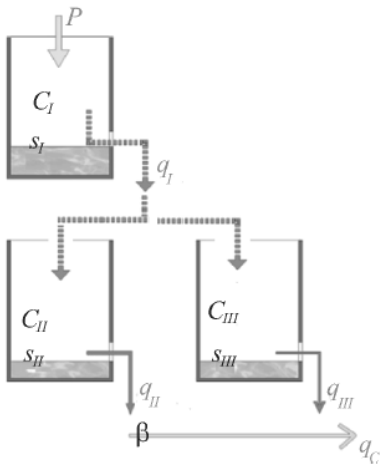
$$q_I I^t = \begin{cases} 0 & h_I^t < s_{II} \\ C_{II}(h_{II}^t - s_{II}) & h_{II}^t \geq s_{II} \end{cases} \tag{8.3}$$

$$h_{II}^t = q_I^t + h_{II}^{t-1} - q_{II}^{t-1} \tag{8.4}$$

Met C_I en C_{II} reservoirconstanten in [volume/tijdseenheid], s_i en $s_I I$ de drempelwaarden voor de reservoirs en h_I en $h_I I$ de waterhoogtes of volumes in de reservoirs. De vergelijkingen voor reservoir III zijn analoog aan die van II. De uitstroom van het model q_C wordt nu gegeven door

$$q_C^t = \beta q_{II}^t + (1 - \beta) q_{III}^t \tag{8.5}$$

Dit model kan nu geïmplementeerd worden, bijvoorbeeld in Matlab waarna de uitstroom vergeleken kan worden met de simulatieresultaten in Infoworks. Dit wordt gedaan voor 12 verschillende buien/simulaties waarna de 7 variabelen kunnen gecalibreerd worden door het minimaliseren van de doelfunctie: er wordt van het



Figuur 8.2: Opbouw van het conceptueel groendakmodel volgens [27]: figuur 1a.

Tabel 8.1: Waarden van de parameters van het conceptueel groendakmodel, eenheden zijn mm/m^2 en minuten.

Parameter	**Waarde**
C_I	0.001416
C_{II}	0.011496
C_{III}	0.011496
s_I	9.565
s_{II}	0
s_{III}	0
β	0 of 1

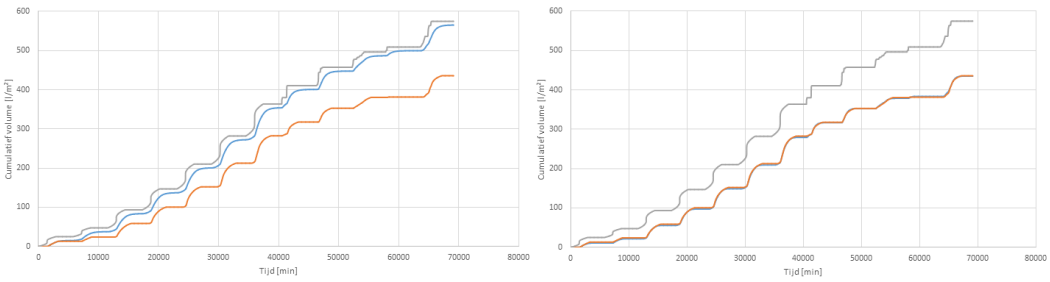
NSE criterium (zie vergelijking **??**) gebruik gemaakt dat aangeeft hoe goed het model in staat is om de 'meetreeks' te voorspellen [23]. Het verschil tussen 1 en deze NSE waarde moet minimaal zijn. Als resultaat worden de volgende parameterwaarden gevonden (tabel8.1):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(q_2^t - q_{ref}^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(q_{ref}^t - \overline{q_{ref}})^2} = 1 \tag{8.6}$$

Met deze parameters wordt een vrij goede NSE-waarde van 0.89 behaald. Volgens deze optimalisatie gedraagt het groendak zich niet alsof er twee parallelle reservoirs, een snel en een traag, aanwezig zijn, zoals blijkt uit de gelijke reservoirconstanten van II en III. In figuur 8.3a wordt echter het cumulatief uitstromend volume geplot voor dit model, waaruit blijkt dat er een systematische overschatting wordt gemaakt van dit uitstromend debiet. De oorzaak ligt in het verwaarlozen van evaporatie in dit model. Omdat Infoworks nergens aangeeft hoe deze zou worden berekend, wordt er eenvoudigweg een constante evaporatie toegevoegd aan het model. De optimalisatie

Tabel 8.2: Waarden van de parameters van het aangepaste conceptueel groendakmodel, eenheden zijn mm/m^2 en minuten.

Parameter	**Waarde**
C_I	0.001699
C_{II}	0.0.009986
s_I	7.1994
s_{II}	0
evaporatie	0.002



(a) (b)

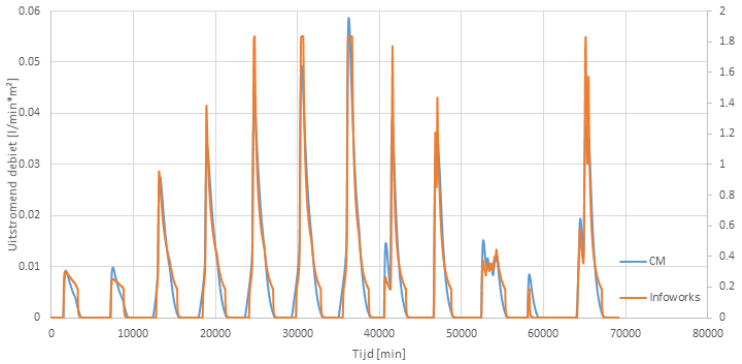
Figuur 8.3: Cumulatief uitstromend debiet van het conceptueel groendakmodel (blauw), het groendak in Infoworks (oranje) en de neerslag (grijs) voor de configuratie zonder (a) en met (b) evaporatie.

wordt herhaald en de resultaten worden gegeven in tabel 8.2:

De nieuwe NSE waarde bedraagt 0.948 wat op een zeer goede prestatie duidt. Ook de cumulatieve volumes komen nu goed overeen, zoals blijkt uit figuur 8.3b. Een vergelijking van de gesimuleerde debieten van het groendak volgens het CM en Infoworks wordt gemaakt in figuur 8.4. In het finale model, waarbij er gebruik gemaakt wordt van synthetische, lange termijn reeksen van neerslag en evaporatie, wordt er niet met een constante evaporatie gewerkt, maar met de ogenblikkelijke uit de reeks.

8.3.2 Neerslagafstroming

Om de neerslagafstroming over verharde oppervlaktes te simuleren wordt een dubbelreservoirmodel opgesteld, gebaseerd op het Wallingfordmodel in Infoworks [18]. Dit conceptueel model bestaat dus uit twee in serie geschakelde reservoirs. De uitstroom uit elk reservoir wordt berekend aan de hand van een lineaire relatie en is afhankelijk van het volume in het reservoir. Om de verschillende parameters te bepalen wordt simulatiedata uit infoworks gebruikt. De procedure voor het opstellen van dit model is dus zeer gelijkaardig aan de methode gebruikt in sectie 8.3.1. Het enige verschil is dat er meteen van 2 i.p.v. 3 reservoirs wordt uitgegaan.



Figuur 8.4: Uitstromend debiet van het conceptueel groendakmodel (blauw) en het groendak in Infoworks (oranje).

Voor een aantal simulaties wordt de neerslagintensiteit en de uitstroom uit een willekeurig subcatchment geëxporteerd, ook de oppervlakte van dit subcatchment wordt opgezocht. Het doel van het conceptueel afstromingsmodel is om de geëxporteerde uitstroom zo goed mogelijk te benaderen, startende van de neerslagintensiteit. Er zijn 4 verschillende parameters die gewijzigd kunnen worden om een zo goed mogelijke benadering te bekomen:

- De recessieconstante van reservoir 1: c_1
- De recessieconstante van reservoir 2: c_2
- De threshold van reservoir 1: s_1
- De threshold van reservoir 2: s_2

De optimalisatie van deze parameters, gebeurt in EXCEL met behulp van de ingebouwde oplossingstool.

Eerst worden de correcte vergelijkingen opgesteld:

$$h_1(t) = h_1(t-1) + i(t-1) - q_1(t-1) \tag{8.7}$$

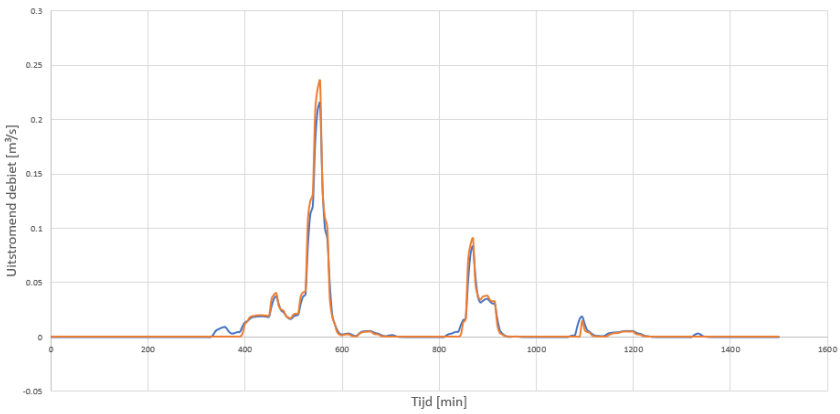
$$q_1(t) = \begin{cases} 0 & h_1(t) \leq s_1 \\ c_1(h_1(t) - s_1) & h_1(t) > s_1 \end{cases} \tag{8.8}$$

$$h_2(t) = h_2(t-1) + q_1(t) - q_2(t-1) \tag{8.9}$$

$$q_2(t) = \begin{cases} 0 & h_2(t) \leq s_2 \\ c_2(h_2(t) - s_2) & h_2(t) > s_1 \end{cases} \tag{8.10}$$

Tabel 8.3: Waarden van de parameters van het conceptueel runoff-model, eenheden zijn mm/m^2 en minuten.

Parameter	**Waarde**
s_1	2.4114
s_2	0
c_1	0.003581
c_2	0.002216



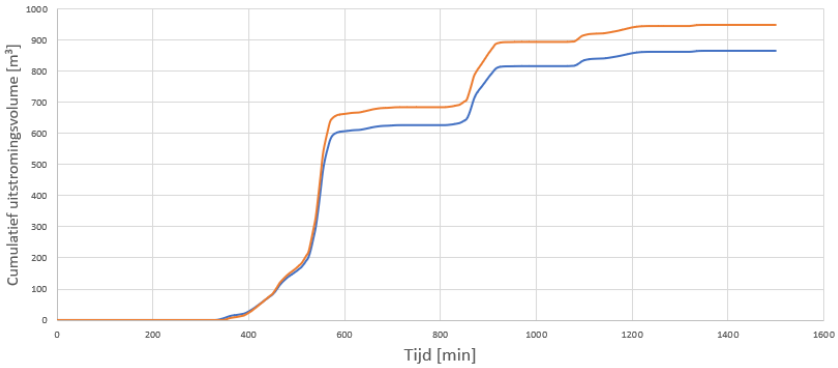
Figuur 8.5: Uitstromend debiet van het conceptueel afstromingsmodel (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw).

De doelfunctie die gebruikt wordt om de parameters te optimaliseren, is weer de vergelijking van de NSE-waarde die 1 moet benaderen. Dit geeft volgende waarden voor bovenstaande parameters:

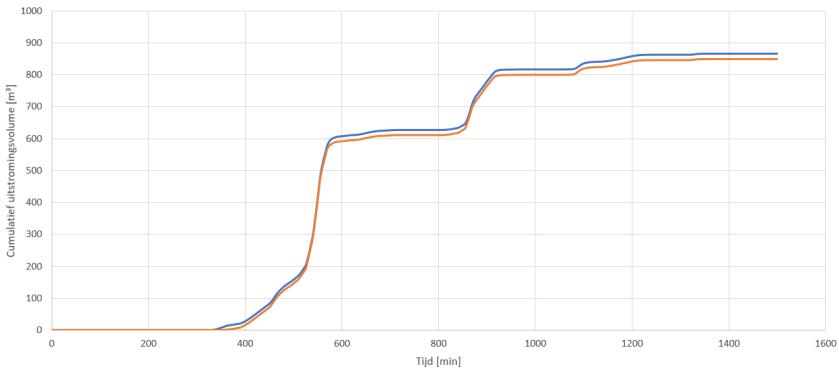
De tijdreeks van q_2 en het cumulatieve uitstromingsvolume kunnen nu geplot worden om ze te vergelijken met de referentiewaarden (zie figuren 8.5 en 8.6). Uit deze figuren blijkt dat er een overschatting is van het cumulatieve uitstromingsvolume. De bijhorende NSE-waarden die gevonden worden aan de hand van dit model liggen tussen 0.98 en 0.99.

Om een betere overeenkomst te bekomen wordt gebruik gemaakt van dezelfde afvoercoëfficiënt die toegepast wordt in Infoworks ICM, zoals ook beschreven in de code van goede praktijk [9]. Het instromende debiet in het eerste reservoir wordt dus vermenigvuldigd met een factor 0.9. Het cumulatief uitstromingsvolume is weergegeven in figuur 8.7. Voor dit model stijgen de NSE-waarden naar 0.994.

Verder zijn er nog enkele aanpassingen die gemaakt moeten worden aan dit model. Zo moet er nog rekening gehouden worden met de evaporatie en de oppervlakteberging of plasberging. De oppervlakteberging wordt in rekening genomen volgens de aanbevelingen beschreven in de Code van goede praktijk [9] en bedraagt 2mm/m^2. Aan het model wordt dus nog een derde reservoir toegevoegd waarin maximaal 2mm/m^2 opgeslagen kan worden. De finale neerslagafstroming die dan in de riolering terecht komt, is dan het debiet dat overgestort wordt uit dit reservoir.



Figuur 8.6: Cumulatief uitstromend volume van het conceptueel afstromingsmodel (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw).



Figuur 8.7: Cumulatief uitstromend volume van het conceptueel afstromingsmodel met factor 0.9 (oranje) en een subcatchment (opp. 21360 m^2) in Infoworks (blauw).

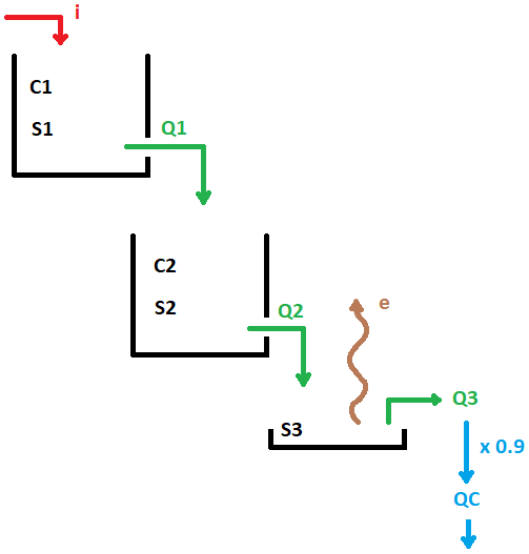
Het is ook logisch om de evaporatie in te rekenen voor dit derde reservoir, aangezien dit het water aan het oppervlak voorstelt. Een laatste wijziging is dat de factor 0.9 toegepast wordt op het finale afstromingsdebiet in plaats van met de neerslag. De eerder opgestelde vergelijkingen worden als volgt uitgebreid:

$$h_3(t) = h_3(t-1) + q_2(t) - e(t) - q_3(t-1) \tag{8.11}$$

$$q_3(t) = \begin{cases} 0 & h_3(t) \leq s_3 \\ (h_3(t) - s_3)/dt & h_3(t) > s_3 \end{cases} \tag{8.12}$$

$$q_c(t) = 0.9\, q_3 \tag{8.13}$$

Merk op dat in de formule van $q_3(t)$ gedeeld wordt door de tijdstap aangezien het debiet hier bepaald wordt aan de hand van het volume aanwezig boven de



Figuur 8.8: Schets van het concept van het neerslagafstromingsmodel.

Tabel 8.4: Overzicht van de effectieve oppervlakte en de populatie per deelstroomgebied van het CM.

Gebied	**Effectieve oppervlakte [m^2]**	**Populatie [Inwoners]**
SC1	3681805	30409
SC2	2204239	21112
SC3	1133105	15301
SC4	1372946	14178
SC5	0	0

2mm voorziene berging, waardoor dit volume verspreid moet worden over de tijdstap. In deze formule wordt s_3 gelijk genomen aan 2mm om de oppervlakteberging voor te stellen. De schets in figuur 8.8 verduidelijkt het finale concept van het neerslagafstromingsmodel:

Tenslotte wordt aan de neerslagafstroming een DWA toegevoegd gelijk aan 150l/(persoon.dag) [9]. In tegenstelling tot de gedetailleerde simulaties wordt deze verondersteld constant te zijn en wordt er dus geen rekening gehouden met de variatie gedurende de dag. De populatie per SC (zie verder) wordt overgenomen van de gebruikte aantallen in het Infoworksmodel en staat samengevat in tabel 8.4.

8.3.3 Topologie

Bij het verdelen van het complexe rioleringsnetwerk in slechts enkele deelbekkens werd met de volgende 'regels' rekening gehouden. Het aantal SC's mag niet te hoog oplopen: Als er veel SC's zijn, zal de calibratie van de stroomrelaties een te grote inspanning vergen, omdat er meer fluxen zullen zijn. Bovendien verhoogt ook de

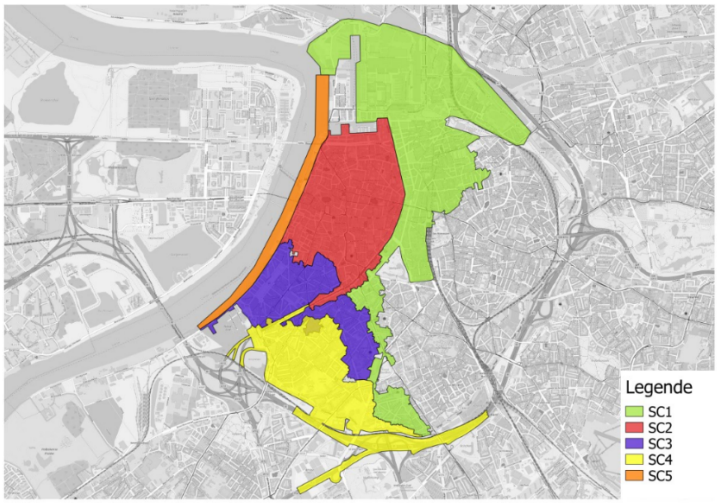
rekentijd, iets wat net getracht vermeden te worden met het CM. Wanneer er echter te weinig SC's worden gedefinieerd, zullen de processen die spelen op een te grote schaal geaggregeerd worden om ze accuraat te kunnen voorspellen met het CM. Er wordt dus gezocht naar gebieden die ook in werkelijkheid als 1 geheel beschouwd kunnen worden. Dit wil zeggen dat ze volledig afwateren naar slechts 1 of enkele leidingen en bovendien zo weinig mogelijk verbonden zijn met de rest van het stelsel.

In Infoworks wordt gebruik gemaakt van de 'connectivity tools' om gebieden te zoeken die hier aan beantwoorden. Deze tools zijn gebaseerd op de oriëntatie van de verschillende leidingen in het gedetailleerde model. Het resultaat is een verdeling van het gebied in 4 SC's, waaraan een vijfde wordt toegevoegd om het gedrag van de persleiding die van noord naar zuid alle deelgebieden afwatert naar de RWZI Antwerpen-zuid correct te beschrijven (zie ook figuur 8.9):

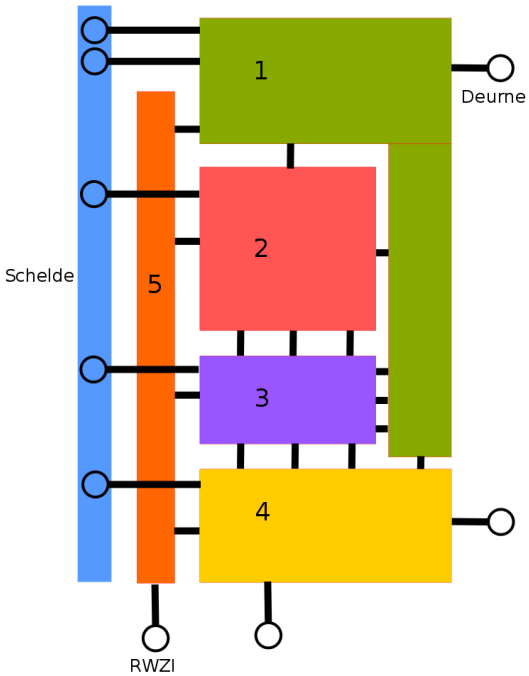
- **SC1** komt overeen met het gebied dat afwatert naar het pompstation Siberiastraat (zie figuur 2.7), en omvat het noordelijke en westelijke deel van het studiegebied zoals de wijken Eilandje, Sint-Amandus, Centraal-Station enz. Het vormt tevens de aansluiting van het studiegebied met de afwateringszone van de RWZI Deurne en is het grootste SC van de vijf.
- **SC2** is gesitueerd rond het historische centrum van de stad. Het watert af via de Ruien richting de Schelde en de persleiding naar het pompstation Herbouvillekaai.
- **SC3** Ligt ten zuiden van SC2 en omvat o.a. de wijken Sint-Andries en het Zuid. Het is het kleinste van de SC's, met uitzondering van SC5.
- **SC4** valt samen met de wijken Brederode, Harmonie en Markgrave.
- **SC5** werd toegevoegd om het gedrag van de persleiding tussen de twee voornaamste pompstations te simuleren. het collecteert dus van de vier andere SC's en watert af naar de RWZI Antwerpen-Zuid.

8.3.4 Connectiviteit

Met de ligging van de SC's gekend, kan nu de connectiviteit van het CM bepaald worden. Er zijn verschillende leidingen die de grenzen van SC's kruisen. Per duo van SC's worden deze nu gegroepeerd in fluxen en subfluxen. Deze verdeling is gebaseerd op het gedrag van de stroming door deze leidingen en hangt vaak samen met hun situering in het studiegebied. Zo zal een pompstation een compleet ander gedrag vertonen dan een gewone gravitaire leiding. Een voorbeeld van zulke leidingen met gelijkaardig gedrag wordt getoont in figuur 8.11. Hier wordt het debiet in twee leidingen getoond die samengevoegd worden tot subflux c van de totale flux tussen SC1 en SC3. Voor de verdeling van fluxen naar uitlaten is het belangrijk rekening te houden met de knopen die afhangen van de waterpeilen in de Schelde.



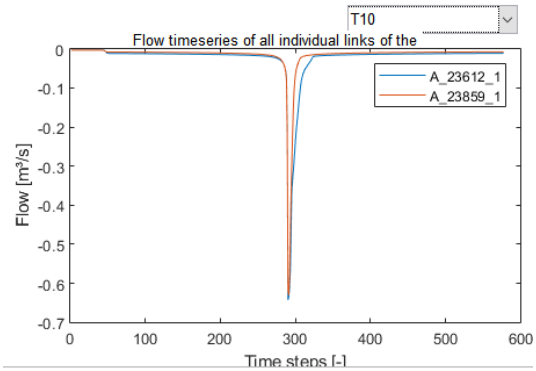
Figuur 8.9: Situering van de verschillende SC's in het studiegebied.



Figuur 8.10: Schematisch overzicht van de structuur van het riolerings-CM: SC's, (sub)fluxen en randvoorwaarden.

Tabel 8.5: Overzicht van de verschillende fluxen (en subfluxen) die de verbindingen vormen tussen de verschillende SC's.

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
SC1	-	3 (2)	6 (3)	1	1
SC2	3 (2)	-	10 (3)	0	5 (1)
SC3	6 (3)	10 (3)	-	6 (3)	2 (1)
SC4	1	0	6 (3)	-	1
SC5	1	5 (1)	2 (1)	1	-
Uitlaten	20 (3)	5 (1)	2 (1)	6 (3)	1

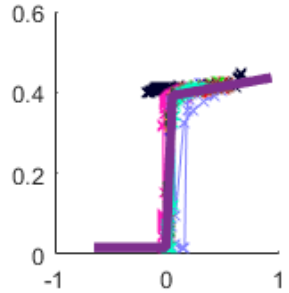


Figuur 8.11: Voorbeeld van gelijkaardig gedrag van de leidingen in subflux.

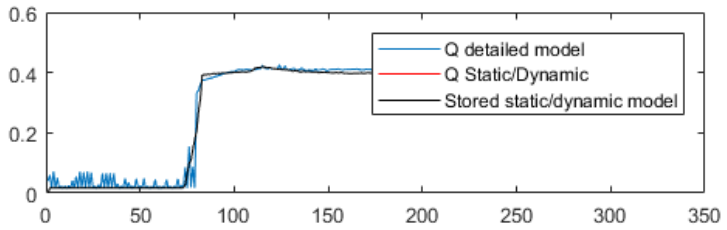
Bij het verdelen van deze (sub)fluxen werd gebruik gemaakt van de CMD software zoals beschreven in [49]. Deze toolbox voor Matlab laat toe om de verschillende fluxen eenvoudig grafisch te onderzoeken. Enkele functies werden hiervoor aangepast opdat de software compatibel zou zijn met het Infoworksmodel van Antwerpen. Een overzicht van de volledige verdeling wordt gegeven in tabel 8.5. Een schematische voorstelling van de modelstructuur van het rioleringsmodel wordt gegeven in figuur 8.10.

8.3.5 Stromingsrelaties

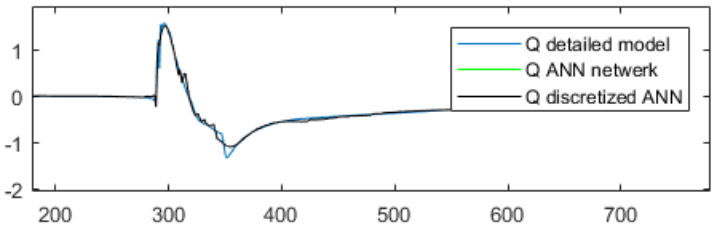
Voor elk van de voorgestelde subfluxen dient nu een stromingsrelatie te worden opgesteld. De methodologie voor het opstellen van de stromingsrelaties werd hierboven al grondig besproken. Om de prestatie van het voorgestelde model te beoordelen, wordt ook hier gebruik gemaakt van de NSE waarde voor een vergelijking tussen de gesimuleerde stroom in Infoworks, en het voorgestelde subfluxmodel. Bovendien worden de beschikbare simulatiedata opgesplitst in calibratiedata voor het opstellen van de relatie en validatiedata voor het controleren van de prestatie. De gebruikte events voor calibratie zijn de composietbuien f7, T01, T02, T05 en T20 en de historische buien september 2013, augustus 2014 en mei 2016. De validatiebuien zijn de composietbuien f10 en T10 en de historische bui van juli 2013.



Figuur 8.12: Statische component van de stromingsrelatie voor de flux tussen SC1 en SC5.



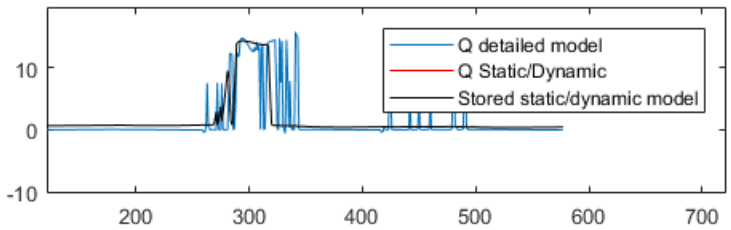
Figuur 8.13: Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en SC5 voor de bui van 30 mei 2016. De NSE waarde bedraagt 0.98.



Figuur 8.14: Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en SC2 voor de T20 composietbui. De NSE waarde bedraagt 0.99.

Een voorbeeld van een goed presterende relatie is het voorgestelde stuksgewijs lineaire, statische/dynamische gedrag van de stroom van SC1 naar SC5. Dit stelt het pompstation Siberiastraat voor, waardoor dit type van relatie gerechtvaardigd is. Als invoer van de statische relatie wordt het volume in SC1 gebruikt, zie ook figuur 8.12. Als dynamische invoer wordt het volume in SC5 gebruikt. Het resultaat wordt getoond in figuur 8.13, voor de bui van 30 mei 2016.
b

Een voorbeeld van een neurale netwerkrelatie is het subfluxmodel voor subflux a tussen SC1 en SC2. De gebruikte inputs zijn het volume in SC1 en SC2, en het instromend debiet in SC1. In figuur 8.14 wordt de prestatie van deze relatie getoond voor een T20 bui.



Figuur 8.15: Gedetailleerde en conceptueel berekende stroming tussen SC1 en de Schelde voor de T20 composietbui. De NSE waarde bedraagt 0.20.

Niet elke voorgestelde relatie presteert even goed. Zo zijn er enkele subfluxen die binnen de gebruikte methodologie nauwelijks te calibreren lijken. Een voorbeeld hiervan is de uitstroom van SC1 naar de Schelde volgens subflux c. Dit is het equivalent van het pompstation Royersluis dat afvalwater verpompt naar de Schelde wanneer de gravitaire afvoer door hoge Scheldepeilen niet mogelijk is. Een logisch voorstel van stromingsrelatie is een vast pompdebiet dat afhankelijk zou zijn van het volume in SC1, de afvoer naar SC5 en het waterpeil in de Schelde. Omdat het pompstation echter verschillende pompen in parallelle schakeling kent, is een vast debiet te eenvoudig. Ook het vastleggen van een aan/uit-criterium blijkt niet triviaal: de invoergegevens blijken niet in staat dit gedrag te kunnen nabootsten. Een andere mogelijkheid, het statisch/dynamisch model, blijkt evenmin in staat om het stromingsgedrag correct na te bootsen omwille van de complexe interactie tussen de verschillende invoervariabelen. Een neuraal netwerk ten slotte is dan weer niet in staat de zeer snelle fluctuaties in de stroom, door het aan- en afslaan van 1 of meerdere pompen, te voorspellen. Het gevolg is een zeer slechte prestatie van elke voorgestelde relatie, zoals bijvoorbeeld getoond in figuur 8.15 voor een lineair, statisch model bij een T20. Het grootste gevolg van deze slechte prestatie zal een erg slechte voorspelling zijn van de volumes in SC1. Dit komt omdat de optredende debieten door dit pompstation erg hoog zijn en dus bepalend voor het gedrag van dit SC. In een optimale opdeling in SC's heeft dit gelukkig kleine gevolgen voor de volumes in de andere SC's omdat ze zo veel mogelijk onafhankelijk zullen werken. Natuurlijk leidt een slechte voorspelling van het volume SC1 ook tot slechte voorspellingen van subfluxen die dit volume als input kennen, maar wanneer deze stromen dus klein blijven, zullen de gevolgen hiervan dat ook zijn.

Uit de calibratie van de stroomrelaties blijken ook de andere overstorten naar de Schelde gelijkaardige moeilijkheden te kennen. Een mogelijke oplossing voor dit soort problemen kan bijvoorbeeld zijn om dit pompstation als een bijkomend modelelement te programmeren, met dezelfde karakteristieken als het werkelijke station. Hiervoor moeten dan wel bijkomende variabelen worden gesimuleerd door het riolerings-CM, namelijk dezelfde waarop de werking van het pompstation gebaseerd is. Omdat dit een bijkomende inspanning vraagt op zowel het vlak van de opbouw van het model, als de calibratie zelf, kan er in dit onderzoek niet verder op worden ingegaan. Er wordt daarentegen vanuit gegaan dat de invloed op de gewenste uitvoervariabelen

Tabel 8.6: NSE waarden van de vergelijking tussen de volumes voor de Infoworks en de CM simulaties in de verschillende SC's bij verschillende neerslaggebeurtenissen. Tussen haakjes wordt aangegeven of het event voor de calibratie of validatie werd toegepast.

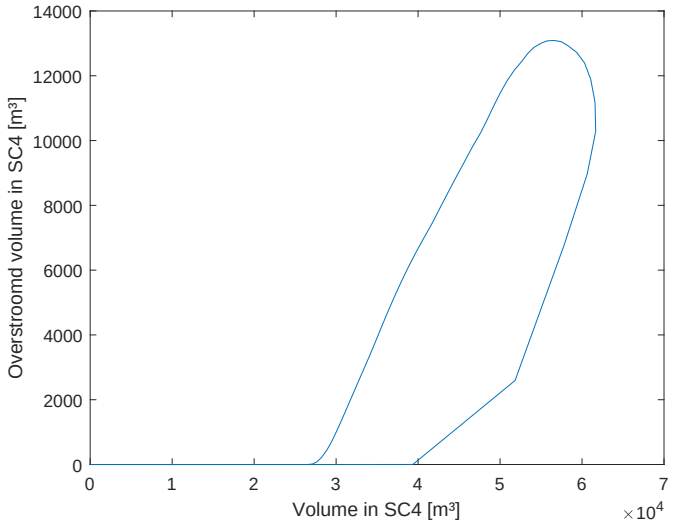
	f07 (C)	**f10 (V)**	**T01 (C)**	**T02 (C)**	**T05 (C)**	**T10 (V)**	**T20 (C)**	**Jul-13 (V)**	**Sep-13 (C)**	**Aug-14 (C)**	**Mei-16 (C)**
SC1	-40.96	-84.23	-9.77	-0.53	-1.66	-0.67	-0.75	0.62	0.44	-0.55	0.45
SC2	0.36	0.24	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.89	0.68	0.31	0.96
SC3	-5.19	-6.71	0.89	0.98	1.00	0.99	0.97	0.60	0.98	0.47	0.97
SC4	0.79	0.73	0.90	0.91	0.93	0.95	0.96	0.78	0.90	0.49	0.92
SC5	-1485.56	-6064.00	-3253.56	-2366.63	-641.43	-751.76	-495.40	-77.50	-272.88	-672.27	-167.93

voldoende klein is in vergelijking met de andere modelleringsonzekerheden. Het toevoegen van deze probleemstructuren als bijkomende modelelementen is wel een interessante uitbreiding van het onderzoek in dit verslag.

De doelstelling van dit conceptueel model is in de eerste plaats het inschatten van de mogelijke effecten van bronmaatregelen op de overstromingsproblematiek. Zoals aangegeven zal dit beoordelen van de overstromingen vertrekken van de gesimuleerde volumes in de SC's, eerder dan van de gesimuleerde (sub)fluxen. Daarom wordt voldoening genomen met een goede modelprestatie van de de volumes. In tabel 8.6 worden de NSE-waardes gegeven voor de vergelijkingen tussen Infoworks en het CM. Zoals voorspeld is de voorspelling van het volume in SC1 erg slecht: voor bijna alle gesimuleerde events is de NSE waarde kleiner dan 0, wat betekent dat het gemiddelde volume in SC1 voor dat event een betere voorspelling geeft dan het CM. Uit de tabel blijkt ook dat dit niet automatisch betekent dat de rest van het model slecht is of waardeloze resultaten geeft. De NSE-waarden van de SC's 2, 3 en 4 liggen voor de meeste gebeurtenissen dicht bij 1 wat op een goede prestatie duidt. Voornamelijk de volumes onder hoogfrequente buien (f7, f10 augustus 2014) blijken nog moeilijk te voorspellen door het CM. Tenslotte is ook de prestatie van SC5 niet goed. Voor de volumes van de andere SC's maakt dit gelukkig niet uit omdat de stroomrelaties van de SC's naar SC5 voornamelijk gebaseerd zijn op de volumes van die SC's zelf, eerder dan het volume van SC5. Wanneer dit model gebruikt zou worden om analyses te maken rond de afvoer naar de RWZI of overstorten naar de Schelde zou een verdere calibratie absoluut noodzakelijk zijn. Voor een eerste berekening van het effect van bronmaatregelen op overstromingen, gebaseerd op de volumes in de SC's, is dit wel voldoende, ook al omdat uit de voorgaande hoofdstukken blijkt dat de wateroverlast voornamelijk gesitueerd is in de wijken die liggen in SC's 3 en 4.

8.3.6 Overstromingscriterium

Zoals hierboven beschreven worden de rioleringsoverstromingen in dit model gelinkt aan de volumes in de verschillende SC's. Idealiter zou er een dan een eenduidig verband bestaan tussen deze twee toestandsvariabelen, waarmee voor elk optredend volume dus een enkel overstromingsvolume overeenkomt. Dit volume kan dan gebruikt worden om bijvoorbeeld overstromingskaarten op te stellen met behulp van 'spreading'-algoritmes of door vooraf gegenereerde kaarten te herschalen naar

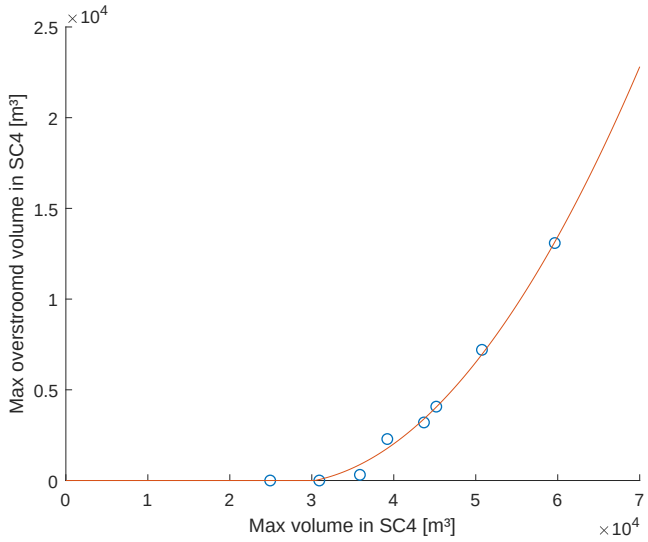


Figuur 8.16: Hysterese in het verband tussen het volume in SC4 en het overstroomd volume in SC4 voor een T20 composietbui.

deze volumes. In werkelijkheid is dit model te eenvoudig omwille van de simpele reden dat het overstromingsvolume zich zoals een reservoir gedraagt. Afhankelijk van het volume in het SC zal er snel water naar de straten stromen, waarna het maar langzaam via de mangaten terug de rioleringen instroomt. Het gevolg hiervan is dat er een hysterese ontstaat in de curve die het overstromingsvolume geeft in functie van het SC-volume. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in figuur 8.16 voor SC4:

Het is duidelijk dat het met een eenvoudig criterium niet mogelijk zal zijn om op elke tijdstap een goede inschatting te krijgen van het overstromingsvolume. Om toch met een robuust criterium te komen, wordt er gekeken naar wat het model in feite moet voorspellen: om de invloed van groendaken te kennen volstaat het om per neerslagevent de maximaal optredende overstrominsgvolumes te kennen. Een voorstel zou dus kunnen zijn om het maximum-overstromingsvolume en bijhorend volume in het SC te berekenen en hier een verband tussen te zoeken. Uit figuur 8.16 blijkt echter dat het max. overstromingsvolume niet optreedt op het moment dat ook het volume in het SC maximaal is. Er zou met andere woorden dus een overschatting gemaakt worden van de overstromingsvolumes. De oplossing bestaat erin om een verband te zoeken tussen het maximum overstromingsvolume in een bepaald SC, en het maximale volume water in dat SC voor een bepaalde neerslaggebeurtenis.

Een laatste opmerking is dat er mogelijks een systematische afwijking bestaat in de volumes die gesimuleerd worden door het riolerings-CM. Dit blijkt niet uit de huidige testsimulaties maar zoals vermeld zouden er nog meer test-events gebruikt moeten worden voor een nauwkeurigere calibratie van het model. Wanneer het CM de volumes in een SC systematisch over-/onderschat, gebeurt dat de overstromingsvolumes ook. Om met deze afwijking rekening te houden worden niet de Infoworks-volumes voor de



Figuur 8.17: Kwadratisch overstromingscriterium voor SC4. In het blauw worden voor verschillende neerslaggebeurtenissen de maximale overstromingsvolumes en de maximale SC-volumes getoond.

SC's, maar de in het CM gesimuleerde volumes gebruikt voor het opstellen van het criterium. In figuur 8.17 wordt zulk voorstel van een overstromingscriterium gegeven voor SC4. Het blijkt dat dit verband goed benaderd kan worden met een kwadratische functie. Ook voor de overige SC's (1,2 en 3) kunnen zulke verbanden gevonden worden. Aangezien SC5 geen subcatchments bevat en enkel bestaat om het gedrag van de collector van het stelsel voor te stellen, wordt er hier geen overstromingscriterium voor opgesteld.

8.4 Modelprestaties en resultaten van lange termijn simulaties

Na het opstellen en calibreren van de verschillende deelmodellen op basis van het Infoworksmodel wordt het globale conceptueel model samengesteld. Dit is in staat om zeer snelle berekeningen uit te voeren. In wat volgt worden enkele resultaten beschreven van het simuleren van een synthetische neerslag- en evaporatiereeks van 100 jaar. Deze werden samengesteld op basis van de 100-jarige meetreeks van Ukkel en vertonen dezelfde statistieken. Zo kan de stabiliteit van het nieuwe model worden nagegaan voor veel intensievere berekeningen dan die waarmee het model werd opgesteld. Ook de gevoeligheid van het gedrag van het systeem aan bepaalde aannames wordt getoetst. Ten slotte wordt besproken wat het effect van het plaatsen van groendaken kan zijn voor het gedrag van het systeem. Opgemerkt moet nog worden dat het model, vooral wat de subfluxen naar de Schelde betreft, afhankelijk is van het waterpeil in de Schelde. Dit werd ook duidelijk uit de voorgaande

besprekingen in dit verslag. Omdat de ingevoerde neerslag- en evaporatiereeksen synthetisch zijn, is er geen overeenkomstige meetreeks beschikbaar voor het waterpeil. In de simulaties wordt daarom gewerkt met de eenjarige meetreeks van 2017 die 100 keer herhaald wordt. Er wordt verwacht dat omwille van de zeer ruime gesimuleerde tijd voldoende gevallen van hoog- of laagwater tijdens de neerslaggebeurtenis aan bod komen om de invloed van groendaken op het stelsel te kunnen begroten.

8.4.1 Werking van de deelmodellen

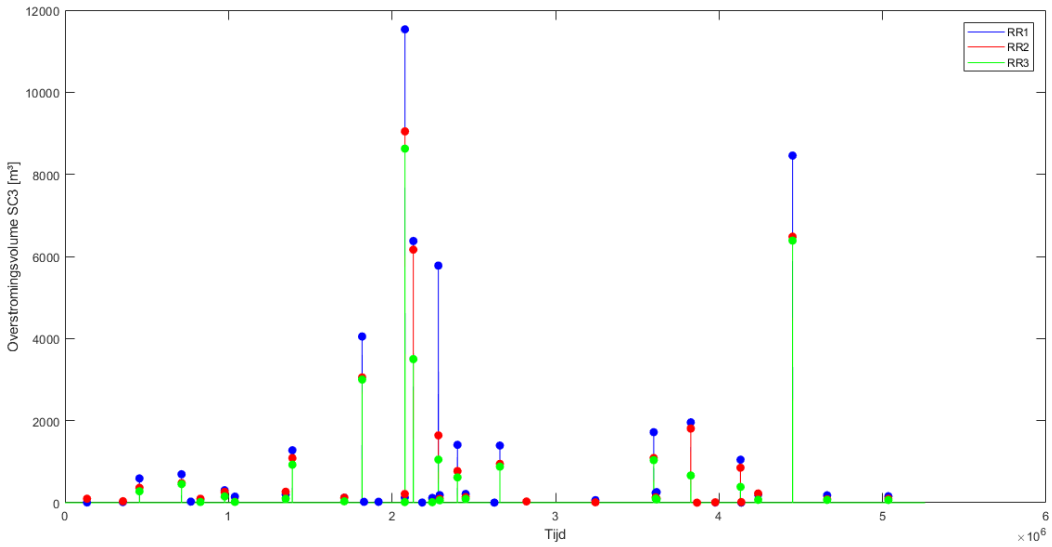
Stabiliteit van het conceptueel rioleringsmodel

Met de 100-jarige reeksen worden neerslagafstromingsreeksen opgesteld op basis van de verharde oppervlakte per SC. Vervolgens worden deze reeksen als invoer gebruikt van het riolerings-CM. Uit een analyse van de resultaten blijkt echter dat het model niet stabiel is. De volumes in de verschillende SC's reageren niet op de invoerdebieten maar vertonen een systematisch stijgen of dalen. Een voorbeeld is het volume in SC1 dat aan een constante snelheid blijft dalen tot een volume van -2.5e^9, wat fysisch volstrekt onmogelijk is. Dit kan erop duiden dat bepaalde (sub)fluxen onafhankelijk reageren van de volumes en dit vereist dus een nieuwe calibratie. Een andere mogelijkheid is dat de subfluxmodellen geen rekening houden met de waterbalans en dus debieten kunnen berekenen op basis van negatieve volumes. Dit bleek het geval voor de instabiliteit van dit model en kon eenvoudig opgelost worden door het aanpassen van het modelscript: door op te leggen dat de uitstromende debieten van een SC niet groter dan 0 mogen worden bij een leeg deelstroomgebied is de waterbalans weer gesloten.

Een ander probleem bleek te ontstaan bij het subfluxmodel E_b, wat het debiet voorstelt van SC1 naar de Schelde volgens een gravitaire overstort: hier ontstonden sterk negatieve debieten wat fysisch vertaald wordt naar het instromen van water van de Schelde naar de rioleringen. Hier kan eveneens een eenvoudige aanpassing van het modelscript toegepast worden om het gedrag van de terugslagklep die aanwezig is, te simuleren. Deze stap wordt hier vermeld om aan te tonen dat de aanname uit 8.3.5 dat SC's 3 en 4 vrij onafhankelijk werken van de rest van het stelsel hier bevestigd wordt: van zodra de vermeldde subflux grote negatieve debieten kent, nemen de volumes van SC1 en SC2 sterk toe. In gebieden SC3 en SC4 zal op dat moment maar een zeer beperkte stijging optreden van de minimale volumes, terwijl de piekvolumes quasi ongewijzigd blijven. Besluit is dus dat de mindere prestatie van het CM voor de voorspelling van de volumes in SC1 en SC2 van weinig belang is voor het resultaat in SC's 3 en 4.

Invloed van het neerslagafstromingsmodel

Uit een analyse van de resultaten blijkt er een niet te verwaarlozen invloed te bestaan van het gebruikte neerslagafstromingsmodel. Zo zullen er gemiddeld het meeste overstromingen gesimuleerd worden wanneer het oorspronkelijke model gebruikt wordt, en het minste voor het finale model. Dit is een logisch resultaat wanneer



Figuur 8.18: Vergelijking van gesimuleerde overstromingen in SC3 voor de verschillende afstromingsmodellen.

men de waterbalansen van de drie modellen met elkaar vergelijkt. In figuur 8.18 wordt een plot gemaakt van optredende overstromingen in SC3 volgens verschillende afstromingsmodellen. De daling in het aantal overstromingen, en het verminderen van de piek-overstromingsvolumes is duidelijk zichtbaar. Dit illustreert het belang om een afstromingsmodel zodanig te calibreren dat ze de werkelijke situatie optimaal benadert. In de verdere resultaten worden enkel de simulaties met het finale model besproken omdat dit het model is dat gangbaar is in de ontwerppraktijk in Vlaanderen. Bovendien zullen de (overstromings-)volumes het kleinst zijn voor dit model en illustreert het dus het minimale effect van bronmaatregelen.

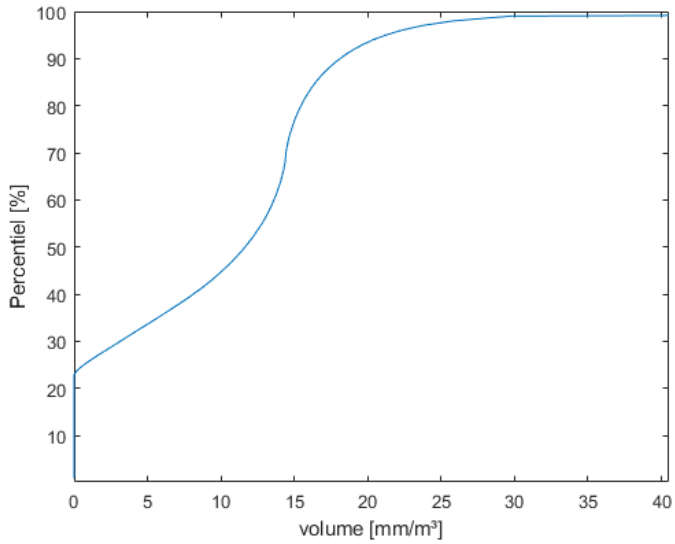
8.4.2 Effect van groendaken

In een laatste paragraaf wordt de invloed van het plaatsen van groendaken op het stelsel geëvalueerd met het opgestelde conceptueel model. Dit gebeurt door het verdelen van de totale instromende neerslag per SC over een neerslagafstromingsmodel en een groendakmodel zoals beschreven in 8.2.2. Analoog aan de werkwijze in hoofdstuk 7 worden de (relatieve) oppervlaktes aan groendaken bepaald met de nieuwe 'potentiële groendakenkaart'. De gebruikte scenario's staan samengevat in tabel 8.7. Merk op dat bij de groendakmodellen niet gerekend wordt met een afvoercoëfficiënt van 0.9, zoals wel gebeurt bij het neerslagafstromingsmodel. Dit betekent dat er in totaal meer water in het stelsel zal stromen al naargelang er meer groendaken worden toegepast. Dit wordt zo toegepast in navolging van de praktijk van rioleringsontwerp in Vlaanderen [9].

De werking van de groendaken wordt geïllustreerd in figuur 8.19: deze toont de percentielen van de volumes water die gebufferd worden in het groendak gedurende de

Tabel 8.7: Totale oppervlakte aan groendaken per SC en percentage van de verharde oppervlakte in dat SC dat ingenomen wordt door groendaken voor de gebruikte groendakscenario's.

	SC1		SC2		SC3		SC4	
	totale oppervlakte m³	**relatieve oppervlakte**	**totale oppervlakte m³**	**relatieve oppervlakte**	**totale oppervlakte m³**	**relatieve oppervlakte**	**totale oppervlakte m³**	**relatieve oppervlakte**
groendaken 100%	378596	10.28%	190999	8.67%	84409	7.45%	123709	9.01%
groendaken 75%	283947	7.71%	143249	6.50%	63306	5.59%	92782	6.76%
groendaken 50%	189298	5.14%	95499	4.33%	42204	3.72%	61854	4.51%
groendaken 25%	94649	2.57%	47750	2.17%	21102	1.86%	30927	2.25%
groendaken 12.5%	47324	1.29%	23875	1.08%	10551	0.93%	15464	1.13%



Figuur 8.19: Percentielplot van het volume in een groendak voor de 100-jarige reeks.

simulatie met de 100-jarige neerslagreeks. Er valt uit af te leiden dat de groendaken zo'n 25% van de tijd droog zullen staan en de overige perioden dus water bufferen. De gebufferde volumes in een gebied kunnen dan bepaald worden aan de hand van de oppervlaktes in tabel 8.7. Verder kunnen zulke grafieken gebruikt worden voor een vergelijking tussen verschillende groendaken, of kan een analyse van deze tijdreeks gebruikt worden in het ontwerp van een beter groendak. Zoals aangehaald in de vorige hoofdstukken behoort het niet tot de doelstellingen om een ontwerp voor te stellen van het meest doeltreffende groendak. Zo werd in een gevoeligheidsanalyse al vermeld dat een minder doorlatend substraat dan aangenomen voor de gebruikte groendakmodellen waarschijnlijk een groter effect heeft op de overstromingsproblematiek. Daarom worden de resultaten enkel besproken voor het groendakmodel dat ook in Hoofdstuk 7 werd toegepast. Het gebruiken van dit conceptueel model voor later onderzoek naar betere groendaken is wel een interessante toepassing.

Verminderde piekvolumes

Een eerste gevolg van het vertragende effect van groendaken op de neerslagafvoer dat besproken wordt, is het dalen van de piekvolumes in de verschillende SC's gedurende hevige zomerstormen. Hierboven werd al besproken dat grotere volumes in de rioleringen overeenstemmen met grotere overstromingen. Een daling van deze piekvolumes als gevolg van het implementeren van groendaken zou dus een gunstig resultaat zijn. Om deze mogelijke daling te evalueren, wordt er een extreme-waarden-analyse uitgevoerd. Dit is een efficiënte techniek om de frequentie of kans op voorkomen van bepaalde volumes in te schatten en is gebaseerd op de werkwijze zoals besproken in [47]. Om de analyse uit te voeren werd onder meer gebruik gemaakt van de WETSPRO toolbox [45]. Dit staat voor 'Water Engineering Time Series PROcessing tool' en werd ontwikkeld aan de afdeling Hydraulica van het Departement Burgerlijke Bouwkunde van de KULeuven. De volledige theorie en werkwijze van zulke analyses wordt hier niet herhaald, maar enkele bepalende stappen worden kort overlopen:

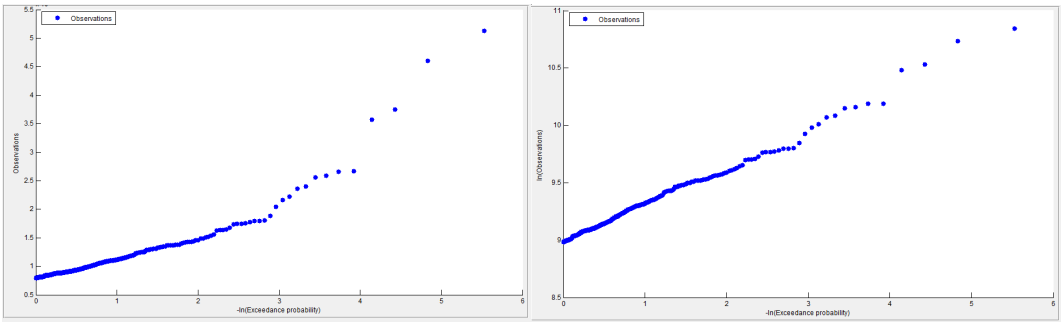
- Uit de tijdreeks van volumes in de verschillende SC's worden in een eerste stap de piekvolumes V_i geselecteerd welke dan gerangschikt worden als $V_1 \geq V_2 \geq .. \geq V_m$. In de 'Peak-Over-Threshold'- of POT-methode worden enkel maxima geselecteerd die boven een bepaald drempelvolume liggen. Opdat een extreme-waardenverdeling kan gevonden worden die deze maxima beschrijft, is het cruciaal dat ze onafhankelijk zijn van elkaar. Zo kunnen twee piekvolumes binnen een korte tijdsperiode het gevolg zijn van een enkele neerslaggebeurtenis, of is het stelsel nog niet geleegd voor het aantreden van de nieuwe bui. In beide gevallen is er dus geen sprake van onafhankelijkheid. Om deze onafhankelijkheid te verzekeren, wordt er een minimale tijdsperiode van 150 stappen, gelijk aan 25 uur, geëist tussen twee opeenvolgende pieken. Omdat de piekvolumes voornamelijk het gevolg zijn van hevige maar korte zomerbuien en omdat uit de Infoworkssimulaties bleek dat de ledigingstijd van het stelsel minder bedraagt dan 24u, kan verwacht worden dat dit een voldoende mate van onafhankelijkheid garandeert.

- Een volgende fase is het vinden van een statistische verdeling $G(x)$ die de kans beschrijft dat een piekvolume V_i kleiner is dan de waarde x. Er kan worden aangetoond dat deze kansverdeling voor een voldoende hoge drempelwaarde convergeert naar de veralgemeende Pareto-verdeling zodat:

$$G(x) = 1 - (1 + \gamma \frac{x - x_t}{\beta})^{-1/\gamma} \tag{8.14}$$

  voor γ verschillend van 0 en:

$$G(x) = 1 - exp(-\frac{x - x_t}{\beta}) \tag{8.15}$$



(a) (b)

Figuur 8.20: Exponentiële en Pareto-QQ-plot voor de piekvolumes in SC3.

als $\gamma = 0$. De waarde van γ, de extreme-waardenindex, bepaalt het staartgedrag van de verdeling: voor $\gamma = 0$ wordt een exponentiële verdeling bekomen die dus exponentieel daalt voor hogere volumes. Wanneer $\gamma < 0$ betekent dit dat de kansverdeling een beperkt bereik heeft en dus dat de volumes niet boven een zeker V_{max} kunnen groeien. Hier bestaat voor de SC-volumes geen fysische verklaring voor. Een $\gamma > 0$ leidt tot een dalen van de staart van de verdeling volgens een machtsverband en leidt potentieel tot zeer grote volumes.

Om de geschikte kansverdeling te kiezen worden zogenaamde aangepaste QQ-plots gebruikt:

- Exponentiële QQ-plot:

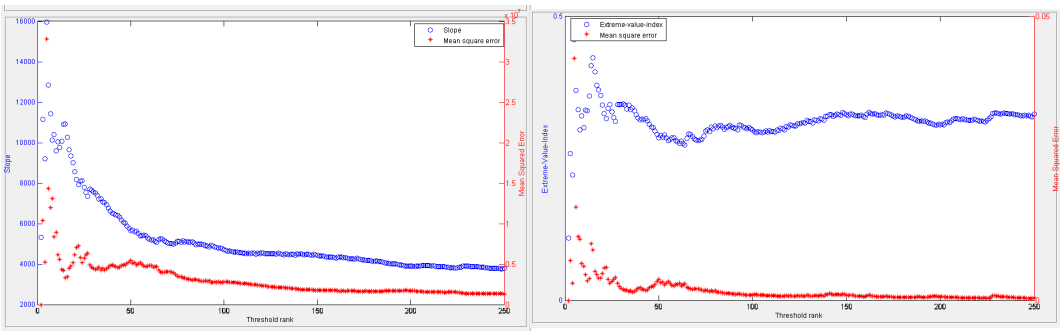
$$(-ln(\frac{i}{m+1}); V_i) \tag{8.16}$$

- Pareto QQ-plot:

$$(-ln(\frac{i}{m+1}); ln(V_i)) \tag{8.17}$$

Waarin $\frac{i}{m+i}$ de empirische overschrijdingskans voorstelt van piekvolume V_i. In figuur 8.20 wordt een voorbeeld gegeven van zulke QQ-plots voor de piekvolumes in SC3 voor de situatie zonder groendaken. Deze plots worden vervolgens gebruikt om de verdeling te bepalen: wanneer de exponentiële verdeling het best in staat is om de piekvolumes te schatten, zullen de punten in de exponentiële QQ-plot naar een lineair verloop convergeren maar zou er bij een Pareto-QQ-plot een afbuiging naar beneden waargenomen worden. Wanneer de Pareto-verdeling de waarnemingen beter beschrijft, zou de Pareto-QQ-plot naar een rechte convergeren, waar de exponentiële plot een afwijking naar boven weergeeft. Dit is duidelijk zichtbaar in de figuur.

- De parameters van de gekozen extreme-waardenverdeling kunnen bepaald worden aan de hand een regressieanalyse met behulp van de Wetspro toolbox.



(a) (b)

Figuur 8.21: Helling van de regressierechte in de Exponentiële en Pareto-QQ-plot voor de piekvolumes in SC3, als functie van het aantal weerhouden piekwaarden.

De gebruikte procedure staat duidelijk omschreven in [47] en wordt hier niet herhaald. Vermeld wordt wel dat de keuze van teken van γ ook door de verschillende volgende stappen kan bevestigd worden opdat de keuze voor een Exponentiële of Pareto-verdeling gerechtvaardigd wordt. Zo worden in de berekende helling voor de regressierechten in beide QQ-plots weergegeven, samen met de MSE (mean squared error, een waarde voor de nauwkeurigheid van de regressie) getoond in figuur 8.21. Deze worden berekend in functie van het aantal piekwaarden, vanaf het maximum, die in de regressieanalyse worden beschouwd. Zo kan de optimale drempelwaarde v_t bepaald worden, maar wordt ook de keuze voor de Pareto-verdeling bevestigd.

- Aan de hand van de bepaalde kansverdelingen kan nu voor een zeker piekvolume de terugkeerperiode T bepaald worden als

$$T[jaar] = \frac{n}{t}\frac{1}{1-G(x)} \tag{8.18}$$

waarbij t het aantal extremen voorstelt boven de optimale drempel v_t, gedurende n(=100) jaar.

De beschreven procedure wordt uitgevoerd voor SC's 3 en 4 en bijhorende strategische scenario's van groendaken. In tabellen 8.8 en 8.9 staan de verschillende parameters samengevat die in deze analyse werden berekend/gebruikt: de drempelwaarde van de POT-selectie en het aantal gevonden waarden, de extreme-waardenindex γ, de optimale drempel v_t en de waarde voor β.

Uit de analyse blijkt duidelijk dat de groendaken een gunstig effect hebben op de piekvolumes. In figuur 8.22 worden de piekvolumes in SC4 getoond in een Pareto-QQ-plot voor het basisscenario en het groendakscenario g100. De grootschalige toepassing van de groendaken zal ervoor zorgen dat de piekvolumes afnemen.

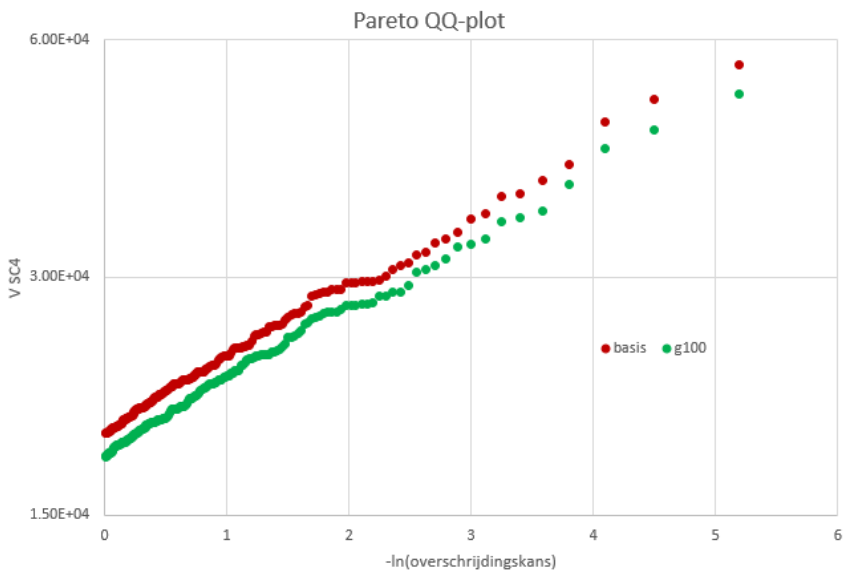
Deze invloed blijkt ook uit de figuren 8.23 en 8.24 waarin op basis van de opgestelde kansverdelingen de terugkeerperiode berekend wordt van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis. Hierin is duidelijk de invloed van groendaken zichtbaar, zelfs

Tabel 8.8: Parameters van de EV-procedure voor SC3.

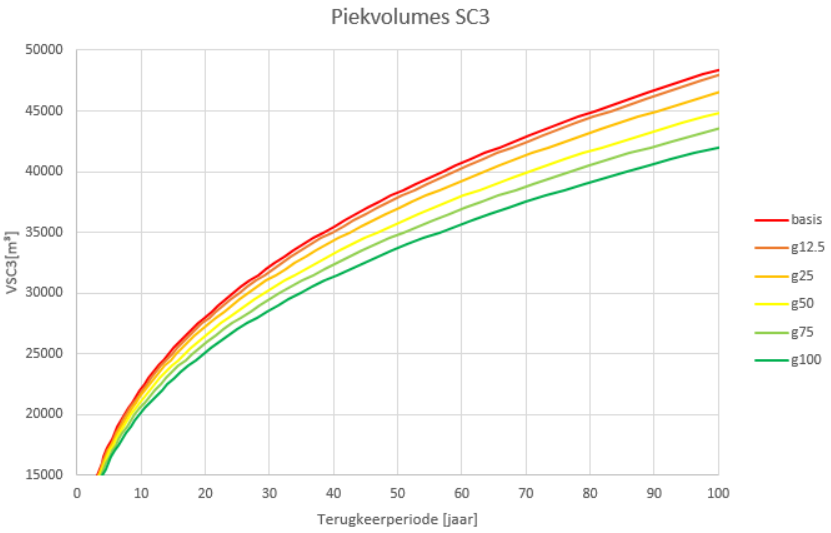
		basis	g100	g75	g50	g25	g12.5
POT-selectie	**Onafh. periode**	150	150	150	150	150	150
	min. Piekvolume	8000	8000	8000	8000	8000	8000
	Piekvolumes	251	205	218	224	237	246
EV-verdeling	**Verdeling**	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
	γ	0.33874	0.31906	0.32372	0.32655	0.33285	0.3402
	β	4869.121	4199.748	4418.645	4585.539	4744.11	4911.808
	v_t [m^3]	14374.01	13163.05	13649.71	14042.32	14253.13	14438

Tabel 8.9: Parameters van de EV-procedure voor SC4.

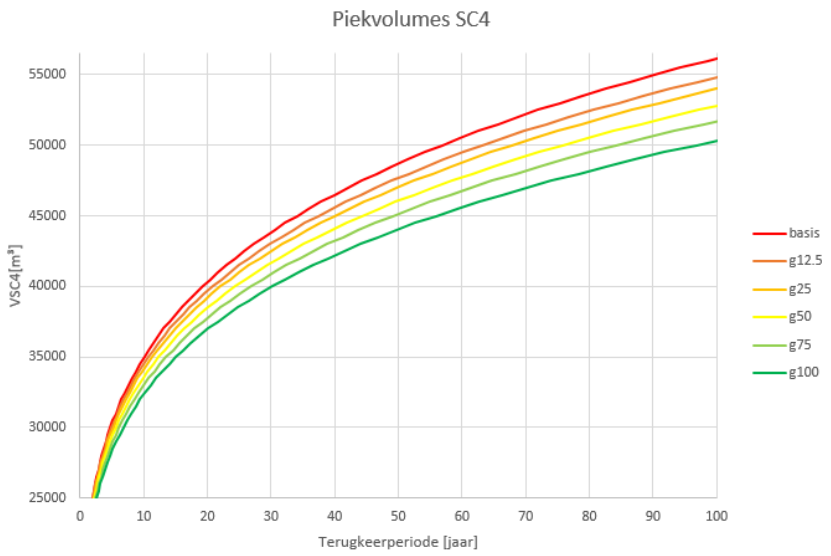
		basis	g100	g75	g50	g25	g12.5
POT-selectie	**Onafh. periode**	150	150	150	150	150	150
	min. Piekvolume	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Piekvolumes	231	179	194	203	219	224
EV-verdeling	**Verdeling**	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
	γ	0.20582	0.19162	0.19495	0.19626	0.19876	0.20072
	β	4691.771	4163.468	4402.574	4440.531	4492.359	4626.0476
	v_t [m^3]	22795.4	21727.37	22582.99	22625.22	22601.66	23047.16



Figuur 8.22: Pareto-QQ-plot van de piekvolumes in SC4: vergelijking tussen de scenario's basis en g100.

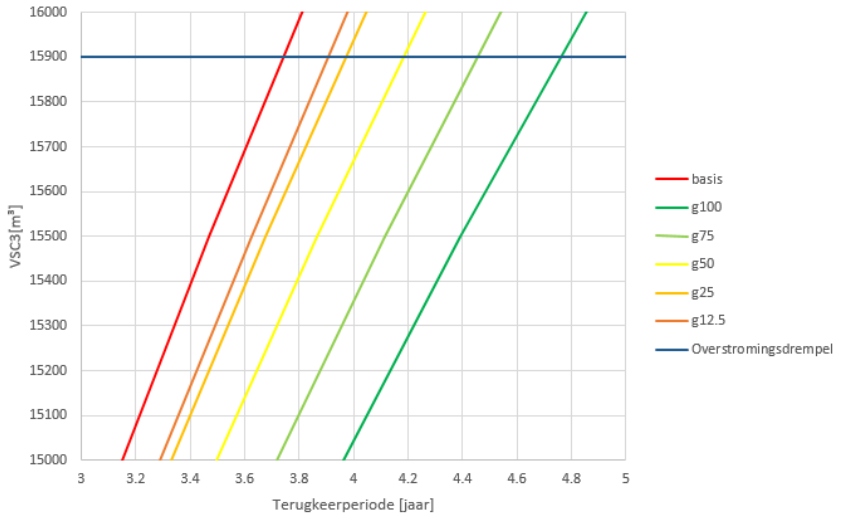


Figuur 8.23: Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC3.

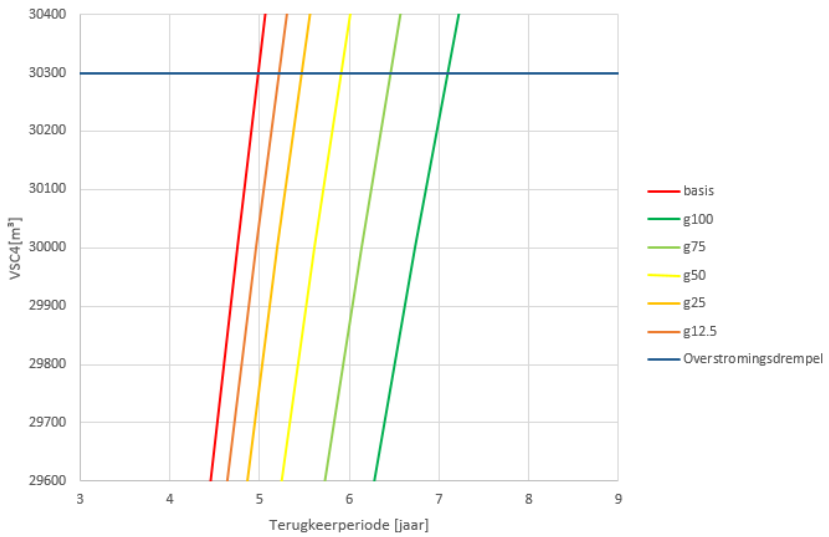


Figuur 8.24: Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC4.

voor een implementatiegraad van slechts 12.5% van de potentiële groendaken. De overstromingsdrempel, zoals bepaald in 8.3.6 wordt op dezelfde figuren getoond in 8.25 en 8.26 waarmee duidelijk wordt dat ook de frequentie waarmee overstromingen optreden, zal dalen door het toepassen van groendaken.



Figuur 8.25: Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC3: Daling van de overstromingsfrequentie.



Figuur 8.26: Terugkeerperiode van een piekvolume tijdens een neerslaggebeurtenis in SC4: Daling van de overstromingsdrempel.

Verminderde overstromingsvolumes

In de voorgaande paragraaf wordt het mogelijk effect van groendaken besproken voor het verminderen van de piekvolumes in de rioleringen. Aangezien in dit onderzoek als vereenvoudigde aanname gesteld wordt dat overstromingsvolumes in een deelgebied rechtstreeks verband houden met de volumes water in de rioleringen in dat gebied, is een logisch gevolg dat ook de overstromingsvolumes zullen dalen wanneer groendaken worden geïmplementeerd. Dit wordt geschetst door figuren 8.27 en 8.28 voor SC3 en SC4. Uit de figuren wordt duidelijk dat het effect wel proportioneel is met de oppervlakte aan groendaken die worden toegepast, maar dat de verhoudingen niet hetzelfde zijn voor elke bui. Dit kan veroorzaakt worden door verschillende antecedente condities in het groendak als gevolg van voorafgaande buien. Hiermee wordt nogmaals het belang van lange termijn simulaties benadrukt.

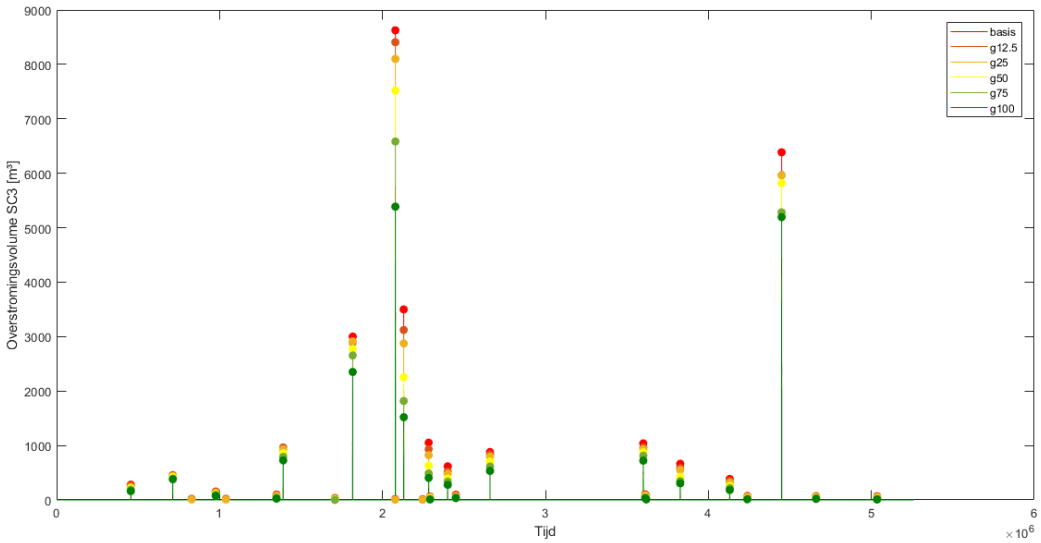
Uit de figuren wordt het ook duidelijk dat groendaken alleen niet kunnen instaan voor het oplossen van de volledige overstromingsproblematiek. Hoewel de reducties op overstromingsvolumes groot kunnen zijn voor extreme buien, zal ook de vereiste implementatiegraad voor groendaken groot moeten zijn. Daarentegen staat het feit dat er ook op andere vormen van bronmaatregelen kan en moet worden ingezet. Zo zullen doorlatende verhardingen, groene zones, hemelwaterputten en andere bufferende maatregelen gelijkaardige effecten vertonen en samenwerken om de overlast te verkleinen. Ook technologische innovaties zoals intelligente sturing van groendaken of andere buffers is een veelbelovende techniek om stedelijke waterhuishouding efficient aan te pakken. Ten slotte bieden groendaken en andere bronmaatregelen bijkomende voordelen zoals verminderd hitte-eilandeffect en een aangenamere leefomgeving. Deze voordelen werden uitgebreid besproken in 2 en kunnen een interessante uitbreiding en toepassing vormen van het opgestelde conceptueel model.

Effect op de waterbalans

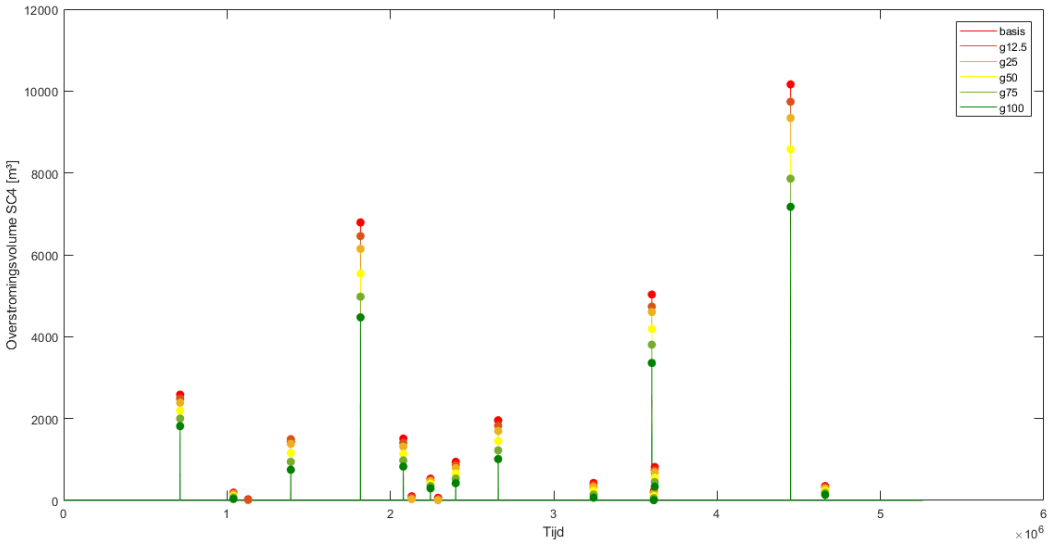
Een interessante toepassing van het conceptueel model is om de invloed van bepaalde netwerkwijzigingen, bijvoorbeeld het aanbrengen van groendaken, op de werking van pompstations, overstorten en vooral de RWZI te kwantificeren. Met de meetreeksen kunnen de gemiddelde debieten naar de waterzuivering bepaald worden waarmee deze kan ontworpen worden om met de veranderingen om te gaan. Om een correct beeld te geven van deze debieten is het beter om de belangrijkste regelende structuren zoals pompstations extern te modelleren. Hiermee wordt bedoeld dat ze expliciet deel uitmaken van de modelstructuur en geprogrammeerd worden zoals ze in de realiteit werken. Dit in tegenstelling tot het impliciet beschouwen van deze elementen in de verschillende stromingsrelaties zoals gecalibreerd volgens 8.3.5. Dit zou bovendien de nauwkeurigheid van het model sterk kunnen verbeteren.

8.5 Besluit

Dit hoofdstuk beschrijft een methodologie voor het opstellen van een conceptueel model voor de evaluatie van het effect van bronmaatregelen op een stedelijk riole-



Figuur 8.27: Verandering van de gesimuleerde piek-overstromingsvolumes in SC3 voor de verschillende groendakscenario's.



Figuur 8.28: Verandering van de gesimuleerde piek-overstromingsvolumes in SC4 voor de verschillende groendakscenario's.

ringsstelsel. Dit model wordt gebaseerd op een gedetailleerd Infoworks-ICM-model maar laat omwille van zijn veel lagere rekentijden toe dat lange termijn simulaties worden uitgevoerd.

In een eerste fase worden de verschillende deelcomponenten van het model geschetst. Centraal staat het conceptueel rioleringsmodel waarvan de opbouw gebaseerd is op de methodologie in [49]. Vervolgens worden ze elk afzonderlijk gecalibreerd aan de hand van simulatieresultaten van Infoworks: zowel de neerslagafstroming van groendaken als van de overige verharde oppervlakte wordt gemodelleerd met een dubbel lineair reservoir. De topologie van het rioleringsmodel wordt gebaseerd op de connectiviteit in het bestaande rioleringsnetwerk en zo worden vier deelgebieden onderscheiden die het conceptueel rioleringsmodel vormen. Een vijfde wordt toegevoegd om de collector onder de scheldekaaien te modelleren. Tussen deze deelgebieden of SC's worden in totaal 25 subfluxen onderscheiden die elk gecalibreerd worden. Ten slotte wordt een overstromingscriterium opgesteld om de simulatieresultaten van het CM te transformeren naar overstromingsgegevens.

In een laatste paragraaf worden simulaties uitgevoerd met een synthetische neerslag- en evaporatiereeks, gebaseerd op de 100-jarige meetreeks van Ukkel. Hiermee worden stabiliteitsproblemen van het CM gedetecteerd en opgelost, wordt de invloed van het neerslagafstromingsmodel bepaald en ten slotte de mogelijke impact van groendaken op de waterhuishouding ingeschat. Zo blijkt dat het op grote schaal toepassen van groendaken in Antwerpen een significant verlagende impact kan hebben op de piekvolumes in het rioleringsstelsel. Ook overstromingsvolumes worden zo gereduceerd. Het model kan in toekomstig onderzoek verder gebruikt worden om ook andere bronmaatregelen of toepassingen te bestuderen.

Hoofdstuk 9

Algemeen Besluit

9.1 Hoofddoelstelling van het onderzoek

Een doeltreffend beheer van water vormt een grote uitdaging voor steden. Als gevolg van hevige zomerstormen vinden er met regelmaat rioleringsoverstromingen plaats. Niet alleen vergroot de hoge mate van verharding het risico op deze overstromingen, ze maakt het ook moeilijker om klassieke, technische oplossingen uit te voeren om deze problematiek aan te pakken omwille van de beperkte beschikbaarheid van vrije ruimte. Bovendien zal ze bijkomende negatieve effecten veroorzaken zoals het verdrogen van de grondwaterlagen en een stijging van de temperatuur in de stedelijke omgeving omwille van een gebrek aan verdamping. Naast deze bestaande problemen zorgen klimaatveranderingen zoals een verhoging van de gemiddelde temperatuur voor een potentiële stijging van de risico's en een grote onzekerheid op de toekomstige evoluties.

Een veelbelovende maatregel tegen het voorkomen van stedelijke wateroverlast is het inzetten op bronmaatregelen. Deze lokale, kleinschalige installaties zijn in staat om onder elke toekomstige evolutie van neerslagpatronen een efficiënte oplossing te bieden tegen overstromingen. Ze kunnen flexibel gecombineerd worden met andere stedelijke voorzieningen zoals parken en parkeerplaatsen, en zijn in staat om ook andere negatieve gevolgen van verstedelijking op de waterhuishouding tegen te gaan. Een voorbeeld is het plaatsen van groendaken. De vegetatie en substraatlagen zijn in staat om grote hoeveelheden water te bufferen tijdens hevige stormen. Het water wordt vertraagd afgegeven en dus wordt het rioleringsstelsel ontlast. Daarnaast zal water kunnen verdampen en zo de luchttemperatuur in de stad verlagen. Ten slotte draagt een groene omgeving bij aan de goede leefbaarheid van de stad.

Dit onderzoek wil een methodologie ontwikkelen om het positieve effect van bronmaatregelen op de waterhuishouding in de stedelijke omgeving te kwantificeren. Dit houdt in dat verschillende computermodellen worden opgesteld om deze invloed te kunnen begroten. Vervolgens kunnen ook voor enkele voorbeelden van bronmaatregelen begroot worden wat hun impact kan zijn. Als casestudie voor dit onderzoek worden de modellen en simulaties uitgevoerd voor het centrum van Antwerpen.

9.2 Evaluatie van de subdoelstellingen

De hoofddoelstelling van het onderzoek werd verder ingedeeld in vier te verwezenlijken subdoelstellingen. Deze laten toe om de opdracht systematisch en gestructureerd aan te pakken. De eerste subdoelstelling bestond uit het verzamelen van informatie rond het studiegebied, maar ook over bronmaatregelen en het onderzoek dat er al naar gevoerd werd. Op basis van een literatuurstudie werd in hoofdstuk twee een lijst opgesteld van criteria waaraan bronmaatregelen moeten voldoen. Vervolgens werd een overzicht gegeven van de in Vlaanderen meest gebruikte toepassingen van bronmaatregelen en werden enkele studies aangehaald die het huidig onderzoek naar bronmaatregelen illustreren. Zo voerde Michel Van Lierde voor zijn masterthesis een gelijkaardig onderzoek naar bronmaatregelen voor de regio van Oostakker en Sint-Amandsberg in Gent. In dit onderzoek maakte men de aanbeveling voor het gebruiken van een meer gedetailleerd 1D-2D-model, en het uitvoeren van lange termijn simulaties om met de voorafgaande toestand van bronmaatregelen rekening te houden. Ook het grote potentieel van groendaken, zoals blijkt uit een studie in Ontario, Canada als bronmaatregel werd onthouden. Ten slotte werd het studiegebied zelf nader bekeken. De huidige toestand van het rioleringsstelsel en haar randvoorwaarden kwamen aan bod. Ook werd er een overzicht gegeven van de bestaande problematiek rond stedelijke overstromingen, die bijvoorbeeld in de Brederodewijk vaak voor overlast zorgt.

De tweede doelstelling van het onderzoek bestaat uit het opstellen van hydraulische modellen die geschikt zijn om de invloed van bronmaatregelen te begroten. In hoofdstuk drie wordt beschreven hoe een gekregen 1D-model, ter beschikking gesteld door Rio-Link, gevalideerd wordt aan de hand van gegevens over noodoproepen bij de brandweer. Zo wordt aan de hand van historische neerslaggebeurtenissen een vergelijking gemaakt tussen de locaties van enerzijds gesimuleerde en anderzijds historische overstromingen. Vooral in de gebieden die ook werkelijk last hebben van overstromingen blijkt de overeenkomst goed, maar er moet rekening gehouden worden met modelleringsonzekerheden op de neerslaggegevens en randvoorwaarden. Hier werden ook twee belangrijke neerslaggebeurtenissen, die van 27 en 28 juli 2013 en de bui van 30 mei 2016 weerhouden om verdere simulaties mee uit te voeren en het effect van bronmaatregelen te onderzoeken.

In hoofdstuk vijf wordt vervolgens beschreven hoe het bestaande 1D-model gekoppeld wordt aan een nieuw 2D-model waarmee de overstromingen meer nauwkeurig gemodelleerd kunnen worden. Na een beschrijving van de opbouw van dit model worden de prestaties van het nieuwe model vergeleken met die van het oorspronkelijke. Zo blijken overstromingsvolumes in het 1D-model onderschat te worden en is ook de verspreiding van het water bij overstromingen veel nauwkeuriger te bepalen met het nieuwe model. In het eerste deel van hoofdstuk acht wordt ten slotte beschreven hoe een conceptueel model wordt samengesteld om zo de invloed van antecedente condities en het gedrag onder een veel uitgebreidere invoerreeks te bestuderen.

Doelstelling drie is het selecteren van bronmaatregelen die in het onderzoek verder bestudeerd worden, en het modelleren van hun werking in de verschillende modellen.

Dit komt uitgebreid aan bod in hoofdstuk vier: Een eerste onderzochte maatregel is het groendak, een veelbelovende techniek omwille van de lage kostprijs voor overheden, de grote efficiëntie en de meerdere voordelen op andere stedelijke uitdagingen. Ook doorlatende verhardingen, bijvoorbeeld uitgevoerd als parkeerstrook, werden verder beschouwd. Ten slotte werden ook lokale, groene infiltratiebekkens bestudeerd.

De bronmaatregelen kunnen op meerdere manieren gemodelleerd worden in een Infoworksmodel. Uiteindelijk wordt de SUDS-control methode gebruikt voor de groendaken en doorlatende verhardingen. Deze methode houdt in dat een deel van het hemelwater via een ander model wordt afgeleid vooraleer het de rioleringen instroomt. Deze modellen bestaan uit verschillende lagen waartussen water wordt uitgewisseld en die zo de vertragende werking van bronmaatregelen nabootsten. Groene zones werden verder gemodelleerd in Infoworks als opslagknopen met een zekere infiltratiecapaciteit. Ook werd voor deze modellen nagegaan wat de invloed van bepaalde parameters is op hun werking. Tenslotte werd een procedure ontwikkeld om met behulp van MATLAB groendaken op grote schaal te importeren in Infoworks vanuit GIS-bestanden.

In hoofdstuk acht werd een conceptueel model opgesteld voor groendaken, gecalibreerd aan de werking van het SUDS-control groendak in Infoworks. De invloed van groendaken werdt bestudeerd door de instromende debieten van de deelgebieden te herschalen al naargelang de oppervlakte aan groendaken die werdt beschouwd.

De vierde en laatste subdoelstelling van dit onderzoek bestaat uit het gebruiken van de modellen uit de voorgaande bespreking, en ze gebruiken om het effect van bronmaatregelen te bestuderen. In hoofdstuk zes werden drie probleemzones geïdentificeerd die regelmatig met wateroverlast kampen. Vervolgens werden deze situaties geanalyseerd en konden verschillende oorzaken van deze problemen worden vastgesteld. Voor elk van deze oorzaken werden specifieke voorstellen gemaakt van bronmaatregelen. Hoewel deze maatregelen dus maar erg lokaal zijn en slechts kleine oppervlaktes innemen, zijn ze in staat om de overstromingsvolumes voor de bestudeerde buien tot wel 18% te verminderen.

In hoofdstuk zeven werdt de problematiek op veel grotere schaal aangepakt. Een nieuwe kaart voor het potentieel aan groendaken in Antwerpen werd opgesteld op basis van een digitaal oppervlaktemodel van Antwerpen. Hiermee werden verschillende scenario's opgesteld waarvan de impact op de overstromingen werd begroot. Zo blijkt het implementeren van groendaken in de Brederodewijk, hoewel ze samen slechts 0.65% van de verharde oppervlakte uitmaken, in staat om de overstromingsvolumes met 12 tot 14% te verminderen. Ook een korte sensitiviteitsanalyse van de resultaten op enkele aannames werd uitgevoerd.

In het tweede deel van hoofdstuk acht tenslotte werd het conceptueel model gebruikt om dezelfde strategische scenario's van groendaken te simuleren. Ook in lange termijn simulaties blijken groendaken een sterk verminderend effect te hebben op de wateroverlast. Hier wordt ook duidelijk dat het implementeren van groendaken alleen geen oplossing biedt aan de volledige problematiek van rioleringsoverstromingen, maar dat een finale oplossing moet gezocht worden in een combinatie van verschillende maatregelen en technologieën.

9.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

In deze laatste paragraaf wordt een beknopte opsomming gemaakt van aanbevelingen voor onderzoek die verder gaan op de thema's in dit werk. Hoewel getracht werd om de doelstellingen zo volledig mogelijk te behandelen, is er binnen het kader van een masterthesis maar een beperkte tijd beschikbaar en kan niet alles even grondig uitgewerkt worden. Zeker de grote verscheidenheid aan (deel)modellen die in dit werk aan bod komen, bieden nog veel interessante mogelijkheden die verder onderzocht kunnen worden.

- **Rechtstreekse neerslag-** Een toepassing van het 1D-2D-model die slechts kort behandeld wordt, is het gebruiken van de module om neerslag rechtstreeks aan te leggen aan het 2D-model in plaats van het te routen via de subcatchments. De afstromingsmodellen van de subcatchments zijn gebaseerd op geaggregeerde eigenschappen zoals oppervlakte en helling, maar missen de specifieke eigenschappen van het terrein zoals verandering van ruimtegebruik, variatie in het terrein, locaties van straatkolken en andere inlaten naar de riolering, infiltratie enz. Bij het toepassen van rechtstreekse neerslag benadert de weg die het water aflegt in het model veel beter de realiteit.

  In het onderzoek werd vastgesteld dat bij het opstellen van het 2D-raster problemen kunnen optreden wanneer de rasterelementen niet in staat zijn het terrein goed te volgen. Hierdoor ontstaan er gebieden waar te veel water ter plaatste blijft en niet de rioleringen instroomt. Het gebruiken van (veel) fijnere elementen kan een oplossing bieden maar gaat ten koste van de rekentijd. Ten slotte bied het beter bepalen van de locaties en karakteristieken van de verschillende inlaten naar de riolering een bijkomende moeilijkheid. Een onderzoek naar een betere, meer nauwkeurige methode voor het toepassen van rechtstreekse neerslag in een gedetailleerd hydraulisch model is een eerste mogelijke uitbreiding.

- **Kaart potentiÏe bronmaatregelen-** In hoofdstuk 7 wordt beschreven hoe op basis van een digitaal oppervlaktemodel een nieuwe kaart wordt opgesteld voor potentiële groendaken in Antwerpen. In feite geeft deze kaart slechts een schatting van de dakoppervlakte in het studiegebied met een helling lager dan een gekozen waarde en wordt er dus geen rekening gehouden met andere randvoorwaarden. Op bepaalde daken kan het bijvoorbeeld niet toegestaan zijn om groendaken aan te leggen, of zijn er al andere voorzieningen zoals bijvoorbeeld zonnepanelen geplaatst. Ook wordt er geen onderscheidt gemaakt tussen daken die al van een groendak zijn voorzien. Al deze bemerkingen kunnen gebruikt worden bij het opstellen van een meer gedetailleerde potentiële groendakenkaart.

  Naast groendaken zijn er nog vele **andere vormen van bronmaatregelen** die een interessante impact kunnen hebben op de stedelijke waterhuishouding. Ook voor deze maatregelen zou het interessant zijn om kaarten op te stellen die de potentiële implementatie in de stad weergeven. Zo kunnen bijvoorbeeld

kaarten opgemaakt worden die de potentiële doorlatende verhardingen, groene infiltratiebekkens, grachten enzovoorts beschouwen. Met de modellen die in deze thesis werden opgesteld kan vervolgens bestudeerd worden hoe groot hun impact kan zijn.

- **Geavanceerder groendakmodel-** De modellen van groendaken die in deze thesis beschouwd worden, zijn eenvoudige buffers die water vertraagd afgeven aan de riolering. Een interessante uitbreiding zou zijn om meer geavanceerde modellen van groendaken op te nemen in de berekeningen. Hiermee wordt gedoeld op groendaken met een intelligente sturing die vlak voor het uitbreken van een wolkbreuk hun opgeslagen water zoveel mogelijk afgeven om tijdens de piekneerslagintensiteit een maximale capaciteit ter beschikking te hebben. Verder zijn de groendakmodellen, zowel in het 1D-2D-model als het conceptuele model, gecalibreerd op de SUDS-controlsmodellen. Voor een betere representativiteit zouden ze gebaseerd kunnen worden op meetcampagnes van bestaande groendaken.

- **Verfijning conceptueel model-** Bij de calibratie van de verschillende subfluxen in het conceptueel model werd duidelijk dat niet elke stromingsrelatie een even goede benadering vormt van de werkelijkheid. Voor een meer nauwkeurig gebruik van dit model zou een veel gedetailleerdere calibratie, met veel meer verschillende neerslaggebeurtenissen van uiteenlopende aard nodig zijn. Ook de indeling in SC's en subfluxen kan in een aantal iteraties wellicht geoptimaliseerd worden.

  Bovendien zou een grote verbetering op vlak van nauwkeurigheid gehaald kunnen worden door het modelleren van de belangrijke pompstations en andere regelstructuren als opzichzelfstaande modelelementen, in plaats van ze impliciet in de stromingsvergelijkingen op te nemen. Nu merkt men dat de gebruikte neurale netwerken niet in staat zijn om met het plotse en sterk fluctuerende gedrag van deze structuren om te gaan, maar dat ook de benadering door een eenvoudig aan/uit-criterium, of een statisch-dynamische relatie niet het werkelijk gedrag kunnen nabootsten. Wanneer de pompstations op zichzelf gemodelleerd worden, kunnen hun karakteristieken, parallel- en serieschakelingen, aan- en afslagvolumes, enz. rechtstreeks ingevoerd worden en zal het gedrag van het volledige model nog realistischer zijn.

  In dit onderzoek werden overstromingen in het conceptueel model maar expliciet in rekening gebracht: volumes water op straat worden afgeleid uit de totale hoeveelheid water die in een deelgebied aanwezig is. Uit deze afleiding van een overstromingscriterium blijkt echter dat het overstroomde water niet eenduidig afhangt van het volume in het SC, maar zich gedraagt als een bijkomend reservoir waarin water overstort tijdens hevige buien. Na de storm zal dit water maar langzaam terug in de rioleringen stromen. Om dit gedrag beter te kunnen beschrijven zouden in elk deelgebied overstromings-SC's gedefinieerd kunnen worden die dit gedrag kunnen simuleren. Eventueel kan de calibratie van die nieuwe stromingsrelaties gebaseerd worden op de resultaten van een

gekoppeld 1D-2D model zoals beschreven in dit werk. Zo wordt de werkelijke overstromingssituatie beter nagebootst.

- **Toepassingen conceptueel model-** De toepassingen van het conceptueel model werden maar kort besproken in dit verslag. Naast het bestuderen van de impact van bronmaatregelen kan dit voor een groot aantal andere toepassingen aangewend worden. Met behulp van lange termijn simulaties kan bepaald worden wat de huidige en toekomstige debieten naar RWZI's zijn, waarmee deze kunnen worden gedimensioneerd. Ook het bestuderen van de waterkwaliteit of de oversortfrequentie naar de Schelde kan hiermee onderzocht worden. Meer specifiek op vlak van wateroverlast kan een meer gedetailleerd model voor de overstromingsvolumes in combinatie met een digitaal hoogtemodel gebruikt worden om overstromingskaarten op te stellen voor gebeurtenissen met een bepaalde terugkeerperiode. Een andere mogelijkheid is om enkele uren voor een storm een groot aantal variaties van neerslaggebeurtenissen door te rekenen, wat mogelijk wordt omwille van de snelle rekentijd. Door dan vooraf opgestelde overstromingskaarten te herschalen naar de berekende volumes kunnen de locaties bepaald worden die met de meeste waarschijnlijkheid met wateroverlast zullen kampen. De hulpdiensten kunnen dan beter voorbereid worden op noodsituaties, nog voor dat deze zich voltrekken.

Bijlagen

Bijlage A

Bespreking van het Infoworks ICM netwerk

A.1 Analyse van de gegeven netwerken

Om de effecten van de bronmaatregelen te kunnen evalueren word er gebruik gemaakt van een gedetailleerd hydrodynamisch model. In deze studie wordt hiervoor Infoworks ICM gebruikt. Er werden twee netweken ter beschikking gesteld. Een eerste via de KULeuven, verder 'eerste netwerk' genoemd, en een tweede door Rio-link, verder 'tweede netwerk' genoemd. Beide dragen de titel '210AC-Antwerpen-Centrum toestand A 2015 aanpassing', wat suggereert dat ze de bestaande toestand van het rioleringsstelsel voorstellen van 2015.

Hoewel de netwerken op het eerste zicht dus identiek lijken zijn er toch een aantal verschillen. Zo maakt een eenvoudige vergelijking van de omvang van elk netwerk duidelijk dat ze niet hetzelfde zijn: tabel A.1 toont een vergelijking van aantal knooppunten, links en subcatchments tussen de twee netwerken.

Tabel A.1: Vergelijking tussen omvang van de verschillende netwerken.

Netwerkelement	**Netwerk 1**	**Netwerk 2**
Knooppunt	8533	8604
Link	9787	9875
Deelstroomgebied	5725	5795

In de volgende sectie worden dan ook andere verschillen tussen de netwerken onderzocht. Ook wordt geprobeerd om het belang hiervan in te schatten voor latere simulaties met implementatie van bronmaatregelen.

A.1.1 Verschillen in oppervlakte-afstromingsmodel

Wanneer een subcatchment onderworpen wordt aan een neerslaggebeurtenis zal er water naar het leidingsnetwerk stromen. De manier waarop dit gebeurt wordt beschreven door het "runoff routing modelöf oppervlakte-afstromingsmodel. Dit zijn de wiskundige relaties tussen neerslagintensiteit en afstromingsdebiet en zijn zo opgesteld om zo goed mogelijk het proces van neerslagafstroming weer te geven. In ICM kunnen verschillende modellen worden toegekend aan een bepaald oppervlaktetype, maar alle oppervlaktes van een bepaald landgebruik moeten hetzelfde model gebruiken [18].

In Infoworks wordt standaard het 'Wallingford' model gebruikt [18]. Dit is een dubbel quasi-lineair reservoir model. De reservoirconstante is hier afhankelijk van verschillende oppervlakteparameters en ook van de neerslagintensiteit. Het is bedoeld voor afstromingsgebieden waar de aangesloten verharde oppervlakte niet groter is dan 1 ha. De afvlakking die hierbij optreedt is meestal verwaarloosbaar in vergelijking met de afvlakking als gevolg van de stroming doorheen het riool[9].

In het netwerk van Antwerpen komen enkele subcatchments voor met een grotere verharde oppervlakte dan 1ha. Het is voor deze gebieden aangewezen om een ander afstromingsmodel te gebruiken. In het Aquafin-netwerk wordt gebruik gemaakt van het Largecatch-model. Largecatch staat voor Large Contributing Area Model en is zoals de naam aangeeft bedoelt voor afstromingsgebieden met grotere verharde oppervlaktes. Het werkt analoog aan het Wallingfordmodel als een dubbel reservoirmodel maar past een tijdsvertraging en routing-coëfficiënt toe die afhankelijk zijn van de afstromingsoppervlakte, de helling en de lengte van het subcatchment [18].

In het eerste netwerk wordt enkel van het Wallingfordmodel gebruik gemaakt. Inspectie van het tweede netwerk met behulp van een query maakt duidelijk dat er hier 14 subcatchments gedefinieerd zijn met het routingmodel Largecatch. Deze bevinden zich allemaal in het gebied Eilandje. Verdere inspectie leert dat er in totaal 21 subcatchments zijn met een deeloppervlakte groter dan 1 ha. Er zijn dus 7 gebieden groter dan 1 ha waar toch het Wallingfordmodel gebruikt wordt. Deze hebben echter ook deeloppervlaktes kleiner dan 1 ha. Bovendien zijn hun deeloppervlaktes altijd kleiner dan 2 ha waarmee besloten kan worden dat het toepassen van het Wallingfordmodel hier waarschijnlijk nauwelijks een verschil zal maken.

A.1.2 Vergelijking van enkele subcatchments

In de volgende paragraaf worden enkele subcatchments van de twee netwerken met elkaar vergeleken om te achterhalen of er verschillen zijn, en wordt geprobeerd om een oorzaak te vinden. Dit gebeurt aan de hand van tabel A.2 die de belangrijkste eigenschappen van de gebieden oplijst.

Het eerste subcatchment dat beschouwd wordt laat duidelijke verschillen zien tussen de netwerken. Met name de afvoerende dakoppervlakte van het tweede net-

Tabel A.2: Vergelijking tussen netwerken van verschillende subcatchments.

	Netwerk 1	**Netwerk 2**
ID	10797	10797
Wijk	Eilandje	Eilandje
Oppervlakte [ha]	50.636	50.636
Straatoppervlakte [ha]	20.200	25.127
Dakoppervlakte [ha]	3.901	14.637
Onverharde oppervlakte [ha]	26.535	10.873
Routingmodel	Wallingford	Largecatch
ID	24230	24230
Wijk	Markgrave	Markgrave
Oppervlakte [ha]	2.787	2.788
Straatoppervlakte [ha]	1.020	1.020
Dakoppervlakte [ha]	0.437	0.437
Onverharde oppervlakte [ha]	1.330	1.331
Routingmodel	Wallingford	Wallingford
ID	76769	76769
Wijk	Ring t.h.v. Berchem	Ring t.h.v. Berchem
Oppervlakte [ha]	0.382	0.382
Ring straatoppervlakte [ha]	0.091	0.091
Ring taludoppervlakte [ha]	0.292	0.292
Routingmodel	Wallingford	Wallingford

werk is significant groter dan in het eerste netwerk. Een mogelijke oorzaak is dat er iets is misgelopen bij het opstellen van het netwerk waarbij de dakoppervlakte misschien verkeerd werd ingelezen. Een andere mogelijkheid is dat het eerste netwerk een oudere toestand beschrijft waarin er minder gebouwen zijn, maar dit spreekt tegen dat beide netwerken de toestand A van 2015 voorstellen. Nog een andere mogelijkheid is dat in het eerste netwerk een toestand beschreven wordt waarin het water van de meeste daken rechtstreeks afvoert naar de Schelde of de dokken, en dat slechts een klein deel van de daken nog op het gemengd stelsel aangesloten zijn. De afgekoppelde daken worden dan als onverhard beschouwd. In ieder geval blijkt uit de eerste paragraaf dat dit grote subcatchment beter wordt beschreven met het Largecatch-afstromingsmodel in plaats van met Wallingford wat dus betekent dat het tweede netwerk nauwkeuriger zou zijn.

Wat de overige deelstroomgebieden in de tabel betreft zijn er geen verschillen.

A.1.3 Verschillende afvoercoëfficiënten

Naast de verschillen in oppervlakte van verschillende landgebruiken is er ook een verschil in gebruikte afvoercoëfficiënten. Deze coëfficiënten bepalen welke fractie van

de gevallen neerslag ook effectief afstroomt naar het rioleringsstelsel. een coëfficiënt van 0.7 betekent dat 70% van de neerslag op een bepaald gebied ook effectief de rioleringinstroomt. De manier waarop dit gebeurt (tijdsvertraging, afvlakking) wordt zoals vermeld bepaald door het afstromingsmodel. In tabel A.3 worden voor de verschillende subcatchments uit de vorige paragraaf de gebruikte coëfficiënt per deeloppervlakte weergegeven.

Tabel A.3: Vergelijking tussen netwerken van verschillende subcatchments.

Deeloppervlakte	**Netwerk 1**	**Netwerk 2**
Straat Eilandje	0.8	0.9
Dak Eilandje	0.8	0.9
Onverhard Eilandje	0	0
Straatoppervlakte	0.8	0.9
Dakoppervlakte	0.8	0.9
Onverhard	0	0
Straat Ring	1	1
Straat Taluds	0	0

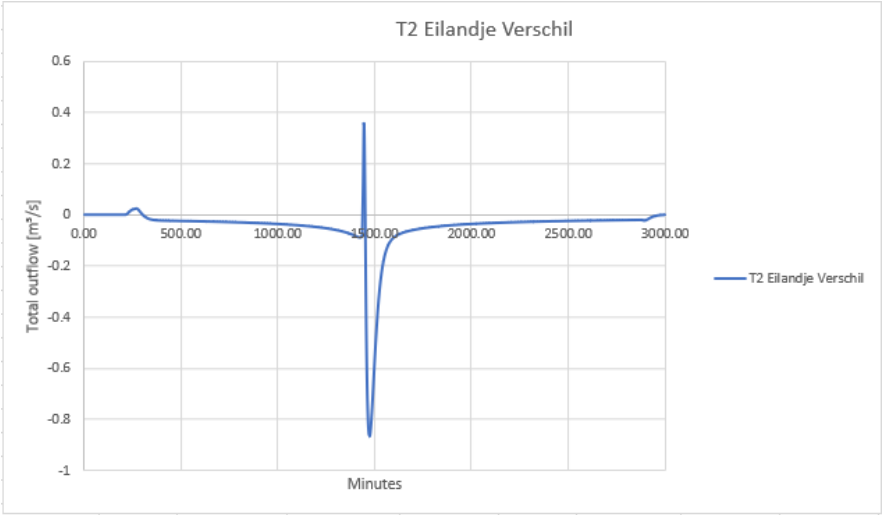
In Vlaanderen wordt opgelegd om de waarde 0.8 te gebruiken voor de coëfficiënt volgens de code van goede praktijk [9]. In de toelichting bij de code worden hier enkele bemerkingen bij gemaakt [40]. Er wordt aangehaald dat de keuze van 0.8 nogal arbitrair is en stamt uit een tijd van handberekeningen met grote onzekerheid. Verder blijkt uit lange-termijnsimulaties dat de afvoercoëfficiënten voor ontwerpberekeningen zich bevinden tussen 0.93 en 0.98, en dat ze bovendien afhankelijk zijn van de terugkeerperiode van de bui en van het gebruikte aggregatieniveau. Indien de frequentie van de bui toeneemt, daalt de afvoercoëfficiënt.

In het opstellen van een model worden vaak kleinere of dus frequentere buien gebruikt omdat deze beschikbaar zijn dankzij pluviograafgegevens. Wanneer het netwerk dan goede resultaten vertoont in de validatie met een afvoercoëfficiënt 0.8, kan het zijn dat de resultaten van simulaties met veel grotere (hoge terugkeerperiode) buien niet meer representatief zijn. De toelichting raadt dan ook aan om bij ontwerpberekeningen een coëfficiënt 0.9 te gebruiken, eventueel ook bij validatieberekeningen. Hiervoor is het aangeraden om de concentratietijd van de bui te bepalen voor elk aggregatieniveau tussen 10 minuten en de maximale concentratietijd van het rioleringsstelsel.

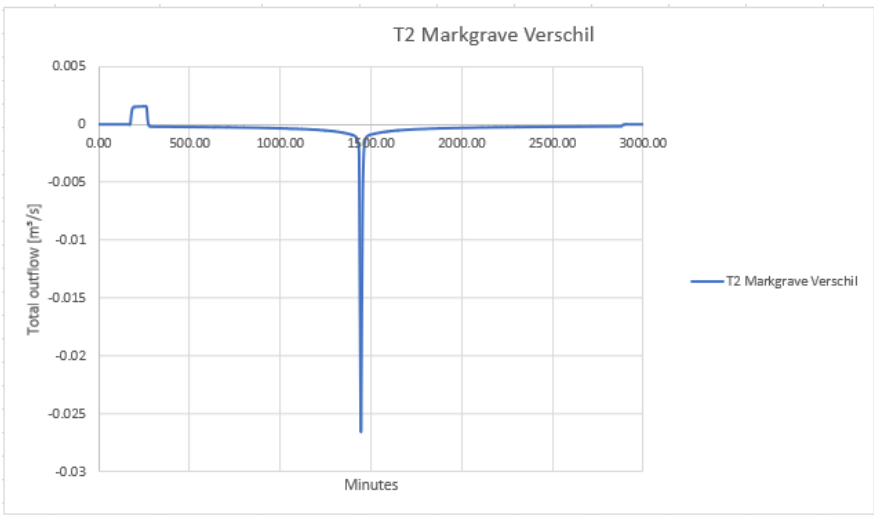
Samengevat is de waarde 0.8 in het eerste netwerk correct voor de code van goede praktijk maar uit studies blijkt dat deze een onderschatting kan geven van de werkelijke instroom in het stelsel. Daarom is de waarde 0.9 in het tweede netwerk waarschijnlijk nauwkeuriger bij het gebruik van composietbuien.

A.1.4 Vergelijking van simulatieresultaten

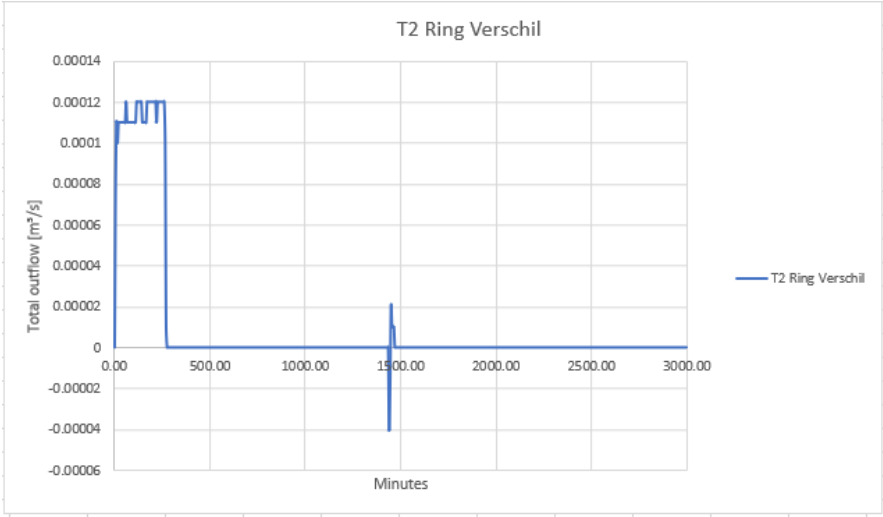
Vervolgens worden simulaties uitgevoerd met composietbuien met terugkeerperiodes van 2 jaar, 5 jaar en 20 jaar. Met deze resultaten kunnen de waarden van totale uitstroming uit de subcatchments vergeleken worden om te zien of de eerder vermelde verschillen een grote invloed hebben. Volgende figuren geven het verschil weer tussen de waarden van totale uitstroming voor eenzelfde subcatchment, maar verschillend netwerk (netwerk 1 - netwerk 2).



Figuur A.1: Verschil in totale uitstroming (T2 Eilandje).



Figuur A.2: Verschil in totale uitstroming (T2 Markgrave).



Figuur A.3: Verschil in totale uitstroming (T2 Ring).

Merk op dat de schaal van totale uitstroming niet gelijk is voor de drie grafieken.

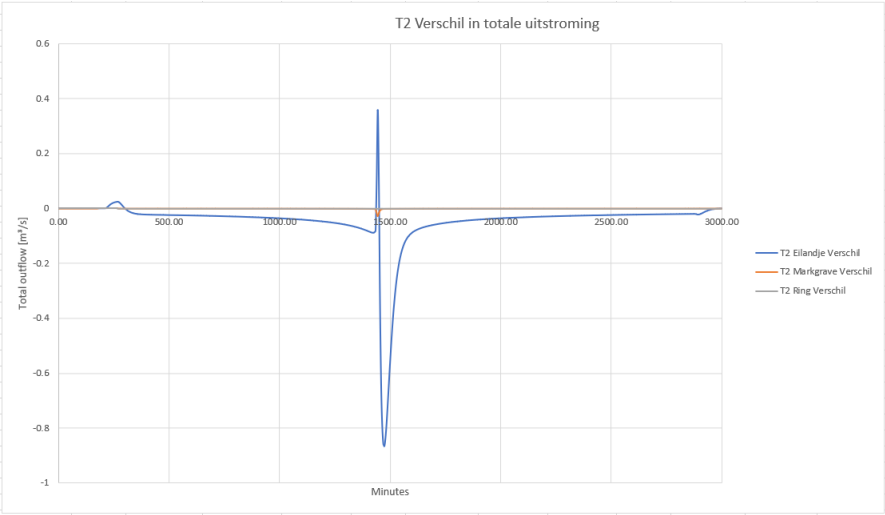
Uit deze resultaten valt af te leiden dat het verschil het hoogst is bij het subcatchment gelegen op het Eilandje. Eerder werd al aangehaald dat bij dit subcatchment een groot verschil waar te nemen is in de verdeling van het totale oppervlakte in de verschillende soorten oppervlaktes (straat, dak en onverhard), ook de afvoercoëfficiënten zijn verschillend voor de twee netwerken. Ten slotte lijkt de grafiek die het verschil in debiet weergeeft een tijdsverschuiving aan te tonen: het eerste netwerk zal sneller water afvoeren (positief verschil), maar dan begin ook het tweede netwerk veel water af te voeren en omwille van het verschil in oppervlakte wordt de fout negatief. Een verklaring voor dit tijdsverschil is het gebruik van het Largecatch afvoermodel in het tweede netwerk waar het eerste netwerk met Wallingford wordt berekend.

Voor het subcatchment gelegen in de Markgrave wijk is er ook een verschil waar te nemen. Dit verschil is niet zo significant als dat van het subcatchment op het Eilandje. Aangezien de oppervlakteverdeling gelijk is voor de twee netwerken is dit verschil veroorzaakt door het verschil in gebruikte afvoercoëfficiënten.

De verschillen waargenomen bij het subcatchment gelegen op de ring zijn verwaarloosbaar klein. Zoals eerder al vermeld staat, zijn de eigenschappen van de subcatchment gelijk voor beide netwerken en was het kleine verschil dus al te verwachten.

Over het algemeen kan dus besloten worden dat de oppervlakteverdeling de grootste impact heeft op het verschil in totale uitstroming. Hoewel de afvoercoëfficiënten ook een impact hebben zijn deze veel minder prominent dan de verschillen veroorzaakt door verschil in oppervlakteverdeling.

Tot slotte worden de verschillen samen weergegeven in éénzelfde grafiek om de relatieve vergelijking tussen de subcatchments te visualiseren:

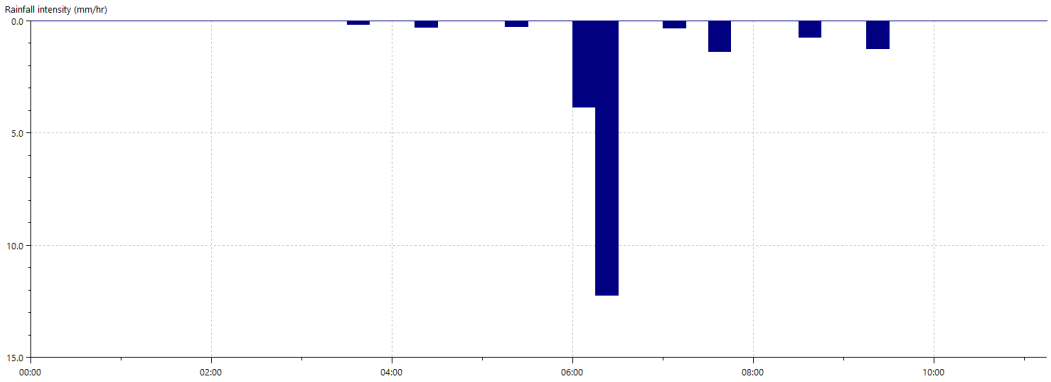


Figuur A.4: Verschil in totale uitstroming.

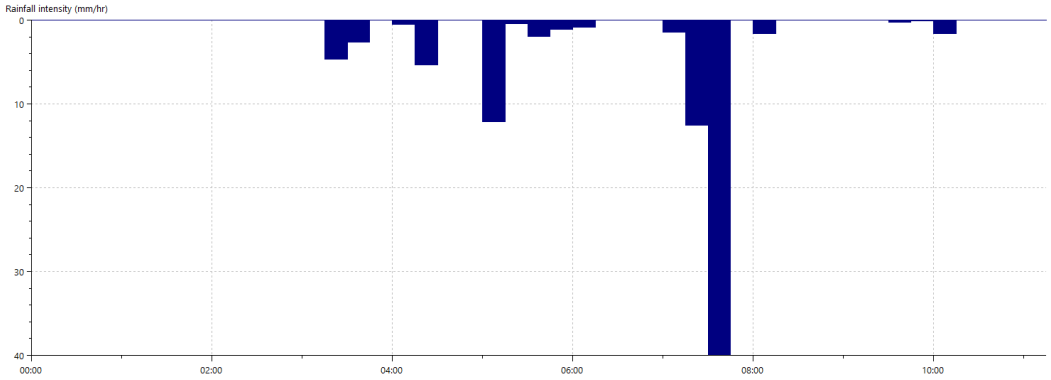
Bijlage B

Verduidelijkende figuren bij de validatie van het netwerk

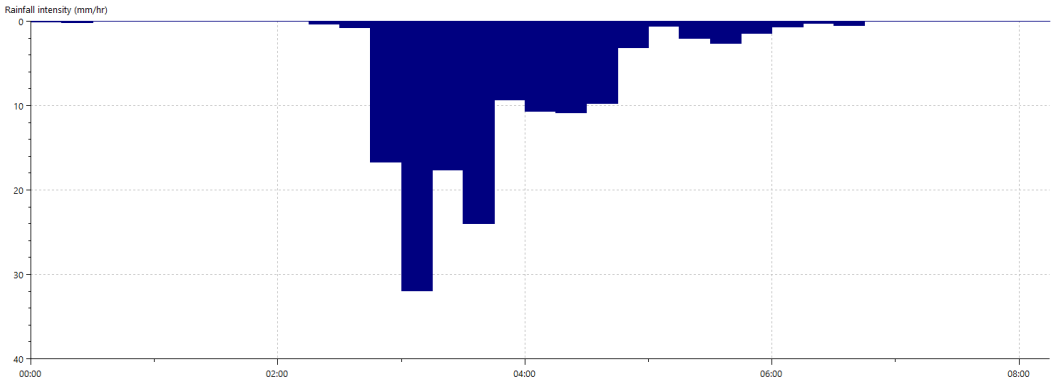
B.1 Neerslagintensiteiten



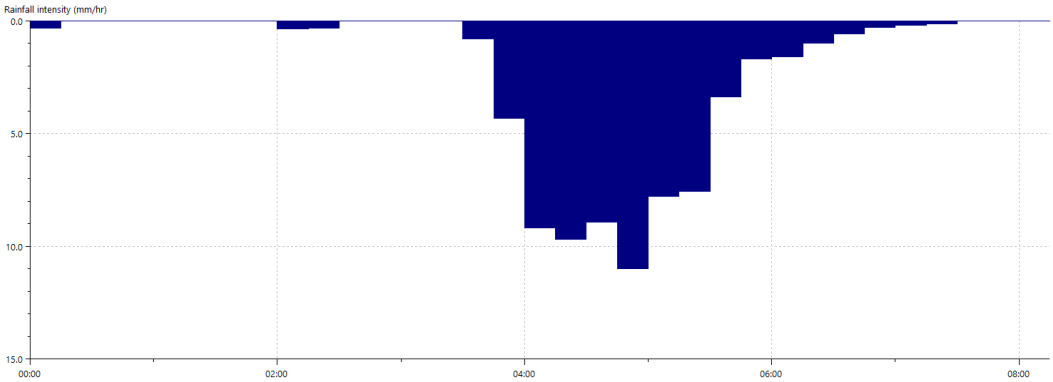
Figuur B.1: Neerslagintensiteiten 11 Juli 2012 (Wilrijk).



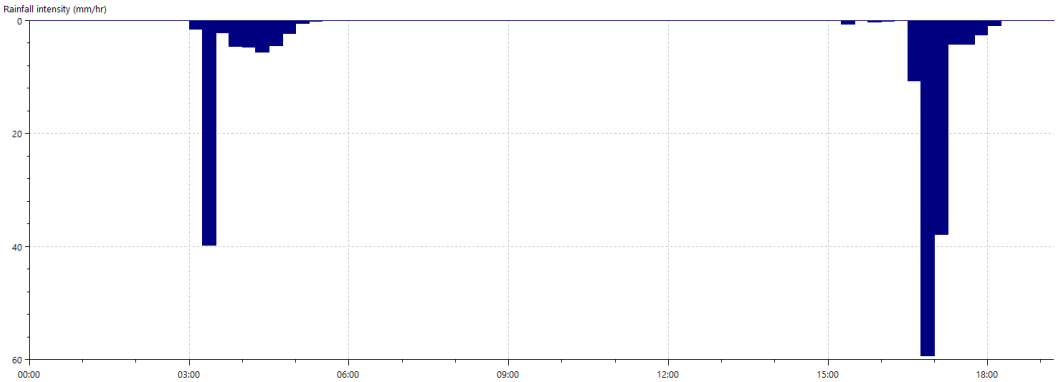
Figuur B.2: Neerslagintensiteiten 11 Juli 2012 (Melsele).



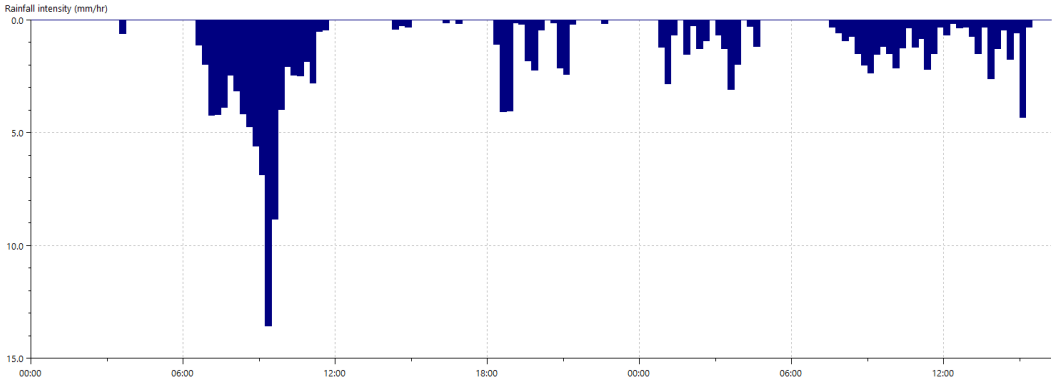
Figuur B.3: Neerslagintensiteiten 21 Juni 2013 (Wilrijk).



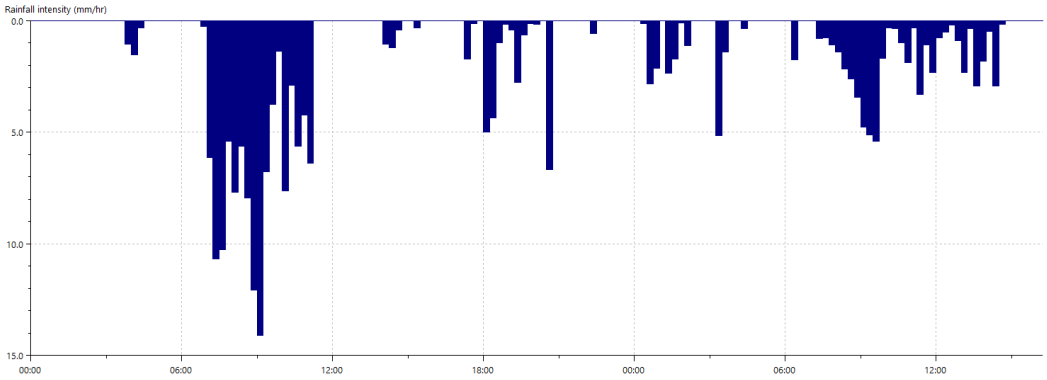
Figuur B.4: Neerslagintensiteiten 21 Juni 2013 (Melsele).



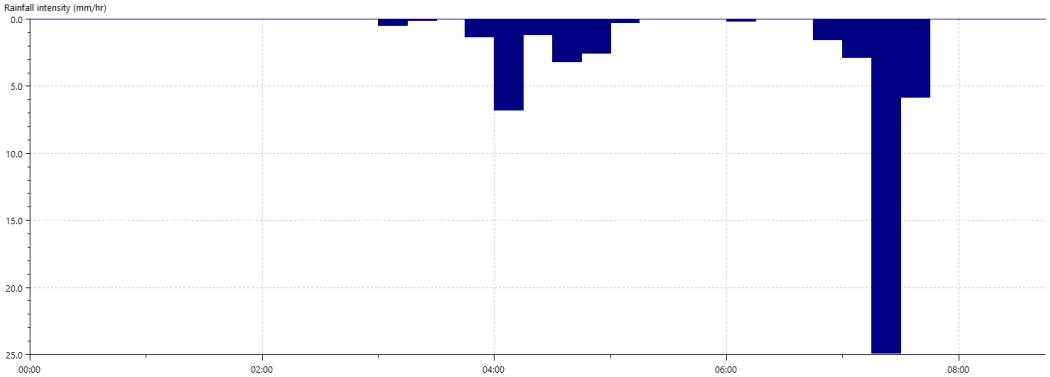
Figuur B.5: Neerslagintensiteiten 27-28 Juli 2013 (Melsele).



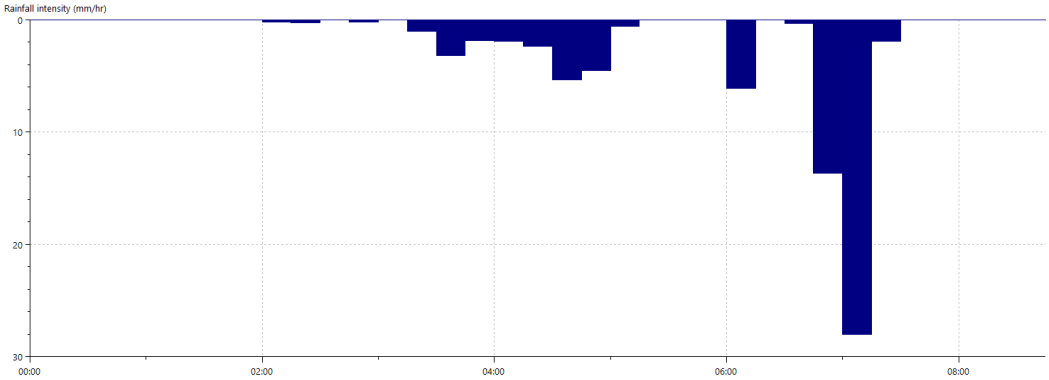
Figuur B.6: Neerslagintensiteiten 9-12 September 2013 (Wilrijk).



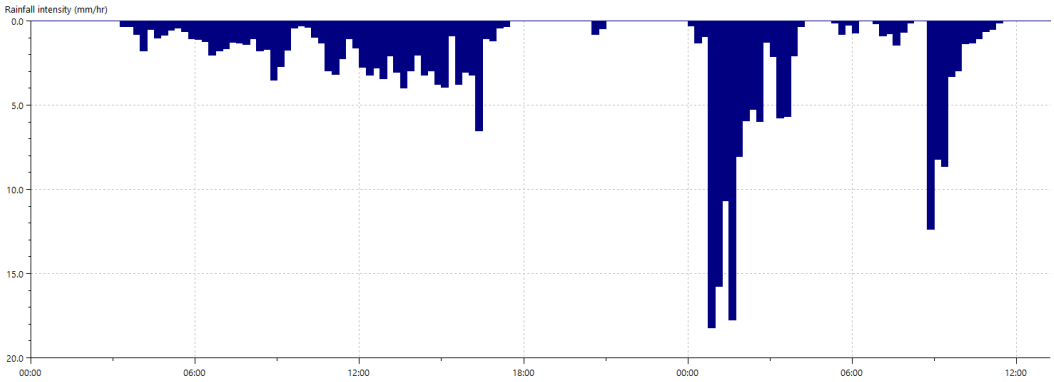
Figuur B.7: Neerslagintensiteiten 9-12 September 2013 (Melsele).



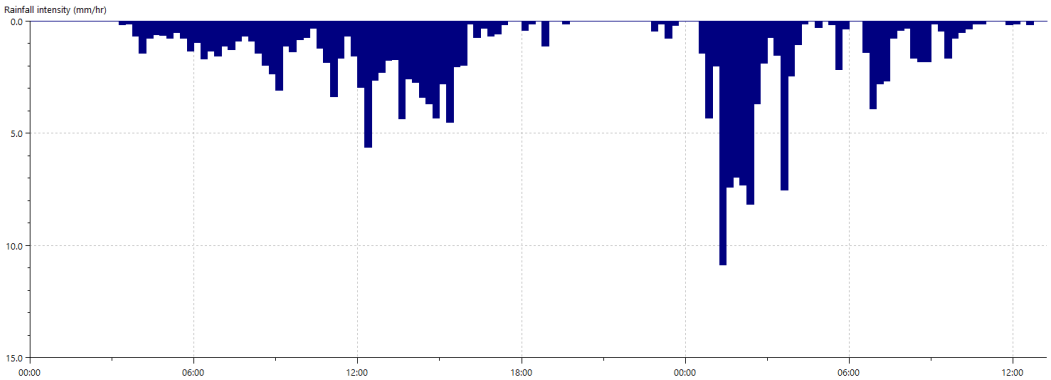
Figuur B.8: Neerslagintensiteiten 10 Augustus 2014 (Wilrijk).



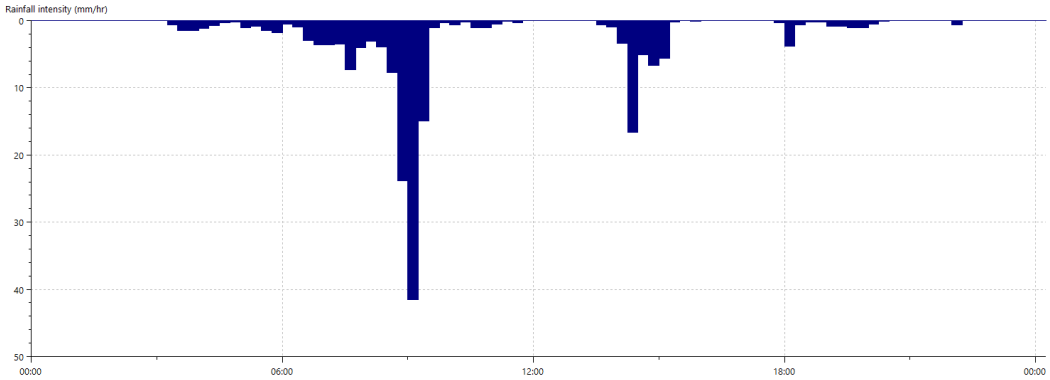
Figuur B.9: Neerslagintensiteiten 10 Augustus 2014 (Melsele).



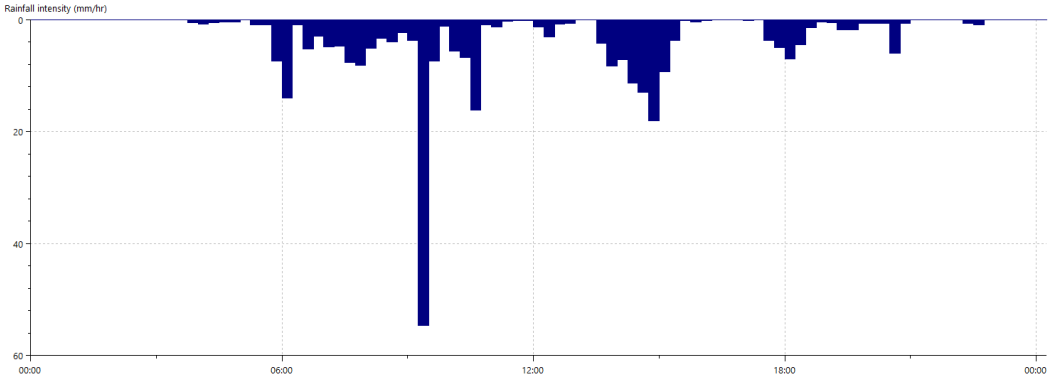
Figuur B.10: Neerslagintensiteiten 26 Augustus 2014 (Wilrijk).



Figuur B.11: Neerslagintensiteiten 26 Augustus 2014 (Melsele).

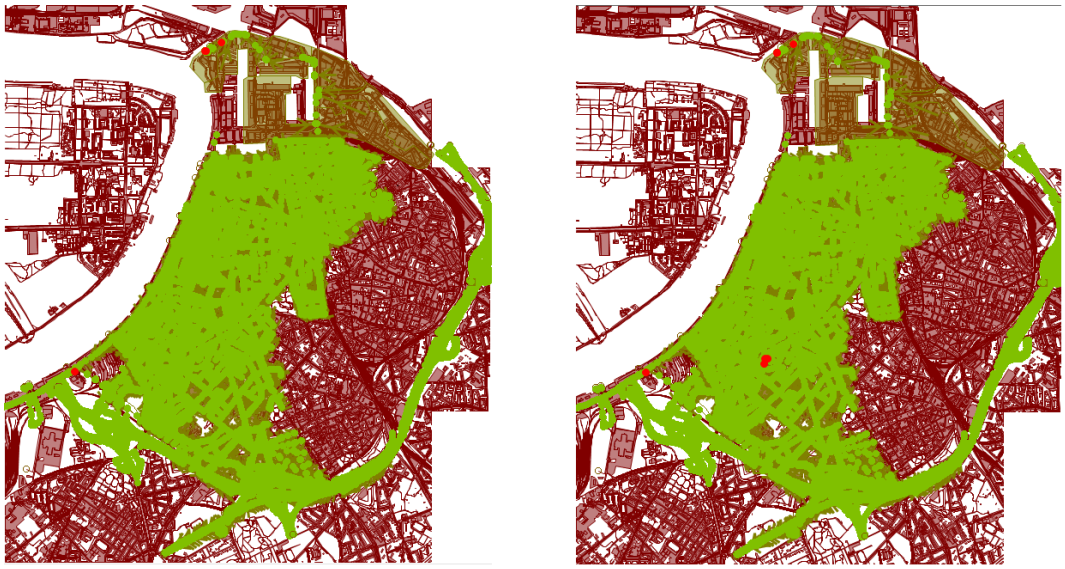


Figuur B.12: Neerslagintensiteiten 30 Mei 2016 (Wilrijk).

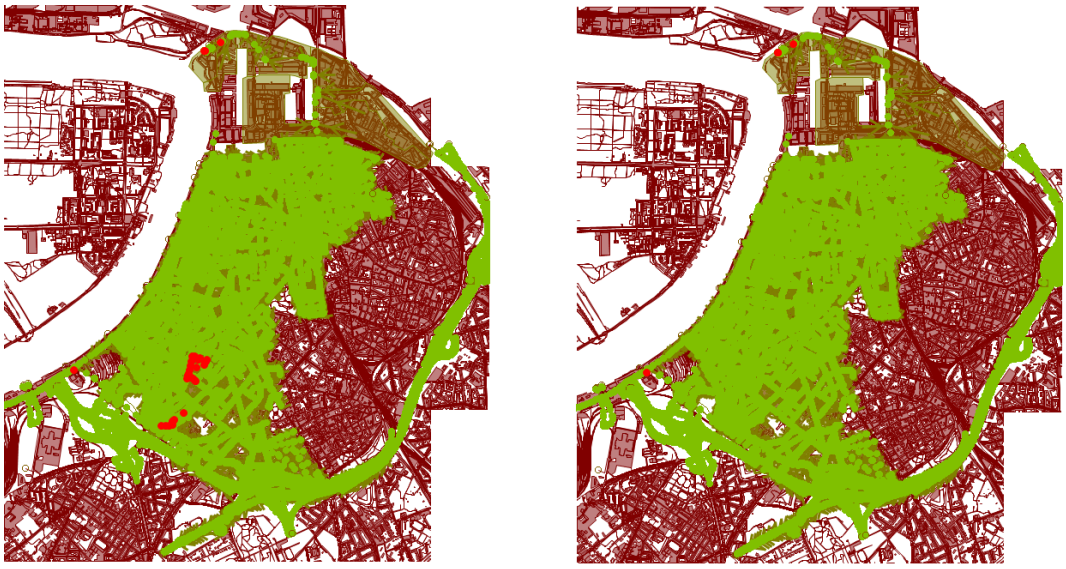


Figuur B.13: Neerslagintensiteiten 30 Mei 2016 (Melsele).

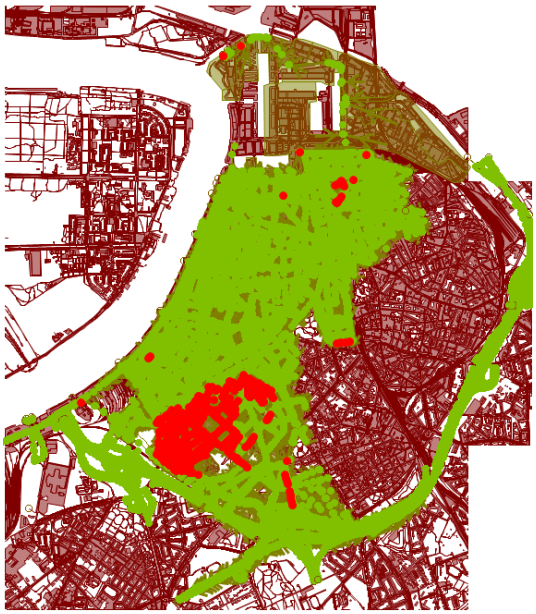
B.2 Overstromingspunten



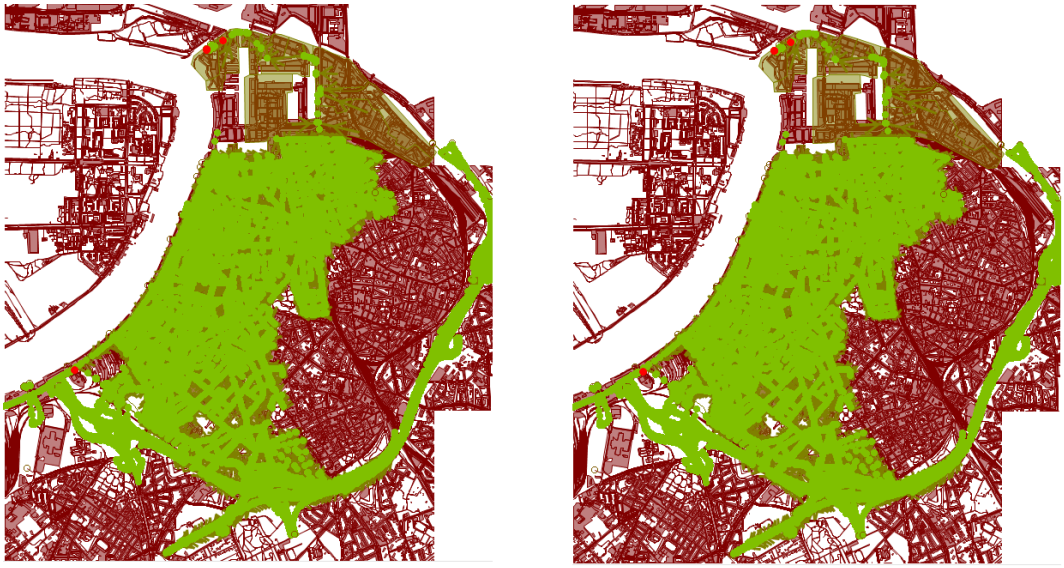
Figuur B.14: Overstromingspunten 11 Juli 2012 (Wilrijk links; Melsele rechts).



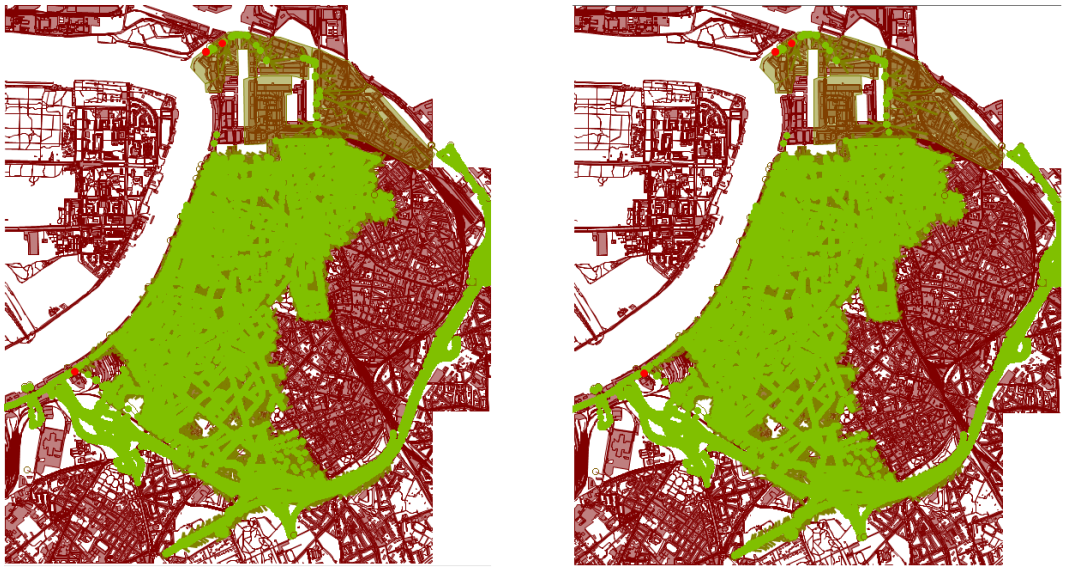
Figuur B.15: Overstromingspunten 21 Juni 2013 (Wilrijk links; Melsele rechts).



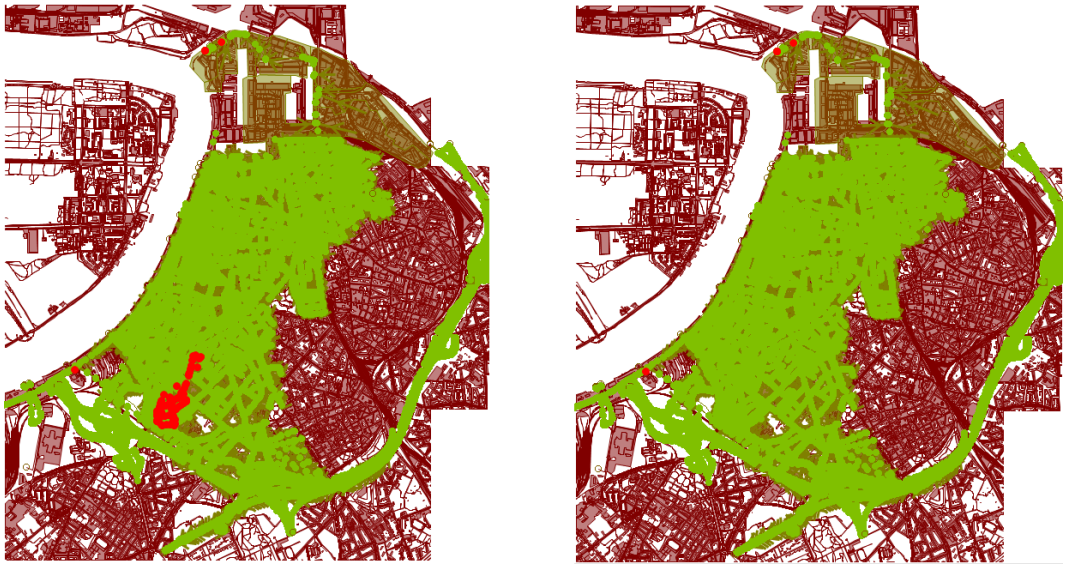
Figuur B.16: Overstromingspunten 27-28 Juli 2013 (Melsele).



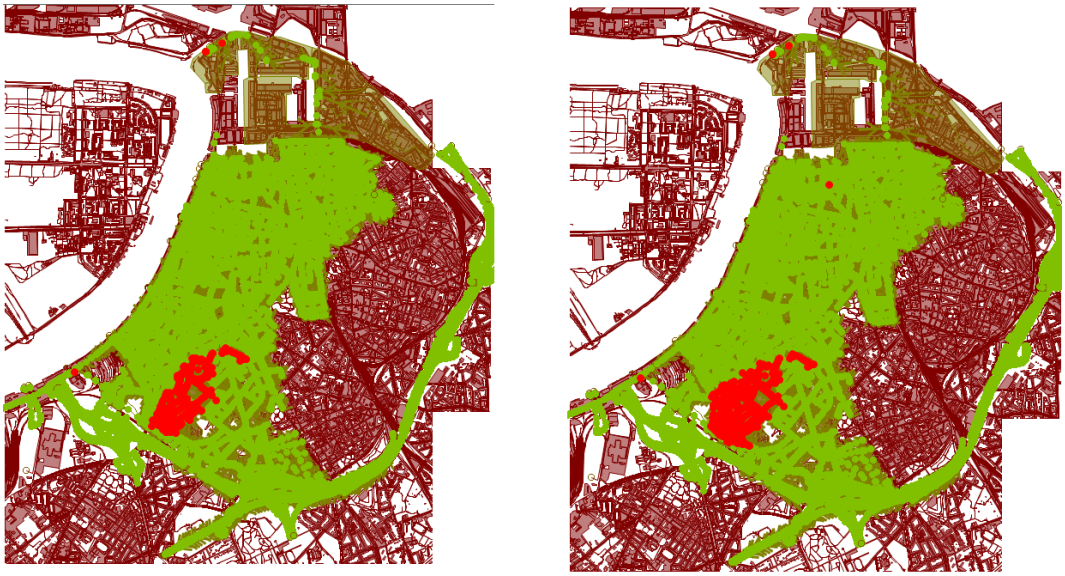
Figuur B.17: Overstromingspunten 9-12 September 2013 (Wilrijk links; Melsele rechts).



Figuur B.18: Overstromingspunten 10 Augustus 2014 (Wilrijk links; Melsele rechts).



Figuur B.19: Overstromingspunten 26 Augustus 2014 (Wilrijk links; Melsele rechts).



Figuur B.20: Overstromingspunten 30 Mei 2016 (Wilrijk links; Melsele rechts).

Bijlage C

Aanpassingen aan het model

Het doel van deze bijlage is om een beknopt en duidelijk overzicht te geven van alle aanpassingen die werden gemaakt aan het netwerk in het verloop van dit onderzoek. Dit is nuttig om de opbouw van de gebruikte modellen in de simulaties op te volgen en om eventueel alle aanpassingen stapsgewijs toe te passen. Het netwerk waarvan vertrokken wordt is dat van Rio-link en staat beschreven in Bijlage **nummer**.

Toevoegen van de 2D-elementen Een belangrijke stap in het opstellen van het 2D-model is het opstellen van de verschillende elementen van de 2D-zone. In dit onderzoek werden de 2D-zone, eventuele groenzones, infiltratiezones en ruwheidszones telkens opgesteld in een GIS-toepassing. De verschillende eigenschappen en parameters van deze elementen staan samengevat in de tekst. De gebruikte bestandstypes zijn shapefiles (.shp en de bijhorende nevenbestanden). Deze werden vervolgens geïmporteerd in het netwerk met behulp van het 'Open Data Import Centre'.

Aanpassing van de maaiveldniveau's Om nauwkeurige simulatieresultaten te bekomen en om zo goed mogelijk de bestaande situatie na te streven werden de oorspronkelijke maaiveildniveau's in het origineel netwerk aangepast. Dit verliep volgens de volgende stappen:

- Verwijderen van de bestaande maaiveldpeilen met de volgende code in de SQL-tool: voor alle elementen type knoop: 'UPDATE SET ground_level = NULL'
- De maaiveildpeilen in de 2D-zone gelijkstellen aan de hoogteligging van het 2D-element waarin het zich bevindt: gebruik van de 'inference'-tool NODE: 'Ground level from 2D mesh element'
- De maaiveildpeilen buiten de 2D-zone gelijkstellen aan de hoogtepeilen volgens het DTM: gebruik van de inference 'NODE: Ground levels from ground model'

2D-knopen Om uitwisseling van water toe te laten tussen het 1D en het 2D-model moeten de knopen in het basisnetwerk worden aangepast naar het 'floodtype' 2D. Dit is erg eenvoudig met behulp van de volgende SQL-opdrachten:

- Aanpassen van het overstromingstype: Object type: All nodes; Spatial search: inside, network layer, 2D zone; SQL: 'UPDATE SET flood_type='2D' WHERE flood_type='stored'
- Instellen van de debietscoëfficiënt: Object type: All nodes; Spatial search: inside, network layer, 2D zone; SQL: 'UPDATE SET flooding_discharge_coeff=0.5'

Sealed knopen in de gebouwen Na aanpassen van de knopen in de 2D-zone zal Infoworks bij een validatie opmerken dat bepaalde knopen zijn aangepast naar type 2D terwijl ze zich niet in een 2D-element bevinden. Inspectie van deze knopen leert dat het gaat om nodes die liggen binnen polygonen die gebouwen afbakenen. In het oorspronkelijke netwerk zijn veel van deze knopen van het type 'stored' wat betekent dat er in de berekening met een floodcone wordt gewerkt. Een mogelijkheid is om deze knopen terug naar de oorspronkelijke toestand van floodcones terug te brengen. Logischer is echter om van deze knopen een overstromingstype 'sealed' te maken wat betekent dat er geen water uit kan stromen bij overstromingen en de mangaten dicht zijn, wat meer waarschijnlijk is voor knopen die zich onder een gebouw bevinden. Deze aanpassing verloopt zeer eenvoudig als volgt met SQL: Object type: All nodes; Spatial search: inside, network layer, polygon; SQL: 'UPDATE SET flood_type='Sealed' WHERE spatial.category_id='void' AND flood_type='2D"

Knopen in de Schelde Uit de eerste simulaties met het nieuwe 2D-model blijkt er telkens een zeer groot volume in en uit het 2D-model te stromen. Nadere inspectie leert dat dit komt door het "overstromen" van 2 knopen, nummers 10859B en 10859C in het Noorden van het netwerk bij de Royersluis, waar de overstroming veroorzaakt wordt door het overschrijden van het lokale grondniveau door het Scheldepeil. Dit water van de Schelde stroomt dan het model binnen en meteen weer buiten, maar dit veroorzaakt enorme overstromingsvolumes volgens de simulatie-log, wat de vergelijkbaarheid tussen simulatieresultaten moeilijker maakt. Als oplossing worden beide knopen terug van type 'stored' gemaakt.

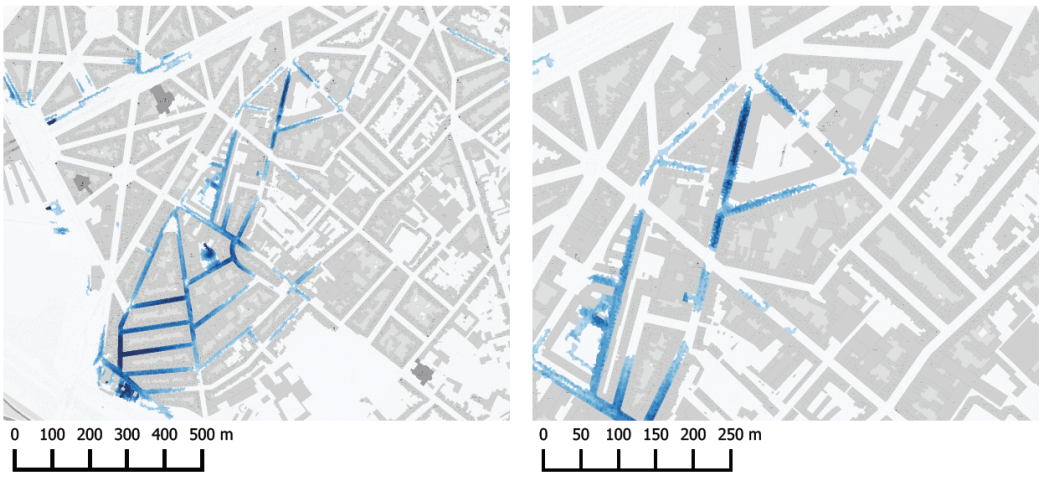
Leidingen boven het maaiveld verlagen Na de aanpassing van de maaiveldpeilen van de verschillende knopen volgens het nieuwe mesh en het grondmodel kan het voorkomen dat bepaalde leidingen nu boven het grondniveau uitsteken. Ook in de validatie van het 1D-model kwam dit al voor. Deze leidingen verschijnen na de validatie bij de verschillende waarschuwingen. Om deze onrealistische fouten aan te passen werden de op- en afwaartse niveau's van de leidingen handmatig verlaagd. Alleen de aanpassingen in het hoofdnetwerk werden uitgevoerd. Leidingen in deelnetwerken (vb. 'Petrol') die niet verbonden zijn met het hoofdnetwerk worden ongewijzigd gelaten. In tabel C.1 worden de verschillende aanpassingen samengevat.

Tabel C.1: Manuele aanpassingen van de leidingen.

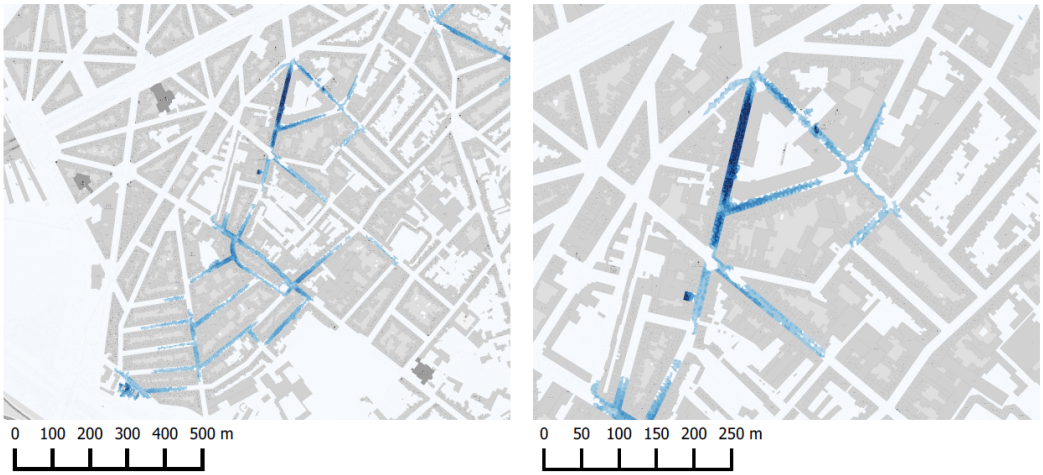
Object Type	**Object**	**Field**	**Message**	**Manuele aanpassing**
Conduit	6652.1	US invert level	Soffit above ground level.	0.5m verlaagd
Conduit	75726.2	US invert level	Invert above ground level.	0.594m verlaagd
Conduit	75726.2	DS invert level	Invert above ground level.	0.6992m verlaagd
Conduit	75739.2	US invert level	Invert above ground level.	US en DS 0.5962m en 0.4312 m verlaagd
Conduit	75740.2	DS invert level	Invert above ground level.	0.5962m verlaagd
Conduit	75740.2	US invert level	Invert above ground level.	0.699m verlaagd
Conduit	76311.1	DS invert level	Invert above ground level.	2.072m verlaagd
Conduit	76995.1	US invert level	Invert above ground level.	orientatie omgedraaid en 1.7m verlaagd
Conduit	M_0179.1	DS invert level	Soffit above ground level.	1m verlaagd
Conduit	M_0179.1	US invert level	Soffit above ground level.	1m verlaagd
Conduit	75721.1	US invert level	Invert above ground level	grondniveau naar 6m T.A.W. verhoogd

Bijlage D

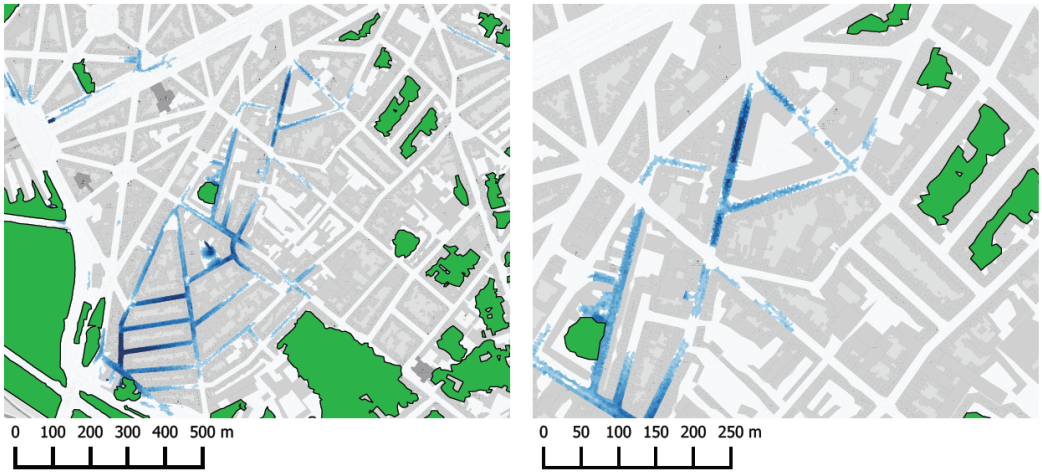
Overstromingskaarten gebruikt bij de evaluatie van het gekoppeld 1D-2D-model



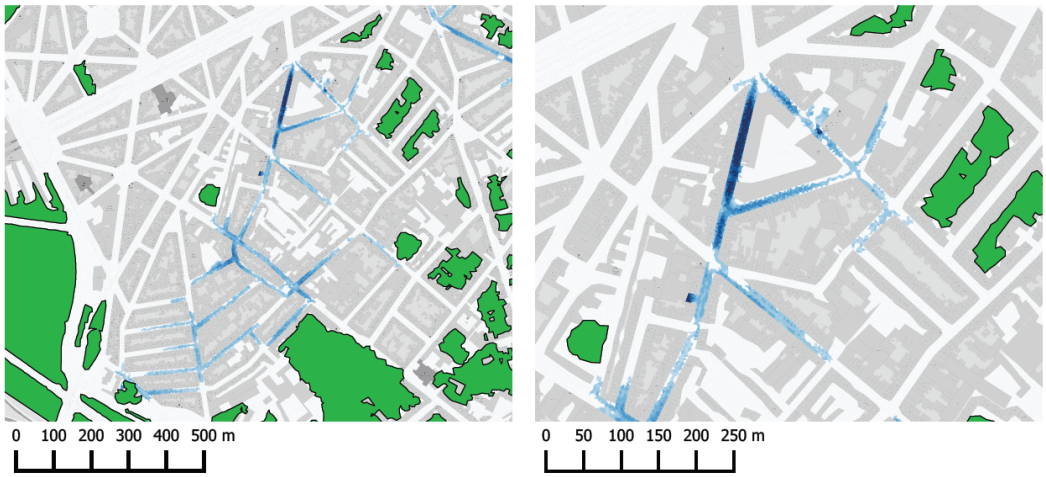
Figuur D.1: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het basismodel met fijne mesh ($15m^2$-$3.75m^2$). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



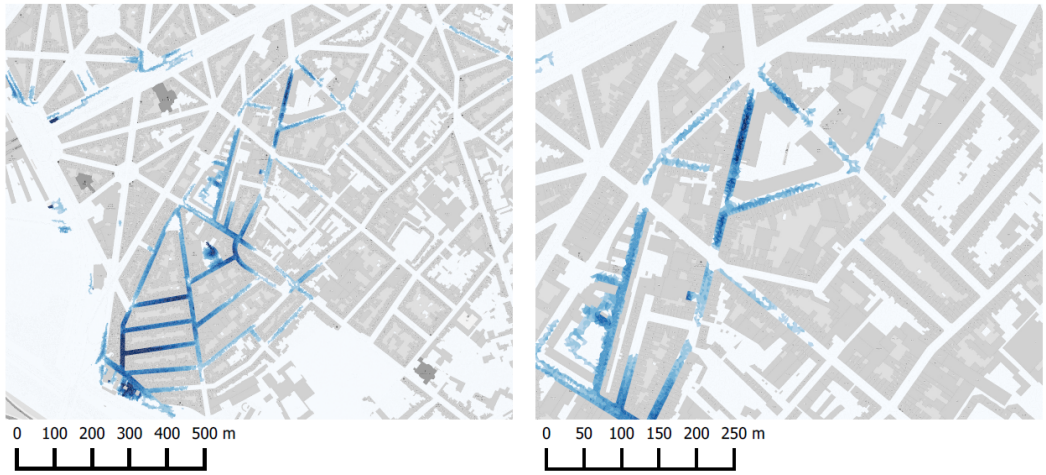
Figuur D.2: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het volgens het basismodel met fijne mesh ($15m^2$-$3.75m^2$). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



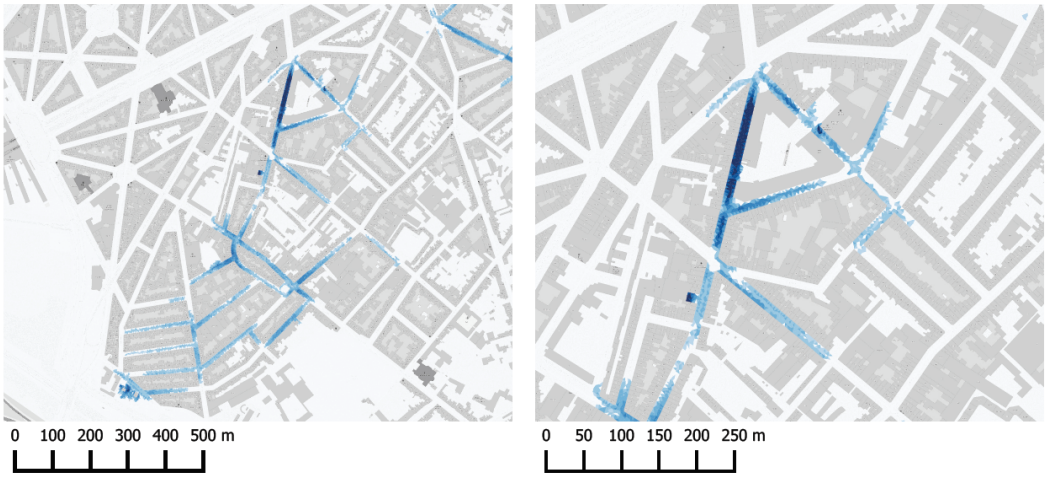
Figuur D.3: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



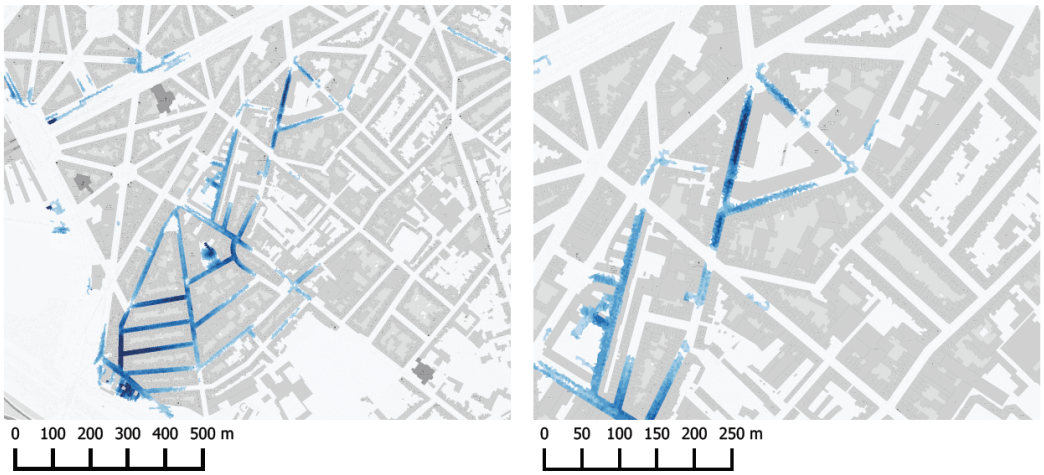
Figuur D.4: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met implementatie van infiltratiezones (groen). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



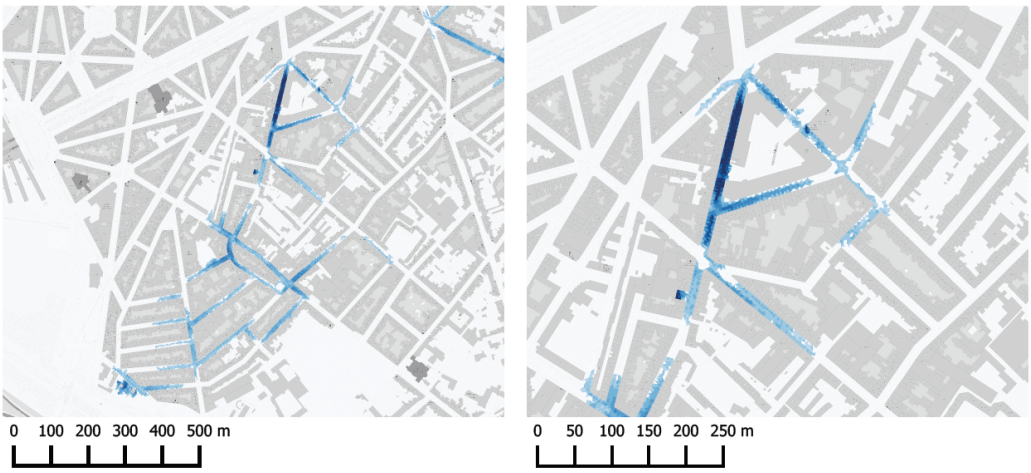
Figuur D.5: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met halvering van de debietscoëfficiënten (0.25). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



Figuur D.6: Overstromingskaart van de Brederodewijk bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met halvering van de debietscoëfficiënten (0.25). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



Figuur D.7: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 30 mei 2016 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met verdubbeling van de debietscoëfficiënten (1). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.



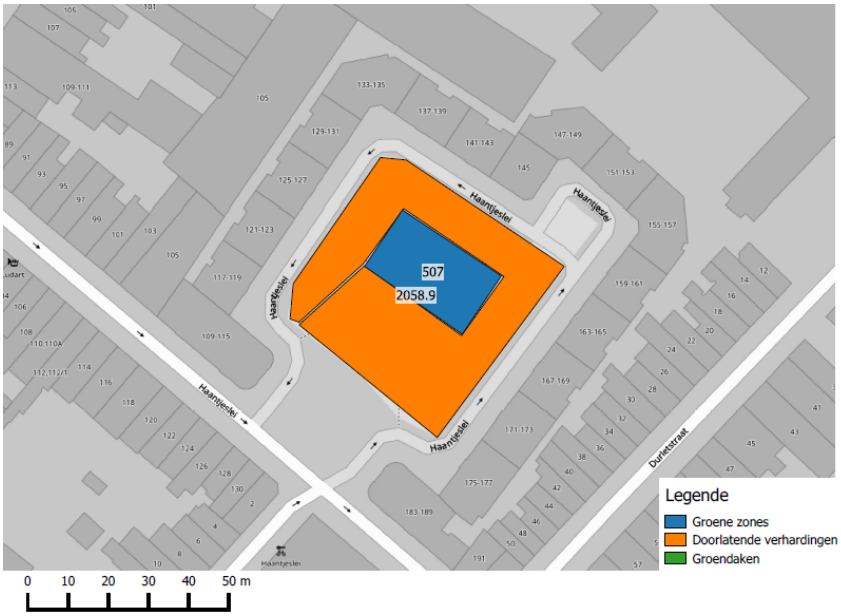
Figuur D.8: Overstromingskaart van de Brederodewijk (bui van 27 en 28 juli 2013 met de neerslaggegevens van Melsele) volgens het model met verdubbeling van de debietscoëfficiënten (1). Een legende van de overstromingen wordt gegeven in figuur 5.8.

Bijlage E

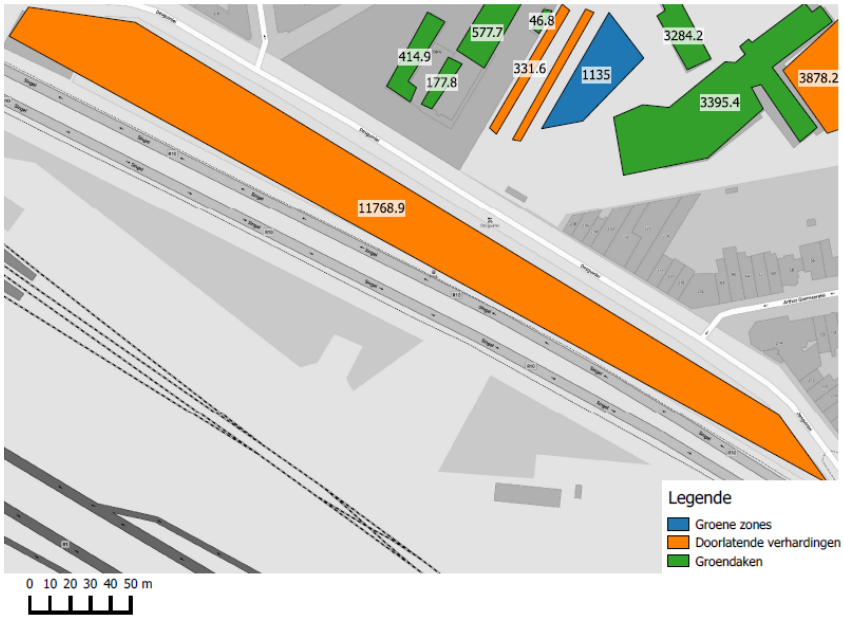
Verduidelijkende figuren bij de oplossingsvoorstellen van de lokale wateroverlast

Figuur E.1: Overzicht van de voorgestelde oplossing bij de speeltuin in de Balansstraat. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

Figuur E.2: Overzicht van de voorgestelde oplossing bij de Caswell-site. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].



Figuur E.3: Overzicht van de voorgestelde oplossingen bij het woonerf aan de Haantjeslei. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].



Figuur E.4: Overzicht van de voorgestelde oplossingen voor de parking Vlooienmarkt aan de Desguinlei. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

Figuur E.5: Overzicht van de voorgestelde oplossingen voor de parking en het gebouw van de AVA. Oppervlaktes worden op de kaart getoond in m^2. Achtergrondkaart OSM [25].

Bibliografie

[1] Q. D. T. (2017-2018). Qgis geographic information system.

[2] Aquafin, oktober 2017. overzicht infrastructuur, http://www.aquafin.be/nl/indexb.php?n=8&e=34&NISCode=11002&zvgbekken=04&ZVGCode=050.

[3] B. W. Ballard, R. Kellagher, P. Martin, C. Jefferies, R. Bray, and P. Shaffer. *The SUDS manual*. CIRIA, 2016. ISBN-978-0-86017-697-8.

[4] Belga/RR. Zware wateroverlast in antwerpen en west-vlaanderen. *Knack*, 2016. http://www.knack.be/nieuws/belgie/zware-wateroverlast-in-antwerpen-en-west-vlaanderen/article-normal-710173.html.

[5] België. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. *Besluit van de Vlaamse Regering houdende vaststelling van een gewestelijke stedenbouwkundige verordening inzake hemelwaterputten, infiltratievoorzieningen, buffervoorzieningen en gescheiden lozing van afvalwater en hemelwater*. Belgisch Staatsblad, 2013.

[6] België. Stad Antwerpen. *Stedenbouwkundige verordening van de stad Antwerpen*. Belgisch Staatsblad, 2014.

[7] N. Bernaerts. Lidl plooit voor buurtprotest. *Het Laatste Nieuws*, 2015.

[8] F. Boogaard, G. Bruins, and R. Wentink. *Wadi?s - Aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer*. Stichting RIONED, 2006.

[9] Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid. *Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen*, 2004.

[10] Dakwerken-weetjes. Prijs van een groendak. https://www.dakwerken-weetjes.be/daken/groendak/.

[11] J. De Niel, H. Tabari, and P. Willems. Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in antwerpen–samenvatting en beleidsaanbevelingen. Technical report, KU Leuven, 2015.

[12] K. De Vleeschauwer, J. Weustenraad, C. Nolf, V. Wolfs, B. De Meulder, K. Shannon, and P. Willems. Green–blue water in the city: quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods. *Water Science and Technology*, 70(11):1825–1837, 2014.

[13] S. Dhalla and C. Zimmer. *Low Impact Development Stormwater Managment Planning and Design Guide.* Toronto and Region Authority, Credit Valley Conservation Authority, Ontario, 2001.

[14] V. Donne. *Categorisering van lokale wegen, Richtlijnen, toelichting en aanbevelingen.* Agentschap Wegen en Verkeer AWV.

[15] A. en Eigenaar. Profiteer van de voordelen van een groen dak. `https://www.appartementeneigenaar.nl/vve-onderhoud/dak/profiteer-van-de-voordelen-van-een-groen-dak`.

[16] FEBESTRAL. *Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen.*

[17] Google. Google maps kaartgegevens, 2018.

[18] Innovyze, 2017. Infoworks ICM Help topics.

[19] Innovyze, november 2017. Webpagina van Innovyze over Infoworks ICM, `http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm/`.

[20] D. Kitts. Sustainable urban drainage modelling in infoworks icm.

[21] K. Liu and J. Minor. Performance evaluation of an extensive green roof. *Presentation at Green Rooftops for Sustainable Communities, Washington DC*, 1:1–11, 2005.

[22] B. Maiheu, K. Van den Berghe, L. Boelens, K. De Ridder, and L. Dirk. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor gent. Technical report, Stad Gent- afdeling milieu, 2013.

[23] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models part ia discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290, 1970.

[24] V. Ntegeka, D. Murla, and P. Willems. Development and evaluation of a coupled 1d-2d urban flood model. 2017.

[25] OpenStreetMap-auteurs. Open street map, 2017-2018.

[26] V. overheid. Waterinfo.be.

[27] A. Palla, I. Gnecco, and L. Lanza. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes*, 26(1):73–84, 2012.

[28] L. Poelmans. Modelling urban expansion and its hydrological impacts. 2010.

[29] Rio-Link. Ruimte voor water in antwerpen: een hemelwaterplan voor een veilige en aantrekkelijke toekomst. Inspiratieboek.

[30] Rio-Link, oktober 2017. Hydraulisch 1D-2D-model in Infoworks ICM.

[31] Rio-Link nv. Hemalwaterplan, overkoepelend deel antwerpen. Hemelwaterplan, 2018.

[32] Rio-Link nv. Ruimte voor water in antwerpen. Inspiratieboek, 2018.

[33] P. S. Shinde. *Multi-use of stormwater detention ponds in parks and open spaces.* PhD thesis, uga, 2002.

[34] R. Smits. *Richtlijn modelleren lokale infiltratievoorzieningen met Infoworks.* Aquafin, 2016.

[35] S. Spatari, Z. Yu, and F. A. Montalto. Life cycle implications of urban green infrastructure. *Environmental Pollution*, 159(8):2174–2179, 2011.

[36] Stad Antwerpen, oktober 2017. Data, `http://opendata.antwerpen.be/datasets/grondwaterinfiltratie`.

[37] S. A. SW/M/EHA. Kaart potentiele groendaken, 2017.

[38] P. Urbanus. Watertekorten in vlaanderen kunnen groot probleem worden. (4), 2011.

[39] G. Vaes. The influence of rainfall and model simplification on combined sewer system design., 1999.

[40] G. Vaes, R. Bouteligier, J. Berlamont, P. Willems, and G. Luyckx. *Toelichting bij de code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen.* Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2012.

[41] E. Van Lennep and S. Finn. Green roofs over dublin: A green roof policy guidance paper for dublin. *Draft guidelines for DCC to develop planning directives for the incorporation of Green Roofs in new development. Retrieved August*, 6:2013, 2008.

[42] M. Van Lierde, P. Willems, V. Wolfs, and V. Ntegeka. *Effect van bronmaatregelen langs rioleringen: Casestudie Oostakker en Sint-Amandsberg.* PhD thesis, KULeuven faculteit ingenieurswetenschappen, 2017.

[43] Vlaanderen, 2017. agentschap voor grafische informatie in vlaanderen, downloadtoepassing `https://download.agiv.be/`.

[44] M. Wang, C. Sweetapple, G. Fu, R. Farmani, and D. Butler. A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. *Journal of environmental management*, 201:145–152, 2017.

[45] P. Willems. Wetspro: Water engineering time series processing tool. *KU Leuven Hydraulics Laboratory, Leuven Belgium*, 2004.

[46] P. Willems. Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations. *Journal of hydrology*, 490:126–133, 2013.

[47] P. Willems. *Waterloopmodellering: algemene methodologie voor numerieke modellering van waterlopen.* 2013.

[48] P. Willems, J. De Niel, and H. Tabari. Modellering en beleidsaanbevelingen ten aanzien van neerslag in antwerpen–validatie aan overstromingsgegevens: Rapport validatie. Technical report, KU Leuven-Afdeling Hydraulica, 2016.

[49] V. Wolfs. Conceptual model structure identification and calibration for river and sewer systems, 2016.

Fiche masterproef

Studenten: Daan Bertels
Lars Janssen

Titel: Duurzame maatregelen tegen wateroverlast in de stedelijke omgeving, casestudie Antwerpen

Engelse titel: Sustainable solutions to reduce the urban flood risk, casestudy Antwerp

UDC: 69

Korte inhoud:

Deze masterproef onderzoekt het effect dat bronmaatregelen kunnen hebben op stedelijke overstromingen. Deze kleinschalige en flexibele installaties bufferen het water voor dat het de rioleringen in stroomt, zijn efficiënt in meerdere toekomstige klimaatsveranderingen en zijn bovendien in staat om ook andere negatieve effecten van verstedelijking op de waterhuishouding aan te pakken. Als casestudie wordt er gekeken naar het centrum van Antwerpen, meer bepaald de westelijke helft van het gebied binnen de ring. De focus zal voornamelijk liggen op een grootschalige toepassing van groendaken, maar ook doorlatende verhardingen en groene infiltratiebekkens komen aan bod. Om de positieve effecten te begroten, wordt een bestaand 1D-hydrodynamisch model gevalideerd aan historische overstromingsgegevens en vervolgens gekoppeld aan een nieuw 2D-oppervlakte overstromingsmodel. Een ander model dat wordt opgesteld, is een conceptueel rioleringsmodel dat de verschillende fysische processen in het gebied aggregeert om zo veel kortere rekentijden te behalen. Zo kunnen ook lange termijn simulaties uitgevoerd worden. De wateroverlast wordt systematisch aangepakt door in een eerste fase drie gebieden te identificeren die volgens de modellen gevoelig zijn aan rioleringsoverstromingen. Vervolgens worden negen locaties gekozen waar de drie bestudeerde bronmaatregelen worden toegepast. Het resultaat is een vermindering van de overstromingsvolumes in het volledige gebied met 18%, voor de historische bui van 30 mei 2016. In een tweede fase wordt een kaart opgesteld van het potentieel aan groendaken voor het studiegebied. Op basis van deze kaart worden strategische scenario's van implementatie van deze daken opgesteld en worden simulaties uitgevoerd, zowel in het gedetailleerde 1D-2D model, als met het conceptueel model. Hieruit blijkt dat deze bronmaatregelen in staat zijn om de overstromingen met een belangrijke factor te reduceren. Ook de frequentie waarmee overstromingen of bepaalde piekvolumes in de rioleringen zullen voorkomen, nemen af door het toepassen van groendaken.

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

Promotor: Prof. dr. ir. P. Willems

Assessor:

Begeleider: Dr. ir. V. Wolfs