



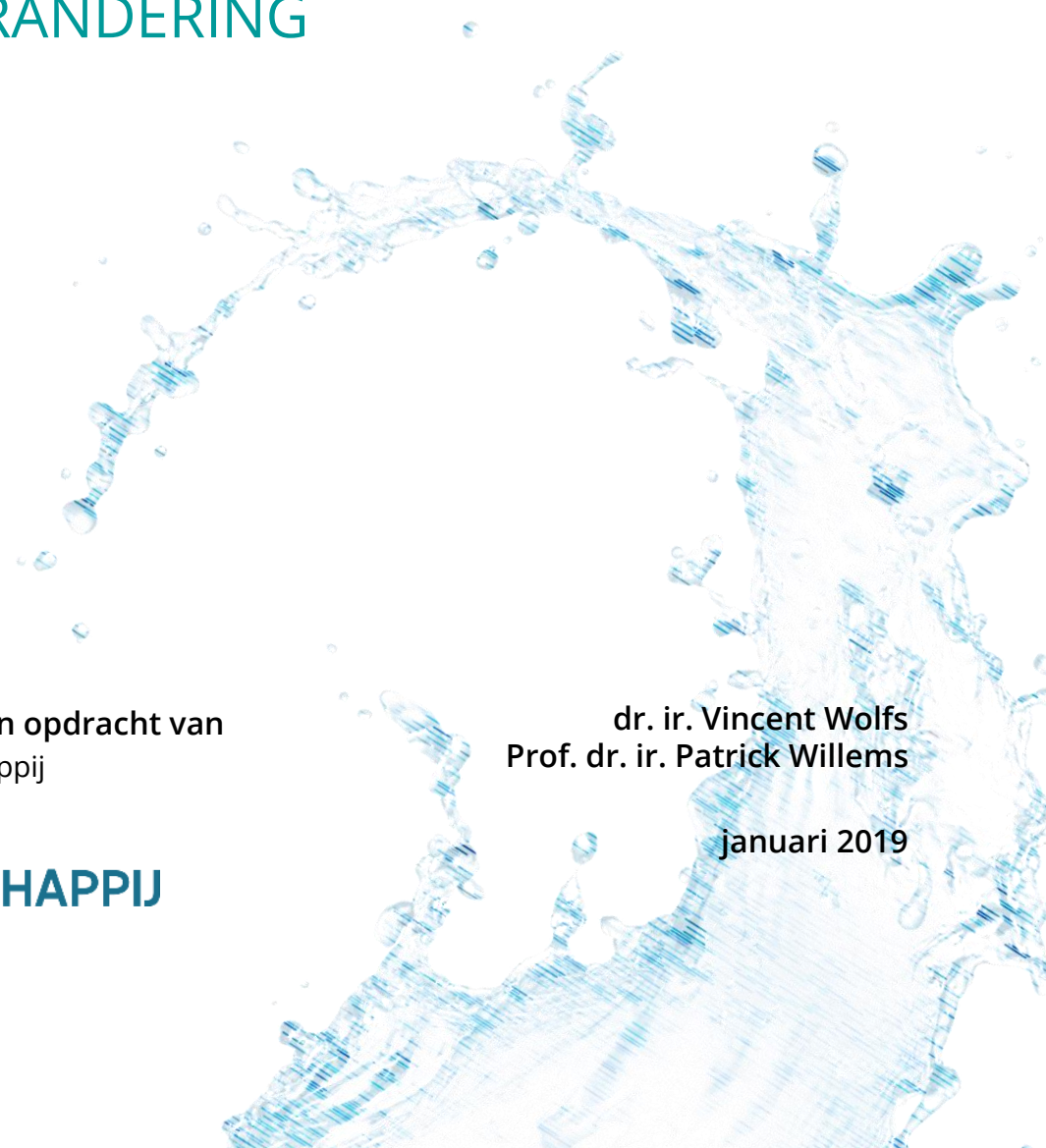
ANALYSE HISTORISCHE DROOGTE EN
ONTWERPRICHTLIJNEN
BRONMAATREGELEN ONDER
KLIMAATVERANDERING

Opdracht uitgevoerd in opdracht van
Vlaamse Milieumaatschappij

**VLAAMSE
MILIEUMAATSCHAPPIJ**

dr. ir. Vincent Wolfs
Prof. dr. ir. Patrick Willems

januari 2019



DOCUMENTIDENTIFICATIE

Titel Analyse historische droogte en ontwerprichtlijnen bronmaatregelen onder
klimaatverandering.

Opdrachtgever Vlaamse Milieumaatschappij

CONTACT

Contactpersoon dr. ir. **VINCENT WOLFS**
Tel.: +32 474 422 003
Mail: vincent.wolfs@sumaquab.be

Correspondentieadres Sumaquab
Tiensesteenweg 28
3001 Leuven, BELGIUM

INHOUD

INLEIDING	1
1 NEERSLAGGREEKSEN ONDER HET HUIDIG EN TOEKOMSTIG KLIMAAT	3
1.1 Neerslagreeksen huidig klimaat	3
1.2 Neerslagreeksen toekomstig klimaat	3
2 ANALYSE DROOGTEPERIODES 2017 EN 2018	6
3 ANALYSE VAN HET ONTWERP VAN KLEINSCHALIGE BRONMAATREGELEN ONDER HUIDIG EN TOEKOMSTIG KLIMAAT	11
3.1 Overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer	11
3.2 Analyse van de equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerp van infiltratievoorzieningen bij een verhoogd hergebruik	15
3.3 Analyse van de leegstand van hemelwaterputten	20
3.3.1 Nodige capaciteit om historische droogteperiodes te overbruggen	21
3.3.2 Nodige capaciteit om leegstandspercentages te bereiken	27
3.3.3 Analyse implicaties op drinkwaterverbruik	30
4 CONCLUSIES	33
5 AANGELEVERDE BESTANDEN	36

5.1	Tijdreeksen toekomstig klimaat	36
5.2	Overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer	36
5.3	Analyse equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerp van infiltratievoorzieningen bij verhoogd hergebruik	36
6	REFERENTIES	38
	BIJLAGE A: BIJKOMENDE FIGUREN OVERSTORTVOLUMES BUFFERVOORZIENINGEN MET LINEAIRE DOORVOER	39
	BIJLAGE B: ANALYSE IMPLICATIES OP DRINKWATERVERBRUIK - HERGEBRUIK 150 L/DAG	41

INLEIDING

Doel van de opdracht

Dit rapport geeft een impactanalyse van klimaatverandering op kleinschalige buffervoorzieningen en regenwaterputten. Concreet worden verschillende aspecten hieraan gerelateerd geanalyseerd:

- Neerslag- en verdampingsreeksen voor het huidig en toekomstig klimaat
- Analyse van de droogteperiodes van 2017 en 2018
- Analyse van het ontwerp van kleinschalige bronmaatregelen:
 - Overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer
 - Analyse van de equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerpen van infiltratievoorzieningen bij verhoogd hergebruik
 - Analyse van de leegstand van hemelwaterputten: nodige capaciteit om historische droogteperiodes te overbruggen, om bepaalde leegstandspercentages te bereiken en een inschatting van de implicaties op drinkwaterverbruik

1 Neerslagreeksen onder het huidig en toekomstig klimaat

1.1 Neerslagreeksen huidig klimaat

Vlaanderen beschikt over een unieke tijdreeks met 10-minuten neerslagintensiteiten van 1898 tot heden, gemeten in Ukkel. De Vlaamse Milieumaatschappij gebruikt deze reeks voor onderzoek naar hydrologische impactanalyses van klimaatverandering voor de Vlaamse stroomgebieden, maar ook voor analyses van bronmaatregelen. De huidige ontwerpnormen van bronmaatregelen zijn dan ook gebaseerd op die lange tijdreeks.

Analyse van die neerslagreeks toont echter een tendens van stijgende neerslagextremen in de afgelopen decennia (zie bijvoorbeeld Willems, 2013a). Omdat de neerslagpatronen de laatste decennia significant gewijzigd zijn, is de historische tijdreeks van 1898 tot heden niet meer representatief voor het huidig klimaat. Daarom werden de neerslag- en verdampingsreeksen van Ukkel aangepast via de kwantielperturbatiemethode aan het klimaat van de laatste 30 jaar (Willems & Vrac, 2011; Willems, 2013b). Het klimaat van de laatste 30 jaar wordt hierbij beschouwd als het "huidig klimaat". De methode behoudt bewust de langjarige natuurlijke neerslagvariabiliteit (de neerslagschommelingen). De methode en toepassing wordt uitgebreid beschreven in Willems et al. (2018a). De aangepaste meetreeks wordt verder aangeduid als de "gedetrende Ukkelreeks".

Deze studie beschouwt daarom de gedetrende Ukkelreeks voor het huidig klimaat. Daarnaast wordt de historische neerslagreeks eveneens doorgerekend in de simulaties. Zo kunnen de impactanalyses voor de gedetrende reeks, historische reeks (waarop de huidige normen gebaseerd zijn) en de reeksen representatief voor klimaatverandering geanalyseerd worden.

1.2 Neerslagreeksen toekomstig klimaat

Naast de historische (en gedetrende) tijdreeksen van neerslag en potentiële verdamping (pET), beschouwt deze studie ook reeksen representatief voor klimaatscenario's met tijdshorizonten 2050 en 2100. Om de impact van klimaatverandering in rekening te brengen, werden de gedetrende neerslag- en verdampingsreeksen van Ukkel, m.a.w. de historische meetreeksen die werden bijgestuurd om representatief te zijn voor het klimaat anno 2016, geperturbeerd voor de verschillende klimaatscenario's (laag-midden-hoog) en tijdshorizonten (2030, 2050 en 2100). Tijdshorizon 2030 werd dus ook bijkomend aangemaakt voor eventuele analyses die de VMM wenst uit te voeren, maar deze tijdshorizon wordt niet verder gebruikt in voorliggende studie.

Voor elke combinatie van laag-midden-hoog klimaatscenario's met horizonten 2030, 2050 en 2100 worden neerslag- en pET-reeksen aangemaakt op basis van de gedetrende neerslag- en pET-reeksen van Ukkel. Dit gebeurde voor de volgende twee periodes en neerslag-pET combinaties:

- 1901 – 2016: 10-minuten Ukkel neerslagreeks met 1-dag pET-reeks op basis van de Bultot-methode
- 1898 – 2016: 10-minuten Ukkel neerslagreeks met 1-dag pET-reeks op basis van de Hargreaves-methode

Deze tijdreeksen worden eveneens mee opgeleverd met deze studie. Bij het gebruik van deze reeksen is het van belang dat deze correct gecombineerd worden in simulaties:

- De neerslagreeks voor de periode 1901-2016 moet gecombineerd worden met de pET-reeks volgens de Bultot-methode.
- De neerslagreeks voor de periode 1898-2016 moet gecombineerd worden met de pET-reeks volgens de Hargreaves-methode.

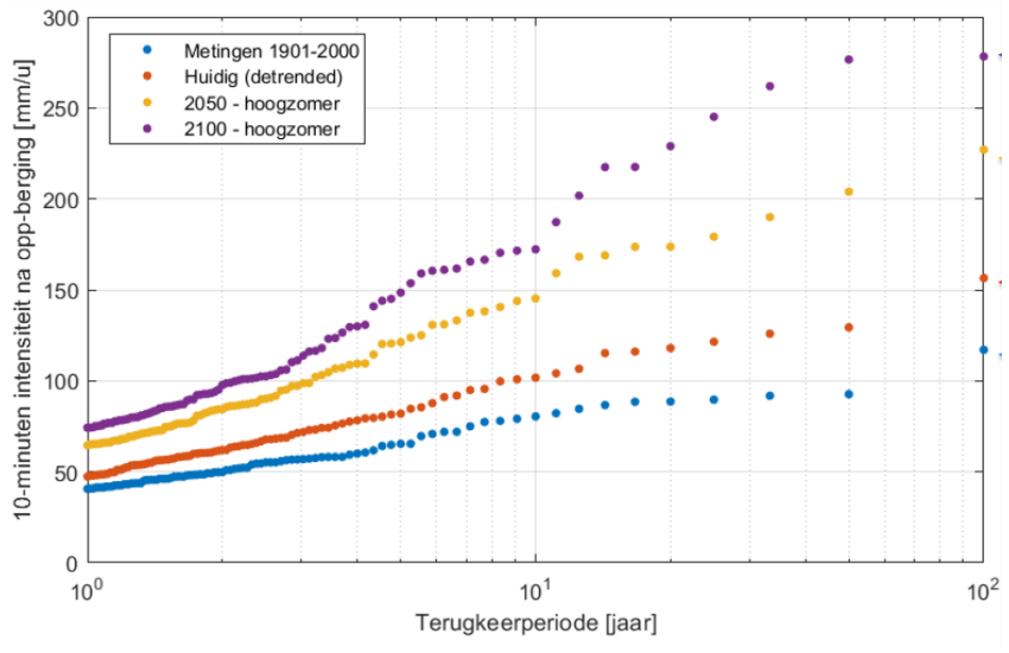
Merk op dat de Bultot- en Hargreaves methodes systematisch verschillende verdampingswaarden opleveren. Deze opdracht stelt zich niet de vraag welke van de twee methodes het beste is. Dit hangt immers voor de meeste toepassingen ook samen met de methode die gebruikt werd bij de (hydrologische) modelkalibratie. We verwachten wel dat de Bultot-methode een nauwkeurigere PET-inschatting toelaat, aangezien deze gebaseerd is op een groter aantal meteorologische variabelen.

Verder werden de neerslag- en pET-reeksen van de historische metingen en de gedetrende reeks op twee manieren geperturbeerd. De perturbaties verschillen doordat een andere aanpak gevolgd werd bij het vastleggen van de referentieperiodes:

- Voor de oorspronkelijke (niet-gedetrende) meetreeksen wordt gesteld dat de reeks gecentreerd is rond een jaartal ergens in het midden van de reeks. Die periode is niet meer representatief voor het huidig klimaat. Er worden op de oorspronkelijke reeksen dus perturbaties toegepast die sterker zijn dan de perturbaties op basis van de klimaatveranderingssignalen van 2016 tot 2030, 2050 of 2100 om dit te compenseren. Zo wordt er indirect rekening gehouden met de klimaattrend die reeds aanwezig is in de historische waarnemingen.
- De gedetrende reeksen zijn echter wel al representatief voor het huidig klimaat (anno 2016). De perturbaties op de gedetrende reeks houden dus enkel rekening met de klimaatveranderingssignalen van 2016 tot 2030, 2050 of 2100, zonder bijkomende correctie.

In feite houden bij methodes dus rekening met de reeds waargenomen klimaatverandering, maar wel op een zeer verschillende manier. Het (artificieel) verhogen van de klimaatperturbatiefactoren van de oorspronkelijke (niet-gedetrende) meetreeks is een indirecte en minder correcte manier dan de aanpassing die gebeurd is bij de gedetrende reeksen. Omdat het verschil in de toegepaste perturbaties voor een deel het verschil kan verklaren tussen de impactresultaten berekend op basis van de geperturbeerde oorspronkelijke reeksen en deze op basis van de geperturbeerde gedetrende reeksen, werden de gedetrende reeksen ook een keer geperturbeerd volgens dezelfde aanpak als voor de oorspronkelijke reeksen. Zo kan eventueel de invloed van dit verschil in aanpak onderzocht worden. In de naamgeving van de geperturbeerde gedetrende reeksen verwijst "c" naar dezelfde aanpak als gevolgd voor de oorspronkelijke reeksen; deze aanpak is dus niet correct maar is enkel toegepast om de invloed van het verschil in aanpak (indien gewenst) te kunnen analyseren. De naamgeving "ac" verwijst naar de correcte aanpak waarbij 2016 als referentiejaar wordt beschouwd voor het berekenen van de perturbaties op de gedetrende reeksen.

Voor de eenvoud beschouwt deze studie enkel de gedetrende reeks die geperturbeerd werd waarbij 2016 als referentiejaar gebruikt werd. De andere methodes werden niet verder gebruikt, maar de bestanden werden wel mee opgeleverd met deze studie. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht en beschrijving van de aangeleverde bestanden.

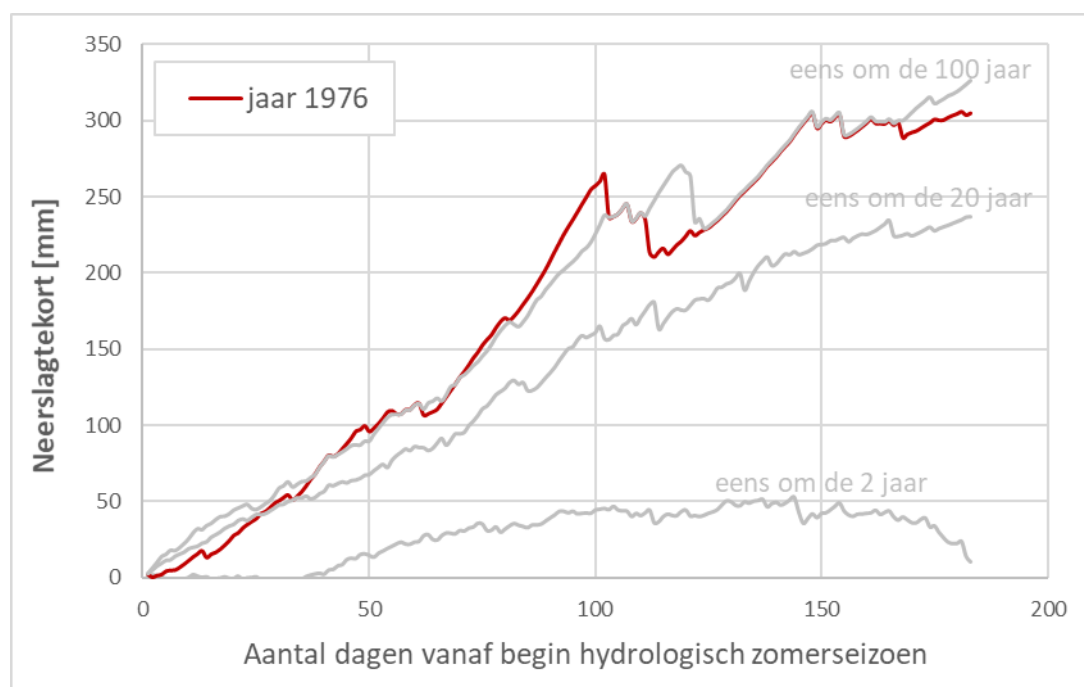


Figuur 1: 10-minuten neerslagintensiteiten voor de metingen 1901-2000 in Ukkel, de gedetrende Ukkelreeks, en de intensiteiten in het hoogzomer klimaatscenario 2050 en 2100.

2 Analyse droogteperiodes 2017 en 2018

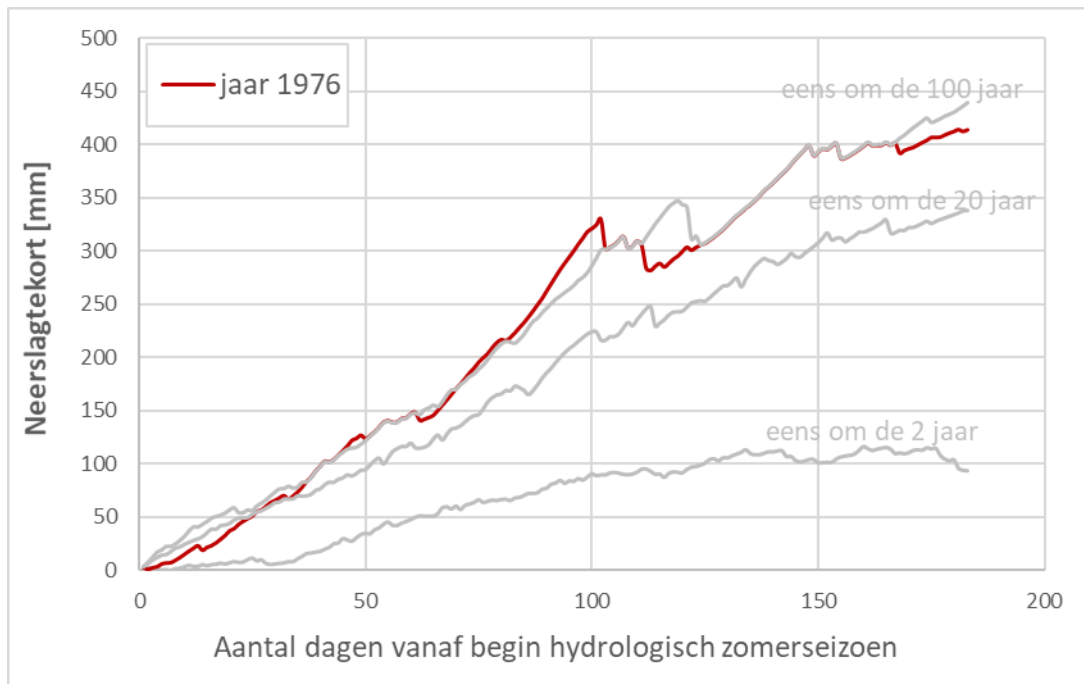
In deze taak werd onderzocht hoe uitzonderlijk de droogteperiodes van 2017 en 2018 waren, evenals hoe frequent deze in de toekomst zullen voorkomen. Deze analyse maakt gebruik van de resultaten van de studie "Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen" van VMM en Sumaqua (2018). In die studie werd een statistische analyse uitgevoerd van het "doorlopend potentieel neerslagtekort", hierna kortweg neerslagtekort genoemd. Dit neerslagtekort werd berekend door het verschil tussen de gevallen neerslag en de referentiegewasverdamping dagelijks te sommeren en dit gedurende het hydrologisch zomerseizoen van elk jaar, d.i. van 1 april t.e.m. 30 september. Door deze cumulatieve som dagelijks te plotten versus de tijd wordt voor elke dag in het hydrologische zomerseizoen het neerslagtekort bekomen.

In de studie van VMM en Sumaqua (2018) werd de statistische analyse van het neerslagtekort uitgevoerd op basis van de 100-jaar neerslaggegevens en de gegevens van de potentiële evapotranspiratie (ETP) via de Bultot-methode van het KMI te Ukkel. Zie het samenvattend resultaat van die analyse in Figuur 2. De droge periode van 1976 blijkt daarbij samen met die van 1921 bij de twee droogste zomerperiodes te horen.



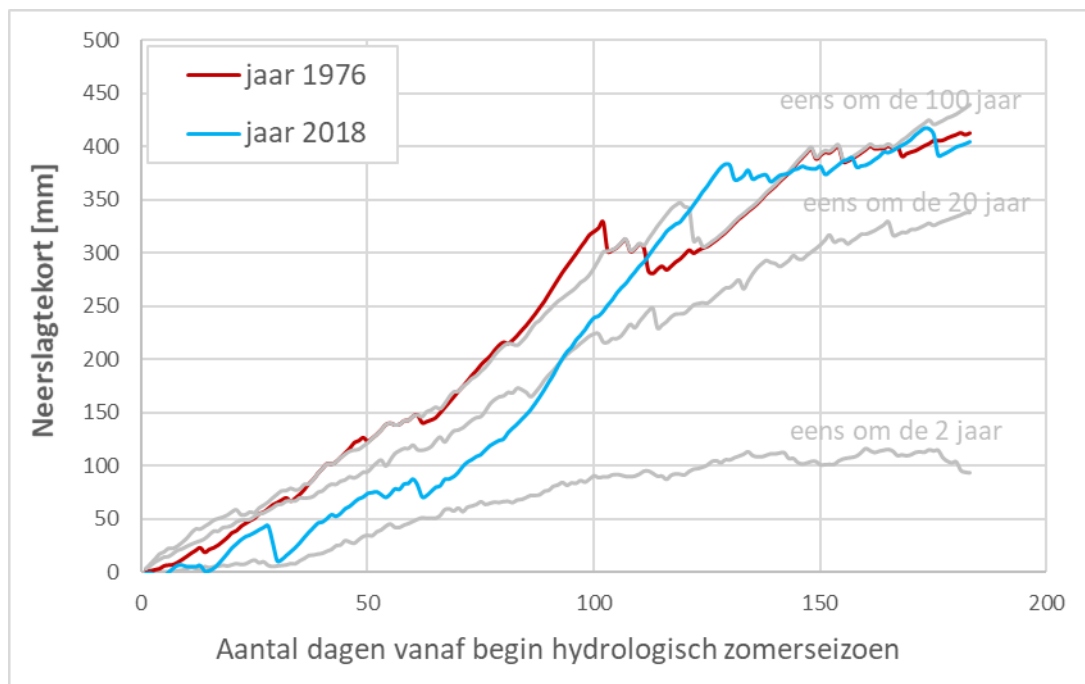
Figuur 2: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen te Ukkel voor trendcorrectie, met aanduiding van de terugkeerperioden van 2, 20 en 100 jaar (de 50-, 5, en 1-percentielen) en de droogte van 1976.

Inmiddels werden op de neerslag- en ETP-reeksen te Ukkel trendcorrecties toegepast (Ntegeka et al., 2017). De neerslagtekort-statistieken werden daarom in deze opdracht geactualiseerd op basis van deze reeksen na trendcorrectie. Zie de aangepaste statistieken in Figuur 3. Het neerslagtekort voor een terugkeerperiode van 100 jaar en na 150 dagen in het hydrologisch zomerseizoen stijgt daarbij van afgerond 300 mm (voor trendcorrectie) naar afgerond 400 mm (na trendcorrectie). Voor een terugkeerperiode van 20 jaar gaat deze stijging van 220 mm naar 300 mm.

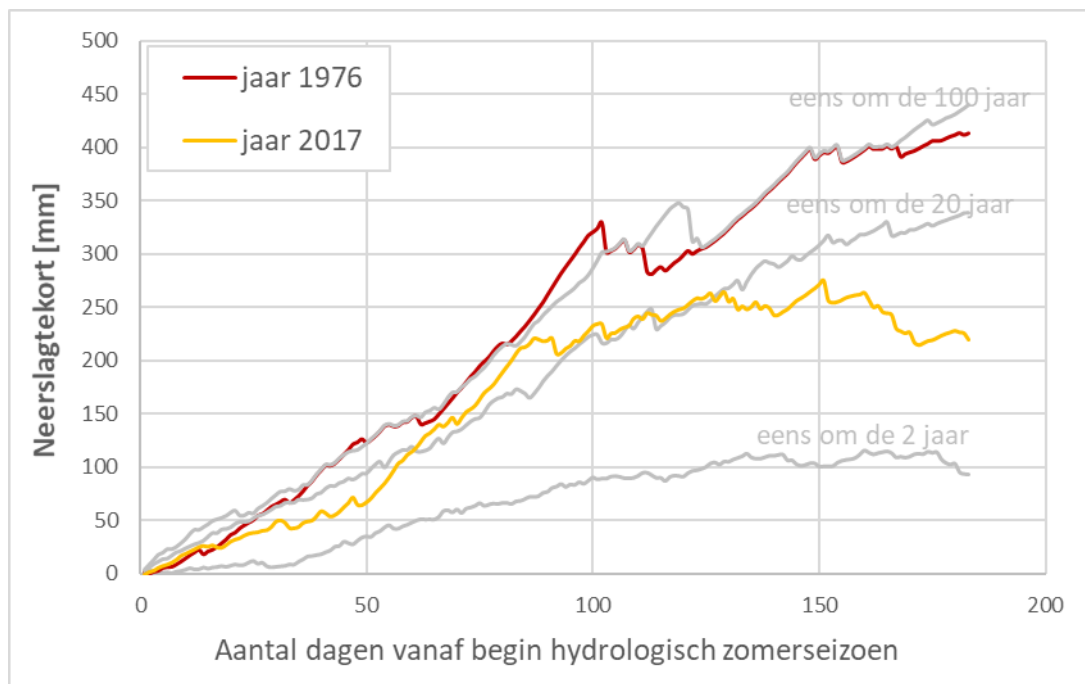


Figuur 3: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen te Ukkel na trendcorrectie, met aanduiding van de terugkeerperioden van 2, 20 en 100 jaar (de 50-, 5, en 1-percentielen) en de droogte van 1976.

Vergelijking van de aangepaste neerslagtekortstatistieken met de meteorologische gegevens van 2018 en 2017 voor centrum Vlaanderen (Figuur 4 en Figuur 5) geven aan dat de droogte van 2018 vergelijkbaar is met deze van 1976, dus een benaderende terugkeerperiode heeft van grootteorde 50 jaar en dit vanaf een duurtijd van ongeveer 110 dagen. De droogte van 2017 bereikte een benaderende terugkeerperiode van grootteorde 20 jaar na 90 tot 130 dagen in het hydrologisch zomerseizoen. Voor grotere duurtijden was de terugkeerperiode lager.



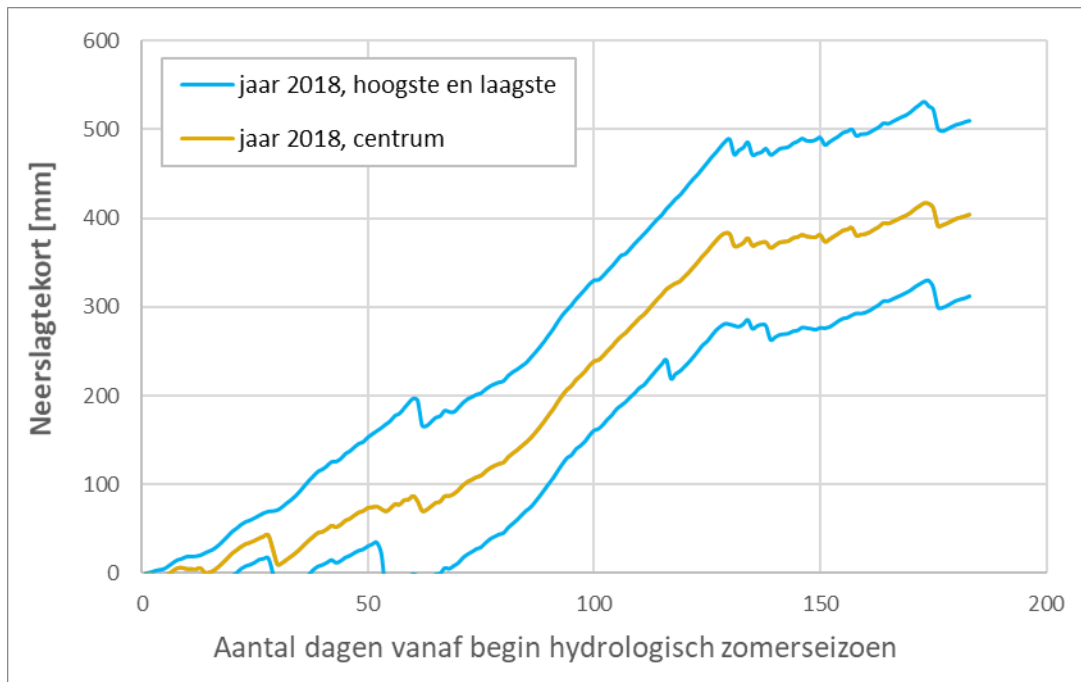
Figuur 4: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen te Ukkel na trendcorrectie, met aanduiding van de terugkeerperioden van 2, 20 en 100 jaar (de 50-, 5, en 1-percentielen) en de jaren 1976 en 2018.



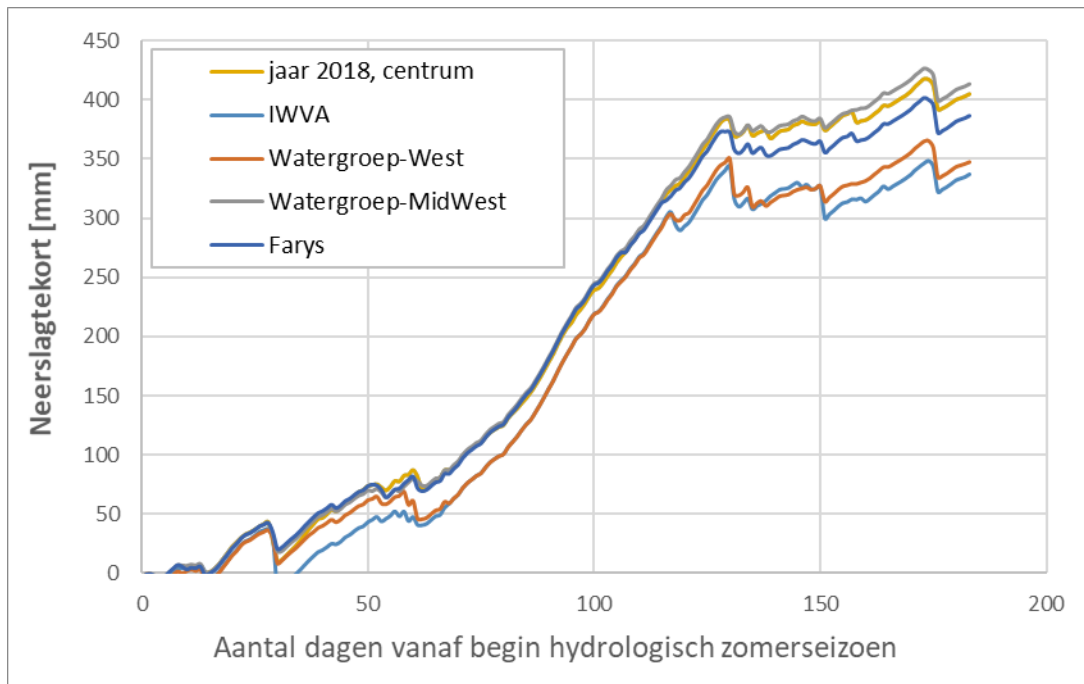
Figuur 5: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen te Ukkel na trendcorrectie, met aanduiding van de terugkeerperioden van 2, 20 en 100 jaar (de 50-, 5, en 1-percentielen) en de jaren 1976 en 2017.

Het cumulatief neerslagtekort werd in de vorige figuren geanalyseerd voor Ukkel en centrum Vlaanderen. Uiteraard zijn er ruimtelijke verschillen. Figuur 6 geeft aan binnen welke grenzen dit neerslagtekort varieerde over Vlaanderen. Het laagste neerslagtekort deed zich voor in het

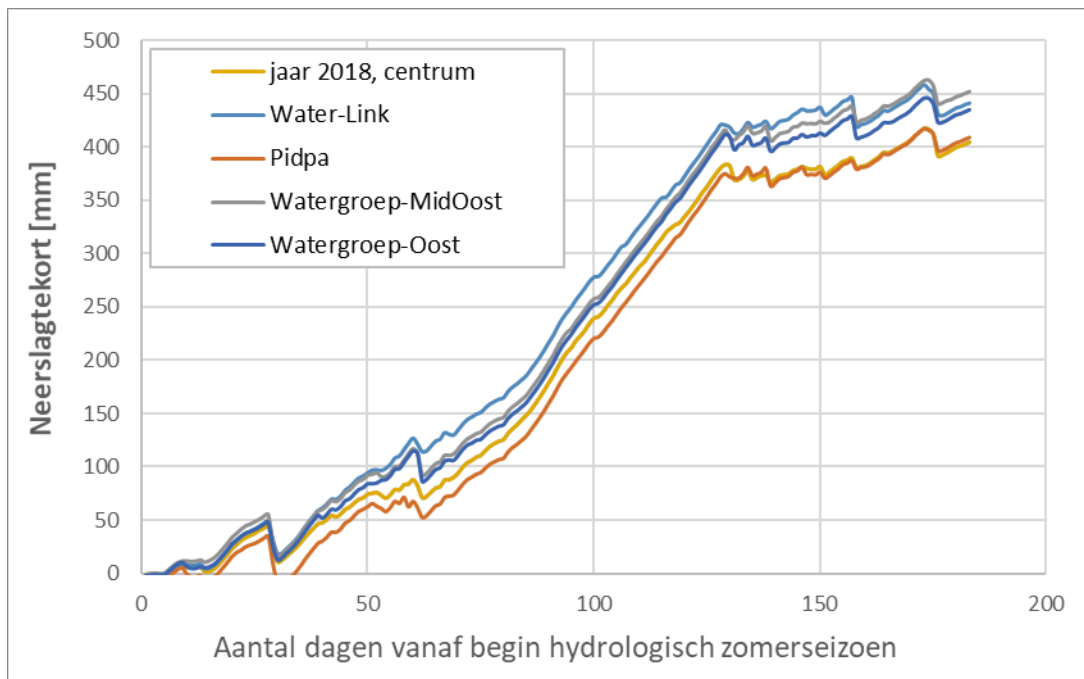
zuidwesten van Vlaanderen (station Poperinge); het hoogste in het binnenland en het oosten van Vlaanderen (hoogste in station Melsele). Verwijzend naar de statistische analyse van het drinkwaterverbruik in taak 1 worden in Figuur 7 en Figuur 8 de verschillen getoond voor de gemiddelde meteorologische condities binnen elk van de bevoorradingsgebieden van de verschillende Vlaamse drinkwatermaatschappijen. Hieruit blijkt opnieuw de iets lagere neerslagtekorten voor de westelijke zones en de iets hogere in de oostelijke zones.



Figuur 6: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen 2018 voor de meteorologische condities in centrum Vlaanderen en deze met de hoogste en laagste neerslagtekorten in Vlaanderen.



Figuur 7: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen 2018 voor de meteorologische condities in centrum Vlaanderen en de bevoorradingsgebieden van de drinkwatermaatschappijen in het westen van Vlaanderen.



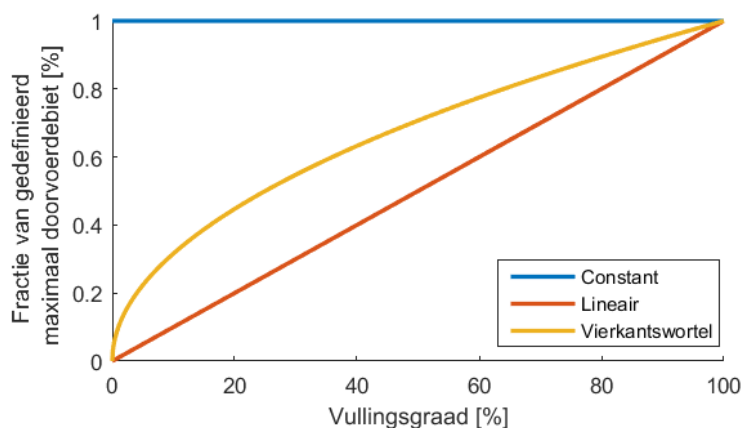
Figuur 8: Tijdsvariatie van het cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen 2018 voor de meteorologische condities in centrum Vlaanderen en de bevoorradingsgebieden van de drinkwatermaatschappijen in het oosten van Vlaanderen.

3 Analyse van het ontwerp van kleinschalige bronmaatregelen onder huidig en toekomstig klimaat

3.1 Overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer

Klimaatverandering brengt grotere neerslagextremen, vooral in de zomer. Hierdoor zal het aantal overstorten van bronmaatregelen en rioleringen kunnen toenemen. Deze paragraaf kwantificeert deze mogelijke toename van aantal overstorten voor verschillende configuraties van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer. **Volgende configuraties van buffervoorzieningen werden gesimuleerd:**

- Maximale bergingscapaciteiten van 10 tot 500 m³/ha met tussenstappen van 10 m³/ha.
- Maximale doorvoerdebieten van 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 en 50 l/s/ha.
- Doorvoerdebiet constant of lineair variërend met de vullingsgraad. Bij een constant doorvoerdebiet doet het opgegeven doorvoerdebiet zich altijd voor van zodra de buffer deels gevuld is. In geval van een "lineaire" relatie is het doorvoerdebiet lineair afhankelijk van de vullingsgraad. Enkel bij volledige vulling (en dus op moment van overstort) zal het maximale doorvoerdebiet bereikt worden. Merk op dat als 3^{de} optie eventueel nog een vierkantswortel-relatie beschouwd kan worden. De resultaten met deze 3^{de} optie bevinden zich echter tussen beide opties in (zie Figuur 9). Deze optie is dan ook niet beschouwd in deze analyse.



Figuur 9: Verhouding van het optredende doorvoerdebiet in functie van het gedefinieerd maximaal debiet en de vullingsgraad van het reservoir tijdens simulaties voor 3 opties.

In het totaal werden dus 500 verschillende combinaties van doorvoerdebieten en capaciteiten gesimuleerd, en dit voor een constante en lineaire doorvoerrelatie (dus 1000 configuraties in het totaal).

Er worden simulaties uitgevoerd voor 4 tijdreeksen:

- De historische meetreeks 1901-2000
- De gedetrende reeksen van Ukkel, representatief voor het huidig klimaat
- De geperturbeerde reeksen van Ukkel (na detrending) volgens het hoogzomer-klimaatsscenario met tijdshorizon 2050

- De geperturbeerde reeksen van Ukkel (na detrending) volgens het hoogzomer-klimaatsscenario met tijdshorizon 2100

Bij de analyses onder klimaatverandering beschouwt de studie het hoogzomer-klimaatsscenario. Dit scenario geeft de grootste (dus meest nefaste) impact van alle beschouwde klimaatscenario's op rioleringsoverstromingen. **De verandering van overstorten beschreven in deze studie zijn voor dit hoge impactscenario. Men kan met grote waarschijnlijkheid aannemen dat de rioleringsoverstromingen in de toekomst tussen die van het "huidig klimaat" en het gerapporteerd "toekomstig klimaat" liggen.**

Om deze tijdreeksen door te rekenen werd gebruik gemaakt van het rekenhart van Sirio. Dit rekenhart werd ontworpen om langetermijn neerslag- en verdampingsreeksen te simuleren voor hydraulische ontwerpen, en de resultaten statistisch te analyseren. Er werd geen oppervlakteberging in rekening gebracht. Alle tijdreeksen werden doorgerekend met een tijdstap van 2 minuten en met een concentratietijd van 10 minuten (dit is de laagst mogelijke concentratietijd). De resultaten werden voor deze analyse uurlijks opgeslagen en geanalyseerd. Overstortgebeurtenissen werden als onafhankelijk beschouwd wanneer er minstens gedurende 12 uur geen overstortdebiet gesimuleerd is.

Volgende resultaten werden toegevoegd aan de opgeleverde bestanden van deze studie:

- 8 tabellen (.xlsx) met het aantal overstorten in 100 jaar. Elke tabel omvat alle beschouwde configuraties voor 1 klimaatscenario (historisch 1901-2000, huidig klimaat, 2050 of 2100) en doorvoerrelatie (constant of lineair).
- 8 tabellen (.xlsx) met de onafhankelijke overstortvolumes, vermelding van de duur van de overstortgebeurtenis en het beginmoment van de overstort. Elke tabel omvat alle beschouwde configuraties voor 1 klimaatscenario (historisch 1901-2000, huidig klimaat, 2050 of 2100) en doorvoerrelatie (constant of lineair).

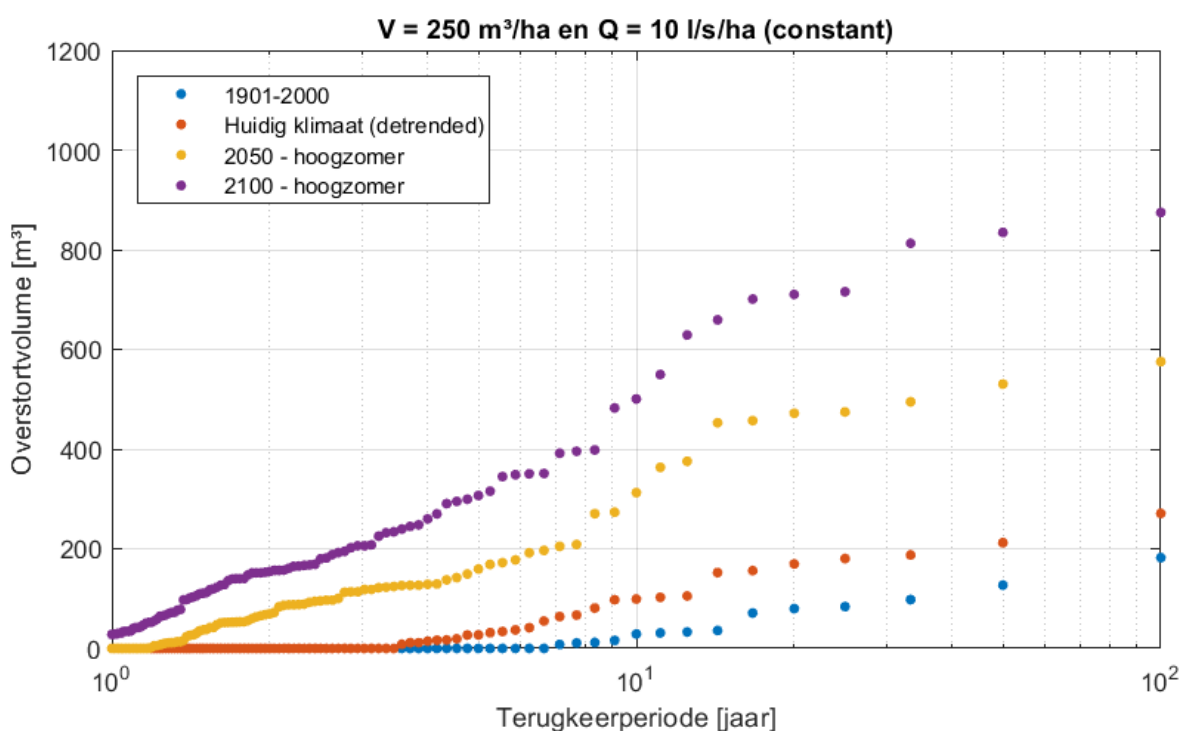
De belangrijkste resultaten worden hieronder ook kort toegelicht.

Tabel 1 toont het **aantal overstorten** over de 100-jarige simulatieperiodes voor enkele configuraties van buffervoorzieningen zoals die vaak voorkomen in Vlaanderen. Uit de tabel is onmiddellijk de zeer sterke stijging van het aantal gesimuleerde overstorten op te merken. De relatieve stijging is het meest uitgesproken voor de buffervoorzieningen die nu het minst vaak overstorten. Dit is logisch, aangezien het hoogzomer-klimaatsscenario vooral een impact heeft op de meest extreme piekregens (zie ook Figuur 1, pagina 5). Er is ook reeds een groot verschil (factor 2 tot 7 voor de getoonde configuraties) waarneembaar tussen de historische reeks 1901-2000 en het huidig klimaat (op basis van de gedetrende Ukkelreeks, zie ook §1.1).

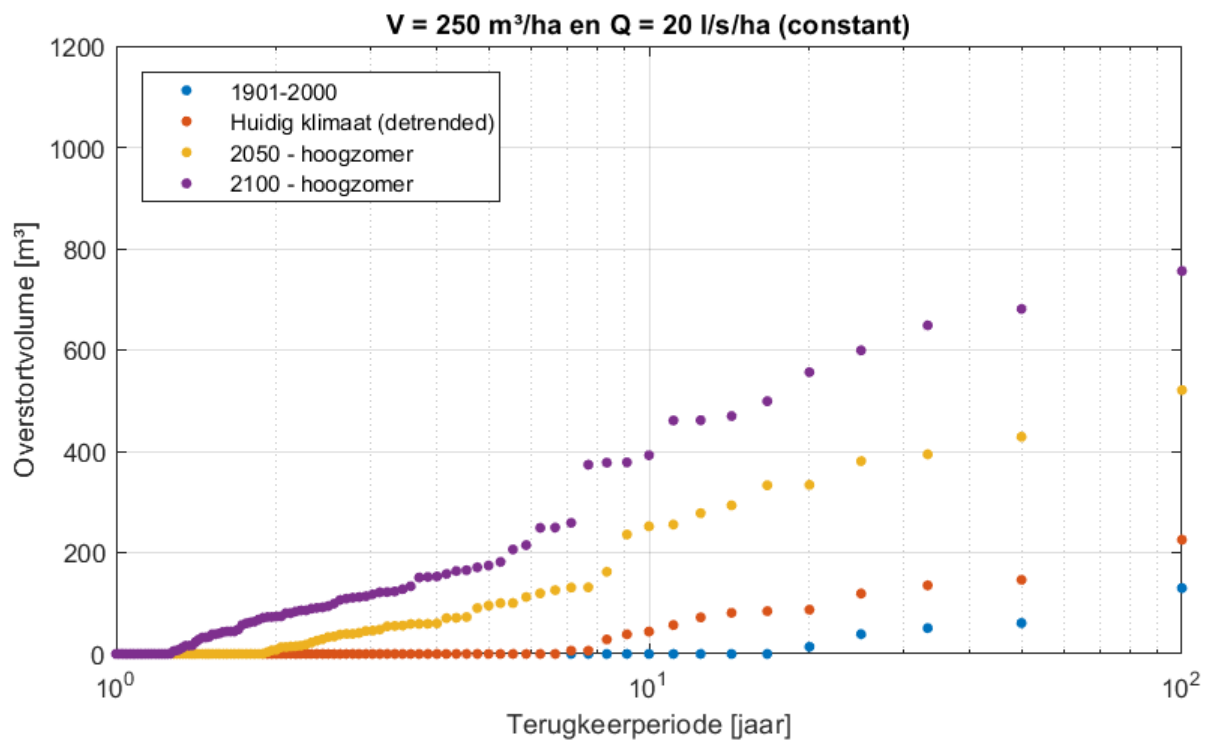
Tabel 1: Aantal overstorten in 100 jaar voor verschillende bufferontwerpen onder huidig en toekomstig klimaat.

	Constant doorvoerdebiet				Lineair doorvoerdebiet			
	Historische reeks 1901-2000	Huidig klimaat (detrend)	Scenario 2050	Scenario 2100	Historische reeks 1901-2000	Huidig klimaat (detrend)	Scenario 2050	Scenario 2100
V = 250 m ³ /ha Q = 10 l/s/ha	14	28	85	118	24	49	130	168
V = 250 m ³ /ha Q = 20 l/s/ha	5	14	53	80	11	27	81	118
V = 330 m ³ /ha Q = 10 l/s/ha	4	12	48	73	9	20	72	103
V = 400m ³ /ha Q = 10 l/s/ha	1	7	20	54	5	11	37	73

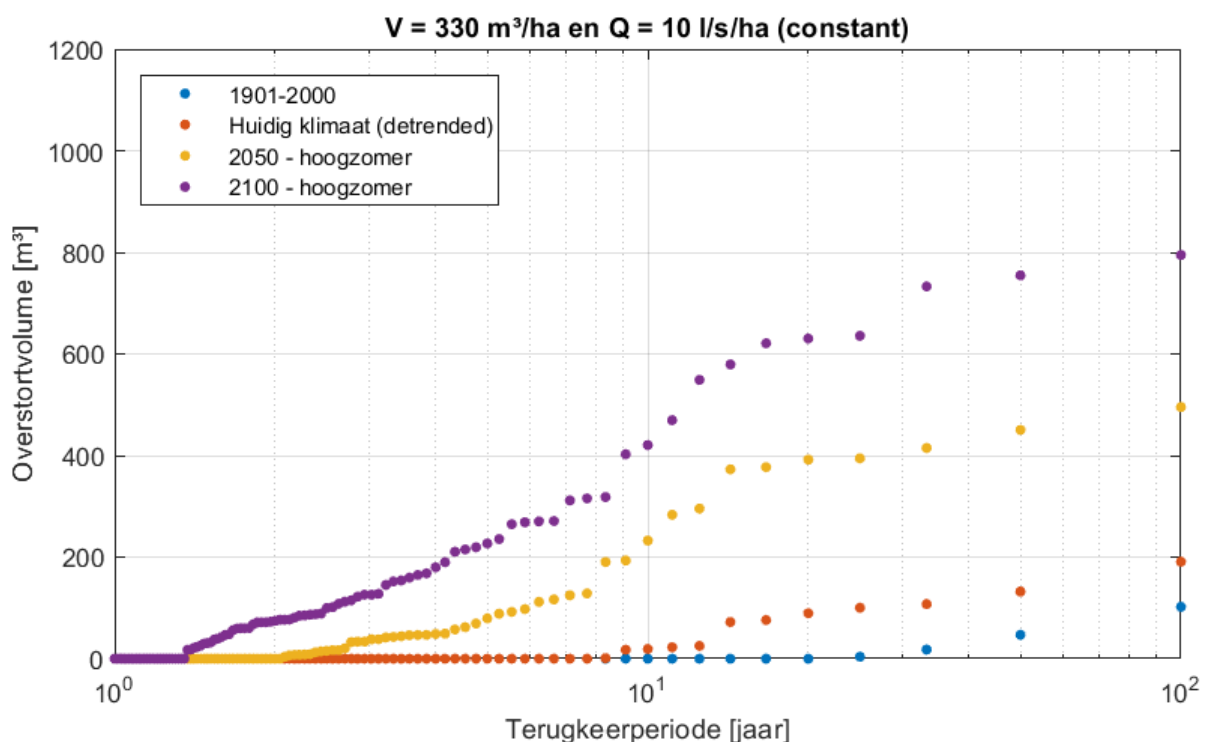
Naast de verandering in het aantal overstorten, zal ook het **overstortvolume** voor eenzelfde terugkeerperiode sterk kunnen stijgen door klimaatverandering. Figuur 10 tot Figuur 13 tonen de gesimuleerde overstortvolumes voor een constant doorvoerdebiet van verschillende bufferontwerpen. Bijlage A toont dezelfde figuren, maar dan voor een lineaire doorvoerrelatie.



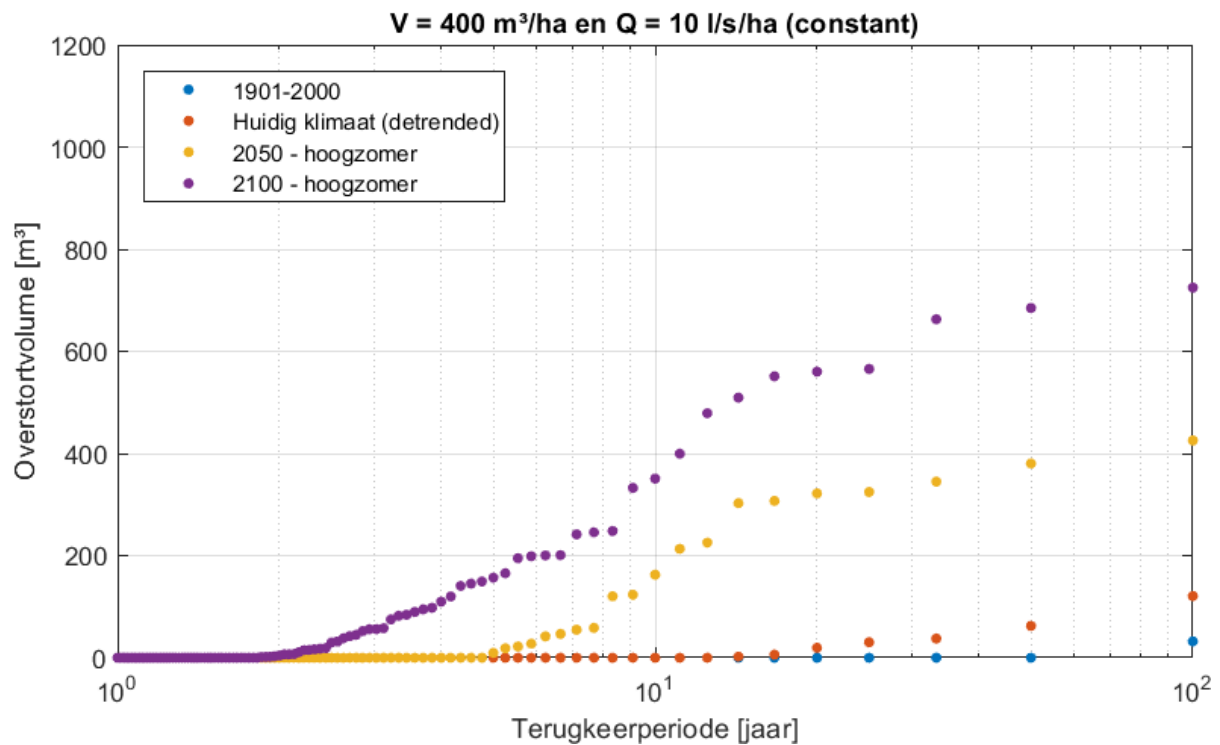
Figuur 10: Overstortvolumes van onafhankelijke gebeurtenissen voor de beschouwde tijdreeksen voor een buffervoorziening met 250 m³/ha capaciteit, en constant doorvoerdebiet van 10 l/s/ha.



Figuur 11: Overstortvolumes van onafhankelijke gebeurtenissen voor de beschouwde tijdreeksen voor een buffervoorziening met 250 m³/ha capaciteit, en constant doorvoerdebiet van 20 l/s/ha.



Figuur 12: Overstortvolumes van onafhankelijke gebeurtenissen voor de beschouwde tijdreeksen voor een buffervoorziening met 330 m³/ha capaciteit, en constant doorvoerdebiet van 10 l/s/ha.



Figuur 13: Overstortvolumes van onafhankelijke gebeurtenissen voor de beschouwde tijdreeksen voor een buffervoorziening met 400 m³/ha capaciteit, en constant doorvoerdebiet van 10 l/s/ha.

Recentelijk werd in opdracht van VLARIO de impact van klimaatverandering onderzocht op rioleringsoverstromingen (Wolfs et al., 2018). Hierbij werden exact dezelfde tijdreeksen (historische meetreeks 1901-2000, huidig klimaat a.d.h.v. de gedetrende Ukkelreeks, en het hoogzomer-klimaatsscenario voor 2050 en 2100) gesimuleerd voor bronmaatregelen en rioleringsystemen. Hierbij bleek dat een overloopvolume met een terugkeerperiode van 20 jaar (T20) in het huidig klimaat, tegen 2050 om de 4 jaar zou kunnen voorkomen, en tegen 2100 zelfs elke 2.5 jaar. Dit is een mogelijke toename met factor 8 tegen 2100. Voor nog extremere overloopvolumes (dus met grotere terugkeerperiode) is de mogelijke toename nog signifikanter, en voor kleinere overloopvolumes minder sterk. De impact van klimaatverandering op infiltratievoorzieningen bleek zeer gelijkaardig aan die van hemelwaterputten. Verder toonde de analyse aan dat het vergroten van hemelwaterputten enkel een impact heeft op de overstort- en overstromingsproblematiek als ook het hergebruik stijgt t.o.v. de gemiddelde situatie nu in Vlaanderen. Let wel dat de exacte cijfers en dus ook conclusies afhankelijk zijn van de beschouwde situatie (zoals aangesloten dakoppervlakte en hergebruik). Het vergroten van de infiltratievoorziening leek een significant grotere impact te hebben op de overstortproblematiek dan het vergroten van de hemelwaterput, zelfs bij relatief geringe infiltratiecapaciteiten. Voor meer informatie en duiding wordt verwezen naar Wolfs et al. (2018).

3.2 Analyse van de equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerp van infiltratievoorzieningen bij een verhoogd hergebruik

De Gewestelijke Stedenbouwkundige Verordening (GSV) Hemelwater schrijft voor dat wanneer een verhoogd hergebruik verwacht/aangetoond kan worden, de toevoerende oppervlakte gebruikt in het ontwerp van de infiltratievoorziening aangepast mag worden ten opzichte van de standaard normen.

De redenering hierachter is dat bij een verhoogd hergebruik, de hemelwaterput minder zal overstorten en bijgevolg de infiltratievoorziening ook kleiner ontworpen mag worden.

Hiertoe bevat de GSV Hemelwater enkele tabellen die de in rekening te brengen afwaterende oppervlakte voor de dimensionering van infiltratievoorzieningen geven bij een groter dan gemiddeld hergebruik (zie tabellen A en B in het Technisch achtergronddocument van de GSV, versie 4 - september 2016).

Deze tabellen werden herberekend in deze studie voor het huidig klimaat (i.e. de gedetrende Ukkelreeks) en het toekomstig klimaat 2050 en 2100. Omdat deze analyse onderliggend steunt op de overstortvolumes, werd opnieuw het hoogzomer-klimaatscenario beschouwd voor het toekomstig klimaat. Dit scenario geeft dus de grootste impactten op overstortvolumes (een toename van de overstortvolumes), en dus ook de grootste dimensievoorwaarden voor de infiltratievoorziening.

Vooraleer het huidig en het toekomstig klimaat te analyseren, werd ook de **meetreeks 1901-2000 gesimuleerd om de resultaten te vergelijken met de huidige tabellen** uit het technisch achtergronddocument. Immers, de exacte configuratieparameters zoals gebruikt bij het opstellen van de tabellen zijn niet gekend, waardoor dergelijke verificatie vereist is. Concreet werd hierbij de 100-jarige tijdreeks doorgerekend voor volgende configuraties, telkens voor een effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m²:

- Hergebruiksdebieten van 0 tot 1000 liter/dag;
- Capaciteiten van de hemelwaterput van 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 en 25 m³.

Dit levert een totaal van 1313 combinaties. Na simulatie werd een statistische analyse uitgevoerd op de resultaten om de equivalente afwaterende oppervlakte te berekenen. Hiertoe werd volgende formule gebruikt:

$$\text{In te rekenen afwaterende oppervlakte [\%]} = \frac{\text{totaal overstortvolume hemelwaterput na hergebruik}}{\text{totaal neerslagafstromingsvolume}}$$

Tabel 2 vergelijkt de in rekening te brengen afwaterende oppervlaktes voor de dimensionering van de infiltratievoorziening (herschaald naar 100 m² dakoppervlak) in de tabel opgenomen in de GSV en de eigen berekening. Hierbij valt op dat er kleine verschillen zijn in de equivalente ontwerpoppervlaktes. De nieuwe berekening geeft telkens iets grotere waarden (en is daarmee dus aan de veiligere kant). In deze simulaties werd gerekend met een oppervlakteberging van 2 mm. Zonder het inrekenen van oppervlakteberging, werden de in te rekenen oppervlaktes voor het ontwerp van de infiltratievoorziening significant groter (wat wel erop wijst dat het inrekenen van oppervlakteberging aan de onveilige kant is; het inrekenen van oppervlakteberging is evenwel te verantwoorden).

Tabel 2: Vergelijking van de huidige tabel opgenomen in de GSV met equivalente oppervlaktes voor het dimensioneren van de infiltratievoorziening versus de nieuwe berekening op basis van de tijdreeks van 1901-2000.

Hergebruik (l/dag/100m ²)	Huidige tabel GSV (tabel A)			Nieuwe berekening a.d.h.v. 1901-2000 meetreeks		
	5m ³ /100m ²	10m ³ /100m ²	20m ³ /100m ²	5m ³ /100m ²	10m ³ /100m ²	20m ³ /100m ²
60	63.1	62.9	62.4	64.3	64.2	64.2
100	39.4	38.5	38.0	41.0	40.6	40.3
160	15.4	9.3	6.0	18.2	11.9	7.7
250	4.1	0.4	0.0	5.4	1.04	0.0

Tabel 3: Equivalente oppervlaktes (herschaald naar 100 m²) voor het dimensioneren van de infiltratievoorziening voor het historisch, huidig en toekomstig klimaat (historisch | huidig | 2050 hoog-impact | 2100 hoog-impact)

Hergebruik (l/dag/100m ²)	5m ³ /100m ²	10m ³ /100m ²	20m ³ /100m ²
60	64.3 65.7 69.5 71.3	64.2 65.7 69.5 71.3	64.2 65.6 69.4 71.3
100	41.5 43.6 49.7 52.6	40.6 42.9 49.3 52.3	40.3 42.7 49.1 52.1
160	18.2 20.9 27.2 31	11.9 14.6 22 26.1	7.7 10.5 19.3 23.9
250	5.4 7.2 12.1 15.7	1 1.7 5 8.3	0 0 0.8 2.7

Tabel 3 toont de verandering van de equivalente ontwerpoppervlaktes voor het huidig en toekomstig klimaat, en vergelijkt deze met het historisch klimaat. Logischerwijs is een toename van de equivalente ontwerpoppervlaktes waarneembaar ten opzichte van het historisch klimaat: de neerslagextremen nemen immers toe, met vakere en grotere overstortvolumes als gevolg. De stijging tussen het historisch en huidig klimaat is evenwel beperkt tot ongeveer 1 à 3 %. Enkel voor het toekomstig klimaat zijn er grotere verschillen waarneembaar.

Volgende bestanden werden mee opgeleverd met de studie (zie ook Hoofdstuk 5 - Aangeleverde bestanden):

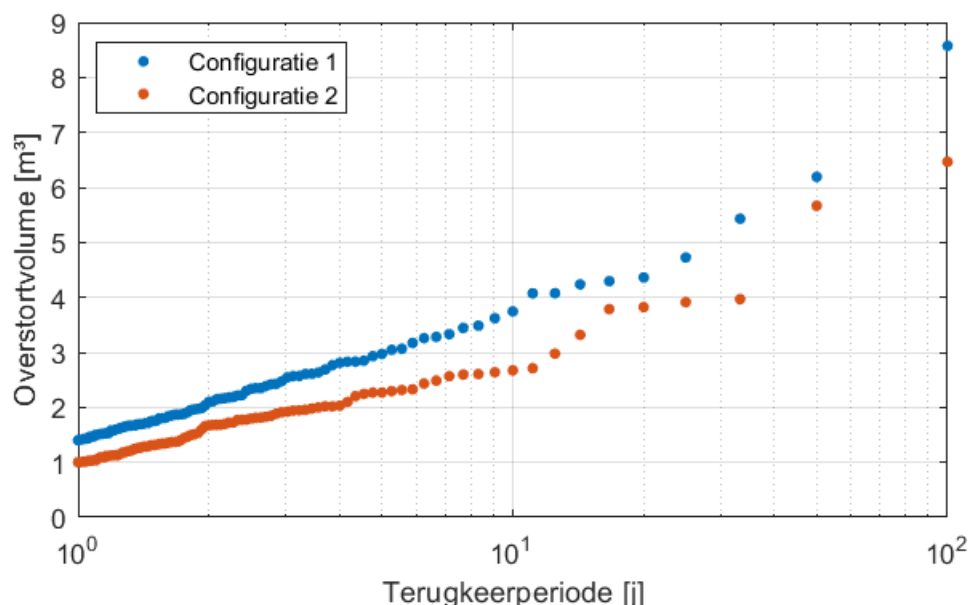
- Tabel (.xlsx) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van de meetreeks 1901-2000;
- Tabel (.xlsx) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van de gedetrende Ukkelreeks;
- Tabel (.xlsx) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van het hoogzomer klimaatscenario 2050;
- Tabel (.xlsx) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van het hoogzomer klimaatscenario 2100.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat deze rekenmethode en aanpak enkel de totale volumebalans beschouwt. Met andere woorden, het totaal volume dat terecht komt in de infiltratievoorziening is inderdaad hetzelfde wanneer (1) de overloop van een hemelwaterput met het verondersteld hergebruik aangesloten wordt, of (2) de equivalente dakoppervlakte aangesloten is. **De overstortwerking, en dus de impact op het afwaarts rioleringsstelsel, is echter wel (licht) verschillend.**

Dit wordt verder geconcretiseerd aan de hand van een **voorbeeld waarbij de ontwerptabellen gevolgd werden**. Er werd gewerkt met een effectieve toevoerende dakoppervlakte van 100 m², en er werden 2 configuraties gesimuleerd (telkens met de gedetrende Ukkelreeks, 2 mm oppervlakteberging en een infiltratiecapaciteit van 20 mm/u):

- Configuratie 1: hemelwaterput van 5 m³ met hergebruik van 100 liter/dag. De overloop geeft uit op de infiltratievoorziening. Deze werd ontworpen conform de tabel met equivalente oppervlaktes voor het huidige klimaat (gedetrende reeks). De equivalente oppervlakte bedraagt 43.63 m². Bijgevolg is de nodige capaciteit 1.09 m³ en nodige infiltratieoppervlakte 1.74 m².
- Configuratie 2: hemelwaterput van 10 m³ met hergebruik van 200 liter/dag. De aangesloten infiltratievoorziening wordt ontworpen met de equivalente oppervlakte van slechts 5.43 m², en heeft bijgevolg een capaciteit van 0.136 m³ en infiltratieoppervlakte van 0.217 m².

De simulaties geven volgende resultaten. Het totaal inkomend volume in de infiltratievoorziening verschilt vanzelfsprekend: gemiddeld 27.9 m³ per jaar voor configuratie 1, tegen slechts 3.5 m³ per jaar voor configuratie 2. Het volume dat in een gemiddeld jaar infiltreert verschilt bijgevolg ook: 22.70 m³ bij configuratie 1 (oftewel 81% van het inkomend volume), en 0.64 m³ bij configuratie 2 (oftewel slechts 19%). Het aantal overstorten verschilt ook: gemiddeld 7.53 per jaar bij configuratie 1, tegen slechts gemiddeld 3.9 per jaar in configuratie 2. De overstortvolumes verschillen ook, maar niet zeer sterk uitgesproken voor beide configuraties: zie Figuur 14. **De piekbelasting op de afwaarts ontvangend systeem is dus wel gelijkaardig wanneer ontworpen wordt met de "equivalente" oppervlakte, maar de effectiviteit van de infiltratievoorziening verschilt.**

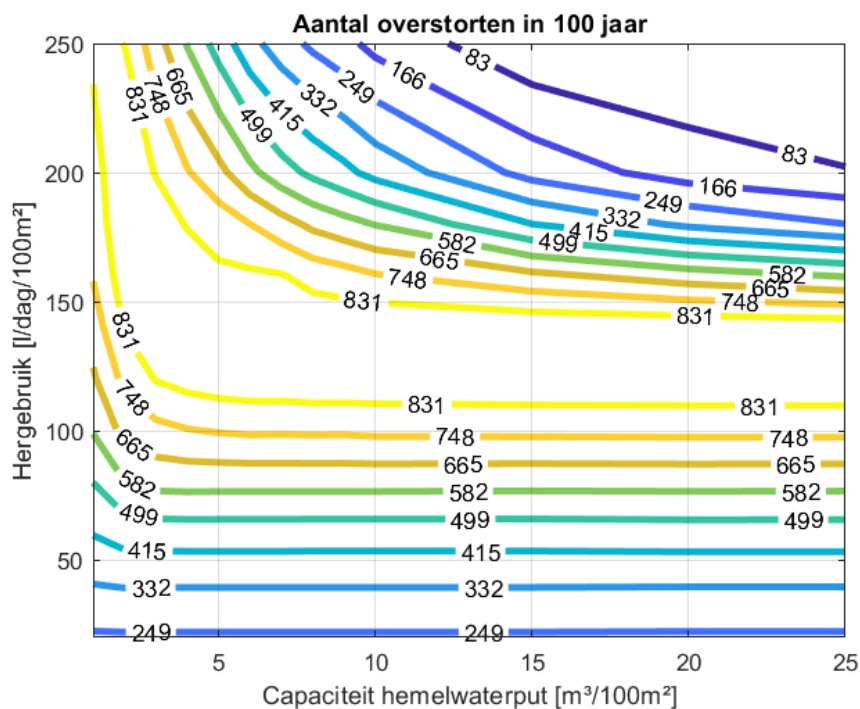


Figuur 14: Overstortvolumes van de infiltratievoorziening van configuratie 1 (100 l/dag hergebruik en 5m³ hemelwaterput) en configuratie 2 (200 l/dag hergebruik en 10 m³ hemelwaterput), waarbij telkens de infiltratievoorziening gedimensioneerd is op basis van de "equivalente" ontwerppoppervlakte.

Voor de volledigheid werd tot slot het aantal overstorten en de overloopvolumes bij een terugkeerperiode van 20 jaar berekend voor een groot aantal configuraties uit Tabel A (GSV Hemelwater - Technisch Achtergronddocument), maar dan geüpdatet voor het huidige klimaat. Concreet werd dus elke combinatie van de capaciteit van de hemelwaterput en beschouwd hergebruik doorgerekend, maar ditmaal door gebruik te maken van de "equivalente oppervlakte". Dit geeft een beeld van de variatie van het aantal overstorten wanneer ontworpen wordt met de "equivalente oppervlakte". De overloop van de hemelwaterput waterde af naar een

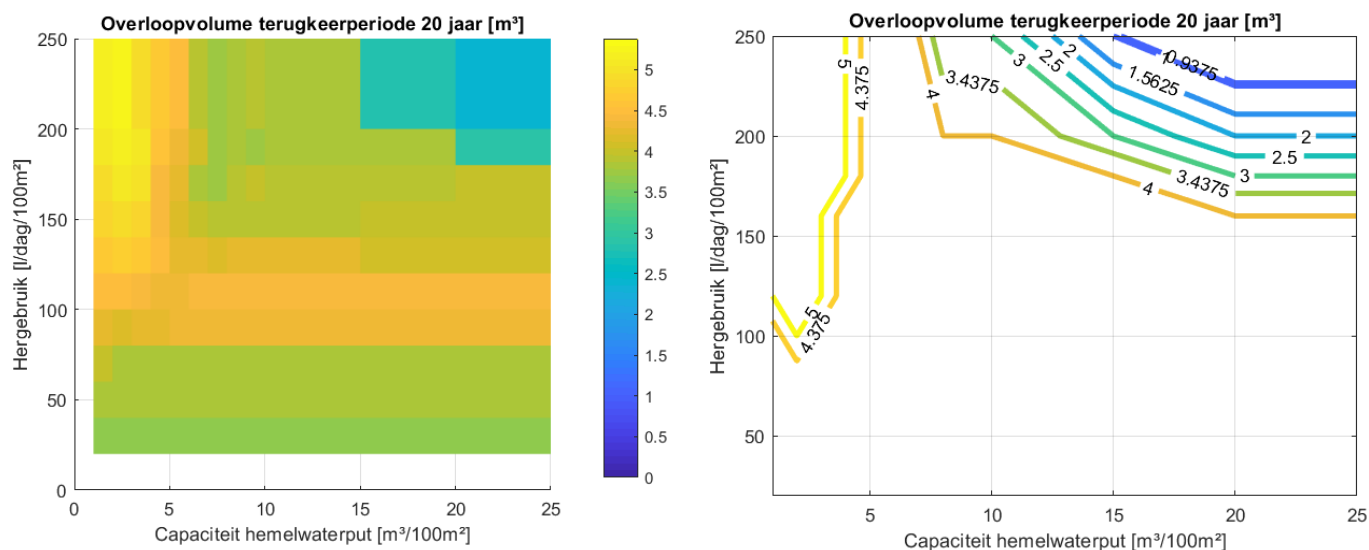
infiltratievoorziening. Deze infiltratievoorziening werd vervolgens ontworpen op basis van de normen door gebruik te maken van de equivalente ontwerpoppervlakte.

Figuur 15 toont het aantal overstorten van de infiltratievoorziening. Hieruit blijkt dat niet elke configuratie leidt tot eenzelfde aantal overstorten (wat ook al werd aangetoond met bovenstaand voorbeeld voor 2 specifieke configuraties). Een hemelwaterput van 5 m³ (per 100 m² afwaterende oppervlakte) met een verondersteld hergebruik van 100 l/dag (per 100 m² afwaterende oppervlakte) zal bijvoorbeeld 7.53 keer per jaar overstorten, terwijl dezelfde hemelwaterput bij een verondersteld hergebruik van 140 l/dag zo'n 9.08 keer per jaar zal overstorten voor de veronderstelde randvoorwaarden (oppervlakteberging en infiltratiecapaciteit). Bij een nog hoger hergebruik van bijvoorbeeld 250 l/dag zal het systeem zo'n 4.64 keer per jaar overstorten. Al deze waarden (voor het huidige klimaat) werden ook mee opgeleverd in een aparte Excel bij deze studie (zie Hoofdstuk 5 - Aangeleverde bestanden), omdat deze niet allen af te lezen zijn uit Figuur 15.



Figuur 15: Aantal overstorten van de infiltratievoorziening voor verschillende configuraties, waarbij de infiltratievoorziening telkens ontworpen werd op basis van de equivalente oppervlakte (huidig klimaat, oppervlakteberging 2 mm, infiltratiecapaciteit van 20 mm/u).

Daarnaast werden ook de overloopvolumes van de infiltratievoorziening onderzocht voor de verschillende configuraties die ontworpen werden met de "equivalente oppervlaktes". Figuur 16 toont de overloopvolumes met een terugkeerperiode van 20 jaar. Hieruit blijkt dat ook de overloopvolumes verschillen naargelang de configuratie. Een hemelwaterput van 5 m³/100 m² en een hergebruik van 100 l/dag/100m² leidt tot een overloopvolume van circa 4.36 m³. Voor zeer kleine hemelwaterputten kan het overloopvolume toenemen tot iets meer dan 5 m³, maar deze configuraties komen in de praktijk niet voor. Voor andere configuraties is vooral een afname te zien van de overloopvolumes.



Figuur 16. Overloopvolumes [m³/100 m² afwaterende oppervlakte] bij een terugkeerperiode van 20 jaar voor verschillende configuraties, waarbij de infiltratievoorziening telkens ontworpen werd op basis van de equivalente oppervlakte (huidig klimaat, oppervlakteberging 2 mm, infiltratiecapaciteit van 20 mm/u).

Uit deze analyse wordt geconcludeerd dat de huidige ontwerpnormen op basis van de equivalente oppervlaktetot tot verschillende overstortfrequenties en -volumes leiden. Dit komt omdat deze “equivalente oppervlaktetot berekend werden uitgaande van de massabalans, en niet de overloopvolumes of -frequentie. De overloopvolumes voor de meest extreme gebeurtenissen verschillen echter niet zeer significant, zoals ook aangetoond in bovenstaande uitwerking. Veelal dalen de overloopvolumes voor configuraties met grotere hergebruiksvolumes of putvolumes. Wel neemt de effectiviteit van de infiltratievoorziening af, zoals ook aangetoond in het eerste voorbeeld. Er zijn alternatieve berekeningswijzen mogelijk, zoals bijvoorbeeld een optimalisatie van de equivalente oppervlakte zodat de overstortfrequenties of overstortvolumes bij een gekozen terugkeerperiode wel gelijk blijven. Dergelijke alternatieven werden niet uitgevoerd binnen deze studie. Verwacht wordt dat dit amper een impact heeft op de uiteindelijke dimensionering.

3.3 Analyse van de leegstand van hemelwaterputten

Naast meer extreme piekneerslagen brengt klimaatverandering ook langere periodes van droogte, die bovendien frequenter zullen voorkomen. Deze paragraaf kwantificeert de leegstand van hemelwaterputten onder het historisch, huidig en toekomstig klimaat. Voor het toekomstig klimaat wordt hierbij het laag-klimaatsscenario geëvalueerd. Dit scenario werd ontworpen om de impact op waterbeschikbaarheid te evalueren. Daarom is dit scenario dan ook het meest relevant om de leegstand te evalueren. Net zoals het hoogzomer-klimaatsscenario de grootste impact heeft op overstorten, heeft het laag-klimaatsscenario de grootste impact op de leegstand van bronmaatregelen. **Men kan dus met grote waarschijnlijkheid aannemen dat de leegstand van bronmaatregelen in de toekomst tussen die van het “huidig klimaat” en het gerapporteerd “toekomstig klimaat” ligt.**

Concreet worden in de volgende paragrafen volgende aspecten gekwantificeerd:

- De nodige grootte van hemelwaterputten om de historische droogtes van 1921, 1976, 2017 en 2018 te overbruggen;
- De nodige grootte van hemelwaterputten om leegstandspercentages te halen in het huidig en toekomstig klimaat.

Hierbij wordt telkens uitgegaan van (1) een constant hergebruik, en (2) een hergebruik dat afhankelijk is van de weersomstandigheden, waarbij in warme en droge periodes een hogere vraag naar hemelwater is.

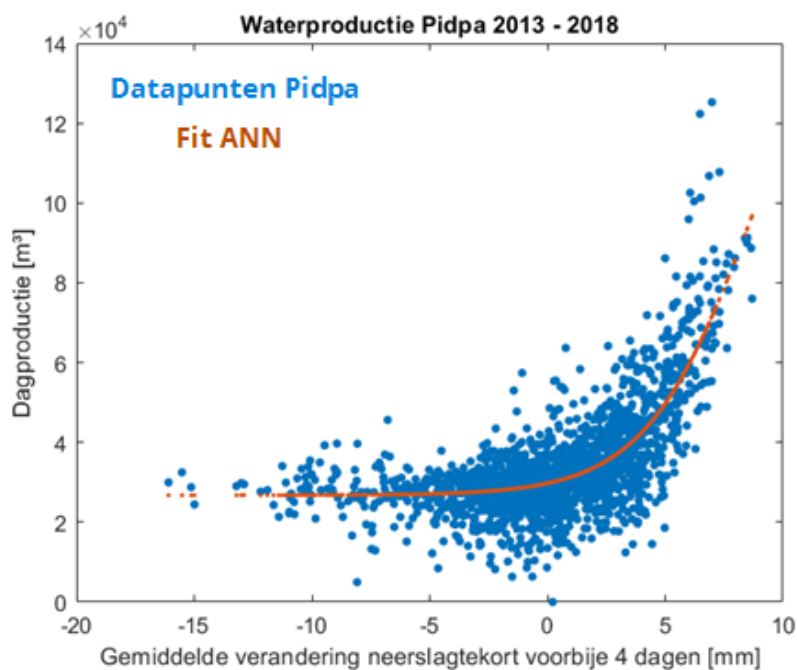
3.3.1 Nodige capaciteit om historische droogteperiodes te overbruggen

Deze paragraaf berekent aan de hand van langetermijnsimulaties de nodige grootte van hemelwaterputten om droogvallen tijdens uitzonderlijke droogtes te voorkomen. Concreet worden de zomers van 1921, 1976, 2017 en 2018 geanalyseerd.

De simulaties werden uitgevoerd met een 1-reservoir model van Sirio. Hierbij werd gerekend met een effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m² (dus met runoff coëfficiënt 1), en zowel zonder als met een oppervlakteberging van 2 mm. Aangezien deze analyse historische droogtes beschouwt, werd dan ook enkel gewerkt met de gemeten tijdreeksen van Ukkel, zonder detrending.

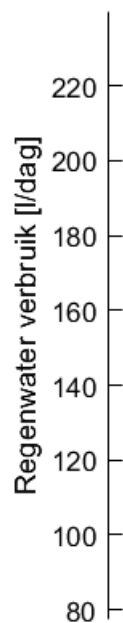
De simulaties werden uitgevoerd met een constant hergebruik van 100 liter/dag, en met een **hergebruiksmodel** dat rekening houdt met de weersomstandigheden. Hiertoe werd gebruik gemaakt van een zeer eenvoudig artificieel neuraal netwerk (ANN) dat geconfigureerd werd op basis van de gegevens van drinkwaterproductie van Pidpa uit de periode 1/1/2013-21/10/2018. In Willems et al. (2018b) werden deze gegevens uitgebreid geanalyseerd, en werd tevens dit ANN-model geconfigureerd. Het ANN-model gebruikt slechts 1 input, namelijk de verandering van de 4-daagse neerslagtekorten.

Figuur 17 toont de datapunten en de fit van het ANN-model. Vanzelfsprekend is de benadering door het ANN model zeer ruw, maar het model is wel in staat de grote trends te volgen. Merk ook op dat de gegevens van Pidpa drinkwaterproductie zijn, terwijl voor deze analyse een model dat hergebruik van hemelwaterputten voorspelt vereist is. Gedetailleerde gegevens van hergebruik zijn echter niet beschikbaar, waardoor voor deze analyse aangenomen wordt dat het gebruik van regenwater eenzelfde trend zal volgen als het gebruik van drinkwater in functie van meteorologische condities. Uiteraard is dit slechts een aanname, maar het laat alleszins toe om een eerste inschatting te maken op de impact van variabel hergebruik op de nodige capaciteit van hemelwaterputten.



Figuur 17: Dagproductie van Pidpa (blauw) en de ANN-model fit (bruin).

De uitkomst van het ANN werd lineair herschaald, zodat over een jaar een gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag verkregen wordt. Beide hergebruiksmodellen (constant en dynamisch) vragen dus eenzelfde jaarvolume, maar hebben wel andere dagdebieten in functie van de weersomstandigheden. Figuur 18 toont de berekende dagverbruiken van het geschaalde ANN model voor de periode 1919-2018. Hierop is te zien dat de gemiddelde debieten dicht tegen het constant verbruik van 100 liter/dag liggen, maar er geregeld uitschieters zijn. De hoogste waarde die berekend werd over de 100-jarige reeks is 232.6 liter/dag gevraagd hergebruik, op 2 juli 1976.

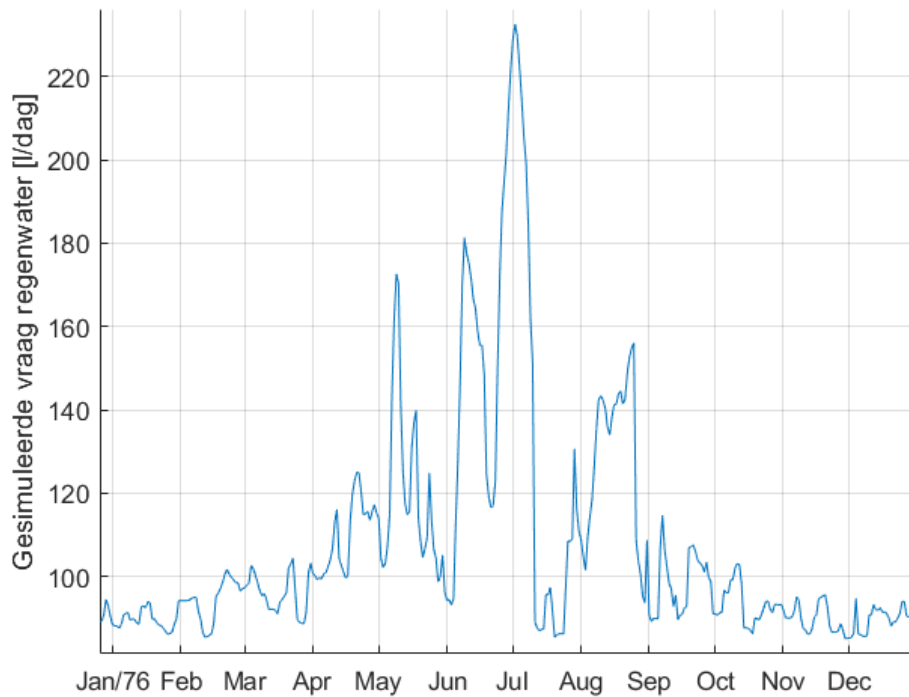


Figuur 18: Berekende dagverbruiken van het geschaalde ANN model voor de periode 1919-2018.

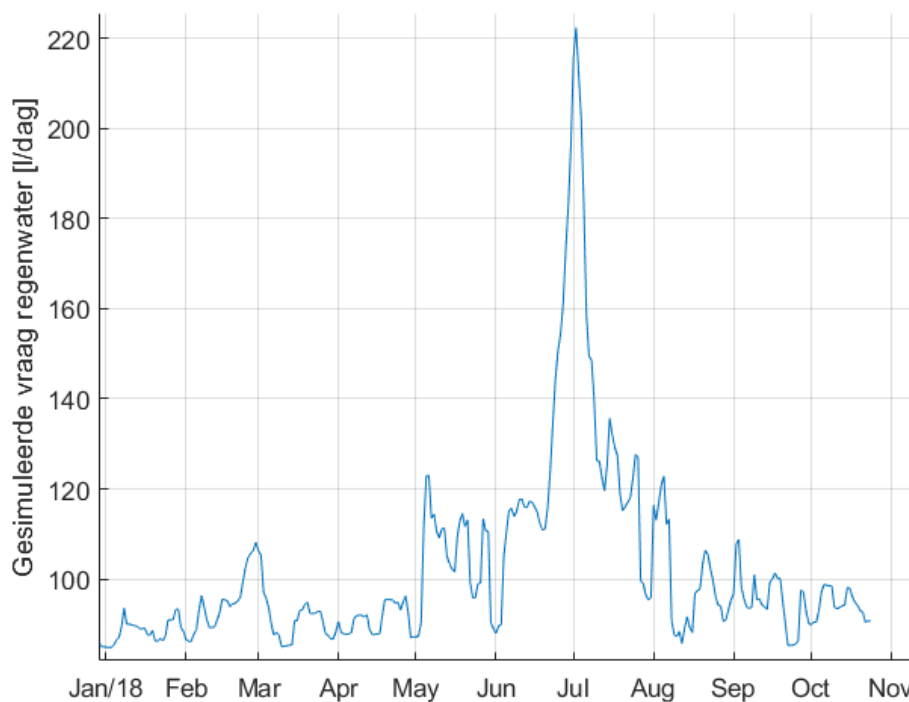
Figuur 19 tot Figuur 21 tonen de gesimuleerde gevraagde dagvolumes voor hergebruik voor de historische jaren 1921, 1976 en 2018. Hierbij zijn enkele verschillen waarneembaar. In 1921 bleek de vraag naar hemelwater bijna onafgebroken hoog te zijn. De absolute piek ligt wel lager dan in 1976 en 2018. Er zijn ook plotse en zeer sterke dalingen waarneembaar in de gesimuleerde vraag naar hemelwater, vooral in 1976 en 2018. Die momenten wijzen op (lichte tot hevige) neerslag, waardoor de verandering van het 4-daags neerslagtekort afneemt.



Figuur 19: Gesimuleerd hergebruik per dag in 1921.



Figuur 20: Gesimuleerd hergebruik per dag in 1976.



Figuur 21: Gesimuleerd hergebruik per dag in 2018.

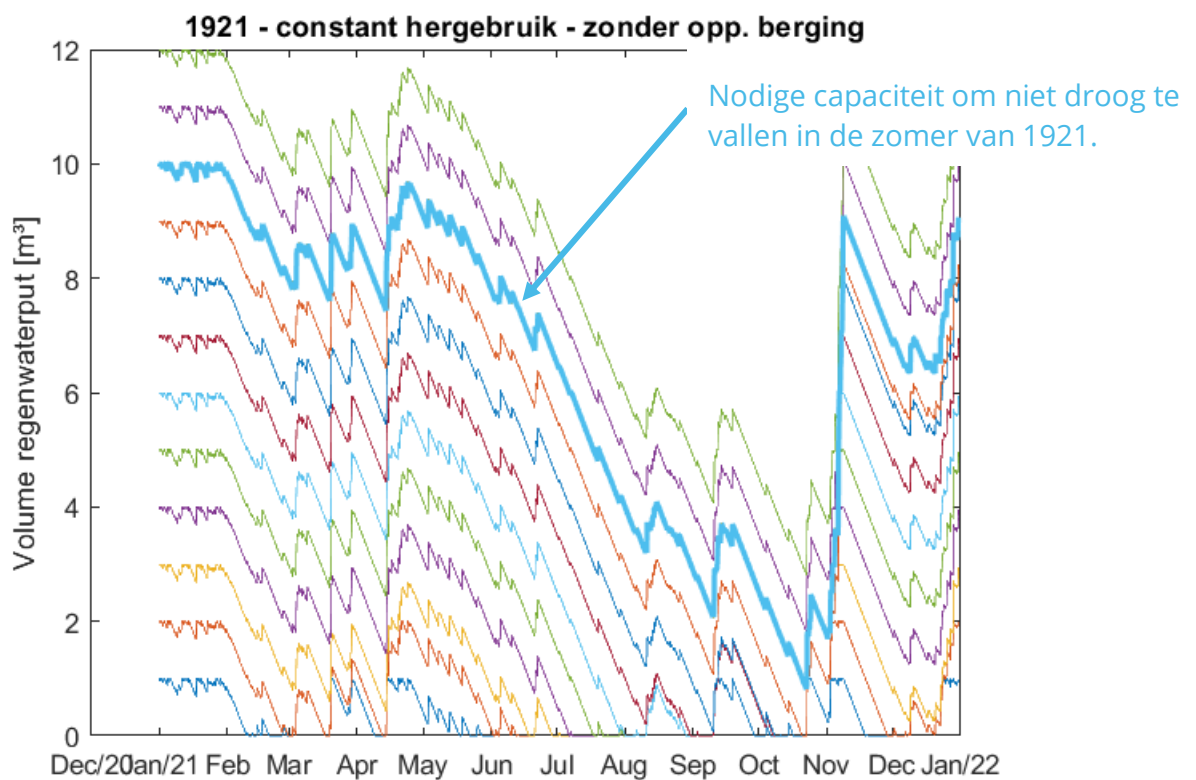
De nodige capaciteiten van de hemelwaterput voor beide hergebruiksmodellen (constant en afhankelijk van de weersomstandigheden) zijn samengevat in Tabel 4.

De nodige capaciteiten zijn veruit het grootst om de zomer van 1921 te kunnen overbruggen. Dat is logisch, aangezien in die zomer de neerslagvolumes bijzonder klein zijn. Er waren amper periodes van regen. Verder valt op dat de nodige capaciteiten zeer sterk verschillen voor de simulaties met en zonder oppervlakteberging. De impact van het in rekening brengen van oppervlakteberging is veel groter dan het gebruik van een dynamisch of constant hergebruiksmodel. Het in rekening brengen van oppervlakteberging is zeker te verantwoorden voor platte daken, waar meer plasvorming tot uiting komt dan op hellende daken. Algemeen kan worden gesteld dat de werkelijke nodige capaciteiten wellicht tussen de resultaten zonder en met oppervlakteberging liggen, waarbij platte daken dichterbij de resultaten "met" oppervlakteberging zullen aanleunen, en hellende daken bij de resultaten "zonder" oppervlakteberging. Hoe dan ook moet beseft worden dat deze analyses kijken naar extreem droge periodes, en er dus altijd lokale verliezen zullen zijn. Tot slot valt op dat de nodige capaciteiten relatief gering zijn (5 tot 10 m³) wanneer er geen oppervlakteberging wordt ingerekend (behalve voor de zomer van 1921).

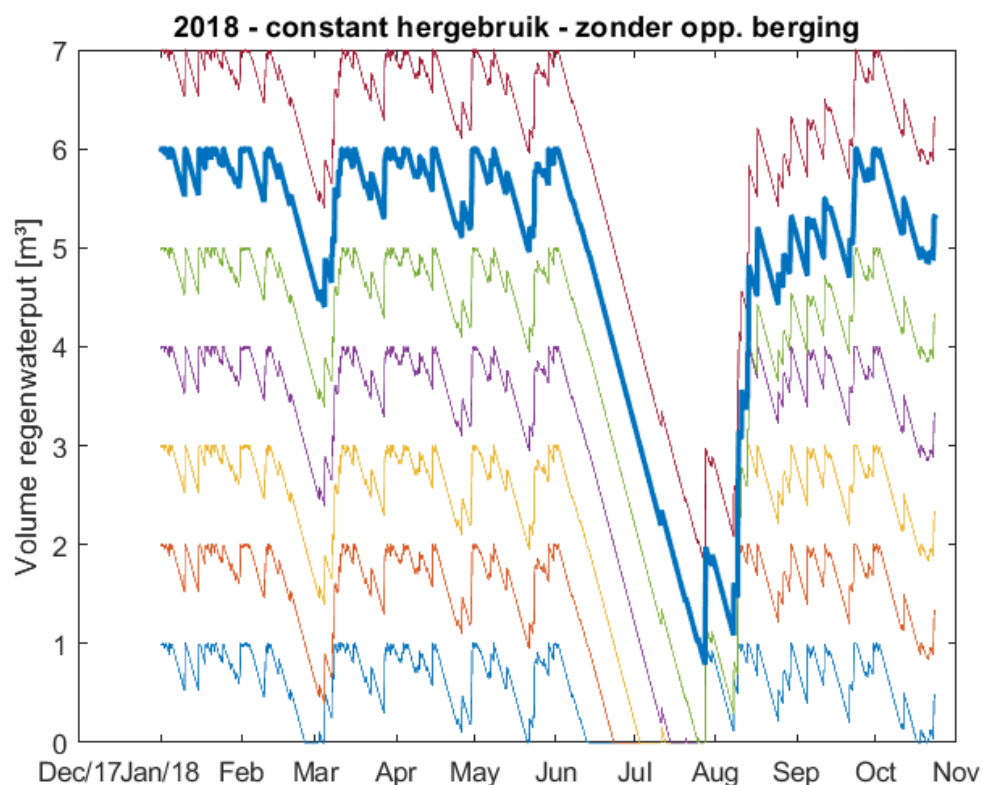
Tabel 4: Nodige capaciteit van de hemelwaterput om droogvallen te voorkomen.

	Constant hergebruik		Weersafhankelijk hergebruik	
	Zonder opp.berg.	Met opp. berg.	Zonder opp. berg.	Met opp. berg.
1921	10 m ³	21 m ³	14 m ³	25 m ³
1976	7 m ³	12 m ³	10 m ³	15 m ³
2017	5 m ³	9 m ³	6 m ³	10 m ³
2018	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³

Figuur 22 en Figuur 23 tonen de gesimuleerde volumes in de hemelwaterput voor diverse capaciteiten. Merk op dat deze resultaten opgehaald werden uit een continue 100-jarige simulatie, en de beginvulling op de figuren dus ook rekening houdt met antecedente condities. Hierop is duidelijk het verschil te zien tussen de zomers van 1921 en 2018: in 1921 daalde de inhoud van de regenwaterput bijna onafgebroken sinds begin mei tot zelfs eind oktober. De temperaturen lagen wel lager dan bijvoorbeeld de zomer van 2018, waardoor de gevraagde dagvolumes lager liggen (niet duidelijk zichtbaar op deze figuur). In 2018 is een sterke daling van het beschikbaar volume in de regenwaterput merkbaar vanaf juni tot ongeveer midden augustus. Midden augustus vielen enkele (grotere) regenbuien, waardoor de hemelwaterputten terug grotendeels aangevuld raakten. De maanden augustus en september waren ook nog relatief droog, aangezien de hemelwaterputten hun maximale capaciteit niet konden bereiken.



Figuur 22: Gesimuleerde volumes in de hemelwaterput voor verschillende capaciteiten voor 1921, met constant hergebruik (100 liter/dag) en geen oppervlakteberging.

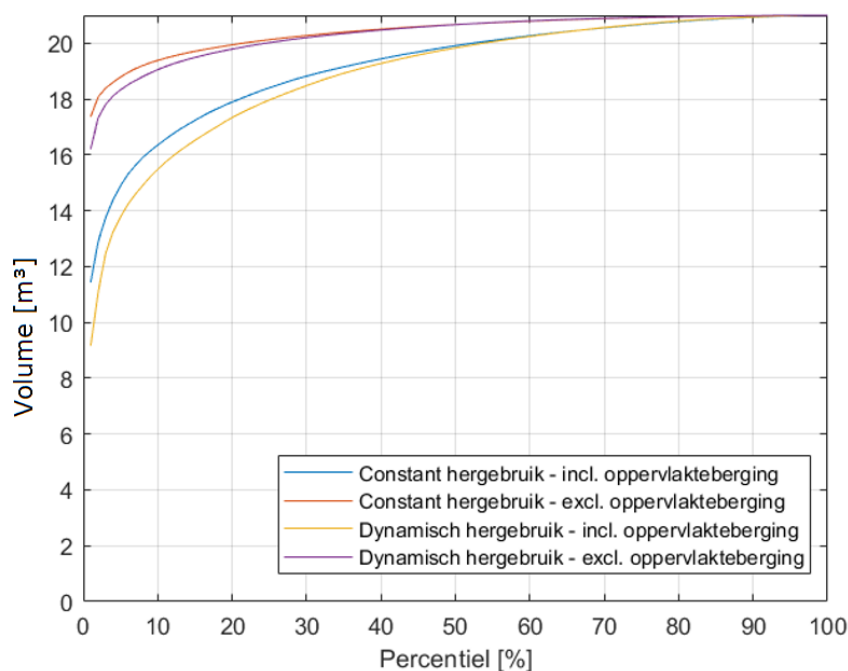


Figuur 23: Gesimuleerde volumes in de hemelwaterput voor verschillende capaciteiten voor 2018, met constant hergebruik (100 liter/dag) en geen oppervlakteberging.

Het is uiteraard **niet wenselijk om hemelwaterputten met te grote volumes** te plaatsen. Zoals reeds blijkt uit Tabel 4 zijn volumes groter dan 10 m³ slechts uiterst zelden nodig (voor de beschouwde configuratie; dus effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m², gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag).

Dit wordt ook geïllustreerd door Figuur 24. Deze figuur toont de vullingsgraad (percentielen) van een hemelwaterput van 21 m³ voor de periode van 1919-2018. De vullingsgraad voor andere capaciteiten kan eenvoudig (benaderend) afgeleid worden door een lineaire (verticale) translatie van de getoonde curven (maar dit is niet mogelijk voor de laagste percentielen, want dan reageert het model niet-lineair). De laagste vullingspercentielen tonen nog altijd dat de hemelwaterput sterk gevuld is. Deze zeer grote capaciteiten zijn dus slechts zéér sporadisch nodig.

De figuur toont nogmaals de impact van het wel of niet inrekenen van de oppervlakteberging. Zonder oppervlakteberging liggen de curven significant hoger, en blijft de hemelwaterput dus meer gevuld. Omdat de laagste percentielen niet duidelijk af te lezen zijn op de figuur, zijn deze ook apart getoond in Tabel 5. Merk op dat de 1%-percentielen verschillend zijn van 0 m³, zelfs voor het dynamisch hergebruikmodel dat rekening houdt met oppervlakteberging. In Tabel 4 kwam naar voren dat voor die configuratie een volume van 21 m³ nodig zou zijn om droogvallen te vermijden in de zomer van 1921. Deze capaciteit is echter slechts voor zo een korte periode nodig, dat die onder de 1% percentiel valt. Dergelijke grote volumes zijn dus werkelijk slechts zeer uitzonderlijk kort nodig.



Figuur 24: Gesimuleerde vulling van een hemelwaterput van 21 m³ voor de periode 1919-2018.

Tabel 5: Volumes in de hemelwaterput met een capaciteit van 21 m³ bij 1,2 en 5%-percentielen van de vulling voor de simulaties van 1919-2018.

	Constant - incl. opp.	Constant - excl. opp.	Dynamic - incl. opp.	Dynamic - excl. opp.
1% percentiel	11.4 m ³	17.4 m ³	9.2 m ³	16.2 m ³
2% percentiel	12.9 m ³	18.1 m ³	11.1 m ³	17.3 m ³
5% percentiel	14.9 m ³	18.8 m ³	13.8 m ³	18.3 m ³

3.3.2 Nodige capaciteit om leegstandspercentages te bereiken

Deze paragraaf beschrijft de nodige capaciteiten van hemelwaterputten om gewenste leegstandspercentages te bereiken. Deze analyse beschouwt zowel het huidig als het toekomstig klimaat. Voor het huidig klimaat werd gewerkt met de gedetrende Ukkelreeks. Voor het toekomstig klimaat werd opnieuw het “laag”-klimaatscenario ingerekend. Dit laag-scenario heeft de grootste impact op waterbeschikbaarheid, en geeft dus de minste hoeveelheid neerslag. Bijgevolg kan met grote waarschijnlijkheid gesteld worden dat de nodige capaciteiten om de leegstandspercentages te bereiken in de toekomst tussen die van het “huidig klimaat” en het gerapporteerd “toekomstig” klimaat liggen.

Er werden simulaties uitgevoerd met Sirio. Opnieuw werd een effectieve toevoerende oppervlakte verondersteld van 100 m² (dus met neerslagafstromingscoëfficiënt 1), en zonder en met (2 mm) oppervlakteberging. Voor hergebruik werd opnieuw een constant hergebruik van 100 liter/dag verondersteld, en een dynamisch hergebruikmodel met gemiddeld 100 liter/dag hergebruik maar met variaties op de dagelijkse vraag op basis van meteorologische condities. Dit model werd voorgesteld in §3.3.1. Alle simulatieparameters zijn dus hetzelfde als in de vorige paragrafen.

De resultaten worden voorgesteld in 2 typen tabellen:

- Tabellen die de nodige capaciteiten van de regenwaterput geven in functie van het gewenste leegstandspercentage en het klimaatscenario. Hierbij is er nog een onderscheid naar gelang

er gerekend werd met of zonder oppervlakteberging, en het hergebruiksmodel (constant of dynamisch). Dit levert in het totaal dus 4 tabellen: Tabel 6 t.e.m. Tabel 9.

- Tabellen die het leegstandspercentage van de regenwaterput geven in functie van de capaciteit en het klimaatscenario. Opnieuw is er een onderscheid naar oppervlakteberging en hergebruiksmodel, zodat ook hier 4 tabellen beschikbaar zijn: Tabel 10 t.e.m. Tabel 13.

Hieronder staan de tabellen die de **nodige capaciteiten geven** om bepaalde leegstandspercentages te bereiken onder verschillende klimaatscenario's. Hoe hoger het leegstandspercentage mag zijn, hoe lager de nodige capaciteit. Door klimaatverandering kunnen de nodige capaciteiten nog verder toenemen (de klimaatscenario's zijn voor deze analyse zodanig gekozen dat deze een pessimistische schatting van de waterbeschikbaarheid; de werkelijke nodige capaciteiten liggen wellicht tussen deze van het huidig klimaat en het gerapporteerd toekomstig klimaat). Oppervlakteberging heeft wederom een grote impact op de nodige volumes. Indien gerekend wordt met een dynamisch hergebruik (dat toeneemt bij warme en droge condities), zijn vanzelfsprekend ook grotere volumes nodig.

Tabel 6: Nodige capaciteiten voor een constant hergebruik - geen oppervlakteberging

	1% leeg	2%	3%	4%	5%	10%
Huidig klimaat	2.9 m ³	2.4 m ³	2.1 m ³	1.9 m ³	1.7 m ³	1.2 m ³
Klimaat 2050	3.3 m ³	2.7 m ³	2.4 m ³	2.1 m ³	1.9 m ³	1.3 m ³
Klimaat 2100	4.5 m ³	3.6 m ³	3.1 m ³	2.7 m ³	2.5 m ³	1.6 m ³

Tabel 7: Nodige capaciteiten voor een dynamisch hergebruik - geen oppervlakteberging

	1% leeg	2%	3%	4%	5%	10%
Huidig klimaat	3.5 m ³	2.8 m ³	2.4 m ³	2.2 m ³	2 m ³	1.3 m ³
Klimaat 2050	4.2 m ³	3.2 m ³	2.8 m ³	2.5 m ³	2.2 m ³	1.5 m ³
Klimaat 2100	6.1 m ³	4.8 m ³	4 m ³	3.4 m ³	3 m ³	1.9 m ³

Tabel 8: Nodige capaciteiten voor een constant hergebruik - met oppervlakteberging

	1% leeg	2%	3%	4%	5%	10%
Huidig klimaat	5.7 m ³	4.5 m ³	3.9 m ³	3.5 m ³	3.1 m ³	2.2 m ³
Klimaat 2050	7.6 m ³	5.8 m ³	4.9 m ³	4.3 m ³	3.9 m ³	2.6 m ³
Klimaat 2100	9 m ³	7.5 m ³	6.6 m ³	6 m ³	5.4 m ³	3.6 m ³

Tabel 9: Nodige capaciteiten voor een dynamisch hergebruik - met oppervlakteberging

	1% leeg	2%	3%	4%	5%	10%
Huidig klimaat	6.6 m ³	5.4 m ³	4.6 m ³	4 m ³	3.6 m ³	2.3 m ³
Klimaat 2050	9.4 m ³	7 m ³	5.9 m ³	5.2 m ³	4.6 m ³	2.9 m ³
Klimaat 2100	10.8 m ³	9.1 m ³	8.1 m ³	7.3 m ³	6.6 m ³	4.2 m ³

De tabellen hieronder geven de **leegstandspercentages** voor gekozen hemelwaterputcapaciteiten en de klimaatscenario's. De cijfers tonen dezelfde variaties als voor bovenstaande tabellen op vlak van

oppervlakteberging, constant vs. dynamisch hergebruik en de klimaatscenario's. Algemeen kan gesteld worden dat voor de typische groottes van hemelwaterputten die nu geplaatst worden (5.000 tot 10.000 liter), de leegstandspercentages kunnen toenemen door klimaatverandering met een factor 2 à 3, maar de leegstandspercentages over het algemeen vrij laag blijven. Zo nemen de gesimuleerde leegstandspercentages voor een put van 5.000 liter met een dynamisch hergebruik en met het in rekening te brengen van oppervlakteberging toe van 2.2% in het huidig klimaat tot 4.1% en 7.7% in het gesimuleerd klimaat van respectievelijk 2050 en 2100 (zie Tabel 13). De leegstandspercentages in het gesimuleerd klimaat van 2100 zijn significant hoger, maar er moet opgemerkt worden dat dit scenario het "hoge impact" betreft. De werkelijke impact van klimaatverandering ligt met grote waarschijnlijkheid tussen deze van het huidig klimaat en het gerapporteerd klimaat van 2100. Ook zijn de leegstandspercentages voor het model zonder oppervlakteberging wel een stuk lager (1.6% in het klimaat van 2100).

Tabel 10: Gesimuleerde leegstandspercentages voor een constant hergebruik - zonder oppervlakteberging.

	1 m ³	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	11.2 %	0.7 %	0.1 %	0.1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Klimaat 2050	12.9 %	1.2 %	0.2 %	0.1 %	0.1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Klimaat 2100	16.5 %	2.9 %	0.6 %	0.3 %	0.1 %	0.1 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tabel 11: Gesimuleerde leegstandspercentages voor een dynamisch hergebruik - zonder oppervlakteberging.

	1 m ³	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	12.6 %	1.3 %	0.3 %	0.2 %	0.2 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0 %	0 %
Klimaat 2050	14.2 %	2.1 %	0.5 %	0.3 %	0.2 %	0.2 %	0.1 %	0.1 %	0 %	0 %
Klimaat 2100	17.6 %	4.6 %	1.6 %	1 %	0.6 %	0.4 %	0.3 %	0.2 %	0 %	0 %

Tabel 12: Gesimuleerde leegstandspercentages voor een constant hergebruik - met oppervlakteberging.

	1 m ³	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	22.7 %	5 %	1.4 %	0.8 %	0.5 %	0.4 %	0.3 %	0.2 %	0.1 %	0 %
Klimaat 2050	26 %	7.4 %	2.7 %	1.7 %	1.2 %	0.8 %	0.6 %	0.4 %	0.1 %	0 %
Klimaat 2100	30.3 %	11.8 %	5.6 %	3.7 %	2.3 %	1.5 %	0.9 %	0.6 %	0.1 %	0 %

Tabel 13: Gesimuleerde leegstandspercentages voor een dynamisch hergebruik - met oppervlakteberging.

	1 m ³	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	23.3 %	6.3 %	2.2 %	1.3 %	0.8 %	0.6 %	0.5 %	0.4 %	0.2 %	0.1 %
Klimaat 2050	26.3 %	8.9 %	4.1 %	2.7 %	1.9 %	1.4 %	1.1 %	0.8 %	0.2 %	0.1 %
Klimaat 2100	30.2 %	13.3 %	7.7 %	5.8 %	4.2 %	2.9 %	2 %	1.3 %	0.2 %	0.1 %

Tot slot wordt herhaald dat deze volumes en leegstandspercentages berekend zijn voor een effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m². Voor kleinere of grotere dakoppervlaktes zullen de cijfers van nodige capaciteit en verkregen leegstand bijgevolg verschillen. Voor grote projecten is het aangeraden simulaties uit te voeren die specifiek rekening houden met de ontwerpgegevens, zoals (variabel) gevraagd hergebruik en dakoppervlakte.

3.3.3 Analyse implicaties op drinkwaterverbruik

Deze paragraaf analyseert de implicaties van een grotere hemelwaterput op het drinkwaterverbruik. Concreet wordt zowel voor het huidig als toekomstig klimaat berekend hoeveel leidingwater nodig is om droge periodes te overbruggen.

Hiertoe werden de simulaties uit §3.3.3 integraal herhaald, en werd berekend hoeveel volume water tekort is om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Een gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag veronderstelt een jaarlijkse vraag van 36525 liter, oftewel 36.5 m³.

Tabel 14 tot en met Tabel 17 tonen de gemiddelde jaarlijkse volumes die tekort zijn om aan het gevraagd hergebruik te voldoen (gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag). Bijgevolg moet leidingwater (of een andere bron) gebruikt worden om deze volumes aan te vullen. Het percentage dat aangevuld moet worden ten opzichte van het gevraagd volume is eveneens weergegeven. **Uit de tabellen blijkt dat de gemiddelde jaarlijkse volumes die aangevuld moeten worden door een alternatieve bron relatief gering zijn.** Voor bijna alle beschouwde configuraties zijn deze minder dan 1 m³/jaar onder het huidig klimaat per kavel. Vergeleken met het jaarlijks drinkwaterverbruik van woningen is dit beperkt (een doorsnee gezin bestaat uit 2,3 personen en verbruikt gemiddeld 84 m³ leidingwater per jaar¹). In het toekomstig klimaat kunnen deze wel toenemen, maar blijven deze ook beperkt tot maximaal 3.3 m³ oftewel 9% voor het klimaatscenario 2100.

Wanneer de minimale grootte van een hemelwaterput wordt verhoogd van 5 m³ tot 10 m³, verminderen uiteraard de volumes die moeten bijgevoerd worden om aan het gevraagd hemelwaterverbruik te kunnen voldoen. Doordat de leegstandspercentages reeds relatief klein zijn, is de verminderde noodzakelijke bijvulling ook relatief beperkt. **Hieruit wordt geconcludeerd dat het vergroten van de hemelwaterputten slechts een geringe impact zal hebben op het totale jaarlijkse drinkwaterverbruik, wanneer een gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag verondersteld wordt en een effectieve toevoerende dakoppervlakte van 100 m².**

¹ Cijfers VMM: <https://www.vmm.be/water/waterfactuur/onderzoek-en-trends>. Geraadpleegd op 18 november 2018.

Een belangrijke kanttekening hierbij is dat een put die leeg valt, in de praktijk vaak “voldoende” terug bijgevuld wordt (bijvoorbeeld tot minimaal 1.000 liter). In de uitgevoerde simulaties werd echter telkens het minimaal volume berekend dat nodig is om het gewenst hergebruik mogelijk te maken. Deze volumes zijn dus het absoluut minimum dat bijgevuld moet worden. In de praktijk zullen de meeste hemelwaterputten echter meer worden bijgevuld. Ten tweede gelden deze conclusies voor een effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m², en een verondersteld gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag.

Tabel 14: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: constant hergebruik, zonder oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	0.3 m ³ 0.7 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2050	0.4 m ³ 1.2 %	0.1 m ³ 0.2 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2100	1 m ³ 2.9 %	0.2 m ³ 0.6 %	0.1 m ³ 0.3 %	0.1 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %

Tabel 15: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: dynamisch hergebruik, zonder oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	0.6 m ³ 1.7 %	0.2 m ³ 0.4 %	0.1 m ³ 0.3 %	0.1 m ³ 0.2 %	0.1 m ³ 0.2 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2050	1 m ³ 2.7 %	0.3 m ³ 0.7 %	0.2 m ³ 0.5 %	0.1 m ³ 0.3 %	0.1 m ³ 0.2 %	0.1 m ³ 0.2 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2100	2.1 m ³ 5.6 %	0.7 m ³ 2 %	0.5 m ³ 1.2 %	0.3 m ³ 0.7 %	0.2 m ³ 0.5 %	0.1 m ³ 0.3 %	0.1 m ³ 0.2 %	0 m ³ 0 %	0 m ³ 0 %

Tabel 16: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: constant hergebruik, met oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	1.8 m ³ 5 %	0.5 m ³ 1.4 %	0.3 m ³ 0.8 %	0.2 m ³ 0.5 %	0.2 m ³ 0.4 %	0.1 m ³ 0.3 %	0.1 m ³ 0.2 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2050	2.7 m ³ 7.4 %	1 m ³ 2.7 %	0.6 m ³ 1.7 %	0.4 m ³ 1.2 %	0.3 m ³ 0.8 %	0.2 m ³ 0.6 %	0.1 m ³ 0.4 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %
Klimaat 2100	4.3 m ³ 11.8 %	2.1 m ³ 5.6 %	1.3 m ³ 3.6 %	0.8 m ³ 2.3 %	0.5 m ³ 1.5 %	0.3 m ³ 0.9 %	0.2 m ³ 0.6 %	0 m ³ 0.1 %	0 m ³ 0 %

Tabel 17: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: dynamisch hergebruik, met oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	2.7 m ³	1 m ³	0.6 m ³	0.4 m ³	0.3 m ³	0.2 m ³	0.2 m ³	0.1 m ³	0 m ³
	7.4 %	2.7 %	1.6 %	1.1 %	0.8 %	0.6 %	0.5 %	0.2 %	0.1 %
Klimaat 2050	3.8 m ³	1.8 m ³	1.2 m ³	0.8 m ³	0.6 m ³	0.5 m ³	0.4 m ³	0.1 m ³	0 m ³
	10.5 %	4.8 %	3.2 %	2.3 %	1.7 %	1.3 %	1 %	0.3 %	0.1 %
Klimaat 2100	5.7 m ³	3.3 m ³	2.4 m ³	1.8 m ³	1.2 m ³	0.8 m ³	0.6 m ³	0.1 m ³	0 m ³
	15.5 %	9 %	6.7 %	4.8 %	3.4 %	2.3 %	1.6 %	0.3 %	0.1 %

De berekening werd herhaald voor een gewenst **hergebruik van 150 liter/dag** (de andere parameters blijven identiek). De tabellen van die berekeningen zijn terug te vinden in **Bijlage B**. Hieruit blijkt dat de **tekorten significant hoger** liggen. Een hemelwaterput van 5.000 liter heeft in het huidig klimaat bijvoorbeeld een tekort van 0.2 m³/jaar (dynamisch hergebruik, zonder oppervlakteberging) en 1 m³/jaar (dynamisch hergebruik, mét oppervlakteberging) voor een hergebruik van 100 liter/dag, maar dit neemt toe tot respectievelijk 1.9 m³/jaar en 7.4 m³/jaar bij een gemiddeld hergebruik van 150 liter/dag. Wanneer dan de hemelwaterput vergroot wordt van 5.000 naar 10.000 liter, neemt het tekort af van 1.9 m³/jaar en 7.4 m³/jaar tot respectievelijk 0.4 m³/jaar en 3.3 m³/jaar. **Op jaarbasis is dit verschil nog steeds gering in vergelijking met het volledige leidingwaterverbruik.** Door klimaatverandering kunnen de tekorten wel nog sterk toenemen in het beschouwde scenario voor 2100: tot circa 9.8% zonder oppervlakteberging, en 23% met oppervlakteberging (zie tabellen in Bijlage B). Door de capaciteit te vergroten van 5.000 naar 10.000 liter, zal het tekort slinken tot respectievelijk 3% en 14.4%. Opnieuw zijn deze verschillen op jaarbasis relatief gering.

Tot slot moet opgemerkt worden dat de tekorten zich uiteraard voordoen in droge periodes. De tekorten in het huidig klimaat bij een gewenst hergebruik van 100 liter/dag blijven gering: van 0.1% tot 2.7% voor een put van 5.000 liter voor de verschillende configuraties. De impact van droogvallende putten op drinkwatergebruik is bij dergelijk gewenst hergebruik dan ook nog steeds relatief beperkt, zelfs tijdens droge periodes. Voor een gemiddeld hergebruik van 150 liter/dag zijn de leegstandscijfers echter hoger: van 2% tot 13.5% voor hemelwaterputten van 5.000 liter. Een gemiddeld tekort van 13.5% op jaarbasis vraagt echter een groot volume tijdens droge periodes. Dan kunnen deze tekorten wel een significante impact hebben op drinkwaterverbruik.

4 Conclusies

Klimaatverandering zorgt voor veranderende neerslagpatronen: langere droge periodes in de zomer, met frequentere en meer intense extreme neerslagbuien. Neerslagmetingen van de voorbije decennia tonen opmerkelijk vaker extreme buien dan gemiddeld over de ganse periode sinds de start van de neerslagmetingen in 1898. Ook waren de zomers van 2017 en 2018 uitzonderlijk droog. Deze gebeurtenissen kunnen door toeval te verklaren zijn, maar kunnen ook tekenen zijn van klimaatverandering.

Deze studie onderzocht daarom de impact van klimaatverandering op enkele ontwerprichtlijnen voor bronmaatregelen en de leegstand van hemelwaterputten. Deze studie analyseerde bijgevolg zowel aspecten rond droogte en waterschaarste, als wateroverlast. Hiertoe werd de historische neerslagreeksen na aanpassing aan het huidig klimaat gebruikt. Daarnaast werden neerslag- en verdampingsreeksen aangemaakt via een perturbatiemethode voor tijdshorizonten 2050 en 2100 met specifieke en afzonderlijke klimaatscenario's voor het analyseren waterbeschikbaarheid en -overlast. Belangrijk om op te merken is dat deze studie steeds uitgaat van de "hoge impact"-klimaatscenario's: de studie toont dus de grootste te verwachten impacts op vlak van waterbeschikbaarheid en -overlast.

Eerst werden de **droogteperiodes van 2017 en 2018 onderzocht op vlak van extremiteit** aan de hand van het doorlopend potentieel neerslagtekort. Het neerslagtekort werd berekend op basis van de gedetrende neerslag- en verdampingsreeksen. Deze reeksen zijn representatief voor het huidig klimaat. Uit de analyse van centrum België (Ukkel) blijkt dat de droogte van het jaar 2017 een terugkeerperiode had van circa 20 jaar van ongeveer begin juni tot begin augustus (respectievelijk 90 tot 130 dagen na de start van het hydrologisch zomerseizoen, namelijk 1 april). Daarna nam de extremiteit van de droogte sterk af. De droogte van 2018 was extremer met een herhalingstijd van ongeveer 50 jaar vanaf de 2^{de} helft van juli (vanaf 110 dagen in het hydrologisch zomerseizoen). De droogte van 2018 is daardoor vergelijkbaar met die van 1976. De extremiteit van de droogte verschilde over Vlaanderen. De minst extreme situatie, dus met de kleinste neerslagtekorten, deed zich voor in het zuidwesten van Vlaanderen (regio Poperinge). De meest extreme droogte deed zich voor in het centrum en oosten van Vlaanderen (maximum in station Melsele).

Klimaatverandering brengt grotere neerslagextremen, vooral in de zomer. De studie kwantificeerde daarom voor een **groot aantal buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer de overstortdynamiek onder het huidig en toekomstig klimaat**. Concreet werden bergingscapaciteiten beschouwd van 10 tot 500 m³/ha, en doorvoerdebieten van 1 tot 50 l/s/ha. De simulatieresultaten tonen aan dat het aantal overstorten in het huidig klimaat significant hoger liggen dan in het historisch klimaat (1901-2000): het aantal overstorten voor buffers met een capaciteit van 250 m³/ha en een doorvoerdebiet van 20 l/s/ha zijn ongeveer reeds verdrievoudigd. In het hoge-impactklimaatscenario kan het aantal overstorten met ongeveer nog een keer een factor 3 toenemen tegen 2050 en nog significant meer tegen 2100 dan in het huidig klimaat. De precieze toename van het aantal overstorten is sterk afhankelijk van de beschouwde configuratie. Daarom werden alle simulatieresultaten mee opgeleverd met deze studie. Ook de overstortvolumes zijn reeds sterk toegenomen in het huidig t.o.v. het historisch klimaat. Voor buffers met vertraagde doorvoer (constant debiet) van 20 l/s/ha en een capaciteit van 250 m³/ha is het volume bijvoorbeeld toegenomen van 14 m³ in het historisch klimaat tot 87 m³ in het huidig klimaat voor een toevoerende oppervlakte van 1 hectare. De mogelijke toenames in overstortvolumes onder klimaatverandering zijn zeer significant: tot ongeveer 330 m³ tegen 2050 en zelfs 550 m³ in 2100 onder het hoge-impactscenario voor diezelfde buffer. Deze toename is voornamelijk te wijten aan de sterke stijging van neerslagextremen in het hoge-impactscenario. Ook de overstortvolumes en duurtijden van de overstorten werden mee opgeleverd

met de studie om de impact van klimaatverandering te kunnen onderzoeken voor alle mogelijke bufferconfiguraties.

De huidige Gewestelijke Stedenbouwkundige Verordening (GSV) Hemelwater laat toe om **kleinere ontwerppoppervlaktes te gebruiken bij het dimensioneren van infiltratievoorzieningen indien hergebruik** aangetoond kan worden. Voor een standaardconfiguratie van gezinswoningen is bijvoorbeeld een aftrek van 60 m² ontwerppoppervlakte toegelaten indien een hemelwaterput geplaatst wordt, maar voor meer hergebruik is een grotere reductie toegestaan. De huidige tabel in de GSV Hemelwater (Tabel A - Technisch achtergronddocument van de GSV, versie 4 - september 2016) geeft de oppervlakte die nog beschouwd moet worden bij het ontwerp van infiltratievoorzieningen. Deze tabel werd herberekend voor het huidig en het toekomstig klimaat. De ontwerppoppervlaktes stijgen licht tussen het historisch en huidig klimaat: ongeveer +1% tot +3%. In het toekomstig klimaat zijn de nodige toenames groter (tot ongeveer +15% tegen 2100). Daarnaast werd de opmerking gemaakt dat de huidige methode enkel de massabalans op vlak van overstortvolumes beschouwt, en niet de dynamiek van overstorten (bijvoorbeeld extreme piekdebieten). Dit heeft echter een zeer beperkte impact op de extreme overloopvolumes.

Naast een toename van neerslagextremen, zorgt klimaatverandering ook voor langere droge periodes en een lagere waterbeschikbaarheid in de zomer. Hemelwaterputten kunnen daardoor vaker en langer droog komen te staan. **Deze studie kwantificeerde daarom eerst de nodige capaciteit om de historische droogteperiodes van 1921, 1976, 2017 en 2018 te overbruggen.** Deze analyse werd uitgevoerd voor verschillende configuraties: met en zonder oppervlakteberging (plasporming op oppervlaktes), en met een constante en weersafhankelijke vraag naar hemelwater. Telkens werd een effectieve dakoppervlakte van 100 m² aangenomen, en een gemiddeld hergebruiksvolume van 100 liter/dag. Voor het weersafhankelijk hergebruiksvolume werd een neurale netwerk geconfigureerd aan de hand van de waterproductiegegevens van Pidpa 2013-2018, in de veronderstelling dat de vraag naar hemelwater dezelfde variabiliteit vertoont als die van de drinkwaterproductiegegevens. De meest optimistische schattingen tonen nodige hemelwaterputvolumes van 10 m³ (1921), 7 m³ (1976), 5 m³ (2017) en 6 m³ (2018) om de historische droogteperiodes te overbruggen. De meest nadelige schattingen vereisen volumes van 25 m³ (1921), 15 m³ (1976), 10 m³ (2017) en 9 m³ (2018). Deze schattingen liggen sterk uiteen, wat voornamelijk veroorzaakt wordt door het wel of niet inrekenen van oppervlakteberging (plasporming). Verwacht wordt dat platte daken eerder tegen de pessimistische schatting aanliggen, terwijl hellende daken eerder bij de optimistische (dus lagere nodige volumes) inschattingen liggen. Het is evenwel niet aan te raden de minimale capaciteit van hemelwaterputten drastisch op te trekken (tot bijvoorbeeld meer dan 10 m³). Dergelijke grotere capaciteiten zijn immers slechts zeer uitzonderlijk nodig, zelfs in het toekomstig klimaat (zie ook verder). Ook opvallend is dat de zomer van 1921 veel grotere volumes vergt dan de meer recente droogtes van 2017 en 2018. In 1921 lagen de temperaturen weliswaar lager dan in 2017 en 2018 (waardoor de verdamping minder is, en droogte zich voor een gelijke periode van geen neerslag minder snel manifesteert), maar de periode zonder neerslag was aanzienlijk langer: van ongeveer eind april tot zelfs begin november viel er amper neerslag. In deze context is het ook interessant om aan te halen dat hydrologische droogte sterk verschillend is van het droogvallen van hemelwaterputten. Immers, hemelwaterputten kunnen na één (extreme) bui terug volledig gevuld zijn en opnieuw langere periodes van droogte overbruggen. Hydrologische droogte vergt echter langere periodes van (niet-extreme) neerslag om de ondergrond terug aan te vullen. Medio augustus 2018 viel er over gans Vlaanderen neerslag, waardoor de hemelwaterputten opnieuw aangevuld werden tot (bijna) hun maximale capaciteit. De hydrologische droogte manifesteert zich op moment van schrijven (november 2018) echter nog steeds in lage grondwaterstanden.

Vervolgens werd een gelijkaardige analyse uitgevoerd voor het bepalen van de **nodige capaciteit van hemelwaterputten om gewenste leegstandspercentages te bereiken onder het huidig en toekomstig klimaat.** Opnieuw lopen de cijfers sterk uiteen naargelang de beschouwde configuratie (met of zonder

oppervlakteberging, en met een constant of weersafhankelijk hergebruiksprofiel). Om een leegstandspercentage van 1% te verkrijgen, lopen de nodige hemelwaterputvolumes uiteen van 2.9 m³ tot 6.6 m³ in het huidige klimaat. Tegen 2050 loopt dit op van 3.3 m³ tot 9.4 m³, en voor het beschouwde hoge-impactscenario in 2100 van 4.5 m³ tot 10.8 m³. Deze capaciteiten sluiten bijgevolg aan met de huidige praktijk (een hemelwaterput van minimum 5 m³), maar liggen voor de toekomstige klimaatscenario's wel hoger. De resultaten kunnen ook anders geformuleerd worden. Zo heeft een hemelwaterput van 5 m³ een leegstandspercentage van 0.1% tot 2.2% in het huidige klimaat (opnieuw afhankelijk van de precieze configuratie). Het leegstandspercentage loopt op tot het bereik van 0.2% tot 4.1% in het klimaat 2050, en 0.6% tot 7.7% in 2100. Meer onderzoek is nodig om dit bereik voor verschillende configuraties (bijvoorbeeld met/zonder oppervlakteberging) te kunnen verkleinen, of de grootte van hemelwaterputten af te stemmen op de randvoorwaarden (bijvoorbeeld een hellend/plat dak). Deze cijfers gelden voor een effectieve toevoerende oppervlakte van 100 m² en een gemiddeld hergebruik van 100 liter/dag. Voor kleinere of grotere dakoppervlaktes, of andere hergebruiksvolumes, moet een herberekening gebeuren. Deze cijfers zijn immers niet lineair schaalbaar. **Daarom wordt de tool Sirio uitgebreid met een bijkomende module voor het dimensioneren van hemelwaterputten voor een gewenst leegstandspercentage.** Op die manier kan deze manier van dimensioneren ook eenvoudig naar de praktijk vertaald worden.

Tot slot werd een inschatting gemaakt van de **implicatie van grotere hemelwaterputten op het drinkwaterverbruik**. Concreet werd zowel voor het huidige als het toekomstig klimaat berekend hoeveel leidingwater (of bronwater) nodig is om droogvallende hemelwaterputten aan te vullen om aan het gevraagd hergebruik te kunnen voldoen. Uit de simulaties met een verondersteld hergebruik van 100 liter/dag en een dakoppervlakte van 100 m² blijkt dat deze volumes beperkt zijn tot ongeveer 1 m³/jaar voor het huidige klimaat per kavel. In het toekomstig klimaat kunnen deze tekorten toenemen tot 3.3 m³, maar gelet op het totaal drinkwaterverbruik blijven deze cijfers beperkt. Wel moet opgemerkt worden dat deze volumes zich (uitsluitend) in droge periodes voordoen, en de waterbevoorrading net dan onder druk staat. Wanneer een hergebruiksdebiet van 150 liter/dag wordt aangenomen nemen de tekorten in het huidige klimaat toe tot, in de meest negatieve schatting, 7.4 m³/jaar voor een hemelwaterput van 5.000 liter, en 3.3 m³/jaar voor een put van 10.000 liter. Op jaarbasis blijft dit verschil beperkt in vergelijking met het totaal drinkwaterverbruik.

5 Aangeleverde bestanden

5.1 Tijdreeksen toekomstig klimaat

De tijdreeksen voor het toekomstig klimaat, uitgebreider beschreven in §1.2, werden eveneens mee opgeleverd met deze studie. Bij het gebruik van deze reeksen is het van belang dat deze correct gecombineerd worden in simulaties:

- De neerslagreeks voor de periode 1901-2016 moet gecombineerd worden met de pET-reeks volgens de Bultot-methode.
- De neerslagreeks voor de periode 1898-2016 moet gecombineerd worden met de pET-reeks volgens de Hargreaves-methode.

In de naamgeving van de geperturbeerde reeksen komt telkens de periode terug ("19012016" of "18982016"). Ook wordt er telkens aangeduid of het gaat om de oorspronkelijke reeksen (dus zonder detrending) of na detrending (toevoeging van "c" in de naamgeving na de periode wijst erop dat het gaat om de gedetrende reeksen; zonder "c" gaat het om de oorspronkelijke reeksen). In de naamgeving van de pET-reeksen wordt ook de pET-methode vermeld ("Bultot" of "Hargreaves").

5.2 Overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer

In het kader van de overstortanalyse van buffervoorzieningen met vertraagde doorvoer (zie ook §3.1) werden volgende bestanden mee opgeleverd met de studie:

- 8 tabellen (.xlsx) met het aantal overstorten in 100 jaar. Elke tabel omvat alle beschouwde configuraties voor 1 klimaatscenario (historisch 1901-2000, huidig klimaat, 2050 of 2100) en doorvoerrelatie (constant of lineair).
- 8 tabellen (.xlsx) met de onafhankelijke overstortvolumes, vermelding van de duur van de overstortgebeurtenis en het beginmoment van de overstort. Elke tabel omvat alle beschouwde configuraties voor 1 klimaatscenario (historisch 1901-2000, huidig klimaat, 2050 of 2100) en doorvoerrelatie (constant of lineair).

5.3 Analyse equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerp van infiltratievoorzieningen bij verhoogd hergebruik

In het kader van de analyse van de equivalente afwaterende oppervlakte voor het ontwerp van infiltratievoorzieningen bij een verhoogd hergebruik (zie ook §3.2), werden volgende bestanden mee opgeleverd met de studie:

- Tabel (**Tabel_A_historisch.xlsx**) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van de meetreeks 1901-2000;
- Tabel (**Tabel_A_detrended.xlsx**) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van de gedetrende Ukkelreeks;
- Tabel (**Tabel_A_high_2050.xlsx**) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van het hoogzomer klimaatscenario 2050;
- Tabel (**Tabel_A_high_2100.xlsx**) met de equivalente ontwerpoppervlaktes berekend op basis van het hoogzomer klimaatscenario 2100.

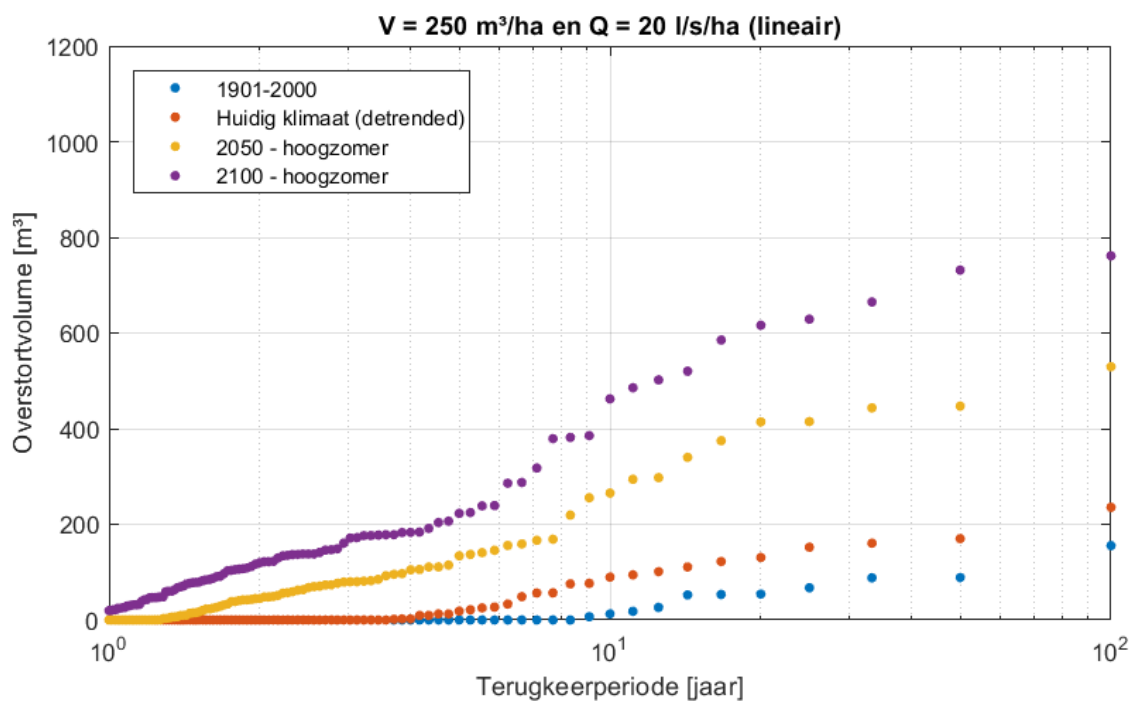
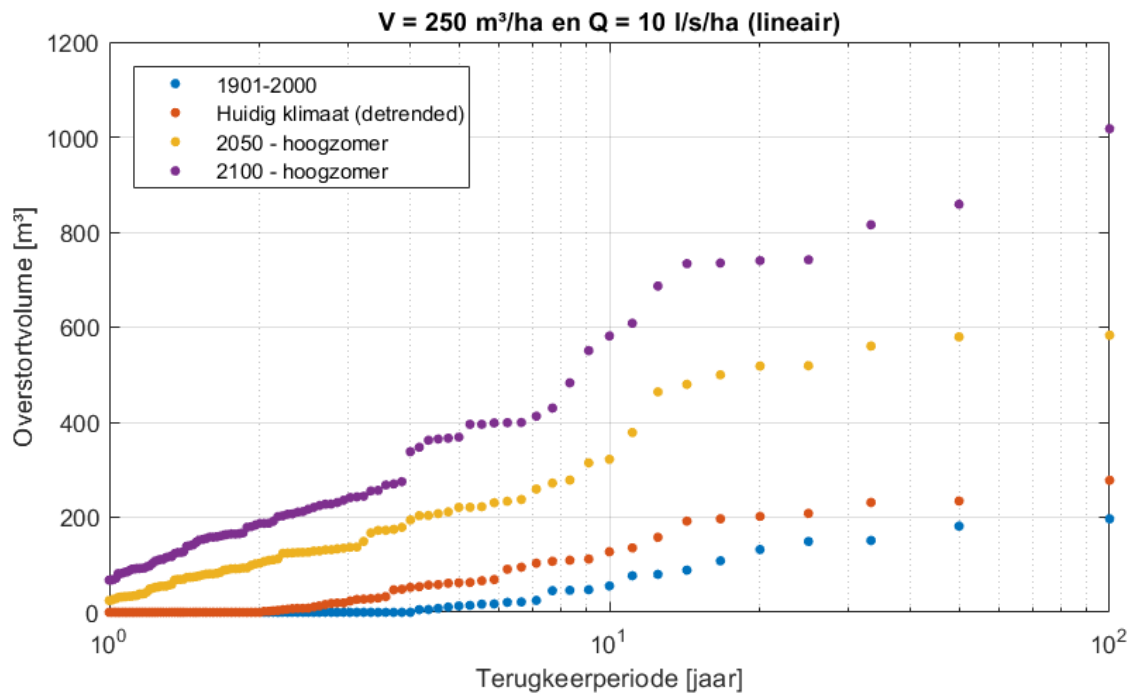
Daarnaast werd ook voor het huidig klimaat (gedetrende Ukkelreeksen) het aantal overstorten bepaald voor elke beschouwde configuratie. De resultaten van die analyse werden mee opgeleverd in het bestand "**Tabel_aantal overstorten detrended.xlsx**" in de map "Analyse equivalente afwaterende oppervlakte".

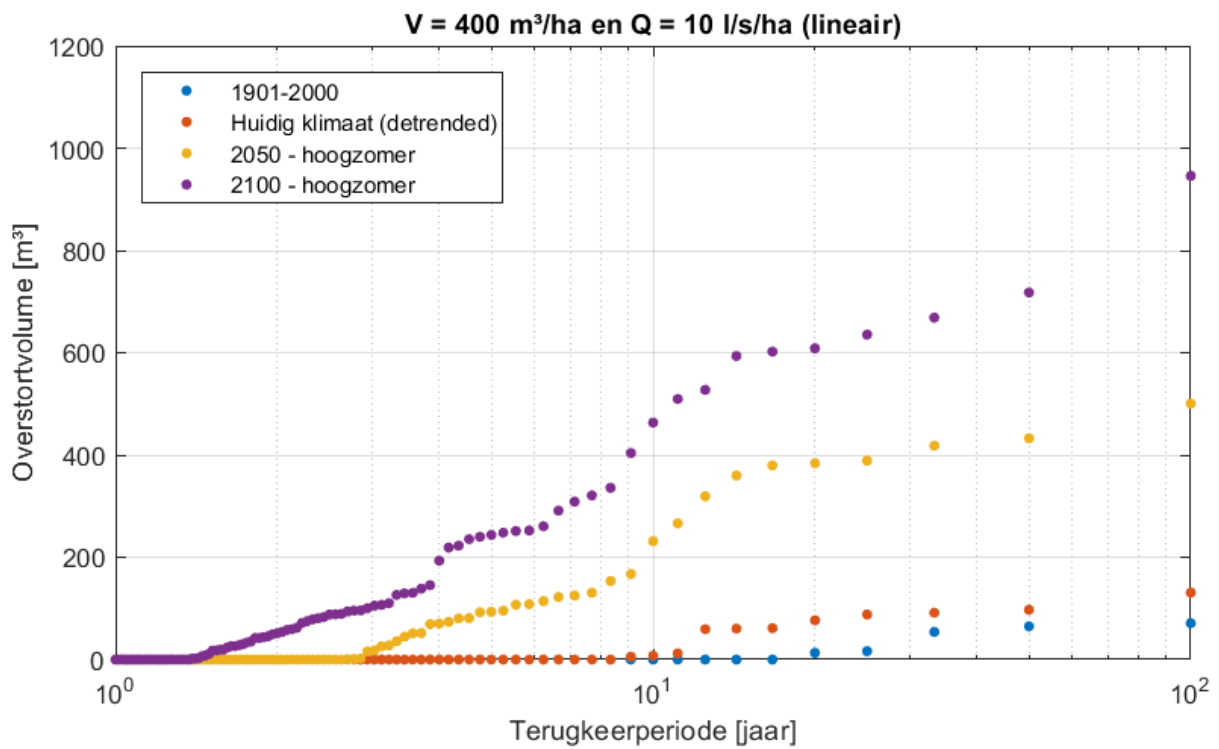
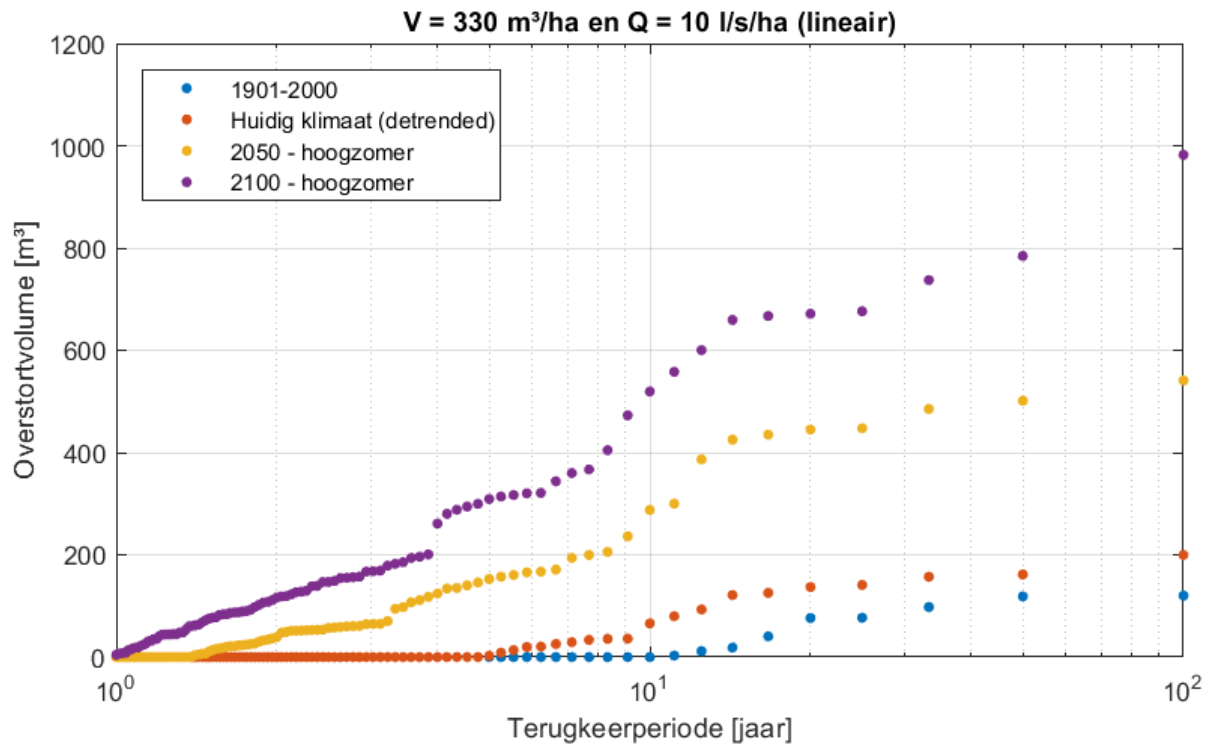
6 Referenties

- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G., 1983. 'Estimation de l'évapotranspiration potentielle en Belgique'. Publications/publicaties série/serie A, No/Nr 112. Institut Royal Météorologique de Belgique - Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, 28 p.
- Ntegeka, V., Wolfs, V., Willems, P., 2017, 'Aanpassen historische Ukkelreeksen aan huidig klimaat', Sumaqua in opdracht van Vlaamse Milieumaatschappij, januari 2018, 43 p.
- VMM & Sumaqua, 2018, 'Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen', Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer, Dienst Hoogwaterbeheer & Sumaqua bvba (in opdracht van VMM), maart 2018, 44 p.
- Willems P., Vrac M., 2011, 'Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change', *Journal of Hydrology*, 402, 193–205
- Willems P., 2013a, 'Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe', *Climatic Change*, 120(4), 931-944
- Willems, P., 2013b. 'Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations', *Journal of Hydrology*, 490, 126-133
- Willems, P., Wolfs, V., Ntegeka, V., 2018a, 'Aanpassen historische Ukkelreeks aan huidig klimaat'. Studie uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij. p. 46.
- Willems, P., Wolfs, V., Ntegeka, V., 2018b, 'Analyse drinkwaterverbruik'. Studie uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij. p.74.

Bijlage A: Bijkomende figuren overstortvolumes buffervoorzieningen met lineaire doorvoer

In uitbreiding op §3.1- Overstortanalyse van buffervoorzieningen bevat deze bijlage de figuren met POT overstortvolumes met lineaire doorvoer.





Bijlage B: Analyse implicaties op drinkwaterverbruik - hergebruik 150 l/dag

Deze bijlage bouwt verder op de analyse uit §3.3.3. In deze bijlage werd echter een gemiddeld hergebruik van 150 l/dag beschouwd.

Tabel 18: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: constant hergebruik van 150l/dag, zonder oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	3.3 m ³	1.1 m ³	0.7 m ³	0.4 m ³	0.3 m ³	0.2 m ³	0.2 m ³	0.1 m ³	0 m ³
	5.9 %	2 %	1.2 %	0.8 %	0.5 %	0.4 %	0.3 %	0.1 %	0 %
Klimaat 2050	4.3 m ³	1.6 m ³	1.1 m ³	0.7 m ³	0.5 m ³	0.4 m ³	0.3 m ³	0.1 m ³	0.1 m ³
	7.8 %	3 %	2 %	1.3 %	1 %	0.7 %	0.6 %	0.2 %	0.1 %
Klimaat 2100	6.6 m ³	3.5 m ³	2.5 m ³	1.8 m ³	1.3 m ³	0.9 m ³	0.7 m ³	0.2 m ³	0 m ³
	12 %	6.4 %	4.7 %	3.3 %	2.3 %	1.7 %	1.2 %	0.3 %	0.1 %

Tabel 19: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: dynamisch hergebruik van gemiddeld 150l/dag, zonder oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	4.7 m ³	1.9 m ³	1.2 m ³	0.9 m ³	0.6 m ³	0.4 m ³	0.4 m ³	0.2 m ³	0.1 m ³
	8.6 %	3.4 %	2.3 %	1.6 %	1.1 %	0.8 %	0.7 %	0.3 %	0.2 %
Klimaat 2050	6 m ³	2.9 m ³	2.1 m ³	1.5 m ³	1.1 m ³	0.9 m ³	0.7 m ³	0.3 m ³	0.1 m ³
	10.9 %	5.3 %	3.7 %	2.7 %	2.1 %	1.6 %	1.3 %	0.5 %	0.2 %
Klimaat 2100	8.6 m ³	5.4 m ³	4.3 m ³	3.5 m ³	2.7 m ³	2.1 m ³	1.6 m ³	0.5 m ³	0.2 m ³
	15.8 %	9.8 %	7.9 %	6.3 %	5 %	3.9 %	3 %	0.9 %	0.3 %

Tabel 20: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: constant hergebruik van 150l/dag, met oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	9.5 m ³	6 m ³	4.9 m ³	4.1 m ³	3.4 m ³	2.9 m ³	2.4 m ³	1.1 m ³	0.4 m ³
	17.4 %	10.9 %	8.9 %	7.4 %	6.2 %	5.2 %	4.4 %	1.9 %	0.8 %
Klimaat 2050	11.5 m ³	7.9 m ³	6.7 m ³	5.8 m ³	5.1 m ³	4.5 m ³	3.9 m ³	2.4 m ³	1.5 m ³
	21.1 %	14.4 %	12.2 %	10.6 %	9.3 %	8.2 %	7.2 %	4.3 %	2.7 %
Klimaat 2100	14.3 m ³	10.8 m ³	9.6 m ³	8.7 m ³	7.8 m ³	7 m ³	6.4 m ³	4.2 m ³	3.1 m ³
	26 %	19.8 %	17.6 %	15.8 %	14.3 %	12.9 %	11.6 %	7.6 %	5.7 %

Tabel 21: Tekorten [m³/jaar] om aan het gevraagd hergebruik te voldoen. Het percentage t.o.v. de totale vraag voor hergebruik is eveneens getoond. Configuraties: dynamisch hergebruik van gemiddeld 150l/dag, met oppervlakteberging.

	3 m ³	5 m ³	6 m ³	7 m ³	8 m ³	9 m ³	10 m ³	15 m ³	20 m ³
Huidig klimaat	11.1 m ³	7.4 m ³	6.2 m ³	5.3 m ³	4.5 m ³	3.8 m ³	3.3 m ³	1.6 m ³	0.9 m ³
	20.3 %	13.5 %	11.4 %	9.6 %	8.2 %	7 %	6 %	3 %	1.6 %
Klimaat 2050	13.2 m ³	9.4 m ³	8.2 m ³	7.2 m ³	6.4 m ³	5.7 m ³	5.1 m ³	3 m ³	2 m ³
	24 %	17.2 %	15 %	13.2 %	11.7 %	10.4 %	9.3 %	5.5 %	3.7 %
Klimaat 2100	16 m ³	12.6 m ³	11.4 m ³	10.4 m ³	9.5 m ³	8.7 m ³	7.9 m ³	5.1 m ³	3.7 m ³
	29.2 %	23 %	20.8 %	19 %	17.3 %	15.8 %	14.4 %	9.3 %	6.7 %



SUMAQUA

Tiensesteenweg 28

3001 Leuven, BELGIUM

dr. ir. Vincent Wolfs

Tel.: +32 474 422 003

Mail: vincent.wolfs@sumaqua.be

www.sumaqua.be

