



Vlaanderen
is milieu



Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen

2018

Documentbeschrijving

Titel

Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen

Samenstellers

Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer
Sumaqua bvba (in opdracht van VMM)

Inhoud

Dit rapport beschrijft de impact van klimaatverandering op de frequentie, duur en intensiteit van meteorologische droogte tegen het jaar 2030, 2050 en 2100 aan de hand van het neerslagtekort, de Standardized Precipitation Index (SPI) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI). De meteorologische waarnemingen voor de historische referentieperiode van 1901 t.e.m. 2000 (huidig klimaat) worden vergeleken met door klimaatmodellen geperturbeerde gegevensreeksen die een klimaatprojectie geven gecentreerd rond de jaren 2030, 2050 en 2100.

Wijze van refereren

Vlaamse Milieumaatschappij (2018), Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen.

Verantwoordelijke uitgever

Michiel Van Peteghem, Vlaamse Milieumaatschappij

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij
Dokter de Moorstraat 24-26
9300 Aalst
Tel: 053 72 62 10
info@vmm.be

Depotnummer

D/2018/6871/013

Dit rapport bevat de mening van de auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse Milieumaatschappij.

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de impact van klimaatverandering op de frequentie, duur en intensiteit van meteorologische droogte tegen het jaar 2100 aan de hand van de Standardized Precipitation Index (SPI) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI). Deze droogte-indicatoren geven weer hoe uitzonderlijk de totale neerslaghoeveelheid (SPI) en de waterbalans (SPEI; het verschil tussen neerslag en evapotranspiratie) zijn ten opzichte van het historische normaal voor een bepaalde periode van het jaar. Voor de analyse van het huidige klimaat werden waarnemingen van neerslag en evapotranspiratie te Ukkel voor de periode 1901-2000 gebruikt. Voor de analyse van het klimaat in het jaar 2100 werden dezelfde, maar door 30 verschillende klimaatmodellen voor het klimaat van 2100 geperturbeerde meetreeksen gebruikt. Op basis van de modelsimulaties werden drie klimaatscenario's gedefinieerd, een -weinig waarschijnlijk- lage-impactklimaatscenario, een midden-impactscenario en een hoge-impactscenario. Het klimaat zal tegen 2100 volgens de huidige beschikbare gegevens en kennis met hoge waarschijnlijkheid ergens gelegen zijn tussen de huidige klimaatcondities en de hoge-impactvariant van de klimaatscenario's. Deze evoluties zijn zich nu al aan het voltrekken en zullen zich de komende decennia geleidelijk aan verderzetten. Uiteraard is het niet mogelijk om de precieze impact te bepalen door onzekerheden in de klimaat-impactmodelleringen en de onzekere toekomstevolutes in de uitstoot aan broeikasgassen. Het is dan ook binnen dit kader dat de cijfers in dit rapport geïnterpreteerd moet worden.

Neerslagtekort

Het totaal neerslagtekort gedurende het hydrologisch zomerseizoen voor de 5-percentielwaarde (i.e. het meest droge jaar in een periode van 20 jaar) zal tegen 2100 stijgen tot 485 mm tegenover 237 mm in het huidige klimaat. De neerslag die kan verdampen gedurende het hydrologisch zomerseizoen: stijging tot 77% (tegenover 67% in het huidige klimaat). De frequentie van voorkomen van het neerslagtekort kent een stijging tot een factor 10 voor de 5-percentielwaarde, wat betekent dat een extreem neerslagtekort dat zich nu gemiddeld eens om de 20 jaar voordoet, zich in de toekomst gemiddeld eens om de 2 jaar kan voordoen. De duur van het neerslagtekort kent een tot een factor 4 voor het aaneensluitend aantal dagen met een extreem neerslagtekort, gedefinieerd als dagen waarbij de 5-percentielwaarde voor het huidige klimaat wordt overschreden.

Standardized Precipitation Index

Analyse van de Standardized Precipitation Index (SPI) en de veranderingen tussen de waarden waargenomen in de periode 1901 en de gemodelleerde waarden voor de periode 1901-2000 geeft voornamelijk voor het hoge-impact klimaatscenario (het 95^e percentiel van de 30 beschouwde klimaatscenario's) en voor de kortere-termijn indices (SPI-1 en SPI-3) substantiële verhogingen van het voorkomen, de duur en de magnitude van droogtes worden waargenomen. Voor het midden-scenario wordt slechts een beperkte toename van de frequentie, duur en magnitude van de SPI waargenomen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de relatief grote variabiliteit in de verwachte neerslagverandering voor de zomermaanden in Vlaanderen in de verschillende klimaatmodellen. De meerderheid van de modellen wijst op een afname van de neerslag in de zomermaanden, met een substantiële afname tot -52% voor het hoge impactscenario (Brouwers et al., 2015). Voor de

langere-termijn indices (SPI-6 en SPI-12) wordt eerder een status quo waargenomen. Deze status quo is vermoedelijk te wijten aan de langere accumulatieperiode voor deze indicatoren die ook delen van de voorbije winter (SPI-6) en zelfs zomer (SPI-12) in rekening brengt. Dit wijst erop dat de verwachte toename van de winterneerslag tegen 2100 deels de effecten van een verminderende zomerneerslag kan compenseren voor wat betreft de langere-termijnaspecten van het watersysteem (b.v. grondwater).

Standardized Precipitation Evaporation Index

De SPI houdt echter enkel rekening met de neerslaghoeveelheden en om ook het effect van de toename in evapotranspiratie door klimaatverandering te begroten werd een analyse uitgevoerd van de Standardized Evapotranspiration Index (SPEI). Deze analyse en vergelijking met de resultaten voor de SPI toont aan dat een belangrijk aandeel van de impact van klimaatverandering op de frequentie, de duur en de magnitude van droogtes tegen het jaar 2100 te wijten zal zijn aan zowel veranderingen in evapotranspiratie als veranderingen in de neerslag. Voor de SPEI wordt tegen 2100 een duidelijke verhoging van de duur, frequentie en magnitude verwacht in het midden-impact klimaat-scenario (50^e percentiel van de 30 beschouwde klimaatscenario's) en een sterke verhoging in het hoge-impact klimaatscenario. Bovendien toont de SPEI, in tegenstelling tot de SPI, tegen 2100 ook voor de langere accumulatieperioden van 6 maanden (SPEI-6) en 12 maanden (SPEI-12) duidelijke verhogingen van de frequentie, duur en magnitude van zeer droge en extreem droge periodes. Dit wijst erop dat wanneer naast neerslag ook het effect van evapotranspiratie, waarvoor een verhoging gedurende het hele jaar verwacht wordt, meegerekend wordt in het effect van klimaatverandering op droogtes, ook op de langere termijn de toegenomen winterneerslag niet meer voldoende is om te compenseren voor de waarschijnlijk afnemende zomerneerslag en toenemende evapotranspiratie.

De droogte van 1976

De hydrologische zomerperiode van 1976 was één van de meest droge in de voorbije 100 jaar en doet zich in het huidige klimaat ongeveer 2 keer per 100 jaar voor (de zomer van 1921 kende een minstens even erge droogte). Het neerslagtekort waargenomen in de zomer van 1976 kan zich tegen 2100 om de 4 à 5 jaar voordoen. Een analyse van de SP(E)I voor de zomer van 1976 en de resultaten van de toekomstscenario's voor 2100 toont dat deze droogte van 1976 ongeveer 2 maal vaker voorkomen in het middenscenario, in het hoge-impactscenario wordt dat al tot 15 maal vaker.

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding	8
2 Materiaal & methoden	9
2.1 Gegevens	9
2.2 Indicatoren	11
2.2.1 Neerslagtekort	11
2.2.2 Standardized Precipitation (Evaporation) Index	11
2.3 Analyse	13
2.3.1 Neerslagtekort	13
2.3.2 Standardized Precipitation (Evaporation) Index	14
3 Resultaten	15
3.1 Neerslag	15
3.2 Evapotranspiratie	16
3.3 Neerslagtekort	17
3.3.1 Huidig klimaat	17
3.3.2 Toekomstig klimaat	18
3.4 Standarized Precipitation Index (SPI)	23
3.4.1 Frequentie en voorkomen	23
3.4.2 Duur	26
3.4.3 Intensiteit	29
3.5 Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI)	31
3.5.1 Frequentie en voorkomen	31
3.5.2 Duur	34
3.5.3 Intensiteit	37
3.6 De droogte van 1976	39
4 Besluit	42
Referenties	44

Figuren

1	Berekeningsmethode SPI	12
2	Maandgemiddelde neerslagverandering voor 2100	15
3	Maandgemiddelde temperatuurverandering voor 2100	16
4	Fractie maandverdamping over maandneerslag	17
5	Cumulatief neerslagtekort	17
6	Percentielen cumulatief neerslagtekort	18
7	5-percentiel cumulatief neerslagtekort	19
8	1-percentiel cumulatief neerslagtekort	19
9	25-percentiel cumulatief neerslagtekort	20
10	Verhogingsfactor voor de voorkomingsfrequentie van het cumulatief neerslagtekort	20
11	Aandeel droogteklassen voor SPI	24
12	Distributie SPI-waarden	25
13	Relatie tussen verhogingsfactor en percentiel voor de duur van de droogtes o.b.v. de SPI	26
14	Duur van de zeer droge en extreem droge periodes voor de SPI	28
15	Relatie tussen verhogingsfactor en percentiel voor de magnitude van de droogtes o.b.v. de SPI	29
16	Magnitude van de zeer droge en extreem droge periodes voor de SPI	31
17	Aandeel droogteklassen voor SPEI	32
18	Distributie SPEI-waarden	33
19	Relatie tussen verhogingsfactor en percentiel voor de duur van de droogtes o.b.v. de SPEI	36
20	Duur van de zeer droge en extreem droge periodes voor de SPEI	36
21	Relatie tussen verhogingsfactor en percentiel voor de magnitude van de droogtes o.b.v. de SPEI	38
22	Magnitude van de zeer droge en extreem droge periodes voor de SPEI	38

Tabellen

1	Klimaatmodellen	10
2	Definitie droogteklassen SP(E)I	12
3	Verhogingsfactor voor de voorkomingsfrequentie van het cumulatief neerslagtekort	21
4	Verhogingsfactor voor de amplitude van overschrijding van een extreem neerslagtekort	22
5	Verhogingsfactor voor de amplitude van overschrijding van een extreem neerslagtekort	22
6	Verhoging van de duur van een extreem neerslagtekort	23
7	Frequentie van de verschillende droogteklassen volgens de SPI	25
8	Voorkomen van de verschillende droogteklassen volgens de SPI	26
9	Duur van de verschillende droogteklassen volgens de SPI	27
10	Magnitude van de verschillende droogteklassen volgens de SPI	30
11	Frequentie van de verschillende droogteklassen volgens de SPEI	33
12	Voorkomen van de verschillende droogteklassen volgens de SPEI	34
13	Duur van de verschillende droogteklassen volgens de SPEI	35
14	Magnitude van de verschillende droogteklassen volgens de SPEI	37
15	Droogteduur en -magnitude voor 1976 voor de verschillende droogteklassen volgens de SPI	40
16	Droogteduur en -magnitude voor 1976 voor de verschillende droogteklassen volgens de SPEI	41

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de impact van klimaatverandering op de frequentie, duur en intensiteit van meteorologische droogte tegen het jaar 2030, 2050 en 2100 aan de hand van het neerslagtekort, de Standardized Precipitation Index (SPI: [McKee et al., 1993](#)) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI: [Vicente-Serrano et al., 2010](#)). Deze indicatoren geven weer hoe uitzonderlijk het neerslagtekort, de totale neerslag (SPI) en de meteorologische waterbalans (SPEI) zijn ten opzichte van het historische normaal voor een bepaalde periode van het jaar, en zijn internationaal bij de meest gebruikte indicatoren om droogte te monitoren. Een meer gedetailleerde beschrijving van deze indicatoren wordt gegeven in [sectie 2.2: Indicatoren](#).

Dit rapport is een verkennende studie op basis van waargenomen en door klimaatmodellen geperturbeerde meteorologische gegevens. Deze studie werd uitgevoerd om een eerste invulling te geven aan het droogteluik van het [klimaatportaal Vlaanderen](#) en gaat vooraf aan het uitgebreidere project "Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingent". Dit project zal resulteren in droogtekaarten voor Vlaanderen op basis van gemodelleerde gegevens zodat ook de ruimtelijke variatie en hydrologische aspecten van de impact van klimaatverandering op droogte kunnen worden ingeschat.

2 Materiaal & methoden

2.1 Gegevens

Als basisgegevens worden de meetgegevens voor de 100-jarige periode 1901-2000 te Ukkel gebruikt. Deze omvatten dagelijkse neerslag (P, mm) en dagelijkse evapotranspiratie (ET, mm). Als indicator voor evapotranspiratie wordt de potentiële verdamping gebruikt. Omdat deze sterk afhankelijk is van het type landgebruik wordt in deze studie de verdamping boven een “referentiegewas” gebruikt, een benadering van een in Vlaanderen veelvoorkomend type landgebruik dat bovendien rechtstreeks verband houdt met landbouw. Droogte zorgt immers in de eerste plaats voor negatieve impact in de landbouw. Dagelijkse evapotranspiratie voor een referentiegewas werd berekend volgens de Penman-Monteith formule (Hosseinzadehtalaei et al., 2017; Ntegeka et al., 2017) op basis van waarnemingen van zonnestraling, luchttemperatuur, windsnelheid, relatieve luchtvochtigheid en luchtdruk te Ukkel. Deze methode werd geselecteerd na vergelijking van een set van acht verschillende methodes voor de berekening van referentiegewasverdamping (ET_0) en de impactschatting van de klimaatverandering op de ET_0 in een recent onderzoek aan de KU Leuven - Afdeling Hydraulica door Hosseinzadehtalaei et al. (2017). De volgende methodes werden daarbij vergeleken: Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Schendel, Makkink, Turc, Jensen-Haise, Tabari en de standaard Penman-Monteith FAO 56 methode. Gegeven de systematische afwijking in de klimaatimpactschatting via de eenvoudigere temperatuur- en zonnestraling-gebaseerde methodes werd de gedetailleerde Penman-Monteith methode aanbevolen. Ze is gebaseerd op het grootste aantal verklarende meteorologische variabelen.

Zowel voor de 100-jarige historische periode 1901-2000 als de toekomstperiodes gecentreerd rond 2030, 2050 en 20100 werd de Penman-Monteith berekening toegepast zoals gedetailleerd beschreven in Tabari et al. (2014) en conform Penman (1948), Bultot et al. (1983) en Gellens-Meulenberghs en Gellens (1992). Deze methode is gebaseerd op de dagtjiddreeksen van de volgende meteorologische uitvoervariabelen van de klimaatmodellen:

- Luchtdruk op zeeniveau (“Mean sea level pressure”: psl)
- Inkomende zonnestraling (“Surface downwelling shortwave radiation”: rsds)
- Daggemiddelde luchttemperatuur (“Mean 2-meter air temperature”: tas)
- Dagmaximale luchttemperatuur (“Maximum 2-meter air temperature”: tasmax)
- Dagminimale luchttemperatuur (“Minimum 2-meter air temperature”: tasmin)
- Windsnelheid (“Mean 10-meter wind speed”: sfcWind)
- Luchtvochtigheid (“Near-surface relative humidity”: rhs)

Volgens de Allen et al. (1998) methode wordt de referentiegewasverdamping (ET_0) aan de hand van de Penman-Monteithmethode als volgt berekend:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (\text{vgl. 1})$$

N°	model	RCP	N°	model	RCP
1	CNRM-CM5-r1-85	RCP 8.5	16	MIROC-ESM-CHEM-r1-60	RCP 6.0
2	GFDL-CM3-r1-85	RCP 8.5	17	BNU-ESM-r1-45	RCP 4.5
3	GFDL-ESM2G-r1-85	RCP 8.5	18	CNRM-CM5-r1-45	RCP 4.5
4	GFDL-ESM2M-r1-85	RCP 8.5	19	GFDL-ESM2G-r1-45	RCP 4.5
5	IPSL-CM5A-LR-r3-85	RCP 8.5	20	GFDL-ESM2M-r1-45	RCP 4.5
6	IPSL-CM5A-MR-r1-85	RCP 8.5	21	MIROC-ESM-r1-45	RCP 4.5
7	MIROC-ESM-r1-85	RCP 8.5	22	MIROC-ESM-CHEM-r1-45	RCP 4.5
8	MIROC-ESM-CHEM-r1-85	RCP 8.5	23	MRI-CGCM3-r1-45	RCP 4.5
9	MRI-CGCM3-r1-85	RCP 8.5	24	INMCM4-r1-45	RCP 4.5
10	GFDL-CM3-r1-60	RCP 6.0	25	BNU-ESM-r1-26	RCP 2.6
11	GFDL-ESM2G-r1-60	RCP 6.0	26	GFDL-ESM2G-r1-26	RCP 2.6
12	GFDL-ESM2M-r1-60	RCP 6.0	27	IPSL-CM5A-MR-r1-26	RCP 2.6
13	IPSL-CM5A-LR-r1-60	RCP 6.0	28	MIROC-ESM-r1-26	RCP 2.6
14	IPSL-CM5A-MR-r1-60	RCP 6.0	29	MIROC-ESM-CHEM-r1-26	RCP 2.6
15	MIROC-ESM-r1-60	RCP 6.0	30	MRI-CGCM3-r1-26	RCP 2.6

Tabel 1: Overzicht van de 30 klimaatmodellen waarvoor zowel neerslag als de nodige basisgegevens voor het berekenen van evapotranspiratie beschikbaar zijn.

waarbij ET_0 de eenheid heeft van $\text{mm} \cdot \text{dag}^{-1}$, R_n de netto straling in $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$, G de bodemwarmteflux in $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$, γ de psychrometrische constante in $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$, e_s de verzadigingswaterdampdruk in kPa, e_a de werkelijke waterdampdruk in kPa, Δ de helling van de regressie tussen de verzadigingswaterdampdruk en de luchttemperatuur in $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, T_a de dag-gemiddelde luchttemperatuur in $^\circ\text{C}$ en U_2 de daggemiddelde windsnelheid dicht bij de oppervlakte in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Allen et al., 1998).

De bodemwarmteflux werd berekend via de Monteith-formule, maar met de parameters seizoenafhankelijk ingesteld zoals in Tabari et al. (2014) op basis van de stralingsmetingen te Ukkel van Bultot et al. (1983). Ook de netto straling en de verzadigings- en werkelijke waterdampdruk werden berekend zoals in Tabari et al. (2014) op basis van de Ukkel-locatie.

Uit deze gegevens werd vervolgens de waterbalans (WBal, mm) berekend als het dagelijkse verschil tussen neerslag en evapotranspiratie (vgl. 2).

$$WBal = P - ET \quad (\text{vgl. 2})$$

Voor de klimaatprojecties werden de resultaten van de meest recente klimaatmodelsimulaties voor Vlaanderen gebruikt (Brouwers et al., 2015; Tabari et al., 2014). 30 van deze modellen geven resultaten voor de nodige parameters om de evapotranspiratie te berekenen aan de hand van de Penman-Monteith formule. Deze 30 modellen (tabel 1) werden gebruikt om de neerslagwaarnemingen en basisgegevens voor de evapotranspiratie te Ukkel te perturberen naar een klimaatsituatie voor het jaar 2100 volgens vier RCP's (Representative Concentration Pathways). Een meer gedetailleerde beschrijving van de waarnemingen, de perturbatie van de waarnemingen naar klimaatcondities voor het jaar 2100, en de resulterende geperturbeerde neerslag- en evapotranspiratiereeksen wordt gegeven in Ntegeka et al. (2017).

2.2 Indicatoren

In dit rapport worden drie proxy-indicatoren onderzocht die internationaal vaak gebruikt worden om meteorologische droogte te karakteriseren: het neerslagtekort, de Standardized Precipitation Index (SPI) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI).

2.2.1 Neerslagtekort

Het “doorlopend potentieel neerslagtekort” is gebaseerd op het neerslagoverschot. Dit overschot wordt berekend door het verschil te berekenen tussen de hoeveelheid gevallen neerslag en berekende referentieverdamping. Het verschil tussen de gevallen neerslag en de referentiegewasverdamping wordt dagelijks gesommeerd en dit gedurende het hydrologisch zomerseizoen van 1 april t.e.m. 30 september. Door deze cumulatieve som dagelijks te plotten versus de tijd en te vergelijken met deze van specifieke jaren of percentielwaarden wordt een beeld bekomen van de grootte van het neerslagoverschot of -tekort ten opzichte van de normale waarden voor de tijd van het jaar. Het doorlopend neerslagtekort werd bepaald voor de historische 100-jarige periode 1901-2000 en voor de toekomstperioden gecentreerd rond 2030, 2050 en 2100.

2.2.2 Standardized Precipitation (Evaporation) Index

De Standardized Precipitation Index (SPI: [McKee et al., 1993](#)) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI: [Vicente-Serrano et al., 2010](#)) geven genormaliseerd weer hoezeer de neerslag (SPI) of meteorologische waterbalans (SPEI) voor een bepaalde periode van het jaar afwijkt ten opzichte van de neerslag of waterbalans tijdens dezelfde periode van het jaar in een historische referentieperiode. Zo vergelijkt b.v. de SPI-3 indicator voor 1 april de totale neerslag in de 3 maanden voorafgaand aan 1 april met de totale neerslag in dezelfde periode gedurende een historische referentieperiode. De SP(E)I is een genormaliseerde indicator: de waarden kunnen voor elke dag van het jaar met elkaar vergeleken worden, in tegenstelling tot het neerslagtekort dat cumulatief is voor het groeiseizoen en waarbij waarden enkel voor corresponderende dagen in het groeiseizoen kunnen worden vergeleken. De SP(E)I kan ook voor elke dag van het jaar berekend worden zodat ook het droger of natter worden van de winter kan worden geëvalueerd. In dit rapport wordt echter enkel ingegaan op de SP(E)I waarden voor de hydrologische zomer van 1 april t.e.m. 30 september.

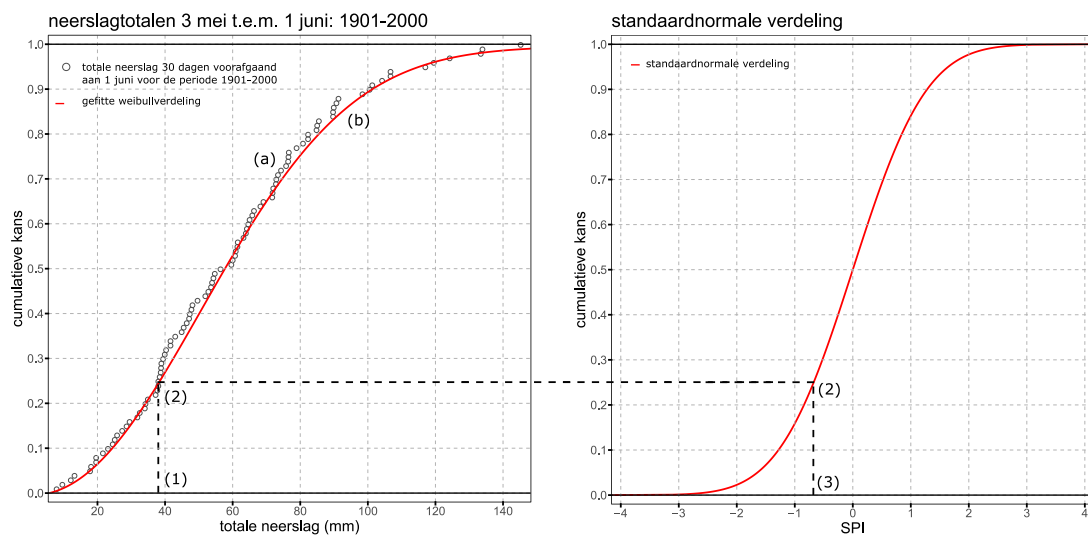
De accumulatieperiodes van de SP(E)I zijn gerelateerd aan de reactietijd van de verschillende componenten van het hydrologische systeem. De SP(E)I-waarden voor korte accumulatieperiodes zoals 1 maand zijn representatief voor snel reagerende delen van het watersysteem zoals oppervlakkig bodemvocht, terwijl SP(E)I-waarden voor langere accumulatieperiodes representatief zijn voor trager reagerende delen van het watersysteem zoals het basisdebiet en de grondwaterstanden. Deze relatie is echter ook afhankelijk van de lokale omgeving zoals het bodemtype en hydrologische eigenschappen van een bekken. Daarom is het moeilijk een rechtstreeks algemeen verband tussen SP(E)I en andere hydrologische variabelen zoals bodemvocht of basisdebiet op te stellen.

[McKee et al. \(1993\)](#) definieerden de SPI initieel op maandelijkse basis (i.e. gebruik makend van maandtotale neerslagen). Voor deze studie werd de SPI gedefinieerd op dagelijkse basis waarbij 1 maand telkens als 30 dagen wordt genomen. De SPI-3 indicator voor 1 april vergelijkt zo de totale neerslag in de 90 dagen voorafgaand aan, en met inbegrip van, 1 april met de totale neerslag in dezelfde periode gedurende een historische referentieperiode. Voor elke dag van het jaar werd een distributie gefit op de 99 of 100 waarden voor de totale neerslag of waterbalans voor accumulatieperiodes van 1, 3, 6 en 12 maanden uit de historische referentieperiode van 1901-2000. Voor de

SPI werd een weibulldistributie gefit aan de hand van de MLE-methode. Aangezien de SPEI negatief kan zijn werd hiervoor een gegeneraliseerde logistische distributie gefit, gebruik makend van de L-Moments methode. Deze keuze van referentiedistributies is gebaseerd op een voorafgaande evaluatie van verschillende kandidaatdistributies en is belangrijk om indicatorwaarden te krijgen die vrij zijn van bias (Sienz et al., 2012; Stagge et al., 2015).

Vervolgens werden de SPI en SPEI waarden voor accumulatieperioden van 1, 3, 6 en 12 maanden bepaald voor zowel de historische waarnemingen als de door de klimaatmodellen geperturbeerde waarden voor het jaar 2100. Een voorbeeld van de berekeningswijze van de SPI-1 voor 1 juni 1976 wordt gegeven in [figuur 1](#). Voor zowel de historische waarnemingen als de geperturbeerde waarden voor het klimaat in 2100 werden de historische referentiedistributies gebruikt. Zodoende geeft de SP(E)I voor de historische waarnemingen een beschrijving van het huidige klimaat, terwijl de SP(E)I voor de geperturbeerde reeksen weergeven hoe uitzonderlijk droogtes in 2100 zullen zijn in vergelijking met hoe uitzonderlijk dezelfde situatie is in het huidige klimaat.

SPI-1: 1 juni 1976



Figuur 1: Voorbeeld van de berekeningsmethode voor de SPI-1 voor 1 juni 1976: voor de neerslagtotalen van 3 mei t.e.m. 1 juni uit de periode 1901-2000 (a) wordt een weibulldistributie gefit (b). Voor het neerslagtotaal van 3 mei t.e.m. 1 juni 1976 (38,0mm) (1) wordt de percentielwaarde in deze distributie bepaald (0,249) (2), indien nodig wordt hierbij ook nog de kans van het voorkomen van nulneerslag (0 mm) geteld. Voor die percentielwaarde wordt vervolgens de overeenkomstige waarde van de standaardnormale distributie bepaald. Deze waarde is de waarde van de SPI-1 voor 1 juni 1976 (-0,68) (3).

McKee et al. (1993) definieerden voor de SPI de droogteklassen “matig droog”, “zeer droog” en “extreem droog”. Een overzicht van de grenswaarden voor deze klassen en het theoretisch voorkomen van deze klassen wordt gegeven in [tabel 2](#).

droogteklasse	grenswaarden SP(E)I	theoretisch % tijd minstens in klasse in klasse	
matig droog	$-1,50 < SP(E)I \leq -1,00$	15.87%	9,18%
zeer droog	$-2,00 < SP(E)I \leq -1,50$	6.68%	4,41%
extreem droog	$SP(E)I \leq -2,00$	2.28%	2.28%

Tabel 2: Definitie van de droogteklassen voor de SP(E)I volgens McKee et al. (1993) en theoretisch percentage van de tijd dat een indicator een bepaalde droogteklasse of minstens die droogteklasse aangeeft.

Er wordt verder nog op gewezen dat de SP(E)I voor bijvoorbeeld 1 april gebaseerd is op neerslag en waterbalanswaarden in de dagen voorafgaand aan 1 april en hoewel deze indicatorwaarde als een waarde voor de hydrologische zomer beschouwd wordt, is de indicatorwaarde voor 1 april bijna uitsluitend gebaseerd op neerslag en waterbalanswaarden uit de hydrologische winterperiode. Dit is in tegenstelling tot het neerslagtekort dat per definitie 0mm bedraagt aan het begin van de hydrologische zomer en dus geen rekening houdt met de voorgaande winterperiode. De SP(E)I-indicatoren geven dus ook een inschatting van het effect van veranderingen in een deel van de voorafgaande hydrologische winter (SPI-1, SPI-3 en SPI-6) en zelfs de voorgaande hydrologische zomer (SPI-12).

2.3 Analyse

2.3.1 Neerslagtekort

Voor elk van de jaren in de historische tijdreeks werd het cumulatieve neerslagoverschot t.o.v. de historische waarnemingen berekend en geplot. Voor elke dag tussen 1 april en 30 september werden vervolgens empirische percentielen berekend op basis van de bekomen waarden. Dit gebeurde voor zowel de historische reeks als de resultaten van de 30 verschillende klimaatmodelsimulaties. De resultaten van de 30 klimaatmodelsimulaties werden vervolgens voor elke dag van het hydrologisch zomerseizoen statistisch verwerkt tot 3 klimaatscenarios: een hoge-impact klimaatscenario o.b.v. de 5-percentielwaarde, een midden-klimaatscenario o.b.v. de 50-percentielwaarde en lage-impact klimaatscenario o.b.v. de 95-percentielwaarde. Deze drie klimaatscenarios zijn afgeleid volgens dezelfde concepten zoals toegepast voor de bestaande klimaatscenarios voor Vlaanderen (dus conform het MIRA2015-klimaatrapport). De klimaatscenarios hoog, midden en laag werden er bepaald via de bovengrens, mediaan en ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald na statistische analyse van de resultaten van de verschillende beschikbare klimaatmodelsimulaties. Deze verwerking van de resultaten gebeurde voor elk van de 3 toekomsthorizonten: 2030, 2050 en 2100.

Daarna werden de grafieken (verloop van het cumulatieve neerslagoverschot versus de tijd) voor bepaalde percentielen (v.b. 5%, 10%, 15%, 25%, 50%, ...) voor de toekomstperiode vergeleken met deze voor de historische periode. Op basis van deze vergelijking werd de gemiddelde toename bepaald in de voorkomingsfrequentie van dezelfde droogtecondities en dit voor de ganse hydrologische zomerperiode en alle beschouwde percentielen die voor de toekomstperiode leiden tot een neerslagtekort. Deze verhogingsfactor werd bepaald door voor elke percentielwaarde van het cumulatief neerslagtekort in het historisch klimaat de beste overeenkomst te zoeken (gemiddeld voor alle dagen in het hydrologisch zomerseizoen) van de curven met het cumulatief neerslagtekort en dit voor elk van de klimaatscenarios. Deze toename in voorkomingsfrequentie, relatief uitgedrukt, geeft de droogte-proxyindicator. Bijvoorbeeld, een toename van deze voorkomingsfrequentie met een factor 10 voor een bepaald klimaatscenario betekent dat vergelijkbare droogtecondities in de toekomst 10 keer zo vaak voorkomen. Op basis van de resultaten voor de 30 klimaatmodellen werden 3 impactscenario's berekend: een laag (5^e percentiel), een midden (50^e percentiel) en een hoog (95^e percentiel) klimaatimpactscenario.

Via een gelijkaardige methode werd naast de verhogingsfactor van de voorkomingsfrequentie ook de verhogingsfactor van (1) de duur van een extreem neerslagtekort en (2) de amplitude van een extreem neerslagtekort onderzocht. Het extreem neerslagtekort werd hierbij gelijk gekozen aan de 5-percentielwaarde. De duur van een extreem neerslagtekort is gedefinieerd als het aantal dagen van opeenvolgende overschrijding van de 5-percentielwaarde. De amplitude van een extreem neerslagtekort is gedefinieerd als het verschil tussen het neerslagtekort en de 5-percentielwaarde en dit gecumuleerd over de ganse duur van opeenvolgende overschrijding van de 5-percentielwaarde. Op

basis van alle overschrijdingen in de ganse tijdreeks (dus alle extreme neerslagtekorten) werden opnieuw percentielen berekend, volgens eenzelfde concept als hiervoor toegepast om de percentielen van de neerslagtekorten per tijdstap te berekenen.

Naast de gemiddelde toename in functie van de percentielen werd ook nagegaan met welke voorkomingsfrequentie een bepaald extreem droog historisch jaar - bijvoorbeeld 1976 - zich in de toekomst zal voordoen. Deze toename is opnieuw relatief uitgedrukt in vergelijking met de huidige klimatologische condities. Verwijzing naar een bepaald historisch jaar heeft het voordeel concreet en helder te zijn, maar het nadeel dat het niet voldoende algemeen is om voor alle mogelijke droogtecondities geldig te zijn.

2.3.2 Standardized Precipitation (Evaporation) Index

In eerste instantie worden de veranderingen in het voorkomen van de SP(E)I-waarden voor de hydrologische zomer tussen het huidige en toekomstige klimaat geëvalueerd. Meer specifiek worden de percentielen voor de grenzen van de verschillende droogteklassen tussen de historische observaties en 3 verschillende klimaatscenario's vergeleken: het "lage", "midden" en "hoge" klimaatscenario komen overeen met respectievelijk het 5^e, 50^e en 95^e-percentiel van de resultaten voor de 30 verschillende klimaatmodellen. De verhouding tussen de percentielwaarde voor deze klimaatscenario's en de percentielwaarde voor de historische waarnemingen geeft een veranderingsfactor die aangeeft hoeveel keer een bepaalde droogtesituatie in het laag, midden of hoog klimaatscenario vaker zal voorkomen dan in het huidige klimaat op basis van de historische waarnemingen.

Naast de verandering in de frequentie van de SP(E)I-waarden wordt telkens ook de kans op het voorkomen van de verschillende droogteklassen in een bepaalde hydrologische zomer geëvalueerd: het percentage van de jaren waarin zich een matig droge, zeer droge of extreem droge situatie voordoet wordt vergeleken tussen de historische waarnemingen en het lage, midden en hoge klimaatscenario. Ook hier wordt telkens een veranderingsfactor bepaald.

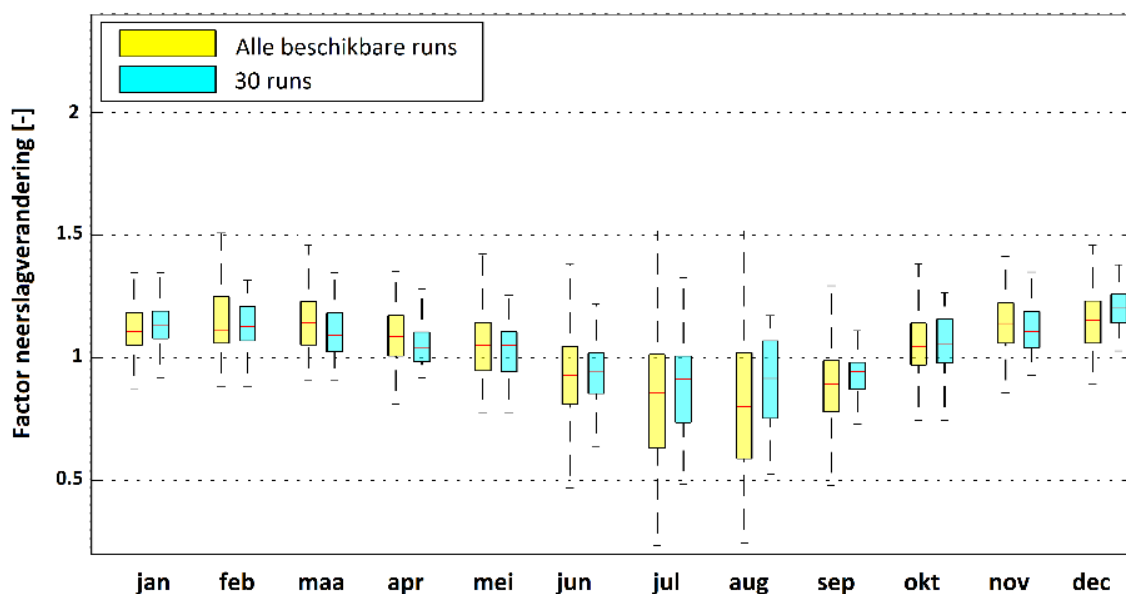
Vervolgens werden de duur en de magnitude bepaald voor de verschillende droogteklassen (McKee et al., 1993). De duur voor een matig droge, zeer droge of extreem droge situatie werd voor elke hydrologische zomer bepaald als het totaal aantal dagen dat de SP(E)I minstens een matig droge, zeer droge of extreem droge situatie aangaf (tabel 2). De magnitude voor een matig droge, zeer droge of extreem droge situatie werd voor elke hydrologische zomer bepaald als de som van de absolute waarden van de SP(E)I voor alle dagen dat de SP(E)I minstens een matig droge, zeer droge of extreem droge situatie aangaf. Om duur en magnitude te evalueren werden telkens het 1, 5, 10 en 50 percentiel van de duur- en magnitudewaarden voor de historische waarnemingen bepaald. Vervolgens werd voor deze waarden het overeenkomende percentiel in de 30 geperturbeerde reeksen voor het klimaat in 2100 bepaald. Ook hier werden de 30 verschillende klimaatperturbaties vervolgens samengevat in een laag (5-percentiel), midden (50-percentiel) en hoog (95-percentiel) klimaatscenario en werden er voor deze scenario's veranderingsfactoren bepaald.

3 Resultaten

3.1 Neerslag

Vooraleer de 30 100-jarige tijdreeksen voor neerslag en referentiegwasneerslag, zoals geperturbeerd aan de 30 klimaatmodelsimulaties, gebruikt worden voor de berekening van de droogteproxy, worden eerst de veranderingen in maandgemiddelden voor neerslag, temperatuur en referentiegwasverdamping geëvalueerd. Dit gebeurt door de consistentie te controleren met de veranderingen in maandgemiddelden voor de ruimere set aan klimaatmodelsimulaties die aan de basis liggen van de klimaatscenario's zoals beschreven in het MIRA2015-klimaatrapport.

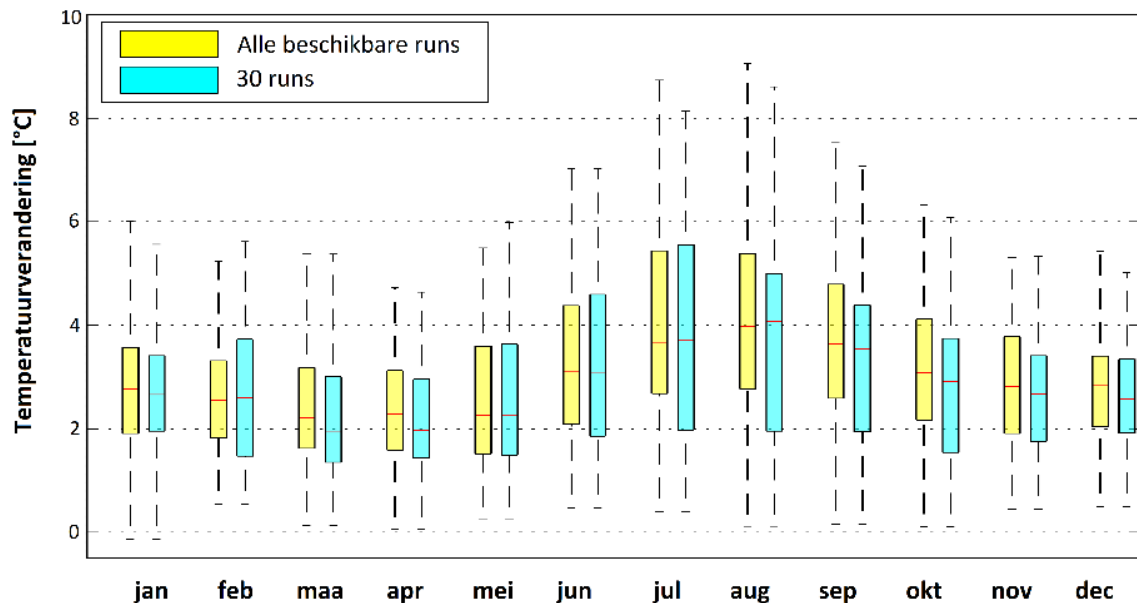
De relatieve neerslagverandering in maandgemiddelde neerslag voor het toekomstig klimaat 2100 volgens de 30 geperturbeerde neerslagreeksen met deze volgens alle klimaatmodelsimulaties die aan de basis liggen van de MIRA2015-klimaatscenario's wordt in [figuur 2](#) vergeleken via box-plots. De MIRA2015-klimaatscenario's waren voor neerslag gebaseerd op 160 klimaatmodelsimulaties, helaas zijn niet voor al deze klimaatmodelsimulaties voldoende meteorologische uitvoervariabelen beschikbaar om de referentiegwasverdamping (zie [vgl. 1](#)) te berekenen. De 30 simulaties waarvoor dit wel kon, blijken volgens [figuur 2](#) in grootteorde representatief te zijn voor de ganse set van klimaatmodelsimulaties waarvoor neerslagresultaten beschikbaar zijn. Deze resultaten worden dus beschouwd als min of meer consistent met de MIRA2015-klimaatscenario's. Tijdens de zomermaanden bevatten de 30 simulaties wel niet de meest droge neerslagcondities (volgens de MIRA2015-klimaatscenario's) zoals blijkt uit de vergelijking van de box-plots in [figuur 2](#). Voor de andere maanden van het jaar is het verschil kleiner



Figuur 2: Factor voor de maandgemiddelde neerslagverandering (toekomstig klimaat 2100 versus historisch klimaat) volgens de 30 geperturbeerde neerslagreeksen en vergelijking met de volledige set aan klimaatmodelsimulaties die de basis vormen van de MIRA2015-klimaatscenario's.

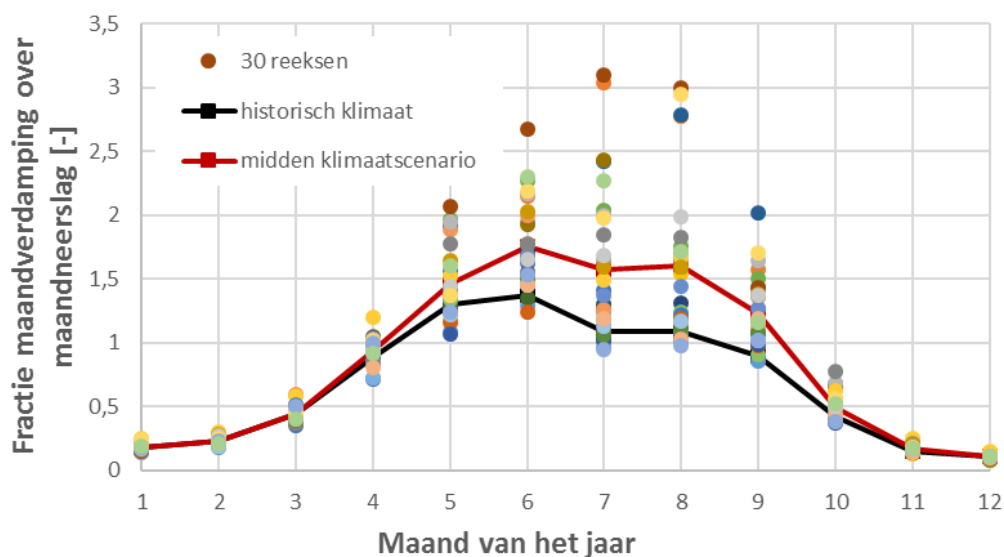
3.2 Evapotranspiratie

Een gelijkaardige analyse voor de absolute temperatuurverandering (voor de temperatuurwaarden gebruikt aan de basis van de referentiegewasverdamping) wordt getoond in [figuur 3](#). Ook hiervoor blijken de 30 simulaties in grootteorde representatief voor de ganse set van klimaatmodelsimulaties waarvoor temperatuurresultaten beschikbaar zijn en die de basis vormen van de MIRA2015-klimaatsscenario's.



Figuur 3: Maandgemiddelde temperatuurverandering (toekomstig klimaat 2100 versus historisch klimaat) volgens de 30 geperturbeerde reeksen en vergelijking met de volledige set aan klimaatmodelsimulaties die de basis vormen van de MIRA2015-klimaatsscenario's.

De verhouding van de referentiegewasverdamping over de neerslag, per maand en voor elk van de 30 klimaatmodelsimulaties en bijhorende geperturbeerde reeksen, wordt getoond in [figuur 4](#). Daarnaast wordt per maand ook de gemiddelde verhouding weergegeven en vergeleken met deze voor het historisch klimaat. Hieruit blijkt dat de meeste klimaatmodelsimulaties een stijging geven van de gemiddelde referentiegewasverdamping per maand, relatief t.o.v. de gemiddelde maandneerslag. Wanneer deze referentiegewasverdamping wordt opgeteld voor alle maanden van het jaar en gedeeld door de totale jaarneerslag blijkt dat de fractie van de neerslag die verdampt voor referentiegewas op jaarbasis 67% bedraagt voor het historisch klimaat (1901-2000). Voor het toekomstig klimaat 2100 en gemiddeld voor alle 30 geperturbeerde reeksen verhoogt dit percentage tot 77%.

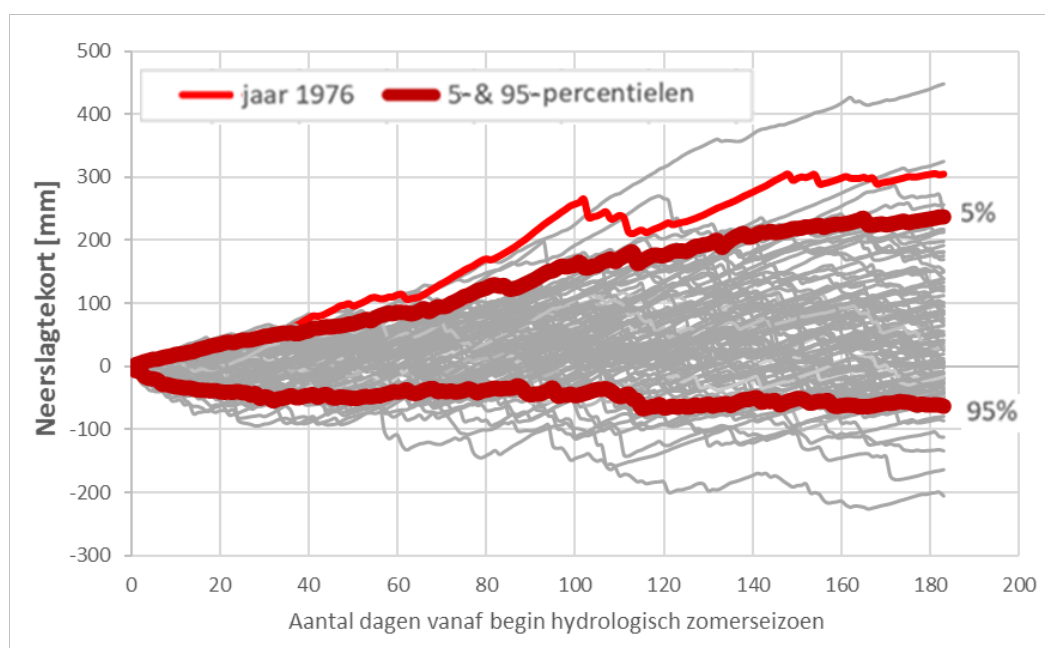


Figuur 4: Fractie gemiddelde maandverdamping over de gemiddelde maandneerslag voor historisch en toekomstig klimaat 2100 volgens de 30 geperturbeerde reeksen.

3.3 Neerslagtekort

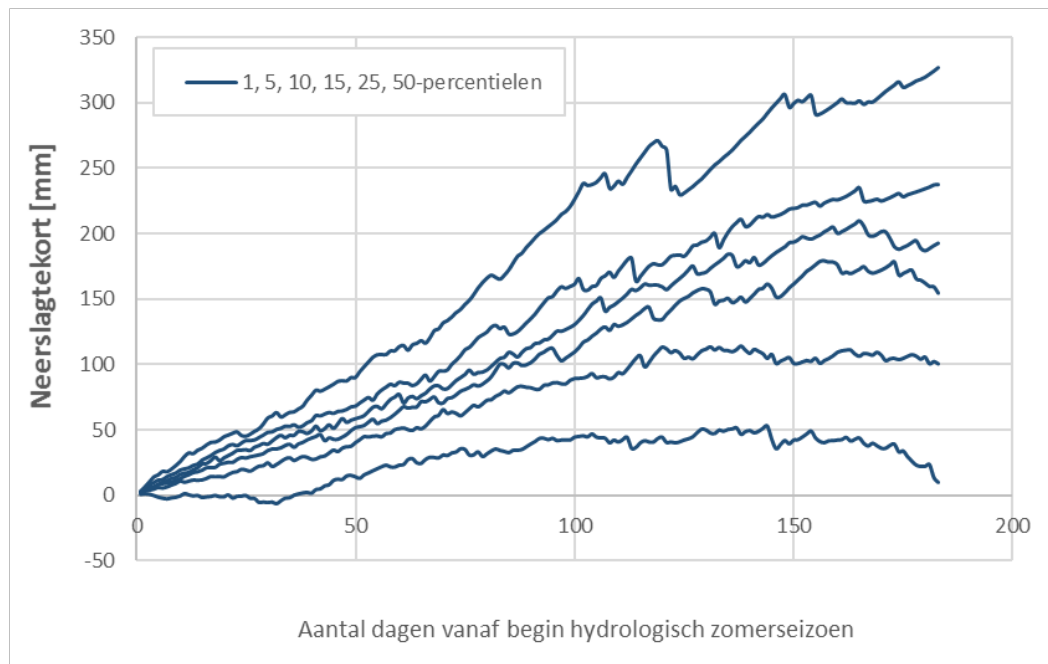
3.3.1 Huidig klimaat

Het neerslagtekort (1 april - 30 sept.) voor elk jaar in de langjarige historische Ukkelse reeks vanaf 1898 wordt weergegeven in [figuur 5](#). De extreme droge zomer van 1976 werd specifiek aangeduid. De zomer van 1976 heeft de eerste 100 dagen van de hydrologische zomer het grootste neerslagtekort van alle 100 jaren, tijdens de tweede helft van de hydrologische zomer heeft 1976 het 2^e grootste neerslagtekort na 1921 waardoor 1976 overeenkomt met het 1- of 2- empirische percentiel.



Figuur 5: Cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen voor alle individuele historische jaren te Ukkel, samen met de 5- en 95-percentielwaarden en aanduiding van het jaar 1976.

De 5- en 95-percentielwaarden staan specifiek aangeduid in [figuur 5](#); de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden in [figuur 6](#). Een 5-percentielwaarde betekent dat slechts in 5% van de jaren de hydrologische zomerperiode een neerslagtekort heeft dat groter is dan de beschouwde percentielwaarde.



Figuur 6: Cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen volgens de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden voor het historisch klimaat te Ukkel.

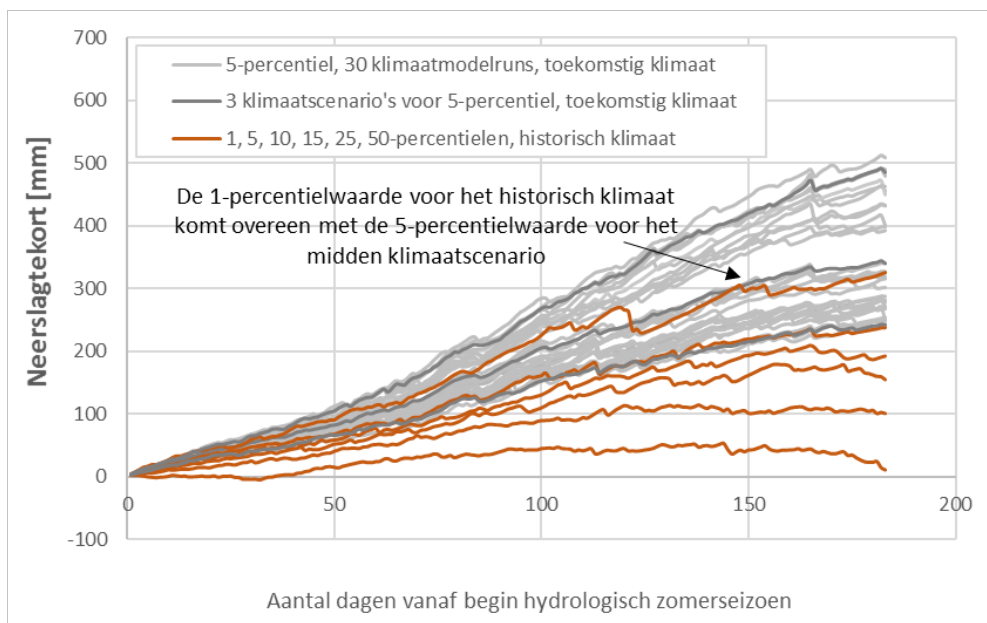
3.3.2 Toekomstig klimaat

Frequentie

Voor het toekomstig klimaat werden eerst voor elk van de 30 klimaatmodelsimulaties en voor een toekomstperiode van 100 jaar de verschillende empirische kwantilen berekend van de cumulatieve neerslagtekorten en vergeleken met deze van het historisch klimaat. Een voorbeeldresultaat wordt [figuur 7](#): de 5-percentielwaarde van het cumulatief neerslagtekort is er voor elk van de 30 verschillende klimaatmodelsimulaties getoond en vergeleken met de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden voor het historisch klimaat.

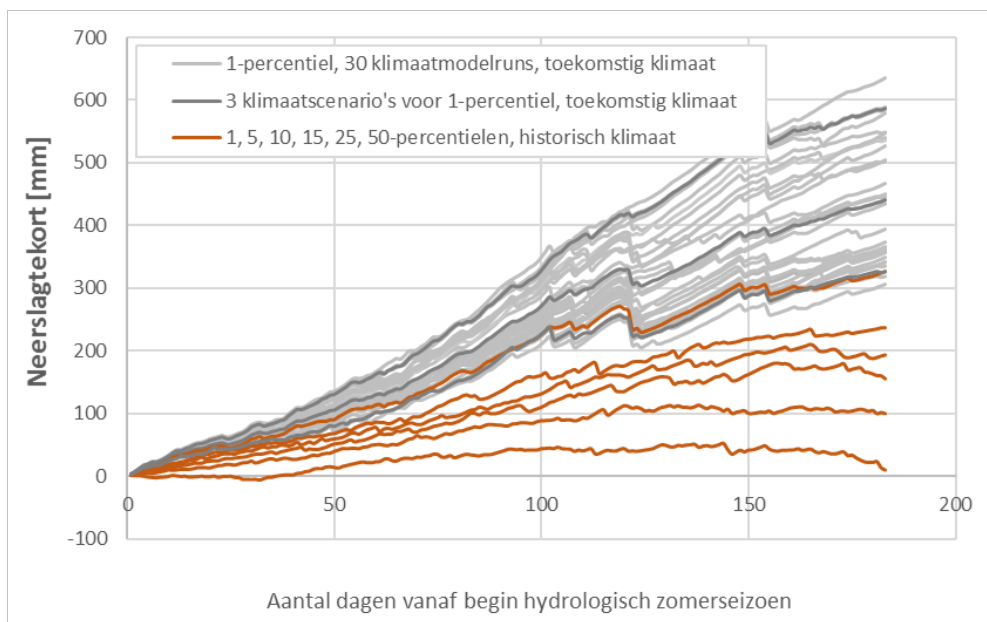
De curve voor de 5-percentielwaarden voor de verschillende dagen in de hydrologische zomer in het midden-klimaatsscenario tegen 2100 komt bij benadering overeen met de curve voor de 1-percentielwaarden voor het historisch klimaat ([figuur 7](#)). Dit betekent dat het cumulatief neerslagtekort dat zich in het historisch klimaat eens op de 100 jaren voordoet, zich in het toekomstig klimaat voor 2100 jaar bij een midden-klimaatsscenario 5 keer zo vaak zou voordoen, dus in 5 van de 100 jaren. Dit komt overeen met een factor 5 voor de verhogingsfrequentie. Voor het hoge-impact klimaatsscenario is deze factor hoger; voor het lage-impact klimaatsscenario is deze lager.

Cumulatief over het ganse hydrologisch zomerseizoen loopt het neerslagtekort bij het hoge-impact klimaatsscenario en de 5-percentielwaarde (i.e. een terugkeerperiode van 20 jaar) op tot 485 mm. Voor het midden-klimaatsscenario is dat 341 mm. Deze waarden zijn beduidend hoger dan de overeenkomstige waarde in het huidig klimaat: 237 mm.

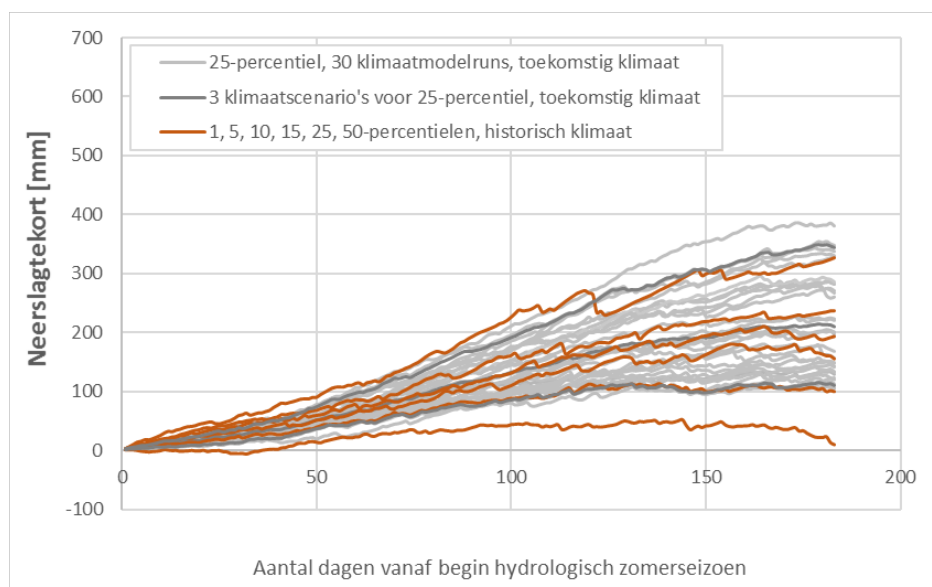


Figuur 7: Cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen volgens de 5-percentielwaarde van de 30 verschillende klimaatmodelsimulaties voor 2100 en vergelijking met de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden voor het historisch klimaat te Ukkel.

Uit [figuur 8](#) blijkt dat de frequentie van de 1-percentielwaarde in het historisch klimaat met een factor 5 verhoogt voor het midden-klimaatsscenario en afgerond een factor 1 voor het lage-impactsscenario ([figuur 8](#)). Voor het hoge-impactsscenario is dat afgerond een factor 25 ([figuur 9](#)). De factor 25 voor het hoge-impact klimaatsscenario betekent dat het cumulatief neerslagtekort dat zich in het historisch klimaat eens om de 100 jaar voordeed, zich tegen 2100 bij een business-as-usual scenario inzake uitstoot aan broeikasgassen eens om de 4 jaar kan voordoen.



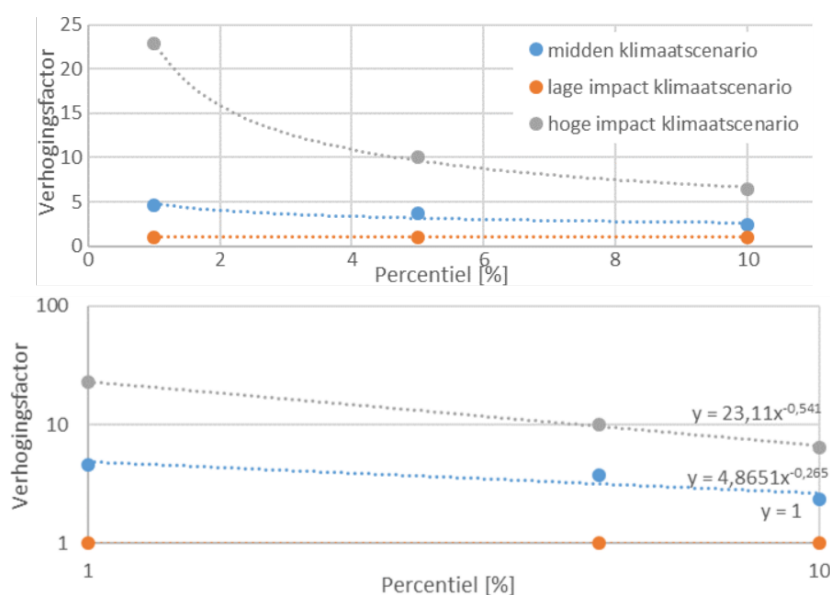
Figuur 8: Cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen volgens de 1-percentielwaarde van de 30 verschillende klimaatmodelsimulaties voor 2100 en vergelijking met de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden voor het historisch klimaat te Ukkel.



Figuur 9: Cumulatief neerslagtekort in het hydrologisch zomerseizoen volgens de 25-percentielwaarde van de 30 verschillende klimaatmodelsimulaties voor 2100 en vergelijking met de 1-, 5-, 10-, 15-, 25- en 50-percentielwaarden voor het historisch klimaat te Ukkel.

Op deze factoren is wel een onzekerheid aanwezig als gevolg van het zoeken naar de beste aansluiting van de curven voor de hele hydrologische zomer. Voor deelperioden kan de factor in beperkte mate hoger of lager zijn. Vooral voor scenario's met lage factoren kan het relatieve belang van deze onzekerheid groot zijn. Voor het lage-impactscenario werd de verhogingsfactor afgerond tot 1, maar de onzekerheid op deze factor loopt in grootteorde op tot 30%.

Dezelfde analyse voor de 1-percentielwaarde in het historisch klimaat werd herhaald voor de 5-, 10- en 50-percentielwaarden. De verhogingsfactoren voor de drie klimaatscenario's en voor toekomstperioden van 100 jaar, 50 jaar en 30 jaar worden samengevat in [tabel 3](#) en [figuur 10](#). De verhogingsfactor blijkt volgens een machtsverband afhankelijk te zijn van het percentiel ([figuur 10](#)).



Figuur 10: Verhogingsfactor voor de voorkomingsfrequentie van het cumulatief neerslagtekort i.f.v. de percentielwaarde voor het historisch klimaat, voor de 3 klimaatscenario's bij een toekomstperiode van 100 jaar.

klimaat 2100						
waarnemingen 1901-2000	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
pct.	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
1	1,0	1,0	4,6	4,6	22,8	22,8
5	5,0	1,0	18,5	3,7	50,5	10,1
10	10,0	1,0	24,0	2,4	65,0	6,5
50	50,0	1,0	75,0	1,5	90,0	1,8

klimaat 2050						
waarnemingen 1901-2000	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
pct.	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
1	1,0	1,0	2,8	2,8	11,9	11,9
5	5,0	1,0	12,0	2,4	27,5	5,5
10	10,0	1,0	17,0	1,7	37,0	3,7
50	50,0	1,0	60,0	1,2	70,0	1,4

klimaat 2030						
waarnemingen 1901-2000	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
pct.	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
1	1,0	1,0	2,1	2,1	7,5	7,5
5	5,0	1,0	9,0	1,8	18,5	3,7
10	10,0	1,0	14,0	1,4	26,0	2,6
50	50,0	1,0	55,0	1,1	60,0	1,2

Tabel 3: Verhogingsfactor voor de voorkomingsfrequentie van het cumulatief neerslagtekort i.f.v. de percentielwaarde voor het historisch klimaat, voor de 3 klimaatscenarios tegen 2100, 2050 en 2030.

Duur en Intensiteit

De verhogingsfactor van de voorkomingsfrequentie voor de duur van overschrijding van een extreem neerslagtekort voor de 1-, 5- en 10-percentielwaarden wordt samengevat in [tabel 4](#). De 5-percentielwaarde van de duur is de duur die in 5% van de jaren wordt bereikt of overschreden. In tegenstelling tot de vorige tabellen met resultaten, vermeldt [tabel 4](#) de 50-percentielwaarde niet. Deze percentielwaarde is immers niet relevant in het kader van extreme neerslagtekorten. Zulke neerslagtekorten doen zich immers slechts met een beperkte kans voor. De 50-percentielwaarde van de duur is daardoor gelijk aan 0 (geen extreme droogtedagen).

De verhogingsfactor van de frequentie van de duur van overschrijding van een extreem neerslagtekort blijkt minder afhankelijk van de percentielwaarde dan dit voor de verhogingsfactor van de voorkomingsfrequentie van het cumulatief neerslagtekort het geval was. Bovendien is er een significante onzekerheid aanwezig op deze factor omwille van het beperkt aantal extreme neerslagtekorten in de tijdreeks. Daarom werd een gemiddelde verhogingsfactor afgeleid voor de 1-, 5- en 10-percentielwaarden van de duur. Deze is voor de toekomsthorizon van 2100 afgerond gelijk aan 3 voor het midden-klimaatscenario en 9 voor het hoge-impact klimaatscenario.

klimaat 2100						
waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
1	1	1	3	3	9	9
5	5	1	20	4	60	12
10	10	1	25	2,5	65	6,5
gemiddelde		1		3		9
klimaat 2050						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
gemiddelde		1		2		5
klimaat 2030						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
gemiddelde		1		1.5		3

Tabel 4: Verhogingsfactor voor de duur van overschrijding van een extreem neerslagtekort i.f.v. de percentielwaarde voor het historisch klimaat, voor de 3 klimaatscenarios tegen 2100, 2050 en 2030.

De resultaten voor de amplitude van overschrijding van een extreem neerslagtekort worden weergegeven in [tabel 5](#). Ook de amplitude blijkt weinig afhankelijk van de percentielwaarde. Afgerond is de factor voor de amplitude van het extreem neerslagtekort voor de toekomsthorizon van 2100 gelijk aan 3 voor het middenscenario en 13 voor het hoge-impactscenario. Verder afgerond verhoogt de voorkomingsfrequentie van de duur en amplitude van een extreem neerslagtekort dus met een factor 3 voor het midden-klimaatscenario en een factor 10 voor het hoge-impactklimaatscenario.

klimaat 2100						
waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
1	3	3	1	1	19	19
5	20	4	5	1	60	12
10	25	2,5	10	1	70	7
gemiddelde		3		1		13
klimaat 2050						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
gemiddelde		2		1		7
klimaat 2030						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
gemiddelde		1,5		1		4,5

Tabel 5: Verhogingsfactor voor de amplitude van overschrijding van een extreem neerslagtekort i.f.v. de percentielwaarde voor het historisch klimaat, voor de 3 klimaatscenarios bij toekomstperioden tegen 2100, 2050 en 2030.

Naast de verandering van de voorkomingsfrequentie van de duur van een extreem neerslagtekort werd ook de verandering van de duur zelf onderzocht en dit voor een extreem neerslagtekort, gedefinieerd als de 5-percentielwaarde (of het neerslagtekort met een terugkeerperiode van 20 jaar volgens het huidig klimaat) (tabel 6). De duur van een extreem neerslagtekort stijgt hierbij van 31 dagen in het huidig klimaat tot 83 dagen in het midden-scenario en tot 135 dagen in het hoge-impactscenario. Dit komt overeen met een afgeronde verhogingsfactor voor de duur van een extreem neerslagtekort van 2.5 voor het middenscenario en van 4 voor het hoge-impactscenario.

klimaat 2100						
waarnemingen 1901-2000	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
# dagen	# dagen	factor	# dagen	factor	# dagen	factor
31	34	1	83	2,5	135	4
klimaat 2050						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	1		1,8		2,7	
klimaat 2030						
	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
	1		1,5		2	

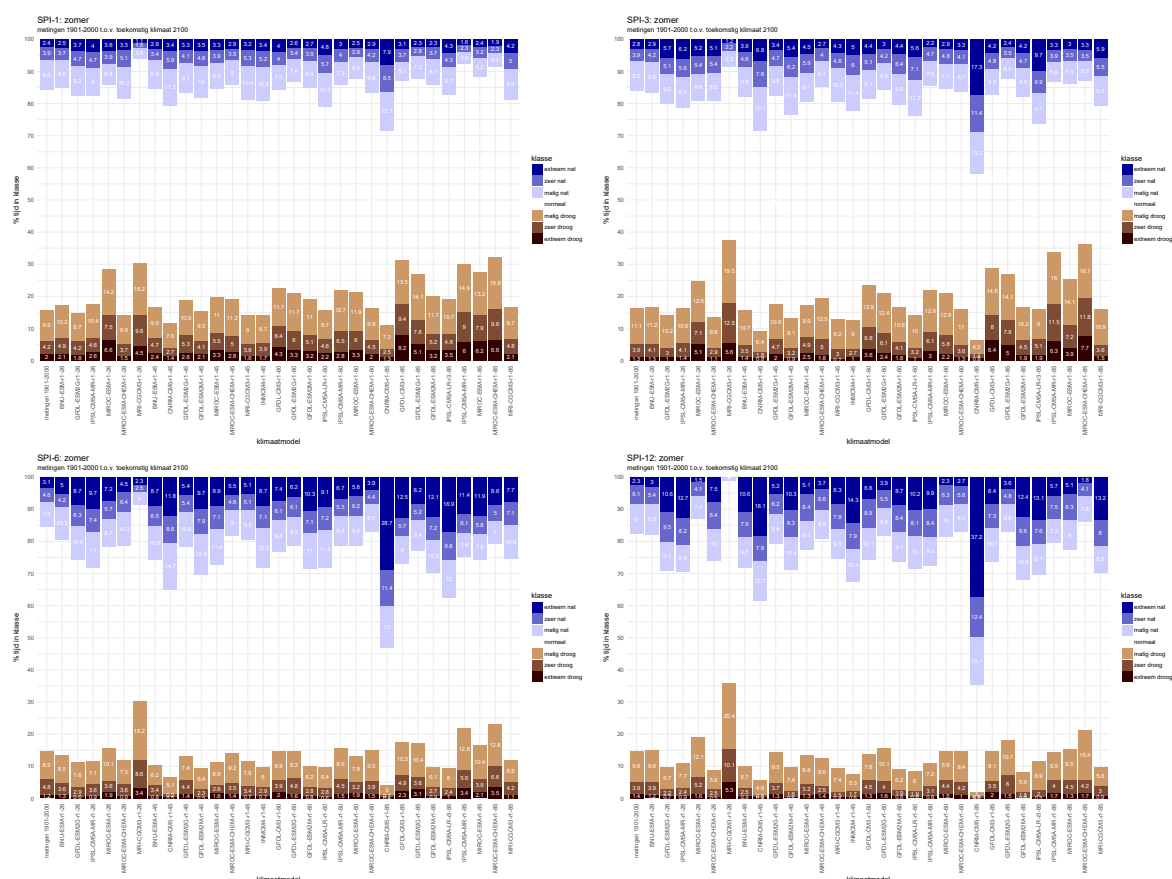
Tabel 6: Verhoging van de duur van een extreem neerslagtekort voor de 3 klimaatscenarios tegen 2100, 2050 en 2030.

3.4 Standardized Precipitation Index (SPI)

3.4.1 Frequentie en voorkomen

Een vergelijking van het voorkomen van de verschillende SPI-klassen voor het huidige klimaat (figuur 11; metingen 1901-2000) met de theoretisch verwachte frequentie van deze klassen (cfr. tabel 2) geeft aan dat deze relatief goed overeenkomen voor de vier accumulatieperioden en geen bias vertonen naar natte of droge waarden. De gekozen weibull-distributie is dus een goede keuze als globale referentiedistributie voor de SPI voor verschillende accumulatieperioden en kan zowel droge als natte situaties karakteriseren zonder bias.

Een eerste visuele analyse van de SPI-waarden voor de historische waarnemingen en de 30 klimaatmodellen (figuur 11) toont aan dat de meeste klimaatmodellen, en zeker de RCP 8.5 klimaatmodellen, een toename van het aandeel zeer droge en extreem droge waarden voorspellen voor de SPI-1 en SPI-3. Voor de SPI-6 en SPI-12 indicatoren lijkt het percentage zeer droge en extreem droge waarden eerder af te nemen. Dit kan verklaard worden doordat de indicatoren met langere accumulatieperioden meer rekening houden met de voorafgaande hydrologische winter en de klimaatmodellen over het algemeen een vernatting van de hydrologische winter voorspellen tegen 2100 (Brouwers et al., 2015; Ntegeka et al., 2017).



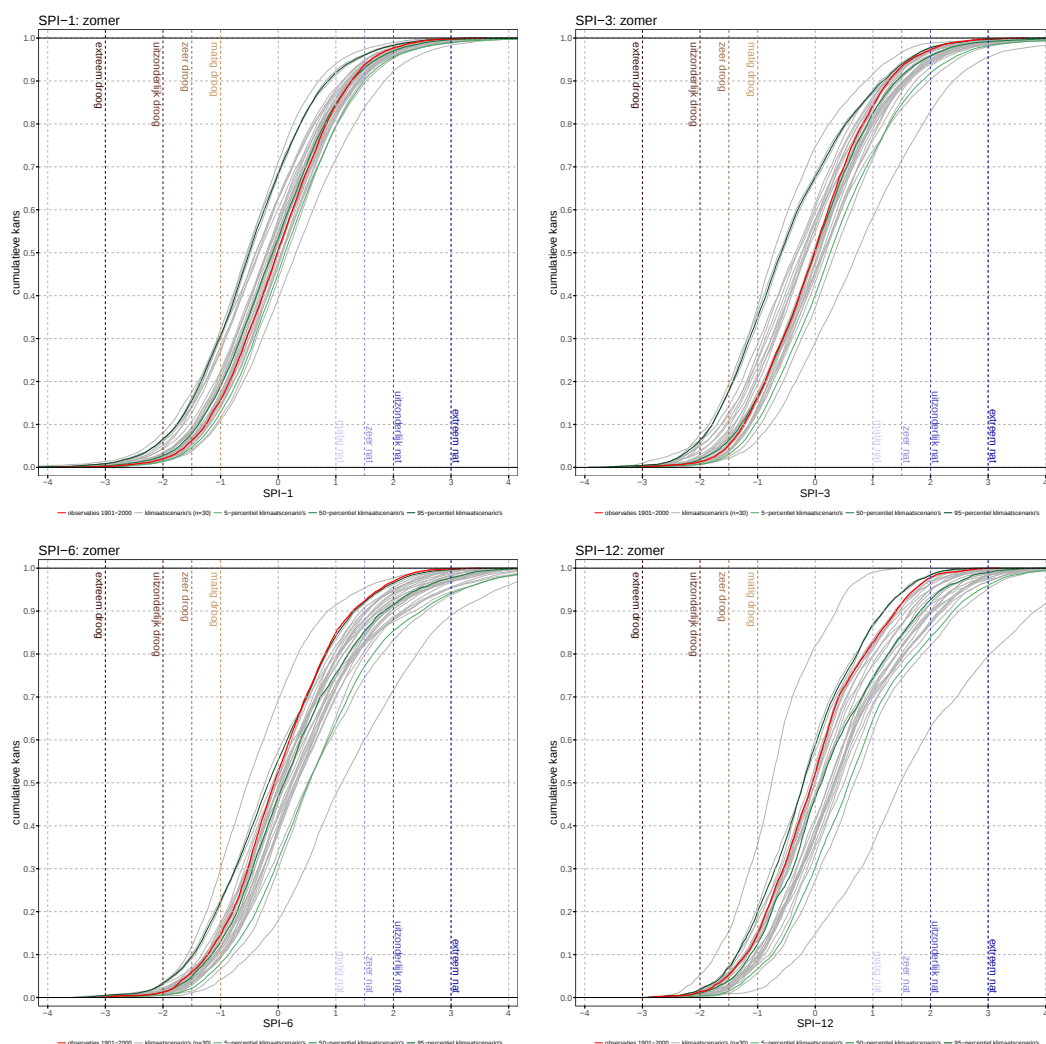
Figuur 11: Vergelijking van het aandeel van de verschillende droogteklassen voor de SPI tussen de historische waarnemingen (1901-2000) en geperturbeerde reeksen (klimaat 2100) voor verschillende aggregatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden).

De verandering van de frequentie waarmee de verschillende droogteklassen voorkomen tussen het huidige klimaat en de drie toekomstscenario's wordt weergegeven in [tabel 7](#) en grafisch voorgesteld in [figuur 12](#). In het lage, maar weinig waarschijnlijke, impactscenario wordt voor alle droogteklassen en accumulatieperiodes een afname van de frequentie verwacht. Voor het middenscenario wordt een verhoging van de frequentie van alle droogteklassen voor de SPI-1 en SPI-3 verwacht, maar een verlaging van de frequentie van de meeste droogteklassen voor de SPI-6 en SPI-12, wat vermoedelijk kan worden toegeschreven aan een verhoging van de winterneerslag. In het hoge impact klimaatscenario wordt een verhoging van de frequentie van alle droogteklassen en voor alle accumulatieperiode verwacht. De grootste verhogingen worden verwacht voor een extreem droge SPI-1 die tot 3,28 keer vaker kan voorkomen en een zeer droge en extreem droge SPI-3 die respectievelijk tot 3,41 en 4,80 keer vaker kunnen voorkomen.

Naast de frequentie (i.e. het totale % van de tijd) dat een bepaalde droogteklasse voorkomt werd ook de kans op voorkomen van de verschillende droogteklassen binnen een zomerseizoen nagegaan ([tabel 8](#)). Deze resultaten vertonen dezelfde trends als de frequentie van de verschillende droogteklassen, met vooral een verhoging van het voorkomen van de zeer droge en extreem droge SPI-3 van respectievelijk 37% en 11% van de jaren tot 74% en 43% van de jaren.

frequentie SPI in de zomer per droogteklaas								
indicator	droogteklaas	waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
			pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
SPI-1	matig droog	15,78	12,83	0,81	19,03	1,21	30,7	1,95
	zeer droog	6,24	4,61	0,74	7,93	1,27	15,63	2,51
	extreem droog	2,01	1,45	0,72	2,75	1,37	6,58	3,28
SPI-3	matig droog	16,31	10,87	0,67	16,6	1,02	34,99	2,14
	zeer droog	5,24	3,12	0,60	6,39	1,22	17,89	3,41
	extreem droog	1,32	0,78	0,60	1,81	1,37	6,32	4,80
SPI-6	matig droog	14,56	7,93	0,54	12,96	0,89	22,35	1,53
	zeer droog	6,02	2,17	0,36	4,85	0,81	9,58	1,59
	extreem droog	1,22	0,53	0,43	1,25	1,02	3,40	2,78
SPI-12	matig droog	14,86	6,66	0,45	12,56	0,85	20,08	1,35
	zeer droog	5,27	1,52	0,29	3,94	0,75	7,07	1,34
	extreem droog	1,37	0,37	0,27	1,02	0,75	1,87	1,37

Tabel 7: Vergelijking van de globale frequentie waarmee de verschillende droogteklassen zich voordoen in de zomer volgens de SPI voor verschillende accumulatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden)



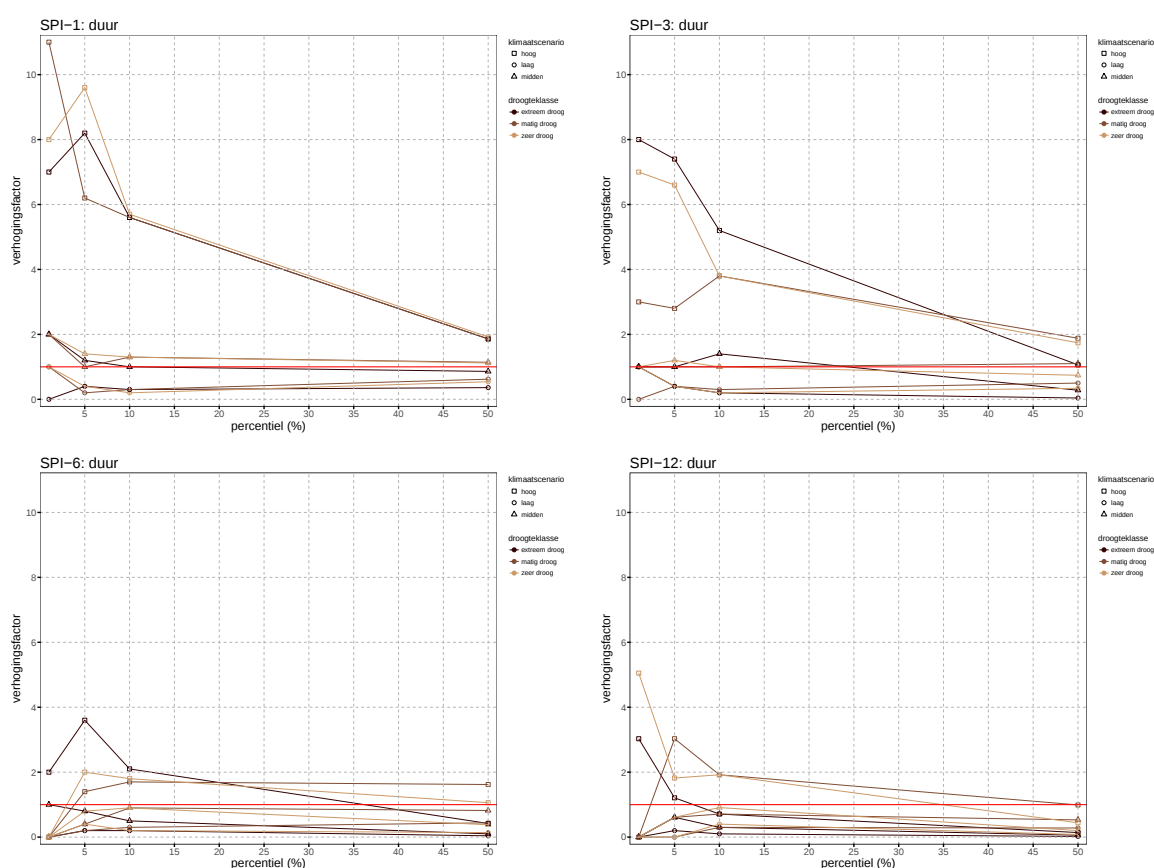
Figuur 12: Vergelijking van de distributies van de SPI tussen de historische waarnemingen (1901-2000) en de 30 geperturbeerde reeksen, en lage, midden en hoge klimaatscenario's (klimaat 2100) voor verschillende aggregatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden).

kans op voorkomen per droogteklasse in de zomer volgens de SPI									
indicator	droogteklasse	waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario		middenscenario		hoog scenario		
			pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor	
SPI-1	matig droog	95,00	90,00	0,95	97,00	1,02	100,00	1,05	
	zeer droog	73,00	58,00	0,79	79,00	1,08	95,00	1,30	
	extreem droog	40,00	29,00	0,72	47,00	1,18	79,00	1,98	
SPI-3	matig droog	65,00	48,00	0,74	67,00	1,03	96,00	1,48	
	zeer droog	37,00	20,00	0,54	40,00	1,08	74,00	2,00	
	extreem droog	11,00	6,00	0,55	15,00	1,36	43,00	3,91	
SPI-6	matig droog	42,00	25,00	0,60	42,00	1,00	78,00	1,86	
	zeer droog	20,00	6,00	0,30	20,00	1,00	50,00	2,50	
	extreem droog	6,00	2,00	0,33	6,00	1,00	20,00	3,33	
SPI-12	matig droog	35,35	15,15	0,43	27,27	0,77	39,39	1,11	
	zeer droog	17,17	5,05	0,29	12,12	0,71	19,19	1,12	
	extreem droog	5,05	1,01	0,20	3,03	0,60	6,06	1,20	

Tabel 8: Vergelijking van de kans op voorkomen van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPI voor verschillende accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden)

3.4.2 Duur

Het 1^e, 5^e, 10^e en 50^e percentiel voor de totale duur van een droogte in de hydrologische zomer voor de verschillende droogteklassen en accumulatieperioden wordt weergegeven in [figuur 13](#) en [tabel 9](#).



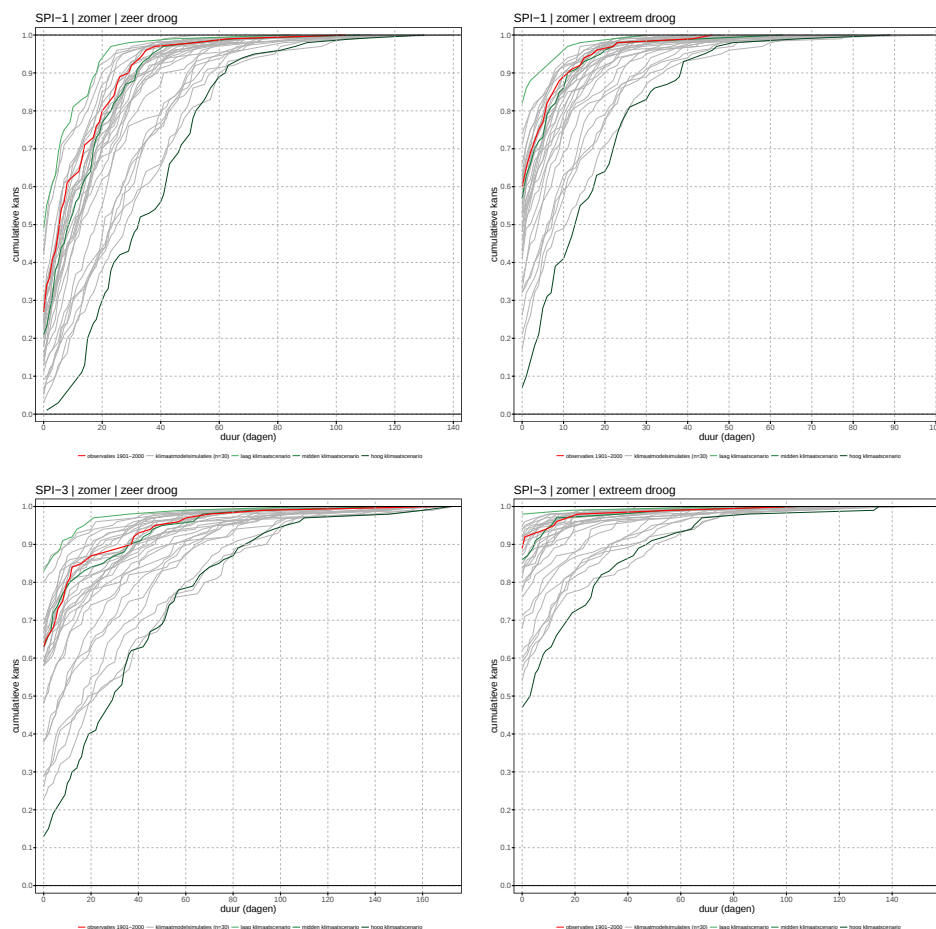
Figuur 13: Relatie tussen de verhogingsfactor en het percentiel voor de duur van de droogtes op basis van de SPI.

aantal dagen per droogteklasse in de zomer volgens de SPI									
indicator	droogteklasse	obs. 1901-2000 pct, # dagen	laag scenario pct, factor	middenscenario pct, factor	hoog scenario pct, factor				
SPI-1	matig droog	1	97	1,00	1,00	2,00	2,00	11,00	11,00
		5	78	1,00	0,20	5,00	1,00	31,00	6,20
		10	56	3,00	0,30	13,00	1,30	56,00	5,60
		50	24	31,00	0,62	57,00	1,14	93,00	1,86
	zeer droog	1	63	1,00	1,00	2,00	2,00	8,00	8,00
		5	34	2,00	0,40	7,00	1,40	48,00	9,60
		10	29	2,00	0,20	13,00	1,30	57,00	5,70
		50	6	27,00	0,54	56,00	1,12	96,00	1,92
	extreem droog	1	41	0,00	0,00	2,00	2,00	7,00	7,00
		5	17	2,00	0,40	6,00	1,20	41,00	8,20
		10	11	3,00	0,30	10,00	1,00	56,00	5,60
		50	0	18,00	0,36	43,00	0,86	93,00	1,86
SPI-3	matig droog	1	167	0,00	0,00	1,00	1,00	3,00	3,00
		5	110	2,00	0,40	5,00	1,00	14,00	2,80
		10	82	3,00	0,30	10,00	1,00	38,00	3,80
		50	13	25,00	0,50	55,00	1,10	94,00	1,88
	zeer droog	1	93	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00
		5	47	2,00	0,40	6,00	1,20	33,00	6,60
		10	37	2,00	0,20	10,00	1,00	38,00	3,80
		50	0	17,00	0,34	37,00	0,74	87,00	1,74
	extreem droog	1	57	1,00	1,00	1,00	1,00	8,00	8,00
		5	12	2,00	0,40	5,00	1,00	37,00	7,40
		10	1	2,00	0,20	14,00	1,40	52,00	5,20
		50	0	2,00	0,04	14,00	0,28	53,00	1,06
SPI-6	matig droog	1	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	141	1,00	0,20	2,00	0,40	7,00	1,40
		10	87	3,00	0,30	9,00	0,90	17,00	1,70
		50	0	22,00	0,44	41,00	0,82	81,00	1,62
	zeer droog	1	156	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	73	2,00	0,40	4,00	0,80	10,00	2,00
		10	38	2,00	0,20	9,00	0,90	18,00	1,80
		50	0	7,00	0,14	19,00	0,38	53,00	1,06
	extreem droog	1	83	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00	2,00
		5	6	1,00	0,20	4,00	0,80	18,00	3,60
		10	0	2,00	0,20	5,00	0,50	21,00	2,10
		50	0	2,00	0,04	5,00	0,10	21,00	0,42
SPI-12	matig droog	1	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	152	0,00	0,00	3,03	0,61	15,15	3,03
		10	119	3,03	0,30	7,07	0,71	19,19	1,92
		50	0	14,14	0,28	26,26	0,53	49,49	0,99
	zeer droog	1	149	0,00	0,00	0,00	0,00	5,05	5,05
		5	93	0,00	0,00	3,03	0,61	9,09	1,82
		10	15	4,04	0,40	9,09	0,91	19,19	1,92
		50	0	4,04	0,08	10,10	0,20	22,22	0,44
	extreem droog	1	93	0,00	0,00	0,00	0,00	3,03	3,03
		5	2	1,01	0,20	3,03	0,61	6,06	1,21
		10	0	1,01	0,10	3,03	0,30	7,07	0,71
		50	0	1,01	0,02	3,03	0,06	7,07	0,14

Tabel 9: Vergelijking van de duur van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPI voor verschillende accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden)

Voor het voorkomen van droogtes met een bepaalde duur wordt een gelijkaardig patroon als voor de frequentie en het voorkomen van de verschillende droogteklassen en accumulatieperioden waargenomen. Voor het laag scenario wordt vooral een verlaging van het voorkomen van een droogte met een bepaalde duur verwacht, terwijl voor het middenscenario enkel voor de SPI-1 een duidelijke verhoging van de droogteduur wordt verwacht. Bij het hoog impactscenario worden verhogingen van de duur voor de meeste droogteklassen, accumulatieperioden en percentielen verwacht, behalve voor een aantal van de extreem droge en zeer droge 10^e en 50^e percentielen van de SPI-6 en SPI-12. De algemene tendens is dat voor een middenscenario vooral de extremen in kortere droogtes (de 1^e en 5^e percentielen van SPI-1 en SPI-3) wat vaker zullen voorkomen, terwijl voor het hoog impactscenario droogtes vaker zullen voorkomen voor de meeste percentielen, klassen en accumulatieperioden, maar ook daar vooral de meer extreme droogteduren (1 en 5 percentiel) op de kortere-termijn (SPI-1 en SPI-3) vaker zullen voorkomen.

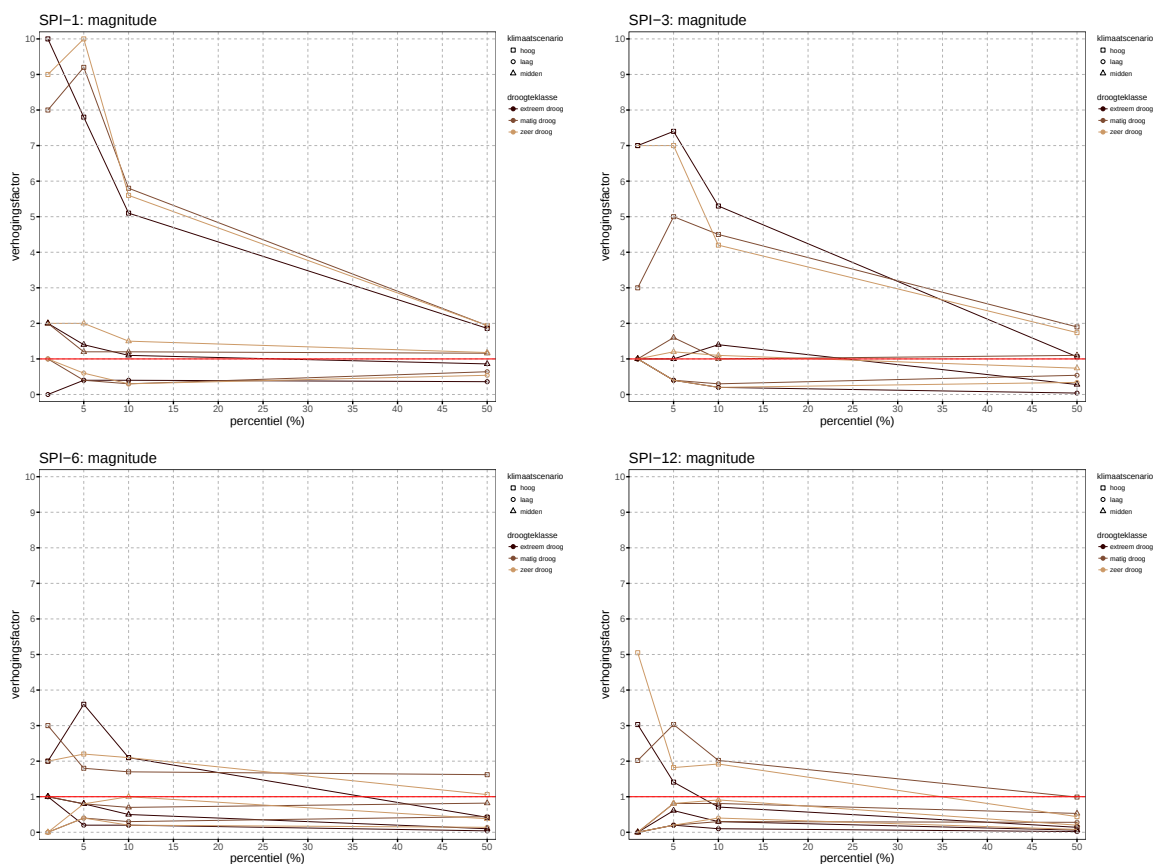
Een gedetailleerde weergave van de verandering van de duur van zeer droge en extreem droge periodes voor de SPI-1 en SPI-3 wordt gegeven in [figuur 14](#). Zeer droge en extreem droge periodes met een gelijkaardige duur voor zowel de SPI-1 en SPI-3 zullen globaal genomen een paar procent vaker voorkomen in het midden-klimaatscenario. De klimaatscenario's die de grootste impact voorspellen vertonen een relatief grote spreiding waardoor in de hogere impact-klimaatscenario's de duur van een droogtevent dat met dezelfde frequentie voorkomt substantieel langer wordt, of een droogte-event met een bepaalde duur dat nu relatief uitzonderlijk is een veel normaler zal worden.



Figuur 14: Distributies van de duur van zeer droge en extreem droge periodes voor SPI-1 en SPI-3 voor de historische waarnemingen (1901-2000), 30 geperturbeerde reeksen, en 3 klimaatscenario's voor 2100.

3.4.3 Intensiteit

De verandering van de intensiteit van de droogte, uitgedrukt als de droogtemagnitude (figuur 15 en tabel 10) vertoont dezelfde trends als de droogteduur. Vergelijking van de droogteduur en -magnitude toont een sterk lineair verband, wat het zeer kleine verschil tussen in de respectievelijke percentielen voor duur en magnitude van de historische waarnemingen en de klimaatscenario's verklaard. Vooral de magnitude van de SPI-1 en SPI-3 voor het 1^e, 5^e en 10^e percentiel in hoge klimaatscenario vertonen een duidelijke verhoging het percentiel, met beperktere verhogingen voor de SPI-6 en SPI-12. Het middenscenario resulteert in eerder beperkte verhogingen van het 1^e, 5^e en 10^e percentiel van de SPI-1 en SPI-3.

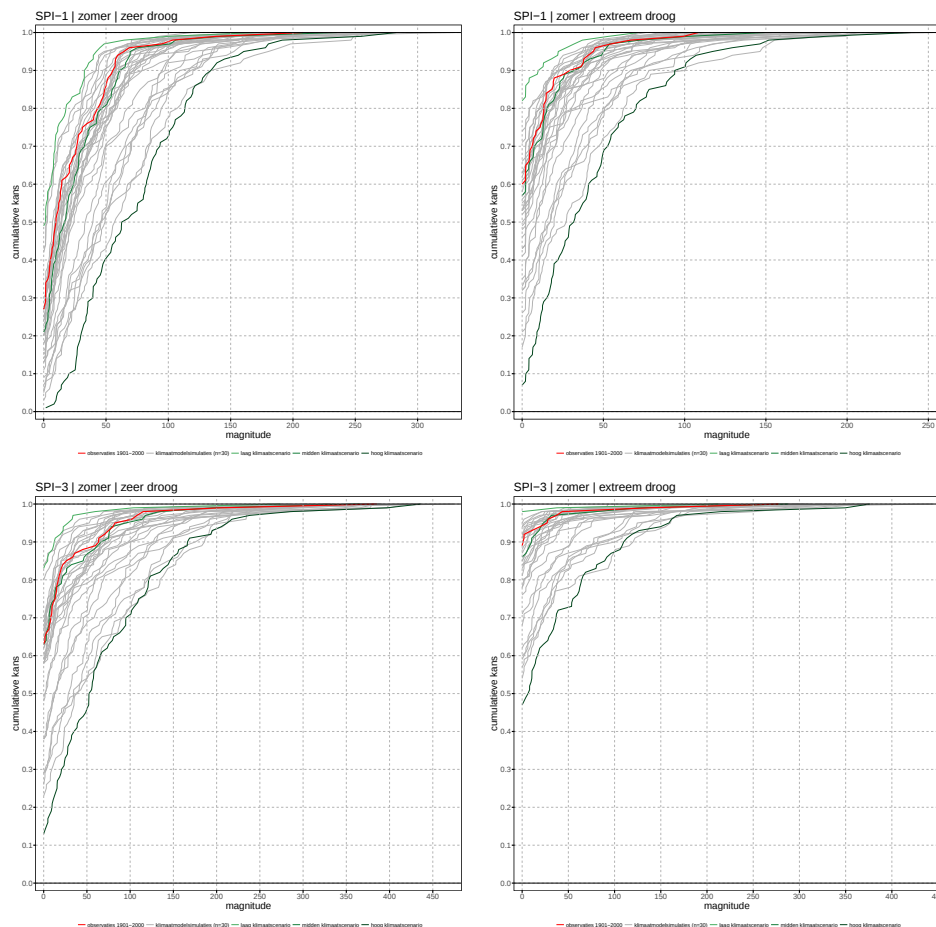


Figuur 15: Relatie tussen de verhogingsfactor en het percentiel voor de magnitude op basis van de SPI.

magnitude per droogteklasse in de zomer volgens de SPI									
indicator	droogteklasse	obs. 1901-2000		laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
		pct,	magnitude	pct,	factor	pct,	factor	pct,	factor
SPI-1	matig droog	1	179,58	1,00	1,00	2,00	2,00	8,00	8,00
		5	114,45	2,00	0,40	6,00	1,20	46,00	9,20
		10	91,63	3,00	0,30	12,00	1,20	58,00	5,80
		50	32,62	32,00	0,64	58,00	1,16	97,00	1,94
	zeer droog	1	138,63	1,00	1,00	2,00	2,00	9,00	9,00
		5	64,38	3,00	0,60	10,00	2,00	50,00	10,00
		10	55,43	3,00	0,30	15,00	1,50	56,00	5,60
		50	9,91	27,00	0,54	59,00	1,18	97,00	1,94
	extreem droog	1	99,33	0,00	0,00	2,00	2,00	10,00	10,00
		5	43,81	2,00	0,40	7,00	1,40	39,00	7,80
		10	29,24	4,00	0,40	11,00	1,10	51,00	5,10
		50	0,00	18,00	0,36	43,00	0,86	93,00	1,86
SPI-3	matig droog	1	289,41	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00
		5	153,65	2,00	0,40	8,00	1,60	25,00	5,00
		10	113,66	3,00	0,30	10,00	1,00	45,00	4,50
		50	15,06	27,00	0,54	55,00	1,10	95,00	1,90
	zeer droog	1	203,28	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00
		5	82,49	2,00	0,40	6,00	1,20	35,00	7,00
		10	63,46	2,00	0,20	11,00	1,10	42,00	4,20
		50	0,00	17,00	0,34	37,00	0,74	87,00	1,74
	extreem droog	1	136,47	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00
		5	26,88	2,00	0,40	5,00	1,00	37,00	7,40
		10	2,00	2,00	0,20	14,00	1,40	53,00	5,30
		50	0,00	2,00	0,04	14,00	0,28	53,00	1,06
SPI-6	matig droog	1	304,79	0,00	0,00	1,00	1,00	3,00	3,00
		5	201,34	2,00	0,40	4,00	0,80	9,00	1,80
		10	140,39	3,00	0,30	7,00	0,70	17,00	1,70
		50	0,00	22,00	0,44	41,00	0,82	81,00	1,62
	zeer droog	1	282,23	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00
		5	126,90	2,00	0,40	4,00	0,80	11,00	2,20
		10	61,05	2,00	0,20	10,00	1,00	21,00	2,10
		50	0,00	7,00	0,14	19,00	0,38	53,00	1,06
	extreem droog	1	182,01	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00
		5	12,22	1,00	0,20	4,00	0,80	18,00	3,60
		10	0,00	2,00	0,20	5,00	0,50	21,00	2,10
		50	0,00	2,00	0,04	5,00	0,10	21,00	0,42
SPI-12	matig droog	1	368,24	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	2,02
		5	218,70	1,01	0,20	4,04	0,81	15,15	3,03
		10	159,60	3,03	0,30	8,08	0,81	20,20	2,02
		50	0,00	14,14	0,28	26,26	0,53	49,49	0,99
	zeer droog	1	310,94	0,00	0,00	0,00	0,00	5,05	5,05
		5	159,27	1,01	0,20	4,04	0,81	9,09	1,82
		10	23,13	4,04	0,40	9,09	0,91	19,19	1,92
		50	0,00	4,04	0,08	10,10	0,20	22,22	0,44
	extreem droog	1	241,33	0,00	0,00	0,00	0,00	3,03	3,03
		5	4,06	1,01	0,20	3,03	0,61	7,07	1,41
		10	0,00	1,01	0,10	3,03	0,30	7,07	0,71
		50	0,00	1,01	0,02	3,03	0,06	7,07	0,14

Tabel 10: Vergelijking van de magnitude van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPI voor verschillende accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden)

Een gedetailleerde weergave van de verandering van de magnitude van de zeer droge en extreem droge periodes voor de SPI-1 en SPI-3 wordt gegeven in [figuur 16](#). De resultaten bekomen voor de magnitude zijn zeer gelijkaardig aan deze bekomen voor de duur ([figuur 14](#)).

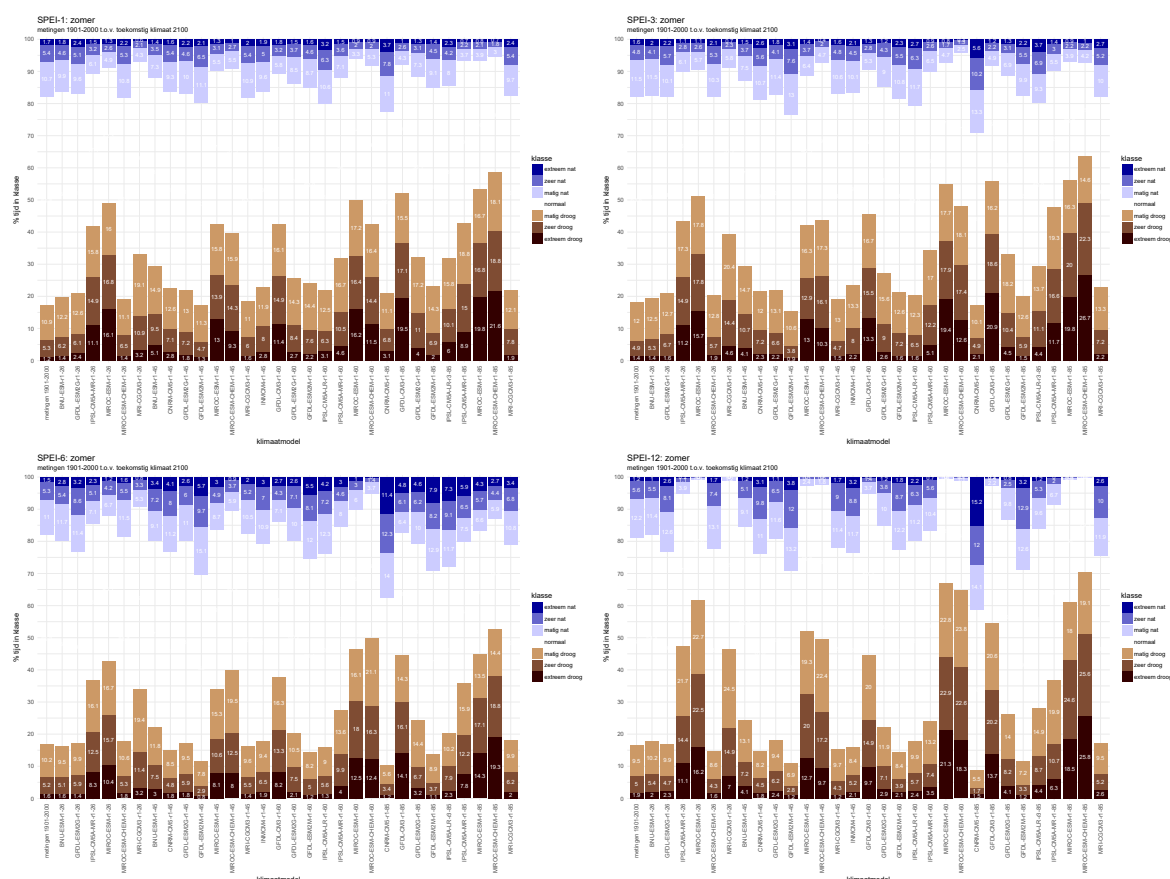


Figuur 16: Distributies van de magnitude van zeer droge en extreem droge periodes voor SPI-1 en SPI-3 voor de historische waarnemingen (1901-2000), 30 geperturbeerde reeksen, en 3 klimaatscenario's voor 2100.

3.5 Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI)

3.5.1 Frequentie en voorkomen

De vergelijking tussen het voorkomen van de verschillende SPEI-klassen voor het huidige klimaat ([figuur 17](#); metingen 1901-2000) met de theoretisch verwachte frequentie van deze klassen (cfr. [tabel 2](#)) geeft aan dat de extreem droge en extreem natte klassen wat minder voorkomen dan theoretisch verwacht, terwijl de matig natte en zeer natte klassen wat meer voorkomen. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de eigenschappen van generalised logistic distributie die als referentiedistributie gebruikt werd. De verschillen met de theoretisch verwachte percentielen zijn echter relatief klein, bovendien is het voorkomen van de verschillende droogteklassen consistent over de verschillende accumulatieperioden en vertoont geen bias naar nattere of drogere waarden. De gekozen generalized logistic-distributie wordt dus als een goede globale referentiedistributie voor de SPEI beschouwd.



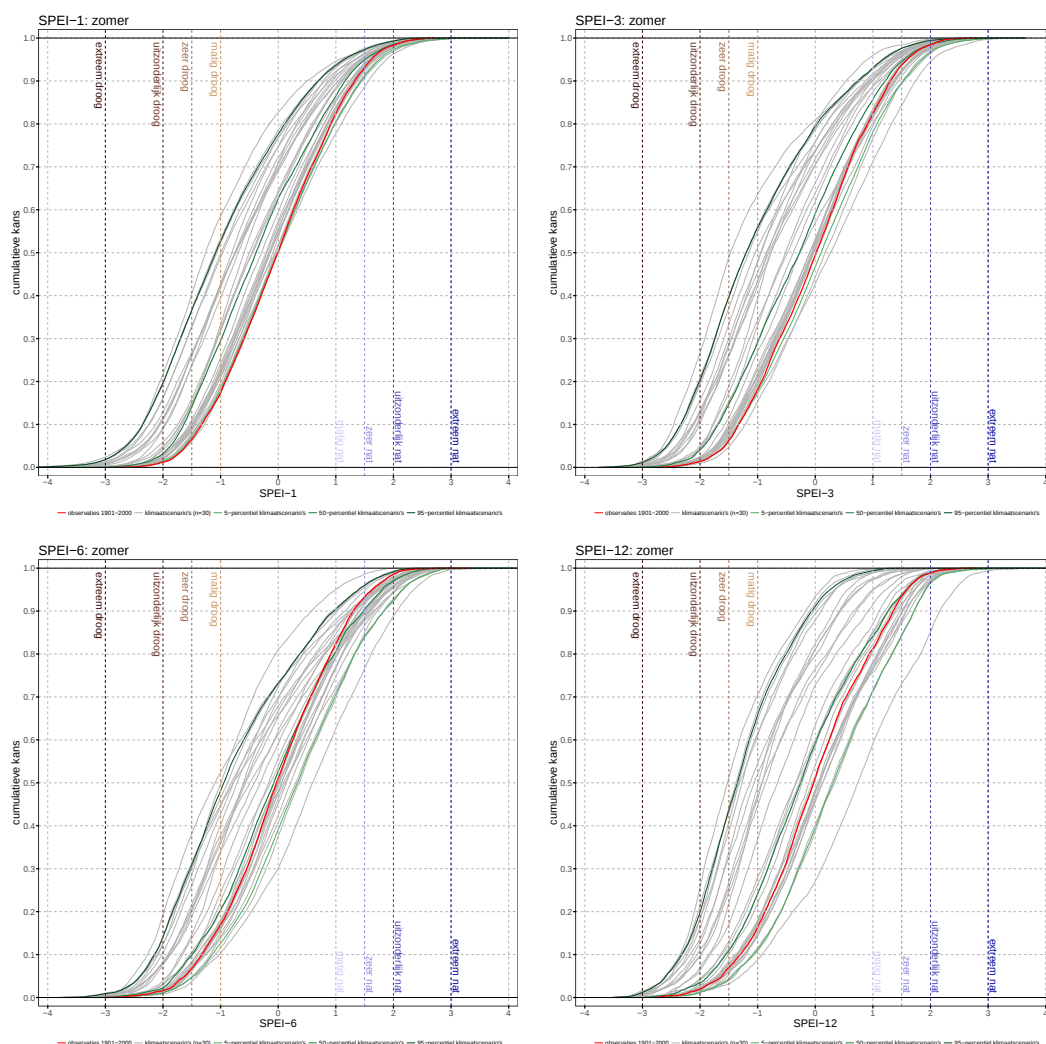
Figuur 17: Vergelijking van het aandeel van de verschillende droogteklassen voor de SPEI tussen de historische waarnemingen (1901-2000) en geperturbeerde reeksen (klimaat 2100) voor verschillende aggregatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden).

Het voorkomen van de droogteklassen bij de geperturbeerde waarden voor het jaar 2100 (figuur 17) toont al aan dat de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI) veel sterkere verhogingen van de droogte in de hydrologische zomer kent dan de SPI voor alle accumulatieperiodes. Dit wordt verklaard door het feit dat de Standardized Precipitation Index (SPI) enkel gebaseerd is op neerslaghoeveelheden waarvan de meeste klimaatmodellen voor Vlaanderen een toename voorspellen in de winter en een afname in de zomer met globaal een iets hogere gemiddelde jaarneerslag (Brouwers et al., 2015). De SPEI is echter gebaseerd op neerslag én evapotranspiratie. Voor evapotranspiratie voorspellen de klimaatmodellen voor Vlaanderen het hele jaar door, en vooral in de zomer, een toename (Brouwers et al., 2015). Dit gecombineerde effect van drogere zomers met een globaal toegenomen evapotranspiratie maakt dat de trends voor de SPEI veel groter zijn dan voor de SPI. Dit toont ook aan dat het essentieel is om veranderingen in evapotranspiratie ook te beschouwen bij het evalueren van de effecten van klimaatverandering op droogte, hoewel de SPEI internationaal veel minder gebruikt wordt dan de SPI.

De verandering van de frequentie waarmee de verschillende droogteklassen voorkomen tussen het huidige klimaat en de drie toekomstscenario's wordt weergegeven in tabel 11 en grafisch voorgesteld in figuur 18.

frequentie SPEI in de zomer per droogteklasse								
indicator	droogteklasse	waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario pct.	factor	middenscenario pct.	factor	hoog scenario pct.	factor
SPEI-1	matig droog	17,37	17,96	1,03	29,50	1,70	52,70	3,03
	zeer droog	6,48	7,03	1,08	14,12	2,18	36,61	5,65
	extreem droog	1,22	1,37	1,12	3,24	2,65	19,66	16,06
SPEI-3	matig droog	18,24	17,68	0,97	29,16	1,60	55,91	3,07
	zeer droog	6,27	6,25	1,00	14,75	2,35	39,69	6,33
	extreem droog	1,38	1,40	1,02	4,09	2,96	20,36	14,73
SPEI-6	matig droog	16,93	12,62	0,75	20,44	1,21	48,18	2,85
	zeer droog	6,76	4,73	0,70	9,89	1,46	30,95	4,58
	extreem droog	1,59	1,12	0,71	2,31	1,46	14,17	8,93
SPEI-12	matig droog	16,39	11,24	0,69	24,14	1,47	65,86	4,02
	zeer droog	6,91	4,20	0,61	10,93	1,58	43,66	6,32
	extreem droog	1,93	1,18	0,61	3,49	1,81	19,92	10,34

Tabel 11: Vergelijking van de globale frequentie waarmee de verschillende droogteklassen zich voordoen in de zomer volgens de SPEI voor verschillende accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden).



Figuur 18: Vergelijking van de distributies van de SPEI tussen de historische waarnemingen (1901-2000) en de 30 gepertureerde reeksen, en lage, midden en hoge klimaatscenario's (klimaat 2100) voor verschillende aggregatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden).

In het lage-impact klimaatscenario blijft de frequentie van de SPEI-1 en SPEI-3 droogteklassen relatief stabiel en neemt af voor de SPEI-6 en SPEI-12, waarschijnlijk als gevolg van de nattere winters. In het middenscenario worden afhankelijk van de accumulatieperiode en droogteklasse toenames van anderhalf tot 3 keer verwacht. Net als bij de SPI worden de duidelijkste toenames van de frequentie van de droogteklassen waargenomen in het hoge impactscenario, met vooral sterke toenames van de zeer droge en extreem droge klassen. Waar de extreem droge SPEI-klasse voor de SPEI-1 en SPEI-3 in het huidige klimaat respectievelijk 1,22% en 1,38% van de tijd voorkomen in de hydrologische zomer zal dat tegen 2100 respectievelijk 19,66% en 20,36% van de tijd zijn (tabel 11). Verder wordt in het hoge impactscenario ook voor de SPEI-6 en SPEI-12 duidelijke verhogingen waargenomen wat erop wijst dat in dit scenario de nattere winters veel minder compenseren voor de toegenomen evapotranspiratie. Dit zou betekenen dat er het hele jaar door een verdroging van het watersysteem optreedt en ook maatregelen zoals het voorzien van een grotere buffercapaciteit om water in de winter op te vangen om ervan te gebruiken in de zomer een deel van hun potentieel verliezen.

Naast de frequentie (i.e. het totale % van de tijd) dat een bepaalde droogteklasse voorkomt werd ook de kans op voorkomen van de verschillende droogteklassen binnen een zomerseizoen nagegaan (tabel 12). Deze verhogingsfactoren voor de SPEI zijn globaal genomen wat hoger dan deze bekomen voor de SPI (tabel 8). De sterkste verhogingen worden opgetekend voor het voorkomen van de extreem droge klassen, maar dit is vermoedelijk mee het gevolg van het ietwat lager dan theoretisch verwacht voorkomen van de extreem droge klasse in de SPEI-reeksen voor het huidige klimaat (cfr. sectie 3.5.1).

kans op voorkomen per droogteklasse in de zomer volgens de SPEI								
indicator	droogteklasse	waarnemingen 1901-2000 pct.	laag scenario pct.	factor	middenscenario pct.	factor	hoog scenario pct.	factor
SPEI-1	matig droog	94,00	94,00	1,00	99,00	1,05	100,00	1,06
	zeer droog	68,00	69,00	1,01	86,00	1,26	100,00	1,47
	extreem droog	18,00	22,00	1,22	43,00	2,39	97,00	5,39
SPEI-3	matig droog	64,00	64,00	1,00	86,00	1,34	100,00	1,56
	zeer droog	36,00	35,00	0,97	59,00	1,64	97,00	2,69
	extreem droog	8,00	8,00	1,00	25,00	3,12	76,00	9,50
SPEI-6	matig droog	44,00	35,00	0,80	62,00	1,41	99,00	2,25
	zeer droog	27,00	19,00	0,70	31,00	1,15	87,00	3,22
	extreem droog	6,00	4,00	0,67	14,00	2,33	55,00	9,17
SPEI-12	matig droog	39,39	31,31	0,79	46,46	1,18	87,88	2,23
	zeer droog	20,20	14,14	0,70	27,27	1,35	71,72	3,55
	extreem droog	6,06	4,04	0,67	9,09	1,50	45,45	7,50

Tabel 12: Vergelijking van de kans op voorkomen van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPEI voor verschillende accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden)

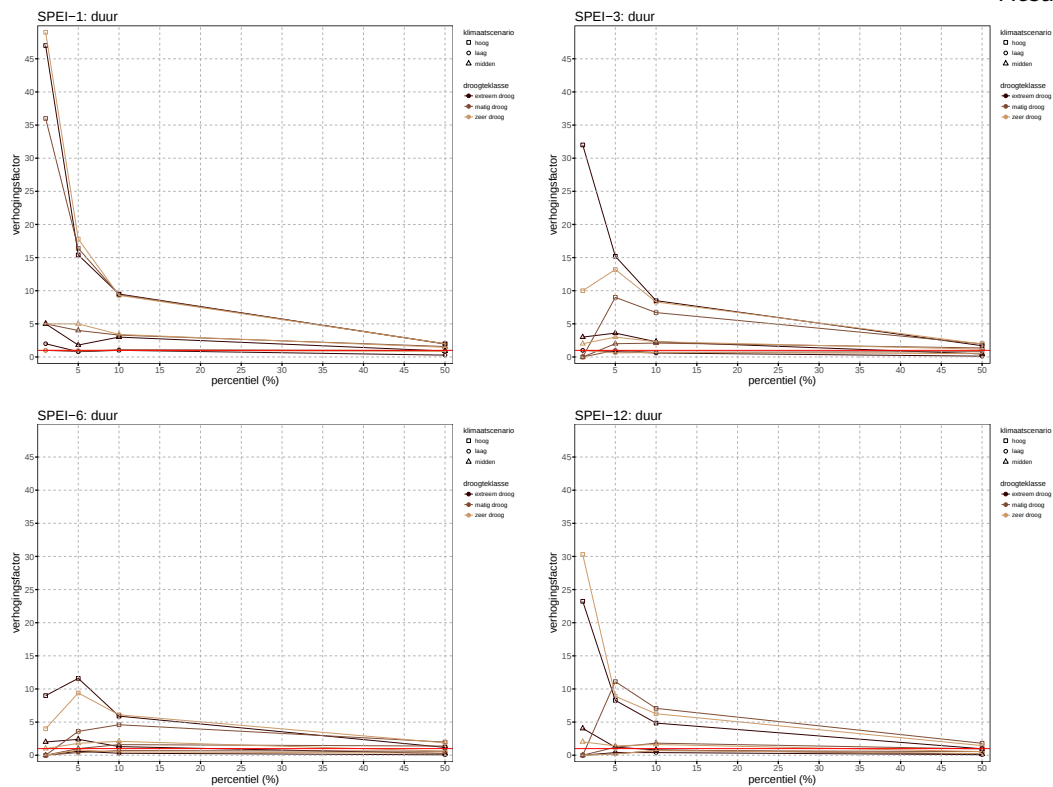
3.5.2 Duur

De percentielen voor de totale duur van een droogte in de hydrologische zomer voor de verschillende droogteklassen en accumulatieperioden wordt weergegeven in tabel 13 en figuur 19. Voor de SPEI wordt voor het midden-klimaatscenario een verhoging van de frequentie van droogtes met een bepaalde duur waargenomen, waar dit voor de SPI nog eerder een status quo was. De grootste verhogingsfactoren worden waargenomen voor het hoog klimaatscenario, waar voor alle accumulatieperioden een duidelijke verhoging van het 1^e, 5^e en 10^e percentiel wordt waargenomen.

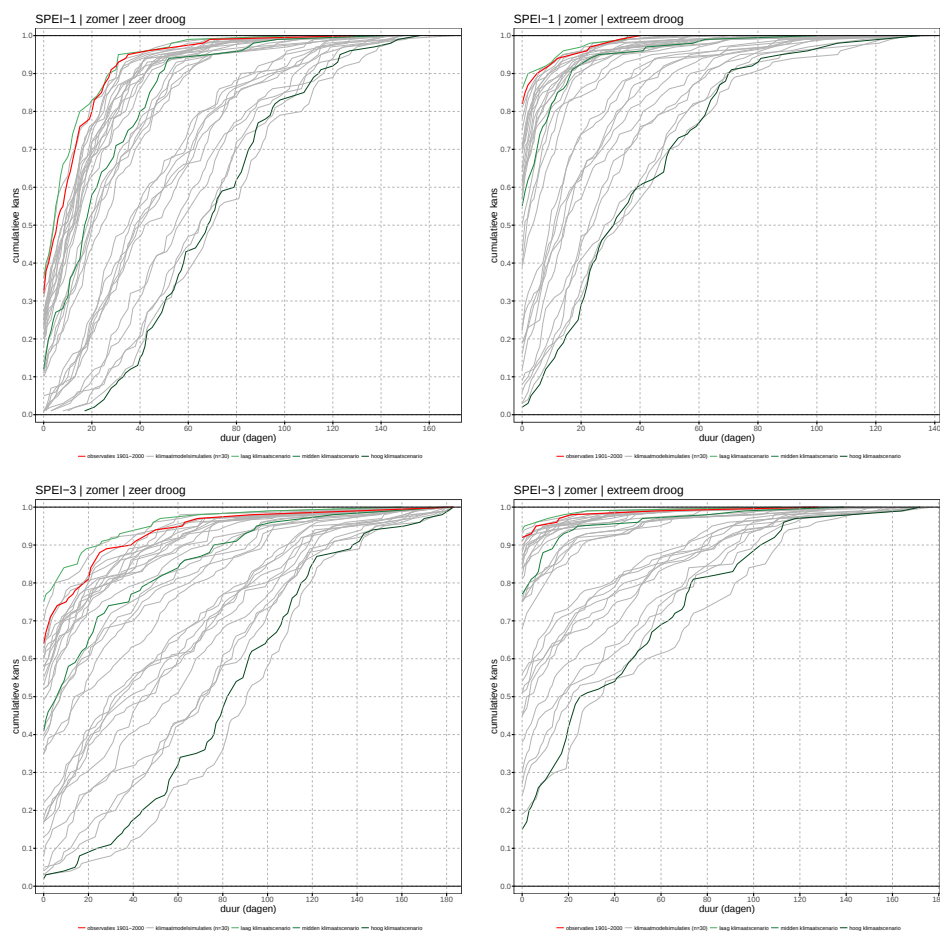
aantal dagen per droogteklasse in de zomer volgens de SPEI									
indicator	droogteklasse	obs. 1901-2000 pct, # dagen	laag scenario pct, factor	middenscenario pct, factor	hoog scenario pct, factor				
SPEI-1	matig droog	1	110	1,00	1,00	5,00	5,00	36,00	36,00
		5	78	4,00	0,80	20,00	4,00	82,00	16,40
		10	63	11,00	1,10	33,00	3,30	94,00	9,40
		50	24	48,00	0,96	79,00	1,58	100,00	2,00
	zeer droog	1	69	1,00	1,00	5,00	5,00	49,00	49,00
		5	35	5,00	1,00	25,00	5,00	89,00	17,80
		10	28	10,00	1,00	34,00	3,40	93,00	9,30
		50	6	42,00	0,84	73,00	1,46	100,00	2,00
	extreem droog	1	33	2,00	2,00	5,00	5,00	47,00	47,00
		5	17	4,00	0,80	9,00	1,80	77,00	15,40
		10	5	10,00	1,00	30,00	3,00	95,00	9,50
		50	0	14,00	0,28	45,00	0,90	98,00	1,96
SPEI-3	matig droog	1	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	120	5,00	1,00	10,00	2,00	45,00	9,00
		10	95	7,00	0,70	21,00	2,10	67,00	6,70
		50	17	40,00	0,80	68,00	1,36	99,00	1,98
	zeer droog	1	140	1,00	1,00	2,00	2,00	10,00	10,00
		5	62	3,00	0,60	15,00	3,00	66,00	13,20
		10	39	7,00	0,70	23,00	2,30	83,00	8,30
		50	0	25,00	0,50	59,00	1,18	98,00	1,96
	extreem droog	1	58	1,00	1,00	3,00	3,00	32,00	32,00
		5	6	4,00	0,80	18,00	3,60	76,00	15,20
		10	0	6,00	0,60	23,00	2,30	85,00	8,50
		50	0	6,00	0,12	23,00	0,46	85,00	1,70
SPEI-6	matig droog	1	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	146	2,00	0,40	5,00	1,00	18,00	3,60
		10	96	7,00	0,70	16,00	1,60	46,00	4,60
		50	0	30,00	0,60	69,00	1,38	99,00	1,98
	zeer droog	1	162	0,00	0,00	1,00	1,00	4,00	4,00
		5	67	4,00	0,80	9,00	1,80	47,00	9,40
		10	43	5,00	0,50	21,00	2,10	61,00	6,10
		50	0	16,00	0,32	31,00	0,62	93,00	1,86
	extreem droog	1	104	0,00	0,00	2,00	2,00	9,00	9,00
		5	2	3,00	0,60	12,00	2,40	58,00	11,60
		10	0	3,00	0,30	13,00	1,30	59,00	5,90
		50	0	3,00	0,06	13,00	0,26	59,00	1,18
SPEI-12	matig droog	1	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	160	1,01	0,20	6,06	1,21	55,56	11,11
		10	104	7,07	0,71	18,18	1,82	70,71	7,07
		50	0	27,27	0,55	47,47	0,95	89,90	1,80
	zeer droog	1	153	0,00	0,00	2,02	2,02	30,30	30,30
		5	105	1,01	0,20	7,07	1,41	44,44	8,89
		10	46	7,07	0,71	16,16	1,62	62,63	6,26
		50	0	13,13	0,26	27,27	0,55	72,73	1,45
	extreem droog	1	94	0,00	0,00	4,04	4,04	23,23	23,23
		5	27	2,02	0,40	6,06	1,21	41,41	8,28
		10	0	4,04	0,40	8,08	0,81	48,48	4,85
		50	0	4,04	0,08	8,08	0,16	48,48	0,97

Tabel 13: Vergelijking van de duur van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPEI voor verschillende accumulatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden)

Een weergave van de verandering van de duur van zeer droge en extreem droge periodes voor de SPI-1 en SPI-3 (figuur 20) toont dat de meeste klimaatscenario's een sterke verhoging van de duur van zeer droge of extreem droge periodes voorspellen die met dezelfde frequentie voorkomen, of dat een droogte met een bepaalde duur die nu vrij uitzonderlijk is veel normaler zal worden.



Figuur 19: Relatie tussen de verhogingsfactor en het percentiel voor de duur van de droogtes op basis van de SPEI.



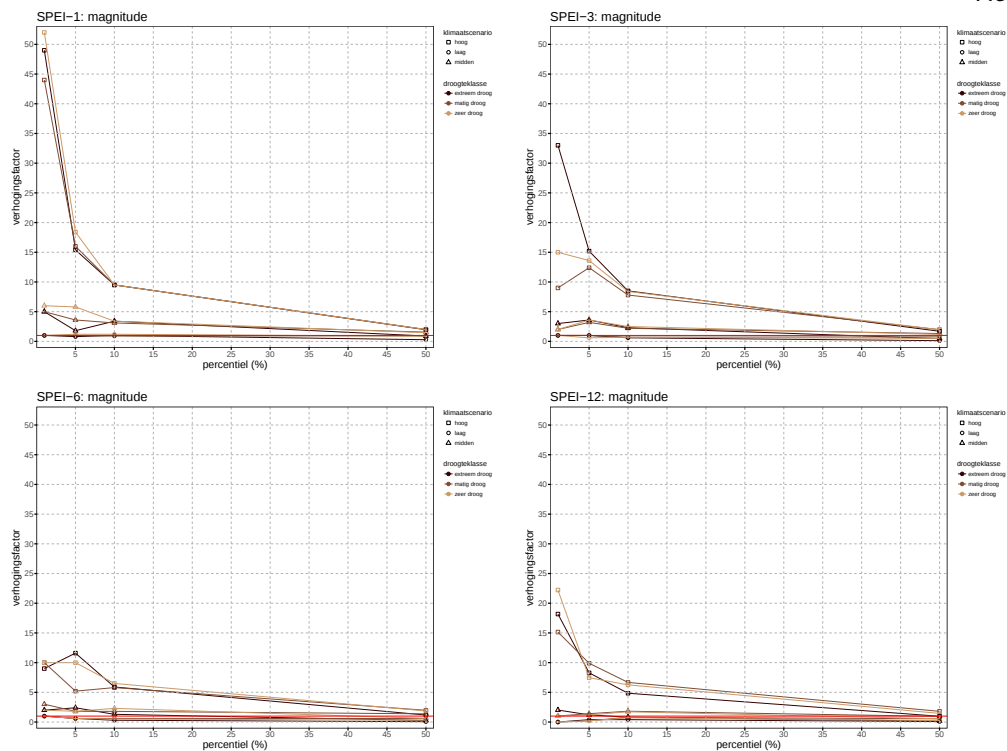
Figuur 20: Distributies van de duur van zeer droge en extreem droge periodes voor de SPEI-1 en SPEI-3, historische waarnemingen (1901-2000), 30 gepertureerde reeksen, en lage, midden en hoge klimaatscenario's tegen 2100.

3.5.3 Intensiteit

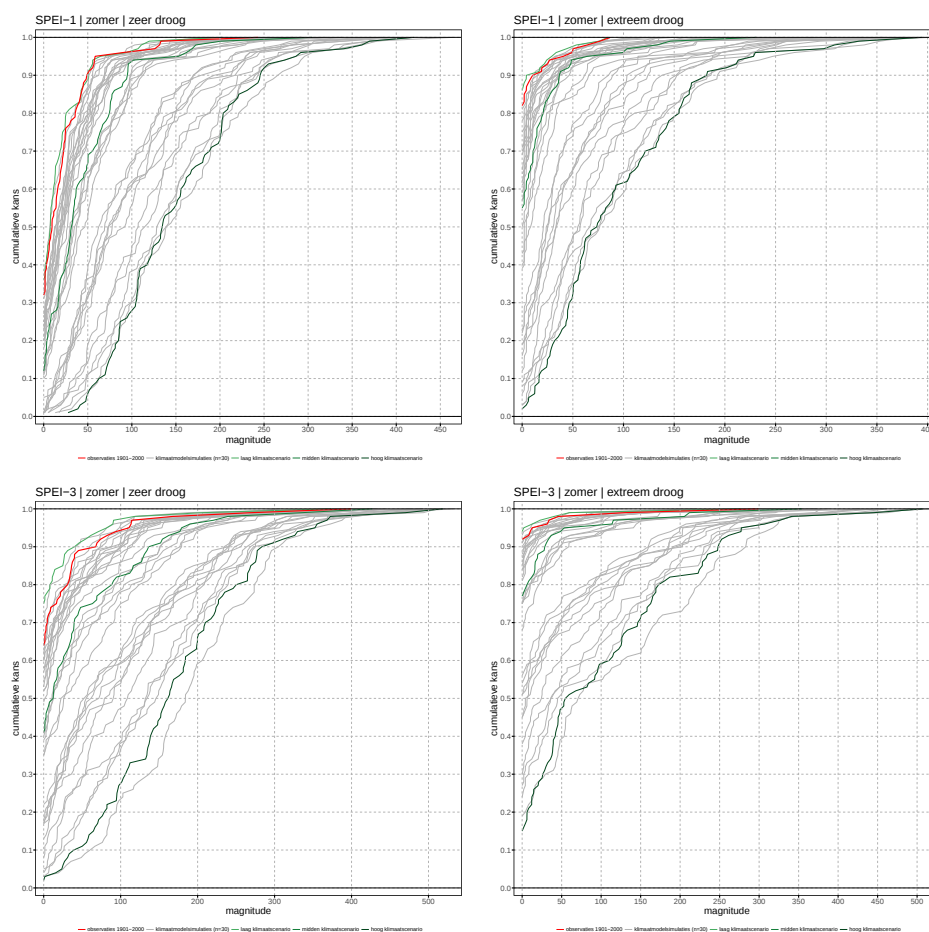
De verandering van de intensiteit van de droogte, uitgedrukt als de droogtemagnitude (tabel 14, figuur 21, figuur 22) vertoont sterke gelijkenissen met de verandering van de duur (cfr. sectie 3.5.2).

magnitude per droogteklasse in de zomer volgens de SPEI									
indicator	droogteklasse	obs. 1901-2000		laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
		pct,	magnitude	pct,	factor	pct,	factor	pct,	factor
SPEI-1	matig droog	1	183,58	1,00	1,00	5,00	5,00	44,00	44,00
		5	129,99	5,00	1,00	18,00	3,60	80,00	16,00
		10	97,42	9,00	0,90	31,00	3,10	95,00	9,50
		50	33,83	47,00	0,94	78,00	1,56	100,00	2,00
	zeer droog	1	133,00	1,00	1,00	6,00	6,00	52,00	52,00
		5	58,42	6,00	1,20	29,00	5,80	92,00	18,40
		10	48,89	12,00	1,20	34,00	3,40	95,00	9,50
		50	9,45	43,00	0,86	73,00	1,46	100,00	2,00
	extreem droog	1	76,71	1,00	1,00	5,00	5,00	49,00	49,00
		5	40,61	4,00	0,80	9,00	1,80	77,00	15,40
		10	10,39	10,00	1,00	34,00	3,40	95,00	9,50
		50	0,00	14,00	0,28	45,00	0,90	98,00	1,96
SPEI-3	matig droog	1	327,76	1,00	1,00	2,00	2,00	9,00	9,00
		5	169,17	5,00	1,00	16,00	3,20	62,00	12,40
		10	130,47	7,00	0,70	22,00	2,20	78,00	7,80
		50	21,27	38,00	0,76	66,00	1,32	99,00	1,98
	zeer droog	1	270,82	1,00	1,00	2,00	2,00	15,00	15,00
		5	110,86	3,00	0,60	18,00	3,60	68,00	13,60
		10	67,70	7,00	0,70	25,00	2,50	84,00	8,40
		50	0,00	25,00	0,50	59,00	1,18	98,00	1,96
	extreem droog	1	130,67	1,00	1,00	3,00	3,00	33,00	33,00
		5	12,63	5,00	1,00	18,00	3,60	76,00	15,20
		10	0,00	6,00	0,60	23,00	2,30	85,00	8,50
		50	0,00	6,00	0,12	23,00	0,46	85,00	1,70
SPEI-6	matig droog	1	318,02	1,00	1,00	3,00	3,00	10,00	10,00
		5	227,58	3,00	0,60	9,00	1,80	26,00	5,20
		10	134,41	6,00	0,60	18,00	1,80	58,00	5,80
		50	0,00	30,00	0,60	69,00	1,38	99,00	1,98
	zeer droog	1	298,41	1,00	1,00	2,00	2,00	10,00	10,00
		5	117,43	3,00	0,60	9,00	1,80	50,00	10,00
		10	69,68	5,00	0,50	23,00	2,30	65,00	6,50
		50	0,00	16,00	0,32	31,00	0,62	93,00	1,86
	extreem droog	1	233,08	1,00	1,00	2,00	2,00	9,00	9,00
		5	4,02	3,00	0,60	12,00	2,40	58,00	11,60
		10	0,00	3,00	0,30	13,00	1,30	59,00	5,90
		50	0,00	3,00	0,06	13,00	0,26	59,00	1,18
SPEI-12	matig droog	1	385,25	0,00	0,00	1,01	1,01	15,15	15,15
		5	270,97	1,01	0,20	7,07	1,41	49,49	9,90
		10	152,24	8,08	0,81	18,18	1,82	66,67	6,67
		50	0,00	27,27	0,55	47,47	0,95	89,90	1,80
	zeer droog	1	335,78	0,00	0,00	1,01	1,01	22,22	22,22
		5	226,84	1,01	0,20	6,06	1,21	37,37	7,47
		10	71,97	7,07	0,71	17,17	1,72	62,63	6,26
		50	0,00	13,13	0,26	27,27	0,55	72,73	1,45
	extreem droog	1	243,09	0,00	0,00	2,02	2,02	18,18	18,18
		5	55,41	2,02	0,40	6,06	1,21	41,41	8,28
		10	0,00	4,04	0,40	8,08	0,81	48,48	4,85
		50	0,00	4,04	0,08	8,08	0,16	48,48	0,97

Tabel 14: Vergelijking van de magnitude van de verschillende droogteklassen in de zomer volgens de SPEI voor verschillende accumulatieperiodes (1, 3, 6 en 12 maanden)



Figuur 21: Relatie tussen de verhogingsfactor en het percentiel voor de magnitude op basis van de SPEI.



Figuur 22: Distributies van de magnitude van zeer droge en extreem droge periodes voor SPEI-1 en SPEI-3, historische waarnemingen, 30 geperturbeerde reeksen, lage, midden en hoge klimaatscenario's tegen 2100.

3.6 De droogte van 1976

Evaluatie van de extreme waarden, grootste duur en magnitude van de SPI en de SPEI voor de verschillende droogteklassen (matig droog, zeer droog en extreem droog) en accumulatieperioden (1, 3, 6 en 12 maanden) voor de hydrologische zomer toont aan dat droogte een complex fenomeen is. Sommige droogtes zijn niet zo intens, maar houden lang aan, terwijl andere dan weer veel intenser zijn maar niet zo lang duren. Ook de periode van het jaar waarin een droogte plaatsvindt (vroeg of laat in de zomer) heeft een invloed op de impact van de droogte, hoewel dit niet onderzocht werd in dit rapport.

De “ergste” droogte waargenomen in de periode 1901-2000 is afhankelijk van welke indicator, droogteklasse en accumulatieperiode gekozen worden. De droogtes in de zomers van de jaren 1921, 1959 en 1976 komen echter vaak naar voren als ongeveer de drie ergste droogtes in de periode 1901-2000. Hoewel uit de analyse van zowel de SPI als de SPEI blijkt dat de droogte van 1976 niet met voorsprong de ergste droogte in de periode 1901-2000 was en de droogte van 1921 voor veel indicatoren als de ergste naar voor komt, is de droogte van 1976 wel de meest recente droogte waarvoor er verspreid over heel Vlaanderen een grote impact was op bijna alle delen van het watersysteem. Hierdoor wordt deze droogte vaak als officieus referentiepunt voor de meer recente droogtes genomen.

Om de interpretatie van de waarden voor droogteduur en -magnitude voor de verschillende droogteklassen en accumulatieperioden te vergemakkelijken worden hieronder de waarden voor duur en magnitude voor de SPI ([tabel 15](#)) en de SPEI ([tabel 16](#)) voor de zomer van 1976 gegeven. Daarnaast wordt ook weergegeven welke percentielen deze droogte vertegenwoordigde voor de verschillende indicatoren in de periode 1901-2000 en welke de verwachte percentielen en verhogingsfactoren zijn voor dezelfde droogte in het jaar 2100.

Deze resultaten tonen aan dat voor wat betreft de neerslag (SPI) een korte-termijn extreme droogte met eenzelfde duur en magnitude als de droogte van 1976 voor de SPI-1 drie keer per 100 jaar zal voorkomen in het middenklimaatscenario ten opzichte van 2 keer per 100 jaar in de waarnemingen, en 6 (duur) à 8 (magnitude) keer per 100 jaar ten opzichte van 2 keer per 100 jaar in de waarnemingen in het hoog klimaatscenario. De iets langere-termijn (SPI-3) extreme droogtes blijven in het middenklimaatscenario met eenzelfde frequentie voorkomen, maar komen tot 8 keer per 100 jaar voor in het hoog klimaatscenario ten opzichte van 2 keer in de waarnemingen.

Wanneer ook evapotranspiratie in rekening wordt gebracht (SPEI) zal een extreme droogtesituatie zoals die van 1976 tegen 2100 in het midden-klimaatscenario voor de korte termijn (SPI-1) 11 keer per 100 jaar voorkomen, ten opzichte van 6 keer per 100 jaar in de waarnemingen, en voor de langere termijn (SPI-3) 4 keer per 100 jaar ten opzichte van 2 keer in de waarnemingen. In het hoge klimaatscenario zullen deze extreme droogtesituaties voor de korte termijn (SPI-1) ongeveer 73 keer per 100 jaar voorkomen ten opzichte van 6 keer per 100 jaar in de waarnemingen, en op de langere termijn (SPI-3) ongeveer 30 keer ten opzichte van 2 keer per 100 jaar in de waarnemingen.

Of een droogte een belangrijke impact heeft zoals de droogte van 1976 hangt af van het samengaan van verschillende indicatoren, een extreme droogte voor de korte termijn (SP(E)I-1) kan voorbijgaan zonder veel problemen wanneer het op de langere termijn (SP(E)I-3 of langere accumulatieperiode) niet zo droog is en watervoorraden in de bodem en het freatische grondwater de ergste effecten van de kortstondige droogte kunnen opvangen. Anderzijds kan een abnormaal droge periode op de lange termijn (SP(E)I-3 of langere accumulatieperiode) ook zonder problemen voorbijgaan als er geen acute extreme droogte binnen deze periode optreedt (SP(E)I-1). De impact van een droogte is ook afhankelijk van o.a. de periode van het jaar waarin de droogte optreedt (b.v. wanneer gewassen ontkiemen), of de droogte samengaat met een hittegolf die de watervraag verhoogt en tal van andere factoren. Ook de impact die droogtes in het jaar 2100 zullen hebben zal naast veranderingen in neerslag en evapotranspiratie ook bepaald worden door veranderingen in andere (socio-economische) factoren.

zomer 1976 (april t.e.m. september)									
duur									
indicator	klasse	obs. 1901-2000 # dagen	pct.	laag scenario pct.	factor	middenscenario pct.	factor	hoog scenario pct.	factor
SPI-1	matig droog	97	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	11,00	11,00
	zeer droog	63	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	7,00	7,00
	extreem droog	41	1,00	0,00	0,00	2,00	2,00	5,00	5,00
SPI-3	matig droog	164	2,00	0,00	0,00	1,00	0,50	3,00	1,50
	zeer droog	93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,00	9,00
	extreem droog	57	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00
SPI-6	matig droog	142	3,00	1,00	0,33	2,00	0,67	5,00	1,67
	zeer droog	137	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,00
	extreem droog	83	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00	2,00
SPI-12	matig droog	183	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	zeer droog	96	3,03	0,00	0,00	3,03	1,00	9,09	3,00
	extreem droog	0	5,05	1,01	0,20	3,03	0,60	6,06	1,20
magnitudo									
indicator	klasse	obs. 1901-2000 magnitudo	pct.	laag scenario pct.	factor	middenscenario pct.	factor	hoog scenario pct.	factor
SPI-1	matig droog	179,58	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	8,00	8,00
	zeer droog	138,63	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	7,00	7,00
	extreem droog	99,33	1,00	0,00	0,00	2,00	2,00	7,00	7,00
SPI-3	matig droog	289,41	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00
	zeer droog	203,28	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,00	6,00
	extreem droog	136,47	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00
SPI-6	matig droog	288,34	2,00	0,00	0,00	1,00	0,50	3,00	1,50
	zeer droog	282,23	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00	2,00
	extreem droog	182,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00
SPI-12	matig droog	281,16	3,03	0,00	0,00	2,02	0,67	6,06	2,00
	zeer droog	159,27	4,04	1,01	0,25	4,04	1,00	9,09	2,25
	extreem droog	0,00	5,05	1,01	0,20	3,03	0,60	6,06	1,20

Tabel 15: Droogteduur en -magnitudo voor de de zomer van 1976, voor de verschillende droogteklassen volgens de SPI-1, SPI-3, SPI-6 en SPI-12, met waargenomen percentielen voor de de periode 1901-2000 en corresponderende percentielen en verhogingsfactoren voor het laag, midden en hoog klimaatscenario.

zomer 1976 (april t.e.m. september)									
duur									
indicator	klasse	obs. 1901-2000		laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
		# dagen	pct.	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
SPEI-1	matig droog	110	1.00	1.00	1.00	7.00	7.00	30.00	30.00
	zeer droog	66	2.00	2.00	1.00	6.00	3.00	48.00	24.00
	extreem droog	17	5.00	5.00	1.00	10.00	2.00	72.00	14.40
SPEI-3	matig droog	183	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	zeer droog	140	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	9.00	9.00
	extreem droog	58	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	29.00	29.00
SPEI-6	matig droog	157	3.00	2.00	0.67	4.00	1.33	12.00	4.00
	zeer droog	139	2.00	1.00	0.50	2.00	1.00	7.00	3.50
	extreem droog	104	1.00	0.00	0.00	2.00	2.00	9.00	9.00
SPEI-12	matig droog	183	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	zeer droog	153	0.00	0.00	0.00	2.02	2.02	26.26	26.26
	extreem droog	3	5.05	4.04	0.80	8.08	1.60	44.44	8.80
magnitude									
indicator	klasse	obs. 1901-2000		laag scenario		middenscenario		hoog scenario	
		magnitude	pct.	pct.	factor	pct.	factor	pct.	factor
SPEI-1	matig droog	179.94	2.00	2.00	1.00	6.00	3.00	45.00	22.50
	zeer droog	126.09	3.00	2.00	0.67	6.00	2.00	54.00	18.00
	extreem droog	40.61	5.00	5.00	1.00	10.00	2.00	72.00	14.40
SPEI-3	matig droog	327.76	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	9.00	9.00
	zeer droog	270.82	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	12.00	12.00
	extreem droog	130.67	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	30.00	30.00
SPEI-6	matig droog	318.02	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	11.00	11.00
	zeer droog	298.41	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	10.00	10.00
	extreem droog	233.08	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	9.00	9.00
SPEI-12	matig droog	310.47	1.01	0.00	0.00	5.05	5.00	31.31	31.00
	zeer droog	267.37	2.02	0.00	0.00	5.05	2.50	32.32	16.00
	extreem droog	6.00	5.05	4.04	0.80	8.08	1.60	44.44	8.80

Tabel 16: Droogteduur en -magnitude voor de zomer van 1976, voor de verschillende droogteklassen volgens de SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 en SPEI-12, met waargenomen percentielen voor de periode 1901-2000 en corresponderende percentielen en verhogingsfactoren voor het laag, midden en hoog klimaatscenario.

4 Besluit

Dit rapport beschrijft de impact van klimaatverandering op de frequentie, duur en intensiteit van meteorologische droogte tegen het jaar 2100 aan de hand van de Standardized Precipitation Index (SPI) en de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI). Deze droogte-indicatoren geven weer hoe uitzonderlijk de totale neerslaghoeveelheid (SPI) en de waterbalans (SPEI; het verschil tussen neerslag en evapotranspiratie) zijn ten opzichte van het historische normaal voor een bepaalde periode van het jaar. Voor de analyse van het huidige klimaat werden waarnemingen van neerslag en evapotranspiratie te Ukkel voor de periode 1901-2000 gebruikt. Voor de analyse van het klimaat in het jaar 2100 werden dezelfde, maar door 30 verschillende klimaatmodellen voor het klimaat van 2100 geperturbeerde meetreeksen gebruikt. Op basis van de modelsimulaties werden drie klimaatscenario's gedefinieerd, een -weinig waarschijnlijk- lage-impactklimaatscenario, een midden-impactscenario en een hoge-impactscenario. Het klimaat zal tegen 2100 volgens de huidige beschikbare gegevens en kennis met hoge waarschijnlijkheid ergens gelegen zijn tussen de huidige klimaatcondities en de hoge-impactvariant van de klimaatscenario's. Deze evoluties zijn zich nu al aan het voltrekken en zullen zich de komende decennia geleidelijk aan verderzetten. Uiteraard is het niet mogelijk om de precieze impact te bepalen door onzekerheden in de klimaat-impactmodelleringen en de onzekere toekomstevolutes in de uitstoot aan broeikasgassen. Het is dan ook binnen dit kader dat de cijfers in dit rapport geïnterpreteerd moet worden.

Neerslagtekort

Het totaal neerslagtekort gedurende het hydrologisch zomerseizoen voor de 5-percentielwaarde (i.e. het meest droge jaar in een periode van 20 jaar) zal tegen 2100 stijgen tot 485 mm tegenover 237 mm in het huidige klimaat. De neerslag die kan verdampen gedurende het hydrologisch zomerseizoen: stijging tot 77% (tegenover 67% in het huidige klimaat). De frequentie van voorkomen van het neerslagtekort kent een stijging tot een factor 10 voor de 5-percentielwaarde, wat betekent dat een extreem neerslagtekort dat zich nu gemiddeld eens om de 20 jaar voordoet, zich in de toekomst gemiddeld eens om de 2 jaar kan voordoen. De duur van het neerslagtekort kent een tot een factor 4 voor het aaneensluitend aantal dagen met een extreem neerslagtekort, gedefinieerd als dagen waarbij de 5-percentielwaarde voor het huidige klimaat wordt overschreden.

Standardized Precipitation Index

Analyse van de Standardized Precipitation Index (SPI) en de veranderingen tussen de waarden waargenomen in de periode 1901 en de gemodelleerde waarden voor de periode 1901-2000 geeft voornamelijk voor het hoge-impact klimaatscenario (het 95^e percentiel van de 30 beschouwde klimaatscenario's) en voor de kortere-termijn indices (SPI-1 en SPI-3) substantiële verhogingen van het voorkomen, de duur en de magnitude van droogtes worden waargenomen. Voor het midden-scenario wordt slechts een beperkte toename van de frequentie, duur en magnitude van de SPI waargenomen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de relatief grote variabiliteit in de verwachte neerslagverandering voor de zomermaanden in Vlaanderen in de verschillende klimaatmodellen. De meerderheid van de modellen wijst op een afname van de neerslag in de zomermaanden, met een substantiële afname tot -52% voor het hoge impactscenario (Brouwers et al., 2015). Voor de

langere-termijn indices (SPI-6 en SPI-12) wordt eerder een status quo waargenomen. Deze status quo is vermoedelijk te wijten aan de langere accumulatieperiode voor deze indicatoren die ook delen van de voorbije winter (SPI-6) en zelfs zomer (SPI-12) in rekening brengt. Dit wijst erop dat de verwachte toename van de winterneerslag tegen 2100 deels de effecten van een verminderende zomerneerslag kan compenseren voor wat betreft de langere-termijnaspecten van het watersysteem (b.v. grondwater).

Standardized Precipitation Evaporation Index

De SPI houdt echter enkel rekening met de neerslaghoeveelheden en om ook het effect van de toename in evapotranspiratie door klimaatverandering te begroten werd een analyse uitgevoerd van de Standardized Evapotranspiration Index (SPEI). Deze analyse en vergelijking met de resultaten voor de SPI toont aan dat een belangrijk aandeel van de impact van klimaatverandering op de frequentie, de duur en de magnitude van droogtes tegen het jaar 2100 te wijten zal zijn aan zowel veranderingen in evapotranspiratie als veranderingen in de neerslag. Voor de SPEI wordt tegen 2100 een duidelijke verhoging van de duur, frequentie en magnitude verwacht in het midden-impact klimaat-scenario (50^e percentiel van de 30 beschouwde klimaatscenario's) en een sterke verhoging in het hoge-impact klimaatscenario. Bovendien toont de SPEI, in tegenstelling tot de SPI, tegen 2100 ook voor de langere accumulatieperioden van 6 maanden (SPEI-6) en 12 maanden (SPEI-12) duidelijke verhogingen van de frequentie, duur en magnitude van zeer droge en extreem droge periodes. Dit wijst erop dat wanneer naast neerslag ook het effect van evapotranspiratie, waarvoor een verhoging gedurende het hele jaar verwacht wordt, meegerekend wordt in het effect van klimaatverandering op droogtes, ook op de langere termijn de toegenomen winterneerslag niet meer voldoende is om te compenseren voor de waarschijnlijk afnemende zomerneerslag en toenemende evapotranspiratie.

De droogte van 1976

De hydrologische zomerperiode van 1976 was één van de meest droge in de voorbije 100 jaar en doet zich in het huidige klimaat ongeveer 2 keer per 100 jaar voor (de zomer van 1921 kende een minstens even erge droogte). Het neerslagtekort waargenomen in de zomer van 1976 kan zich tegen 2100 om de 4 à 5 jaar voordoen. Een analyse van de SP(E)I voor de zomer van 1976 en de resultaten van de toekomstscenario's voor 2100 toont dat deze droogte van 1976 ongeveer 2 maal vaker voorkomen in het middenscenario, in het hoge-impactscenario wordt dat al tot 15 maal vaker.

Referenties

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., Others, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300 (9).
- Brouwers, J., Peeters, B., Van Steertegem, M., van Lipzig, N., Wouters, H., Beullens, J., Demuzere, M., Willems, P., De Ridder, K., Maiheu, B., De Troch, R., Termonia, P., Vansteenkiste, T., Craninx, M., Maetens, W., Defloor, W., Cauwenberghs, K., 2015. MIRA Klimaatrapport 2015, over waargenomen en toekomstige klimaatveranderingen. Vlaamse Milieumaatschappij, Aalst, 147 pp.
- 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 pp. pp.
- Gellens-Meulenberghs, F., Gellens, D., 1992. L'évapotranspiration potentielle en Belgique: variabilité spatiale et temporelle. Publications/publicaties série/serie A, No/Nr 130. Institut Royal Météorologique de Belgique - Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, pp. Publications/publicaties série/serie A, No/Nr 130.
- Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., Willems, P., 2017. Quantification of uncertainty in reference evapotranspiration climate change signals in Belgium. *Hydrology Research* 48 (5), 1391–1401.
- McKee, T., Doesken, N., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 17, pp. 179–183.
- Ntegeka, V., Wolfs, V., Willems, P., 2017. Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte. *Sumaqua*, 30 pp.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In: *Proc. R. Soc. Lond. A*. 193, pp. 120–145.
- Sienz, F., Bothe, O., Fraedrich, K., 2012. Monitoring and quantifying future climate projections of dryness and wetness extremes: SPI bias. *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (7), 2143–2157.
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., Stahl, K., 2015. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35 (13), 4027–4040.
- Tabari, H., Taye, M., Willems, P., 2014. Bijsturing van de Vlaamse klimaatscenario's voor hydrologische en hydrodynamische impactanalyse inclusief hydrologische extremen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Afdeling Operationeel Waterbeheer van de Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA. KU Leuven Afdeling Hydraulica, 106 pp.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23 (7), 1696–1718.

