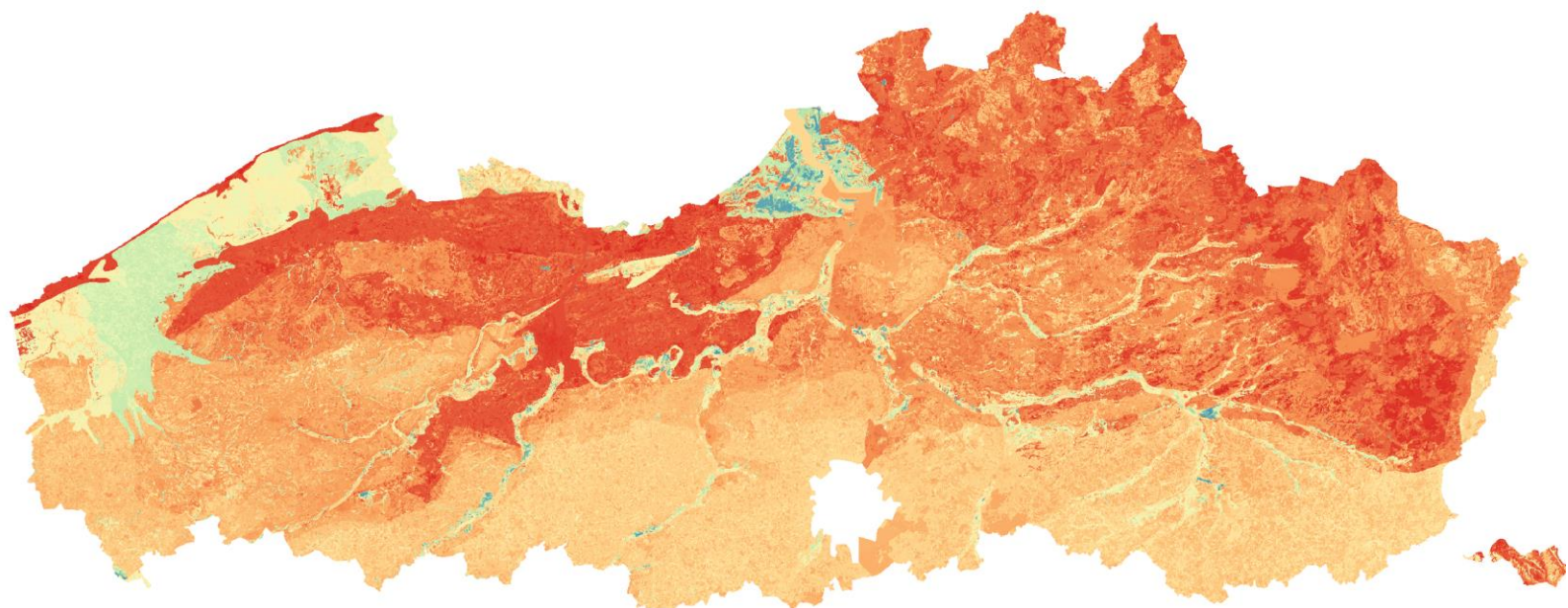


## Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingen

Eindrapport Voorwaardelijk deel - toepassing droogte-instrumentarium op Vlaanderen

Vlaamse Milieu Maatschappij  
Afdeling Operationeel Waterbeheer

**RAPPORT** 26 maart 2021 - versie 2.0



## Colofon

---

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Van Immerseelstraat 66, 2018 Antwerpen, België

Telefoon: + 32 3 270 92 95

Email: [info@imdc.be](mailto:info@imdc.be)

Website: [www.imdc.be](http://www.imdc.be)

## Document Identificatie

Project	Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingen
Titel rapport	Eindrapport Voorwaardelijk deel - toepassing droogte-instrumentarium op Vlaanderen
Opdrachtgever	Vlaamse Milieu Maatschappij - Afdeling Operationeel Waterbeheer
Contactpersoon	Thomas Vansteenkiste, t.vansteenkiste@vmm.be, 02/214.21.43
Datum	26/03/2021
Projectref.	11541
Rapportref.	I/RA/11541/20.074/BPA, RN20004
Besteknummer	L 2017 S 0006 X
Trefwoorden	Droogte, laagwaterdebieten, bodemvocht, PDM, SWAP

Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
Bart Pannemans Senior advisor Els Van Uytven Engineer advisor	Roeland Adams Principal advisor	Roeland Adams Principal advisor

Copyright © IMDC 2021, Alle rechten voorbehouden. Deze publicatie of delen mogen niet worden gekopieerd, gereproduceerd of verzonden in welke vorm of op welke manier dan ook, digitaal of anderszins zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van IMDC. De inhoud van deze publicatie zal door de klant vertrouwelijk worden behandeld, tenzij anders schriftelijk overeengekomen. Verwijzing naar een deel van deze publicatie dat tot verkeerde interpretatie kan leiden, is verboden.

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	02/02/2021	Concept	BPA & EVU	RAD	RAD
2.0	26/03/2021	Revisie	EVU	RAD	RAD

## Inhoudsopgave

---

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	De opdracht	7
1.2	Doel van het rapport	7
1.3	Leeswijzer	7
<b>2</b>	<b>Methodologie uitrol Vlaanderen</b>	<b>8</b>
2.1	Kalibratie van de PDM-modellen voor de bemeten stroomgebieden	9
2.1.1	Modelinput en -opbouw	9
2.1.2	Kalibratiegegevens en droogweerafvoer	10
2.1.3	Parameterranges voor de automatische kalibratie	12
2.1.4	Validatie van de gekalibreerde PDM-modellen	13
2.2	Extrapolatie van de parameters voor bemeten stroomgebieden naar onbemeten stroomgebieden	15
2.3	Opzetten van regionale bekkenmodellen	18
2.4	Langetermijnsimulaties met de bekkenmodellen	19
2.4.1	Meteorologische inputs	19
2.4.2	Verwerken van debietreeksen tot droogtekaarten waterlopen	22
2.4.3	Verwerken van bodemvochtreesen tot droogtekaarten bodem	25
2.5	Opstellen van gebiedsdekkende Vlaamse droogtekaarten	28
2.5.1	Samenstelling tot droogtekaarten Vlaanderen	28
2.5.2	Rekentijd en opslag	29
2.5.3	Nabewerking droogtekaarten Vlaanderen	29
<b>3</b>	<b>Agrarische droogtekaarten Vlaanderen</b>	<b>31</b>
3.1	Agrarische droogtekaarten – huidig klimaat	31
3.1.1	Jaarlijks relatief bodemvochtminimum	31
3.1.2	Jaarlijks aantal droogtedagen	33
3.1.3	Jaarlijkse droogte-intensiteit	39
3.2	Agrarische droogtekaarten – toekomstig klimaat	43
3.2.1	Jaarlijks relatief bodemvochtminimum	43
3.2.2	Jaarlijks aantal droogtedagen	46
3.2.3	Jaarlijkse droogte-intensiteit	50
<b>4</b>	<b>Hydrologische droogtekaarten Vlaanderen</b>	<b>52</b>
4.1	Hydrologische droogtekaarten – huidig klimaat	52
4.1.1	Jaarlijks laagwaterminimum	52
4.1.2	Jaarlijks aantal droogtedagen	53
4.1.3	Jaarlijkse droogte-intensiteit	55
4.2	Hydrologische droogtekaarten – toekomstig klimaat	55
4.2.1	Jaarlijks laagwaterminimum	55
4.2.2	Jaarlijks aantal droogtedagen	56

4.2.3	Jaarlijkse droogte-intensiteit	59
<b>5</b>	<b>Laagwaterpercentielkaarten</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>62</b>
6.1	Conclusies	62
6.2	Aanbevelingen	64
6.2.1	Droogte-instrumentarium en methodologie	64
6.2.2	Validatie droogtekaarten	65
6.2.3	Exploitatie Vlaanderen dekkende modellen	65
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>66</b>

## Bijlagen

<b>Bijlage A</b>	<b>Oplijsting van alle debietmeetstations uit WISKI-databank</b>	<b>68</b>
<b>Bijlage B</b>	<b>Overzicht van de RWZI-stations</b>	<b>74</b>
<b>Bijlage C</b>	<b>Overzicht parameterranges gebruikt voor de automatische kalibratie</b>	<b>79</b>
<b>Bijlage D</b>	<b>Gekalibreerde stroomgebieden als basis voor modellering Vlaanderen</b>	<b>81</b>
<b>Bijlage E</b>	<b>Analyse van de drempelwaarden voor het definiëren van de bodemvocht droogtedagen en droogte-intensiteit</b>	<b>85</b>
E.1	Een vaste drempelwaarde	86
E.2	Een variabele drempelwaarde	88
E.2.1	Droogte-indicator SWAP	88
E.2.2	Vlaams Reactief Afwegingskader	88
E.2.3	GEOPEARL gebaseerde drempelwaarden ifv gewas en bodem (methode 'by texture and crop')	89

## Lijst van Tabellen

Tabel 2-1 :	De p-waarden in functie van het droogteniveau voor verschillende gewassen (VRAG project: VMM et al., 2021)	27
Tabel 3-1 :	Overzicht aan bodemvochtminima over Vlaanderen voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	43
Tabel 3-2 :	Overzicht van het aantal (bodemvocht) droogtedagen over Vlaanderen voor huidig klimaat, 2050 en 2100.	46
Tabel 3-3 :	Overzicht aan (bodemvocht) droogte-intensiteit over Vlaanderen voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	50
Tabel 4-1 :	Overzicht van het aantal (debiet) droogtedagen in de Vlaamse waterlopen voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	57

## Lijst van Figuren

Figuur 2-1:	Droogweerafvoerkaart voor de provincie Limburg.	11
Figuur 2-2:	Invloed van de droogweerafvoer op de vergelijking tussen de geobserveerde (gemeten) en gesimuleerde 90-percentieldebieten.	12
Figuur 2-3 :	Modelvalidatie voor de modelsimulaties ter hoogte van de limnigrafen a) 01L09_14A Tielt/Grote_Motte, b) 01LS06_347 Etikhove/Molenbeek en c) 01L02_423 Loppem/Kerkebeek.	14
Figuur 2-4 :	Aanduiding van de stroomgebieden met parametersets.	15

Figuur 2-5 : Ruimtelijke verdeling van de verschillende parametersets over Vlaanderen.	17
Figuur 2-6 : Ruimtelijke verdeling van de verschillende parametersets over Vlaanderen na verdere regionalisatie	17
Figuur 2-7: De 17 Vlaamse rivierbekkens.	19
Figuur 2-8 : Ruimtelijke variatie in de jaarlijkse gemiddelde neerslaghoeveelheden (bron: KMI Klimaatatlas).	20
Figuur 2-9 : Cumulatieve neerslaghoeveelheden (mm) over de periode 01/06/2012 tot 01/06/2020 voor de VMM neerslagstations in West-Vlaanderen en enkele stations in Oost-Vlaanderen.	21
Figuur 2-10: Overgang van de meteorologisch tijdreeksen voor Veurne in de Westhoek (100%) naar de meteorologische tijdreeksen voor Ukkel in het binnenland. (0%). In de rode zone wordt een gewogen gemiddelde van beide tijdreeksen toegepast.	22
Figuur 2-11: Selectie van de laagwaterminima in een debiettijdreeks.	23
Figuur 2-12 : De droogte-intensiteit wordt aangeduid als het volume (V1, V2, V3, etc.) onder het P95-debiet (drempel).	24
Figuur 2-13: Relatief bodemvocht drempelwaarden voor agrarische droogte-events.	27
Figuur 2-14 : Debiet droogtekaarten voor en na toepassing van riviermask: links: oorspronkelijk resultaat; midden: na wegfilteren kleine waterlopen; rechts: na toepassing mask 'bevaarbare waterlopen'.	30
Figuur 3-1 : Relatieve bodemvochtminima voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.	32
Figuur 3-2 : Bodemkaart Vlaanderen.	33
Figuur 3-3 : Duur van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.	35
Figuur 3-4 : Bosareaal in Vlaanderen (bron: Digitale Boswijzer 2015).	36
Figuur 3-5: De relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode per landgebruik.	37
Figuur 3-6 : De relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode per textuur.	38
Figuur 3-7 : Intensiteit van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.	41
Figuur 3-8 : Dagelijkse intensiteit van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.	42
Figuur 3-9 : Minima aan relatieve bodemvochtgehaltenes voor een terugkeerperiode van 50 jaar voor huidig klimaat, 2050 en 2100.	45
Figuur 3-10 : Jaarlijks aantal droogtedagen voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat en condities 2050 en 2100.	48
Figuur 3-11: Jaarlijks aantal droogtedagen en de droogte-intensiteit voor extreem zomerevent in het huidig klimaat en het overeenkomstig event in het toekomstig klimaat voor droogteID 1336000009061 (gras/lemig zand), met p-waarde 0.71.	49
Figuur 3-12 : Jaarlijks droogte-intensiteit voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	51
Figuur 4-1 : Laagwaterdebieten voor een terugkeerperiode van 10 jaar.	52
Figuur 4-2 : Duur van hydrologische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.	54
Figuur 4-3 : Intensiteit van hydrologische droogte-events voor een terugkeerperiode van 10 jaar.	55
Figuur 4-4: Laagwaterminima voor de Velpe voor a) terugkeerperiode van 10 jaar, en b) terugkeerperiode van 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	56
Figuur 4-5: Jaarlijks droogtedagen in de waterlopen voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat en condities 2050 en 2100.	58
Figuur 4-6 : Droogte-intensiteit voor de Velpe voor een terugkeerperiode van a) 10 jaar en b) 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.	60

# 1 Inleiding

## 1.1 De opdracht

De voorbije jaren heeft Vlaanderen enkele droge zomers meegemaakt, waarvan de ernst en impact momenteel moeilijk te begroten is. Om het beleid rond droogte en waterschaarste te ondersteunen, wenst de VMM een droogte-instrumentarium en methodologie te ontwikkelen dat ingezet kan worden voor de kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen (bestek L2017 S 0006 X). Het voorgenomen project bestaat uit een vast en voorwaarde gedeelte. In het vaste gedeelte werd op zoek gegaan naar een goede methodiek en geschikte modelconcepten om droogte-events te kunnen kwantificeren en karteren, en dit door ze toe te passen op zes pilootgebieden (IMDC, 2019). Het voorwaardelijk gedeelte bestaat erin dat meest geschikte model toe te passen en de droogtekartering verder uit te breiden naar Vlaanderen. Het eindproduct is een set van gebiedsdekkende kaarten die de droogtetoestand in Vlaanderen weergeven, en dit zowel op basis van het relatief bodemvocht als op basis van de (laagwater)debiëten op de waterlopen.

Voorliggende tekst maakt deel uit van het eindrapport 'Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingen – voorwaardelijk deel'. Het project werd gegund aan IMDC, i.s.m. KULeuven, Sumaqua en Alterra/Wageningen, en liep van juni 2019 tem februari 2021.

## 1.2 Doel van het rapport

Dit rapport betreft het voorwaardelijk gedeelte van de studie. Het vat de stappen samen nodig voor het uitrollen van de methodologie voor de pilootgebieden naar geheel Vlaanderen en stelt de Vlaamse droogtekaarten voor.

## 1.3 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport is als volgt:

De verschillende stappen voor het opstellen van Vlaamse droogtekaarten worden toegelicht in §2. Hierbij wordt vooral gefocust op de methodologische aanvullingen op de pilootstudie (IMDC, 2019) en de uitrol naar Vlaamse schaal. Voor meer info met betrekking tot de technische implementatie van de methodologie (onder andere de scripts, mappen en bestanden) wordt verwezen naar de handleiding horende bij dit eindrapport (IMDC, 2021).

De droogtekaarten worden gepresenteerd en besproken in §3 voor wat de agrarische droogte betreft, en in §4 en §5 voor wat de hydrologische droogte in de waterlopen betreft.

De conclusies en aanbevelingen zijn aanwezig in §6.

Overige analyses en/of detailinformatie voor het opstellen van de droogtekaarten zijn opgenomen als bijlages van dit rapport.

## 2 Methodologie uitrol Vlaanderen

Het modelinstrumentarium en de methodologie voor de droogtekwantificering en -kartering werd uitvoerig besproken in het eindrapport van het vast gedeelte van deze studie (IMDC, 2019). Het werd er toegepast op zes pilootgebieden. Voor de uitrol van het modelinstrument en de methodologie op schaal Vlaanderen waren echter nog enkele extra implementatiestappen noodzakelijk. Deze extra stappen hebben onder andere betrekking op het ruimtelijke karakter van de modellen en de kaarten. De modellen en kaarten dienen op schaal Vlaanderen te worden berekend. Dit betekent dat er modellen moeten worden opgesteld voor zones waar amper informatie voorhanden is. Bovendien brengt het de nodige rekentechnische uitdagingen met zich mee om de berekening op schaal Vlaanderen uit te voeren. Daarnaast werden nog aspecten onderzocht die de modelkalibraties en eindresultaten ten goede komen. Het gaat hier bijvoorbeeld om het in rekening brengen van externe afvoeren (effluënten van rioolwaterzuiveringsinstallaties), het gebruik van een hydrologisch gecorrigeerd digitaal terreinmodel als modelinput en het onderzoek naar optimale droogtedrempels. Deze worden verder in het rapport besproken.

Het opstellen van de Vlaamse droogtekaarten kan worden samengevat in volgende stappen:

- **Kalibreren van de PDM-modellen voor alle bemeten stroomgebieden.** Voor de kalibratie van de PDM-modellen worden lokale meteorologische meetreeksen en statische inputs gebruikt (§2.1.1). Indien van toepassing, dan worden de geobserveerde debietreeksen gecorrigeerd met de gerapporteerde droogweerafvoeren (§2.1.2). Met voorgaande inputs worden de PDM-modellen automatisch gekalibreerd (§2.1.3). Op die manier worden voor de bemeten stroomgebieden over Vlaanderen optimale parametersets gedefinieerd. Die parametersets worden nadien gevalideerd via meerdere criteria (§2.1.4).
- **Samenvoegen en extrapolatie van de parametersets** voor de bemeten stroomgebieden tot parameterkaarten voor geheel Vlaanderen (§2.2).
- **Opzetten van regionale bekkenmodellen, iFramework/PDM en SWAP** (§2.3)
- **Uitvoeren en verwerken van de langetermijnsimulaties** voor het huidig klimaat en voor de toekomsthorizonten 2050 en 2100. Het uitvoeren van de langetermijnsimulaties gebeurt met 50-jaar lange meteorologische inputs voor Ukkel (§2.4.1). De output van de lange termijnsimulaties zijn 50-jaar lange debiet- en bodemvochtijdreeksen. Op basis van die tijdreeksen worden de empirische terugkeerperiodes, het aantal droogtedagen en de droogte-intensiteit berekend voor debieten in de waterloop (§2.4.2) en de vochtgehalten in de bodem (§2.4.3).
- **Combineren van de resultaten van de verschillende bekkens tot gebiedsdekkende droogtekaarten voor Vlaanderen** (§2.5)



## 2.1 Kalibratie van de PDM-modellen voor de bemeten stroomgebieden

### 2.1.1 Modelinput en -opbouw

Voor 184 limnigrafen wordt getracht een PDM-model op te zetten. Een overzicht van die 184 limnigrafen, hun nummer, naam en locatie is beschikbaar in Bijlage A. De lijst aan limnigrafen is samengesteld na een automatisch export uit het Waterinformatiesysteem (WISKI-databank) van de Vlaamse Milieumaatschappij via Kiwis-calls. Binnen de opdracht werd er maximaal ingezet op scripting en het automatiseren van modelopbouw, kalibratie, kaartgeneratie, verwerven van data en modelinput. Het in bulk exporteren van data heeft als voordeel dat alle beschikbare informatie wordt verzameld, maar heeft als nadeel dat geen controle wordt uitgevoerd naar de geschiktheid van de limnigrafen en de (laagwater)metingen voor de kalibratie van de modellen. Er zijn dus een groot aantal locaties niet geschikt om een model aan af te ijken. Tijdens het kalibratieproces zullen enkel de geschikte stations en hun reeksen worden weerhouden. Het draagt de voorkeur om verder te werken met een kleinere set aan goede data, dan een grotere set aan onzekere data.

De modelkalibratie gebeurt standaard met meteorologische inputs voor het dichtstbijzijnde neerslag- en potentiële evapotranspiratie station en dat voor de periode 1 oktober 2012 - 30 april 2019. Indien het dichtstbijzijnde station geen geschikte data heeft, dan wordt een nabijgelegen station of een andere periode gekozen. De statische inputs omvatten informatie met betrekking tot het digitaal terreinmodel (DTM), het bodemtype, het landgebruik, de verharding en de grondwaterdiepte, en worden bepaald voor het stroomgebied opwaarts van de limnigraaf. De gebruikte info voor de invulling van deze statische input kan worden nagelezen in IMDC (2019). Elk van deze databronnen wordt via scripting en dus op een automatische manier per stroomgebied voorbereid. Hierdoor kan op relatief korte termijn een groot aantal modellen voor de limnigrafen over Vlaanderen worden opgesteld.

De stroomgebieden opwaarts de limnigrafen worden afgebakend in de 'Flanders Hydrological Model' ('FHM') python omgeving (Vansteenkiste et al., 2016), op basis van een hydrologisch gecorrigeerd DTM<sup>1</sup> (Agentschap Informatie Vlaanderen, 2020) en de locaties van de limnigrafen. Een hydrologisch gecorrigeerd DTM, ook HydroDTM genaamd, kan beschreven worden als een DTM waarvan de berekende stroomrichtingen overeenkomen met de verwachte afwatering in het gebied. Om dit te bereiken worden er wijzigingen aangebracht aan de relatieve hoogtewaarden, zodat de juiste stroomrichting uit het geconditioneerde DTM kan afgeleid worden. Concreet werden in het hydrologisch gecorrigeerd DTM de VHA-waterlopen ingebrand - verlaagd t.o.v. de oorspronkelijke waarde – in het oorspronkelijke DTM. Enkel de relevante waterlopen werden ingebrand: artificiële waterlopen die niet bijdragen aan de natuurlijke afstroming, zijn niet opgenomen in het HydroDTM (bv. Kempense kanalen, polderkanalen, etc.). Het gebruik van het HydroDTM resulteert bijgevolg in een afstromingskaart ('local drainage direction' raster of 'ldd') die beter aansluit bij het werkelijk waterloppennetwerk. Het HydroDTM laat ook toe om de afwateringsgebieden opwaarts van punten nauwkeuriger in te schatten. Binnen de modelleringen wordt, zoals boven reeds gemeld, dit ook gehanteerd om de afstroomgebieden en -oppervlakte opwaarts van limnigrafen te bepalen. Een vergelijking met de stroomgebiedsoppervlaktes gerapporteerd op Waterinfo toont een goede overeenkomst tussen beiden. Echter in bepaalde gevallen kan het ook voorkomen dat de berekening van de stroomgebieden opwaarts van limnigrafen niet correct verloopt. Dit kan enerzijds veroorzaakt worden door de 100x100m resolutie van het HydroDTM.

---

<sup>1</sup> HydroDTM, versie 2, aangeleverd door VMM dd. 23/01/2019, resolutie 100x100m

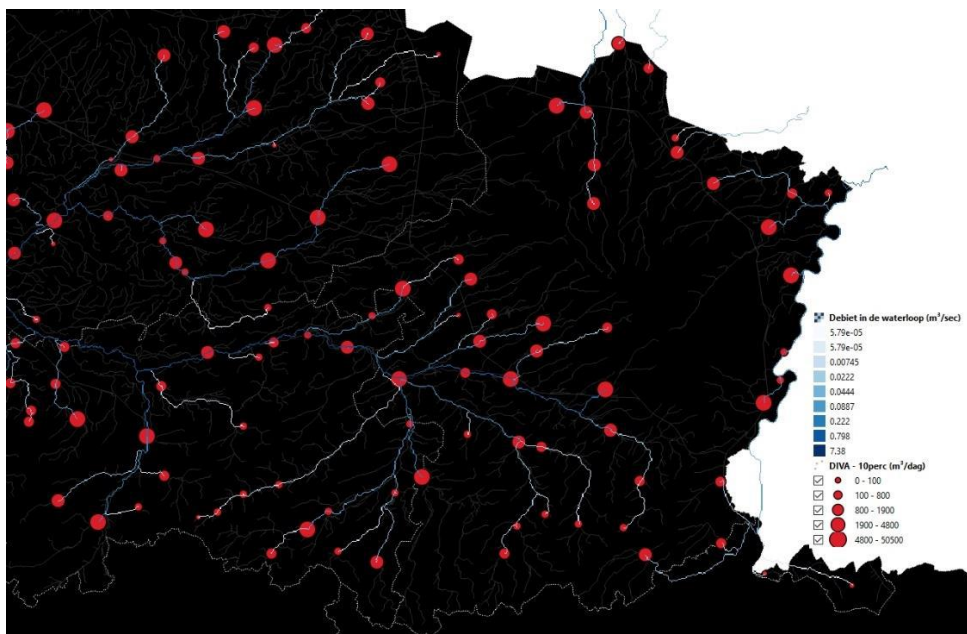
Als er foutieve afstromingspaden worden vastgesteld door de opschaling van het DTM, dan werden deze manueel aangepast in het DTM en het overeenkomstig Idd. Anderzijds wordt ook vaak een oorzaak gevonden in de gerapporteerde coördinaten van de limnigrafen. Vaak worden de coördinaten van het meettoetsel meegegeven en niet die van het meetpunt in de waterloop. Hierdoor komt de limnigraaf niet op een afwateringspunt te liggen en wordt zijn opwaartse afwateringsoppervlakte verkeerd ingeschat. Om dit te verhelpen worden manuele correcties doorgevoerd aan de coördinaten van de limnigrafen. Desalniettemin, is het HydroDTM als input voor de modelleringen een meerwaarde en een noodzakelijk dataset voor het opstellen van gebiedsdekkende modellen en kaarten. Het is een uitbreiding op de methodologie uit het vast gedeelte (IMDC, 2019).

### 2.1.2 Kalibratiegegevens en droogweerafvoer

Voor elk van de limnigrafen zal een PDM-model worden opgesteld. Deze modellen zullen worden afgeijkt aan de debietijdreeksen opgemeten door de limnigraaf, met specifieke aandacht voor de laagwatercondities. Men dient dus over goede tijdreeksen en informatie te beschikken van laagwaterafvoeren. De laagwaterafvoeren bestaan vaak niet enkel uit de natuurlijke aanvoer vanuit het grondwater, maar omvatten ook vaak toevoeren van externe bronnen. Zo zijn er in Vlaanderen zijn heel wat rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) actief. Ook in periodes van droogte en zonder neerslag lozen die RWZI's een debiet. Dat debiet is de droogweerafvoer en is afkomstig van huishoudens en industrie. Binnen de modellering zal rekening worden gehouden met deze aanvoer van de RWZI's. Om deze in te schatten wordt gebruik gemaakt van de effluentmetingen van de RWZI's van de VMM (de DIVA gegevens). Er wordt gerekend met een percentielwaarde van deze effluentmetingen. Een dergelijke percentielwaarde geeft aan hoeveel procent van de tijd het overeenkomstig of een hoger debiet geregistreerd werd. Binnen de studie wordt de 90-percentielwaarde gebruikt als beste inschatting van de droogweerafvoer van de RWZI. Deze extreme percentielwaarde werd gekozen, omdat de modelleringen focussen op de meest droge situaties, waarbij er geen bijdrage is van regenwaterafvoer en er geen drainage meer zal zijn door lekkende rioleringsleidingen.

Die toevoeren zijn vaak zeer laag, maar voor de grootste RWZI's kunnen de debieten oplopen tot 0.3 m<sup>3</sup>/s en zelfs tot 0.5 m<sup>3</sup>/s. Voor kleinere waterlopen kan een dergelijke externe toevoer een aanzienlijk aandeel van het totale zomerdebiet vertegenwoordigen. Het is dus belangrijk deze externe aanvoeren expliciet mee op te nemen in de modelleringen om zo nauwkeurig mogelijk de laagwatercondities te kunnen inschatten. Zowel bij de kalibratie van de modellen als voor het opstellen van de laagwaterdroogtekaarten wordt rekening gehouden met de droogweerafvoer. Deze stap is eveneens een methodologische aanvulling ten opzichte van de pilootstudie (IMDC, 2019).

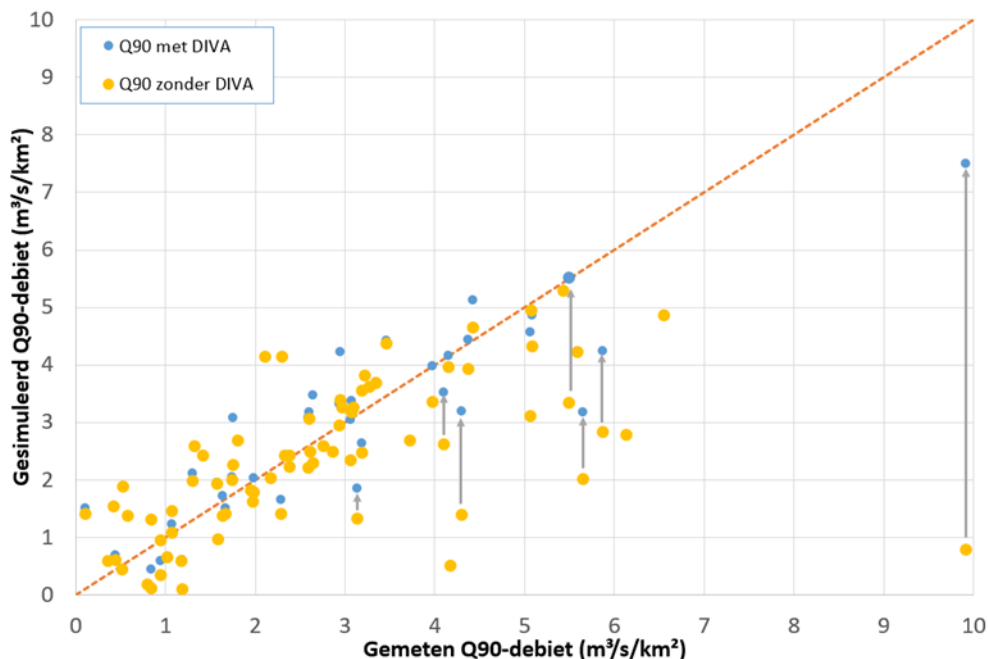
Om hieraan invulling te geven, werd een kaart voor Vlaanderen aangemaakt die voor elk riviersegment de cumulatieve debieten van opwaartse RWZI's weergeeft. Hiertoe werd de afstromingskaart (het Idd uit het HydroDTM) gebruikt om de droogweerafvoer te cumuleren. In Figuur 2-1 wordt een extract van deze droogweerafvoer-kaart weergegeven ter hoogte van de provincie Limburg. De kaart is opgebouwd op basis van de 90-percentieldebieten ter hoogte van de RWZI's en de locaties van bijhorende lozingspunten. Er werd bij het opstellen van de kaart rekening gehouden met in totaal 296 RWZI's en lozingspunten (Bijlage B). De lozingspunten situeren zich steeds op een waterloop. Waar RWZI's lozingspunten hebben op meerdere riviersegmenten, werd het debiet evenredig verdeeld.



Figuur 2-1: Droogweerafvoerkaart voor de provincie Limburg.

Bij het voorbereiden van de modelinput wordt ten opzichte van het vast gedeelte (IMDC, 2019) als bijkomende stap gecontroleerd of er een bijdrage is vanuit de RWZI's ter hoogte van de limnigrafen. Wanneer dit het geval is, worden de debietrijdsreeksen gecorrigeerd met de droogweerafvoer zodat de natuurlijke afstromende debieten overblijven. De natuurlijke afstromende debieten worden vervolgens gebruikt als basisreeks in de kalibratie.

Onderstaande Figuur 2-1 illustreert een modelkalibratie aan een debietrijdsreeks, wel en niet gecorrigeerd met de droogweerafvoer. De figuur toont de gesimuleerde en geobserveerde 90-percentieldebieten na normalisatie van de debieten. Er wordt een opmerkelijk betere overeenkomst verkregen na het inrekening brengen van de droogweerafvoer van RWZI's. Zonder die droogweerafvoer onderschatten de gesimuleerde 90-percentieldebieten in sterke mate de geobserveerde 90-percentieldebieten. Dit toont het belang aan van het in rekening brengen van deze droogweerafvoer bij laagwatermodelleringen.



Figuur 2-2: Invloed van de droogweerafvoer op de vergelijking tussen de geobserveerde (gemeten) en gesimuleerde 90-percentieldebieten.

### 2.1.3 Parameterranges voor de automatische kalibratie

De automatische kalibratieprocedure maakt gebruik van het SCE-UA algoritme (Duan et al., 1993, 1994), waarbij de Nash-Sutcliffe coëfficiënt voor laagwaterafvoeren ('Nash-Sutcliffe for Low Flows' of 'NS-LF') als objectiefunctie werd gehanteerd. De kalibratie focust op de periode 1 oktober 2012 - 30 april 2019. Na het doorlopen van de kalibratieproces voor deze periode wordt de optimale parameterset weggeschreven en vervolgens ruimtelijk gedisaggregeerd volgens de concepten beschreven in IMDC (2015) en Tran et al. (2015, 2018). Ook bijkomende parameters, zoals de schaalfactoren om van lumped naar ruimtelijk verdeelde modellen over te gaan en de routingparameters worden geregistreerd. Een dergelijke disaggregatie laat toe om op een ruimtelijk verdeelde wijze neerslag-afvoerdebieten te simuleren en inzicht te krijgen in de debieten van het stroomgebied.

De automatische kalibratieprocedure werd meermaals uitgevoerd met verschillende parameterranges. Een iteratie op de parameterranges was nodig omdat de nadruk bij de modelkalibratie in het verleden vaak lag op piekafvoeren. Gerapporteerde parameterranges voor Vlaanderen (o.a. Cabus, 2008) bleken niet optimaal voor het simuleren van lage afvoeren. Ook de tijdstap speelt hierin een rol. Waar voor droogte- en laagwatertoepassingen een dagelijks modelstap volstaat, is bij hoogwatertoepassingen een hogere resolutie tijdstap gewenst (uurlijks of zelfs kleiner). Door het herhalen van de kalibratieprocedure en het telkens bijstellen van de parameterranges, kon finaal een goed resultaat worden bekomen. De gehanteerde parametersranges zijn terug te vinden in Bijlage C.

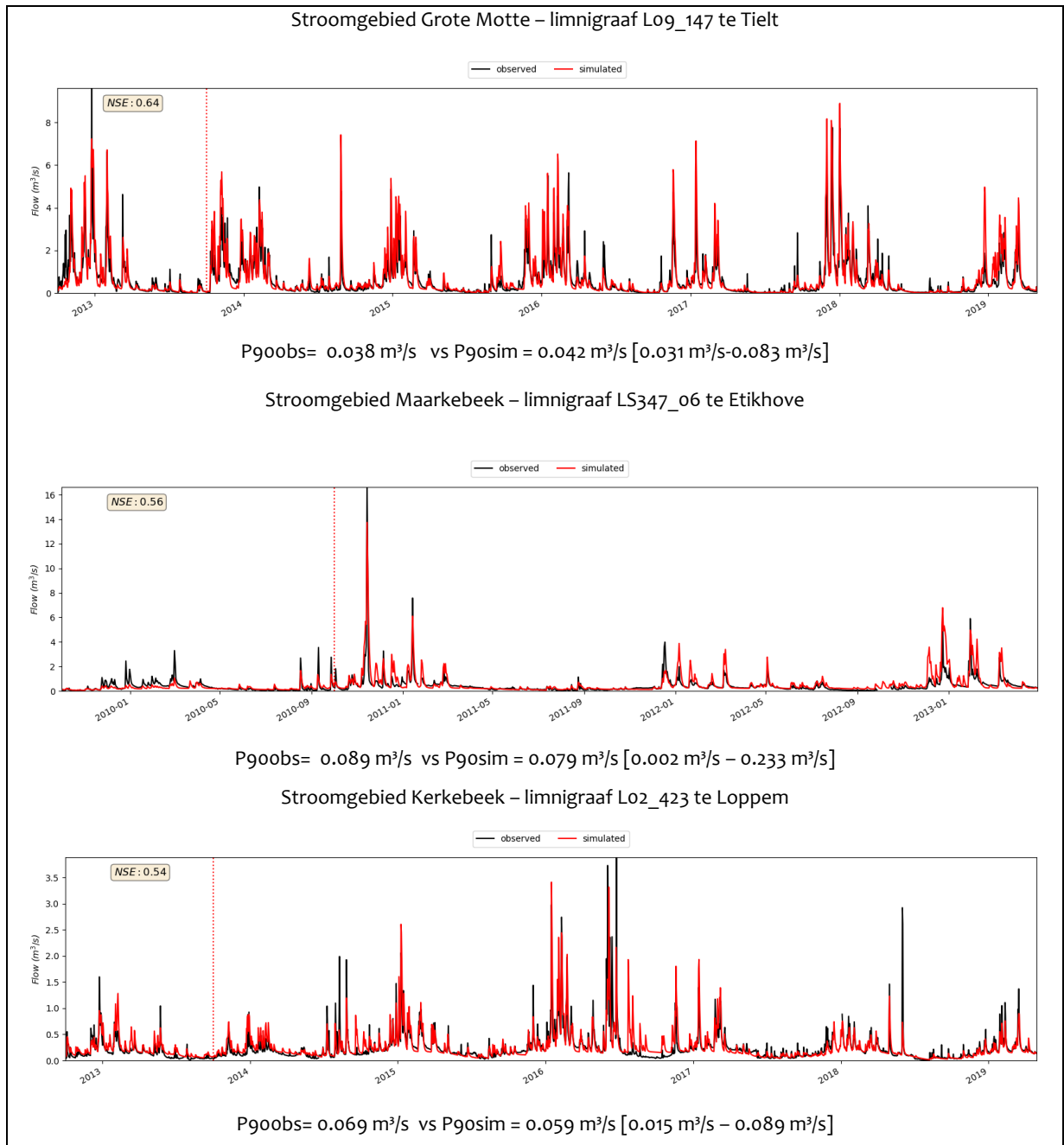
#### 2.1.4 Validatie van de gekalibreerde PDM-modellen

De modellen worden gekalibreerd op basis van NS-LFE, maar de evaluatie van het model en de kalibratie ervan gaan nog een stap verder. Zo worden ook de hydrogrammen bekeken en wordt een vergelijking gemaakt tussen de geobserveerde en gesimuleerde 90-percentieldebieten (P90-debieten). De geobserveerde P90-debieten zijn beschikbaar op Waterinfo. Figuur 2-3 illustreert de validatie voor drie stroomgebieden, verspreid over Vlaanderen. Voor de vergelijking tussen de P90-debieten wordt voor de metingen het meerjarige P90-debiet beschouwd als basis, maar wordt eveneens de range aan jaarlijks P90-debieten meegegeven. Als de P90-modeldebiet buiten deze range valt, is het model niet goed gekalibreerd en zal een nieuwe poging ondernomen worden.

Na de validatie worden er 93 limnigrafen, en de daarbijhorende stroomgebieden, weerhouden voor verder gebruik en opschaling naar schaal Vlaanderen. Deze stroomgebieden worden gespecificeerd in Bijlage D. Een groot aantal limnigrafen viel af en bleek niet geschikt om een model aan te kalibreren. De redenen waren zeer divers. Het betreffen:

- historische stations die niet langer bemeten worden en geen recente data meer hebben.
- stations die meten op waterlopen met hevige plantengroei in de zomer. Die plantengroei kan de laagwatermetingen sterk verstoren, waardoor geen goede tijdreeksen beschikbaar zijn voor modelkalibratie.
- stations nabij of ter hoogte van kunstwerken, die de watertafvoer sturen, en dat terwijl het model enkel in staat is om natuurlijke afstroming na te bootsen.
- stations, die door een gebrekkige werking of slechte afijking, onvolledige of onvoldoende kwaliteitsvolle debietreeksen registreren.

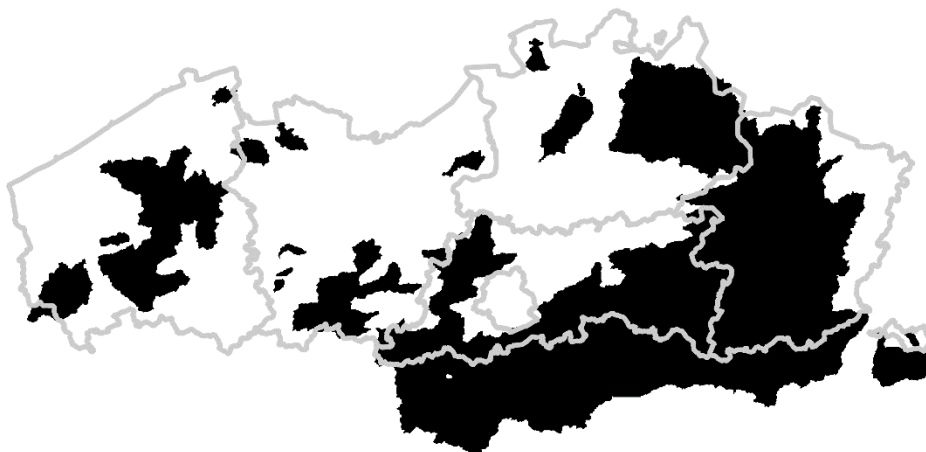
In bepaalde gevallen was het niet mogelijk door de limitaties van het HydroDTM om een correct afwateringsgebied af te bakenen opwaarts een limnigraaf. In dergelijke gevallen kon mogelijks wel nog een model afgeijkt worden, maar kon geen ruimtelijk verdeeld model opgebouwd worden en/of konden geen opwaartse stroomgebied en afwateringspaden afgelijnd worden. Die limnigrafen werden evenzeer niet geschikt bevonden voor verdere modelleringen, ook al hadden ze goede en betrouwbare laagwatermetingen.



Figuur 2-3 : Modelvalidatie voor de modelsimulaties ter hoogte van de limnigrafen a) o1Lo9\_14A Tielt/Grote\_Motte, b) o1LS06\_347 Etikhove/Molenbeek en c) o1Lo2\_423 Loppem/Kerkebeek.

## 2.2 Extrapolatie van de parameters voor bemeten stroomgebieden naar onbemeten stroomgebieden

Voor 93 stroomgebieden werden dus goede modelparameters gevonden. Voor die stroomgebieden konden de lage afvoeren dus goed benaderd worden. Figuur 2-4 geeft een ruimtelijk overzicht van deze stroomgebieden. Het valt meteen op dat er een grote ruimtelijke spreiding is over Vlaanderen en dat bepaalde regio's in Vlaanderen sterker bemeten zijn. Die regio's zijn bijgevolg ook nauwkeuriger en eenvoudiger te modelleren. Zo is er bijvoorbeeld veel debietsinformatie beschikbaar in het oosten en zuidoosten van Vlaanderen. Hieronder vallen het Demer- en Netebekken. Ook in het centrum van Vlaanderen konden de nodige modellen worden opgesteld. Het betreffen hier stroomgebieden binnen het Bovenschelde-, Dijle- en Zennebekken. Een laatste cluster zien we in het midden van West-Vlaanderen. Veel minder informatie was voorhanden in de poldergebieden, maar ook in de regio's rond Gent en Antwerpen. Voor de poldergebieden heeft dit te maken met het beperkte aanbod aan limnigrafen. De watertransfers in de polderwaterlopen worden sterk gestuurd in functie van de streefpeilen. Metingen focussen voornamelijk op peilen in functie van de vaak specifieke doelstellingen - landbouw en natuur - in het poldergebied, en de kennis van de afvoeren is minder uitgebreid. Een dergelijke sturing en regeling van de polderwaterlopen bemoeilijkt ook de toepassing van de neerslag-afvoermodellen, welke gericht zijn op het modelleren van natuurlijke afstroming. Voor de regio's rond de steden Antwerpen en Gent is de oorzaak van het gebrek aan modellen te vinden in het type waterlopen die deze regio's doorkruisen. Ter hoogte van Gent zijn de bevaarbare Leie en Bovenschelde aanwezig. Hun aanvoer wordt rond Gent kunstmatig verdeeld richting Oostende (Kanaal Gent-Oostende), Heist (Afleidingskanaal van de Leie), Terneuzen (Kanaal Gent-Terneuzen) en Antwerpen (Zeeschelde). Enerzijds de omvang van de waterlopen en anderzijds de sterke sturing maken het niet mogelijk om hydrologische modellen hiervoor op te stellen. Hiertoe zijn andere type modellen – waterbalansmodellen – beter geschikt, maar dat ligt buiten scope deze opdracht. Hetzelfde kan gezegd worden voor regio rond Antwerpen, waar meerdere grotere waterlopen samenkomen, en verder afvoeren richting zee. Er is de Rupel, dat debiet ontvangt vanuit het Nete-, Demer- en Dijle en Zennebekken, en Beneden-Schelde, die vanuit het oosten komt.



Figuur 2-4 : Aanduiding van de stroomgebieden met parametersets.

De informatie uit de gekalibreerde modellen zal in een volgende stap opgeschaald moeten worden naar Vlaanderen om gebiedsdekkende modellen te kunnen opbouwen en zo Vlaamse gebiedsdekkende kaarten te kunnen opstellen. Met andere woorden, de informatie uit deze modellen zal geëxtrapoleerd worden naar de zones waar geen modellen opgesteld konden worden. Dat zijn (vaak) niet-bemeten stroomgebieden, wat eveneens inhoudt dat de extrapolatie moeilijk verifieerbaar is. De wijze waarop de extrapolatie zal gebeuren dient nauwkeurig overwogen en bestudeerd te worden.

Er wordt geopteerd om de parameters van de gekalibreerde modellen te regionaliseren. De parameters worden hierbij uitgewisseld tussen stroomgebieden op basis van gemeenschappelijke gebiedseigenschappen en nabijheid. Op dergelijke manier worden regio's met gelijkaardige gebiedseigenschappen gekenmerkt door eenzelfde parameterisatie. De extrapolatie veronderstelt dat voor de simulatie van laagwaterafvoeren in nabijgelegen stroomgebieden met eenzelfde kenmerken een gelijkaardige parameterset gebruikt kan worden en dat dit niet resulteert tot grote afwijkingen inzake laagwater. Dergelijke regionalisatietechnieken werden zowel op basis van naburigheid (Reager en Famiglietti, 2009; Parajka et al., 2005; Li en Zhang, 2016) als op basis van gelijkaardige fysische eigenschappen (Samuel et al., 2011; Reichl et al., 2009; Samaniego et al., 2010) al meermaals succesvol toegepast voor hydrologische modellen, maar ook specifiek voor het PDM model (Oudin et al., 2008; Chang et al., 2018). De methode werd ook reeds in het vast gedeelte van de opdracht (IMDC, 2019) getest. Hierbij werden de parameters tussen de stroomgebieden van de Dommel en Warmbeek uitgewisseld en werd de performantie van het laagwatermodel voor beiden gecontroleerd. Beide stroomgebieden waren bemeten zodat de impact van de uitwisseling kon worden gecontroleerd. In geen van de gevallen bleek de performantie sterk te dalen na uitwisseling van de modelparameters.

Omdat het in de praktijk niet steeds eenvoudig was om een keuze te maken tussen welke parameterset nu best wordt getransfereerd naar welke zone, werden nog enkele bijkomende regels in acht genomen. De hiërarchie dient hierbij gerespecteerd te worden:

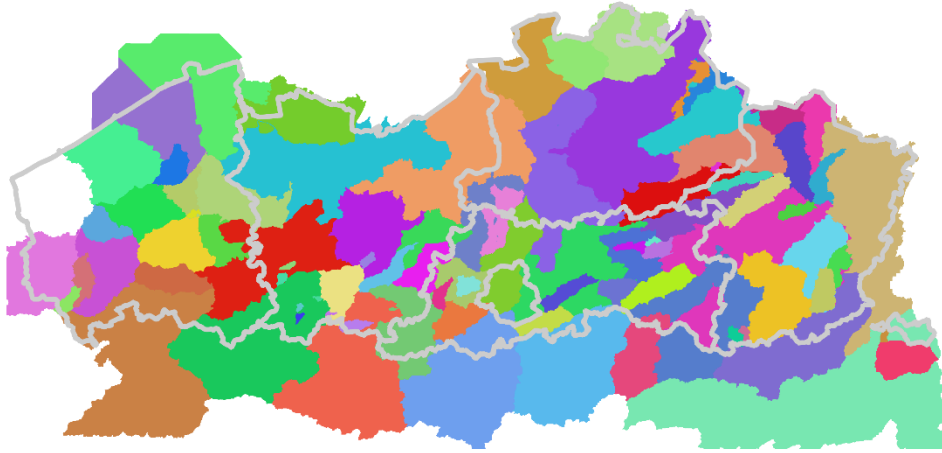
- Bij geneste bekkens krijgt het kleinste bekken steeds voorrang in de overlappende zones.
- Per VHA-zone wordt nagegaan welke parametersets voorkomen in de zone. De parameterset voor het bekken met de grootste oppervlakte binnen de VHA-zone wordt gebruikt om de rest van de VHA-zone te vullen.
- Tenslotte worden parametersets van opwaarts naar afwaarts getransfereerd via het ldd.

De parameters van de 93 modellen werden op deze wijze geëxtrapoleerd tot een gebiedsdekkende parameterkaart voor Vlaanderen. Na het ter beschikking komen van de eerste laagwaterresultaten en berekeningen van de droogte-indicatoren werd de extrapolatie geverifieerd en verder bijgewerkt. Hierbij werd gestreefd naar een verdere regionalisatie zonder daarbij de laagwatermodelperformantie negatief te beïnvloeden.

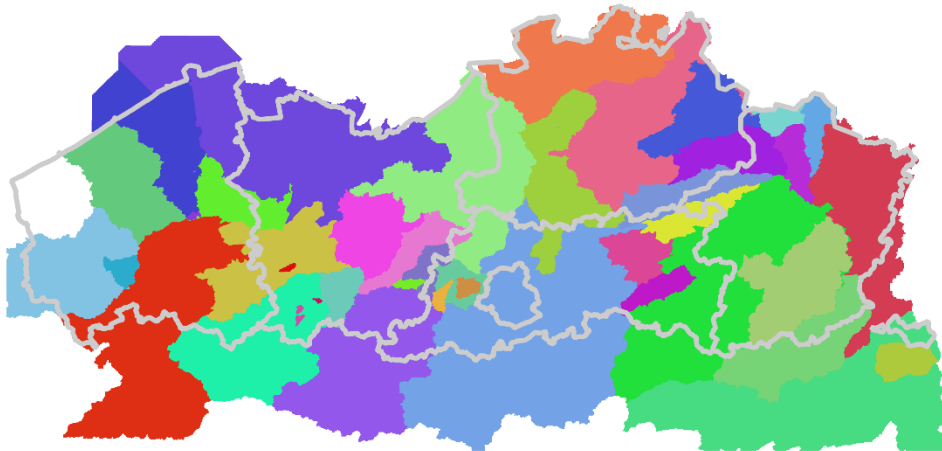
De ruimtelijke verdeling van de parameters zoals verkregen met de extrapolatie wordt aangeduid in Figuur 2-5. In de kaart valt op hoe de zuidelijke band van de Leie- tot Voerstreek relatief kleinere stroomgebieden omvat, hetgeen te verklaren is door het grote aantal limnigrafen en bemeten stroomgebieden in die regio. In het noorden van Vlaanderen zijn er minder kwalitatieve metingen en/of limnigrafen en bemeten stroomgebieden. Als gevolg worden de parameters daar over relatief grotere gebieden toegepast. In Figuur 2-6 wordt de kaart met verdere regionalisatie van de parameters weergegeven. Het aantal parametersets wordt hierbij herleid tot een kleiner aantal, waarbij vooral de kleinere stroomgebieden qua parameters mee opgaan in grotere



zones. De afzonderlijk inschatting van laagwater- en droogte-indicatoren volgens de gedetailleerde parametersets voor deze kleinere stroomgebieden bleek weinig meerwaarde te hebben ten opzichte van een doorgedreven regionalisatie. Er wordt dan ook met deze versie gewerkt om de droogte-indicatoren (zie verder §2.4.2 en 2.4.3) te berekenen.



Figuur 2-5 : Ruimtelijke verdeling van de verschillende parametersets over Vlaanderen.



Figuur 2-6 : Ruimtelijke verdeling van de verschillende parametersets over Vlaanderen na verdere regionalisatie

## 2.3 Opzetten van regionale bekkenmodellen

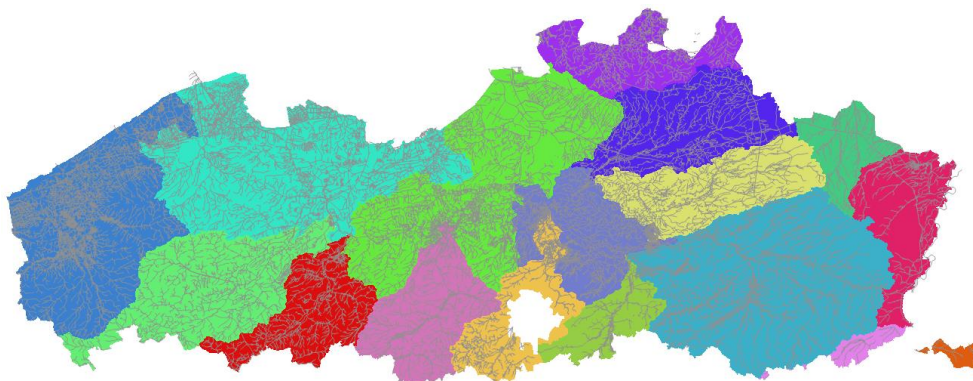
Met de parameterkaarten voor Vlaanderen beschikken we over de nodige modelinput om de simulaties op te starten op schaal Vlaanderen. Het doorrekenen van één model op schaal Vlaanderen, of zelfs voor drie grote stroomgebieden (Ijzer, Schelde en Maas), is niet haalbaar. Enerzijds is het rekentechnisch niet mogelijk. Het doorrekenen van dergelijk grote modellen vereist zeer hoge rekentijden, maar ook het verwerken van de resultatenbestanden stoot op de limieten van de courante computerwerkgeheugens. Anderzijds vereist het doorrekenen van één model op schaal Vlaanderen, of modellen voor grensoverschrijdende stroomgebieden, ook input van buiten Vlaanderen. Zo zouden er grote oppervlaktes van Wallonië, Nederland en Frankrijk moeten opgenomen worden in het model. Voor die gebieden is data moeilijk te verwerven. Het meenemen van die gebieden maakt de modelleringen bovendien nodeloos complex en uitgebreid. Het andere uiterste waarbij Vlaanderen wordt opgedeeld in een groot aantal kleine stroomgebieden, die dan afzonderlijk gemodelleerd worden, is praktisch zeer uitdagend omdat dit een onoverzienbare stroom aan modellen en resultaten met zich meebrengt.

Om Vlaanderen zo efficiënt mogelijk gebiedsdekkend te simuleren werd de bestaande modelcode uit de pilootstudie (IMDC, 2019) aangepast. Er werd gestreefd naar een maximale en hoogste haalbare oppervlakte van modelgebieden, die rekentijden van de modellen binnen aanvaardbare grenzen hielden en bovendien voldoende praktisch waren. De modelcode werd ook verder uitgebreid zodat, niet enkel grotere, maar ook complexere gebieden gemodelleerd konden worden. Complexe gebieden zijn bijvoorbeeld gebieden die bestaan uit meerdere kleinere stroomgebieden, en meerdere uitlaten hebben en dus geen perfect afgelijnd afwateringsgebied omvatten, of gebieden waarbij opwaartse zones ontbreken omdat die buiten Vlaanderen gesitueerd zijn.

Door deze bijkomende aanpassingen aan de modelcode werd het mogelijk composietmodellen op te stellen, welke toelaten om grotere zones of stroomgebieden in één model onder te brengen en te simuleren, ook al hebben deze verschillende parametersets. In totaal volstond het om met 17 composietmodellen geheel Vlaanderen modelmatig te benaderen. Deze modellen omvatten stroomgebieden en worden aangeduid in Figuur 2-7: Benedenschelde, Bovenschelde, Brugse Polders, Demer, Dender, Dijle, Grote Nete, Ijzer, Jeker, Kleine Nete, Leie, Maas Noord, Maas Oost (N), Maas Oost (Z), Rupel, Voer en Zenne. In de meeste gevallen omvat het composietmodel een volledig bekken. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het Denderbekken (stroomgebied opwaarts van monding in de Schelde) en het Demerbekken (stroomgebied opwaarts van Aarschot). Voor een aantal modellen kan niet het volledige bekken doorgerekend worden. Het bekken is ofwel te groot ofwel ontbreekt er data buiten de grenzen van Vlaanderen. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de (zijrivieren van) de Maas in Limburg en de Voerstreek. In dat geval wordt het bekken opgedeeld in een aantal kleine deelbekkens, waarvoor dan wel een model wordt opgemaakt. Dit is het geval voor de modellen Maas Noord, Maas Oost, Maas Zuid, Jeker, maar ook de Kleine Nete.

In de modelopzet wordt er geen rekening gehouden met de opwaartse toevoeren van buiten het modelgebied. Een duidelijk voorbeeld hiervan is het Bovenscheldebekken, waarbij de aanvoer vanuit Frankrijk niet meegerekend wordt. In dit specifieke geval worden er geen modellen opgemaakt voor het deel van de Bovenschelde in Frankrijk en kan het dus niet in rekening worden gebracht. Echter wanneer er wel gegevens en modellen beschikbaar zijn van dergelijke opwaartse toevoergebieden, dan nog wordt er geen rekening gehouden met die opwaartse aanvoer. Het is technisch te complex deze in rekening te brengen. Dergelijke situatie doet zich voor bij de modellen van het Rupel, dat debiet ontvangt van de opwaartse bekkens van de Nete, Demer en Dijle en Zenne, en bij het stroomgebied van de Beneden-Schelde, dat debiet ontvangt van de opwaartse stroomgebieden van de Bovenschelde en Leie. Dergelijke interacties hebben enkel betrekking op de grotere en bevaarbare waterlopen. Dit heeft geen gevolgen naar de

droogtekaarten, gezien er geen resultaten worden gepresenteerd voor de bevaarbare waterlopen en kanalen (§2.5.3). Een dergelijke beslissing om geen resultaten te presenteren op de bevaarbare waterlopen en kanalen vindt enerzijds oorzaak in de afvoer op deze waterlopen, welke in periodes van droogte sterk gestuurd is, en anderzijds het modelinstrument dat afgestemd is op natuurlijke afstroming, en niet in staat is om dergelijke ingrepen te omvatten.



Figuur 2-7: De 17 Vlaamse rivierbekkens.

## 2.4 Langetermijnsimulaties met de bekkenmodellen

Met elk van de opgestelde composietmodellen voor de 17 stroomgebieden wordt een langetermijnsimulatie uitgevoerd. Deze simulaties laten toe één grote dataset te creëren aan hydrologische informatie over Vlaanderen. Deze data wordt vervolgens statistisch verwerkt tot relevante droogte-info en gekarteerd over Vlaanderen.

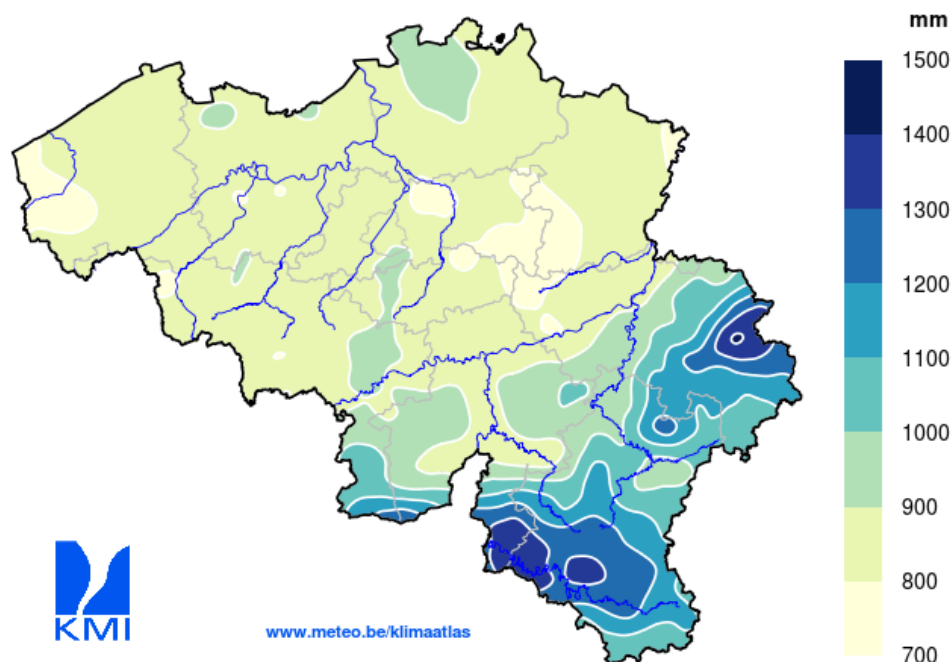
### 2.4.1 Meteorologische inputs

De hydrologische modellen achter de droogtekartering worden afgeijkt met lokale neerslag en evapotranspiratiegegevens (zie §2.1.1). Op die manier worden parameters bekomen die het hydrologische gedrag binnen het stroomgebied het best kunnen beschrijven. Voor zijn lange termijnsimulaties (50 jaar) worden de modellen doorgerekend met de neerslag- en evapotranspiratietijdreeksen van Ukkel voor de periode 1970-2019. Voor sommige modellen werd een opwarmingsperiode van 10 jaar gebruikt door periode 1970-1979 te dupliceren. Er werd gewerkt met de neerslag en evapotranspiratiereeksen van Ukkel, na trendverwijdering. Deze tijdreeksen werden wat betreft hun achterliggende statistiek aangepast aan het huidig klimaat, zodat na modelleringen de finale droogtekaarten een recente toestand weerspiegelen en geen beschrijvingen weergeven uit het verleden. Deze gedetrende reeksen werden opgemaakt i.o.v. VMM, en worden tegenwoordig standaard gehanteerd in hydrologische modelleringsstudies. De procedure en een vergelijking met de originele meetreeksen is terug te vinden in Ntegeka et al. (2018).

Daarnaast moet aandacht geschonken worden aan de ruimtelijke verdeeldheid van de aangelegde tijdreeksen. De neerslagstatistieken en het klimaatveranderingssignaal over Vlaanderen zijn niet hetzelfde. Figuur 2-8 illustreert de ruimtelijke variatie in de jaarlijkse neerslaghoeveelheden. Aan de kust valt op jaarlijkse schaal duidelijk minder neerslag, hetgeen ook moet worden weergegeven in de input van de modellen.

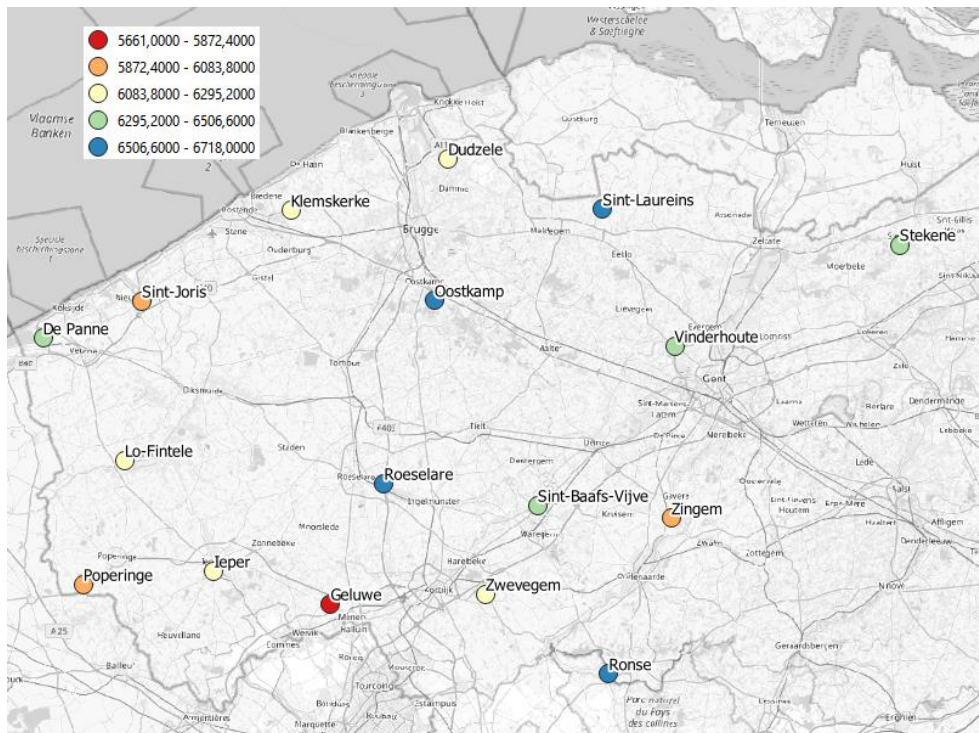
### Jaarlijkse gemiddelde neerslaghoeveelheid

Normalen 1981 - 2010



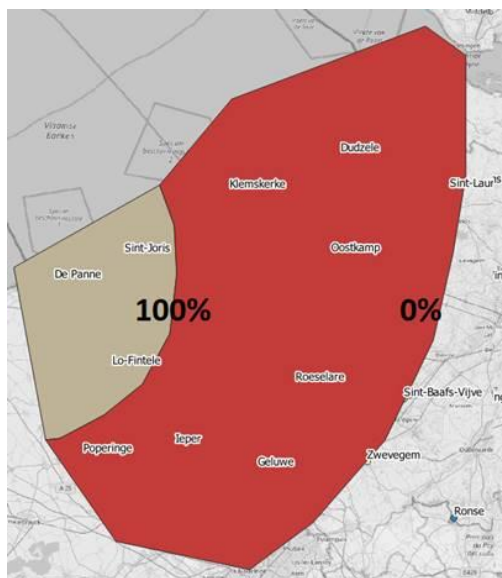
Figuur 2-8 : Ruimtelijke variatie in de jaarlijkse gemiddelde neerslaghoeveelheden (bron: KMI Klimaatatlas).

Om deze ruimtelijke variatie in rekening te brengen, wordt idealiter de Ukkelreeks gebruikt voor geheel Vlaanderen, omdat het gebruik van langere en bovendien consistente tijdreeksen aangewezen is, maar dan gecorrigeerd conform de lokale omstandigheden. Hiertoe werd de ruimtelijke variatie van de neerslaghoeveelheden geverifieerd voor enkele VMM neerslagstations. De cumulatieve neerslaghoeveelheden werden bepaald over de periode 01/06/2012 tot 01/06/2020 voor de neerslagstations in de provincie West-Vlaanderen en voor enkele neerslagstations in Oost-Vlaanderen. De ruimtelijke variatie van de cumulatieve neerslaghoeveelheden wordt aangeduid in Figuur 2-9. Er werd geen duidelijke gradiënt vastgesteld, welke kon worden toegepast om de Ukkelreeks te bewerken. Mogelijke oorzaken voor de afwezigheid van een gradiënt zijn het voorkomen van lokale extreme neerslagevents en de relatief korte tijdspanne van de tijdreeksen.



Figuur 2-9 : Cumulatieve neerslaghoeveelheden (mm) over de periode 01/06/2012 tot 01/06/2020 voor de VMM neerslagstations in West-Vlaanderen en enkele stations in Oost-Vlaanderen.

Omdat een correctie van Ukkelreeks op basis van de lokale meetgegevens niet mogelijk is, wordt een meer graduele correctie toegepast over Vlaanderen, met voornamelijk correcties voor de kuststreek. Deze correcties worden uitgevoerd met dezelfde methode als gebruikt voor het aanmaken van ruimtelijk verdeelde data van het Klimaatportaal Vlaanderen (<https://klimaat.vmm.be/>). De statistiek van de meteorologische reeksen van Ukkel worden aangepast aan de lagere neerslaghoeveelheden voor de kuststreek. Naar het binnenland toe wordt nog een kleine graduele overgang voorzien, zoals geïllustreerd in Figuur 2-10. De verschillende modellen zullen bijgevolg met verschillende verwerkingen van de Ukkelreeksen worden doorgerekend, al naargelang de ligging nabij de kust.



Figuur 2-10: Overgang van de meteorologisch tijdreeksen voor Veurne in de Westhoek (100%) naar de meteorologische tijdreeksen voor Ukkel in het binnenland. (0%). In de rode zone wordt een gewogen gemiddelde van beide tijdreeksen toegepast.

Voor de toekomstprojecties worden neerslag- en PET tijdreeksen opgesteld voor de klimaathorizonten 2050 en 2100, met behulp van de Klimaat Perturbatie Tool van de KU Leuven (Van Uytven en Willems, 2016). De tool zet de inputreeksen om volgens een laag (droog), midden en hoog (nat) klimaatscenario, en dit om de onzekerheden in de broeikasgasscenario's en klimaatmodelleringen mee in rekening te brengen. Binnen deze studie wordt enkel het lage of het meest droge scenario beschouwd, daar deze de hoogste impact zal hebben op droogte en laagwater. Het is een worst case scenario voor droogte. Men kan verwachten dat de werkelijke veranderingen zich zullen situeren tussen de huidige condities en dat lage scenario.

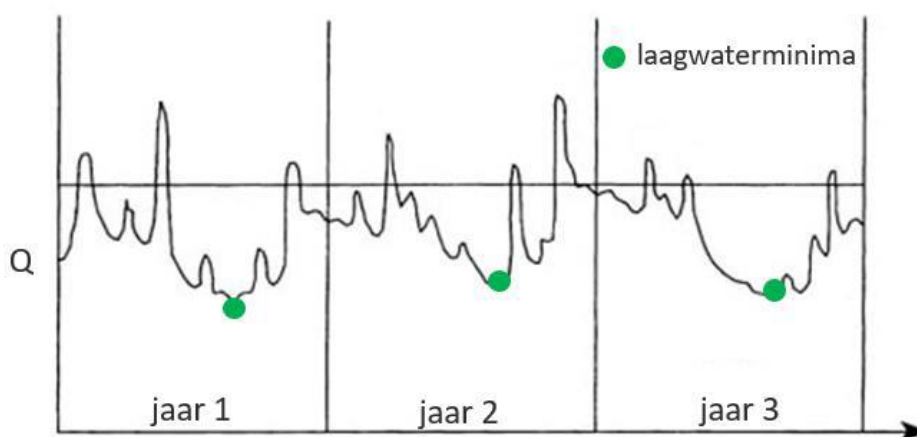
#### 2.4.2 Verwerken van debietijdreeksen tot droogtekaarten waterlopen

De hydrologische modellen berekenen een debiet voor elke rivierpixel. Dit resulteert voor iedere simulatie en voor iedere rivierpixel in een 50 jaar lange debietijdreeks. In een eerste en voorbereidende stap wordt elke debietreeks bewerkt om de laagwaterhydrologie beter te kunnen bestuderen. Op die debietijdreeksen wordt een 7-daags breed bewegend venster toegepast en wordt voor ieder venster de mediaan berekend. Op die manier worden de korte termijn fluctuaties uit de reeksen gehaald, wat ten goede komt voor de laagwateranalyses. De daaruit volgende debietijdreeksen worden in een volgende stap statistisch verwerkt naar indicatoren om de droogtetoestand te karakteriseren.

Er wordt gewerkt rond drie eigenschappen van droogte. De eerste indicator volgt rechtstreeks uit de debietreeksen en focust op de laagwaterdebieten als absolute grootheid (minimale laagwaterdebieten) of afgeleide grootheden (laagwaterpercentielen of gemiddelde laagwaterdebieten). Een tweede indicator typeert de duur van de droogte-events en wordt verkregen na een verwerking van de debietreeksen. Het geeft aan hoe lang een droogte-event aanhoudt. Een laatste en derde indicator houdt rekening met zowel de absolute laagwaterdebieten als de duur, en is een maat voor de ernst van het droogte-event. Het berekent totale afvoertekorten langsheen trajecten.

De statistische verwerking omvat een frequentie-analyse en bestaat erin een terugkeerperiode of kans op voorkomen toe te kennen aan deze laagwater- en droogtevariabelen. Indien bijvoorbeeld 50-jaar Ukkel-gegevens worden gesimuleerd met het model, dan worden voor elke variabele 50 waarden bekomen (indien de meest extreme waarde per jaar geselecteerd wordt). De 50 waarden worden bekomen ervan uitgaande dat er slechts 1 onafhankelijk extreem per jaar geselecteerd wordt. Deze 50 waarden worden gerangschikt van klein naar groot om empirische terugkeerperioden te berekenen. Hieruit worden dan de waarden bij bepaalde terugkeerperioden (bijvoorbeeld  $T = 5, 10, 20, \dots$  jaar) berekend. De terugkeerperiode van 50 jaar komt dan bijvoorbeeld overeen met een “extreme/uitzonderlijke” droogtetoestand (toestand die zich gemiddeld eens om de 50 jaar voordoet). De ruimtelijke kaart met de waarde van de indicatorvariabele van een bepaalde terugkeerperiode (bijvoorbeeld  $T = 50$  jaar) geeft dan een beeld van de ruimtelijke variatie over Vlaanderen van de droogtegevoeligheid (specifiek voor elk van de beschouwde toepassingen). Deze kaart heeft bijgevolg dezelfde eenheden als de gekozen indicatorvariabele. Onder worden deze verschillende variabelen, die laagwater- en droogteperiodes kunnen karakteriseren verder verduidelijkt:

- **Jaarlijkse laagwaterminima [ $m^3/s$ ]:** hierbij wordt per kalenderjaar het laagwaterminimum geselecteerd (Figuur 2-11). Daarna worden deze laagwaterminima gesorteerd van klein naar groot en worden empirische terugkeerperiodes toegekend aan de laagwaterminima. Zo krijgt het kleinste laagwaterminimum een terugkeerperiode van 50 ( $=50/1$ ) jaar, het tweede kleinste laagwaterminimum een terugkeerperiode van 25 ( $=50/2$ ) jaar, ..., en het grootste laagwaterminimum een terugkeerperiode van 1 ( $=50/50$ ) jaar. Op die manier krijgen we een inzicht met welke frequentie de laagwaterminima kunnen voorkomen.



Figuur 2-11: Selectie van de laagwaterminima in een debietrijdsreeks.

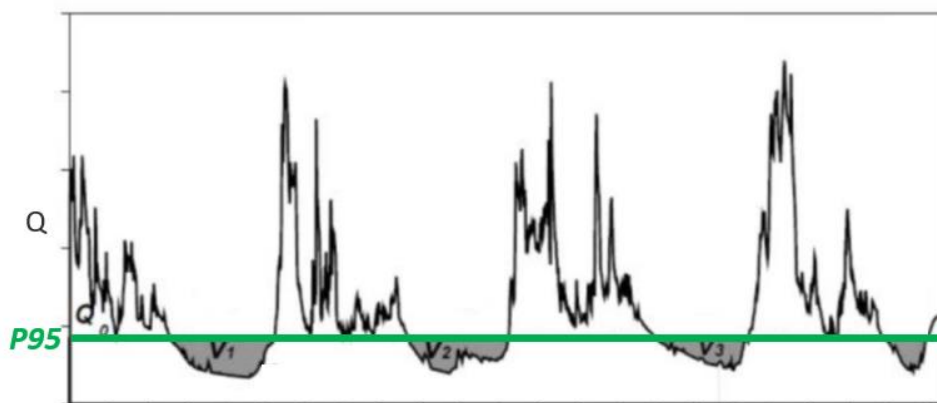
Een gelijkaardige extreme-waarden-analyse kan gebeuren voor de duur en ernst van droogte. Een hydrologisch droogte-event wordt gekwantificeerd zodra de afvoer een bepaalde drempelwaarde onderschrijft. Deze drempelwaarde wordt gelegd bij het 95-percentiel. Dit betekent dat 5 procent van de afvoeren die buiten dit percentiel vallen geclassificeerd worden als een te lage afvoer. Er kunnen ook nog andere drempelwaardes voorgesteld worden zoals een variabele drempelwaarde per waterloop(segment), een drempel afhankelijk van de functie of het gebruik van de waterloop (landbouw, natuur, industrie, drinkwater...), maar binnen dit project wordt een vaste drempelwaarde gehanteerd.

Zodra een afvoer onder deze drempelwaarde zakt, zal de indexatie van de hydrologische droogte van start gaan. Deze duurt vervolgens net zolang totdat de afvoer weer boven de drempelwaarde komt. Het geaccumuleerde afvoertekort is dan het totaal aan afvoertekorten onder deze drempelwaarde gedurende die periode. Het is een maat voor de ernst of intensiteit van het droogte-event. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2-12. De berekening van deze droogtevariabelen wordt uitgevoerd voor iedere rivierpixel, waarbij voor iedere pixel een eigen 95-percentiel drempelwaarde (P95-debiet) zal berekend worden voor de definitie en afbakening van een droogte-event. Alvorens deze indicatoren te kunnen bepalen, moet dus eerst informatie gekend zijn over deze percentielwaarden. Onder worden de droogte-indicatoren nogmaals toegelicht, en hoe ze gebruikt werden voor het opstellen van de droogtekaarten:

- **Jaarlijks aantal droogtedagen [dagen/jaar]:** De duur van een droogte-event wordt getypeerd door een aantal droogtedagen. Een droogtedag wordt gedefinieerd als een dag waarvoor het debiet kleiner is dan het P95-debiet. Het aantal droogtedagen wordt berekend per kalenderjaar. Vervolgens kan een frequentie-analyse worden uitgevoerd op deze aantallen en kunnen terugkeerperiodes worden toegekend aan de droogte-events. Het grootste aantal droogtedagen heeft een terugkeerperiode van 50 (=50/1) jaar, het tweede grootste aantal droogtedagen heeft een terugkeerperiode van 25 (50/2) jaar, ..., en het kleinste aantal droogte dagen heeft een terugkeerperiode van 1 (50/50) jaar.

Merk op dat het gemiddeld aantal droogtedagen voor het huidig klimaatscenario gelijk is aan 18 dagen (5% van 365 dagen = 18 dagen) en dat het niet varieert over de verschillende pixels. Het gemiddeld jaarlijks aantal droogtedagen voor het toekomstig klimaat kan wel variëren over de verschillende pixels, gezien voor elke pixel de drempelwaarde uit de huidige klimaatsimulaties worden beschouwd en de veranderingen onder een toekomstig klimaat ten opzichte van deze drempel worden berekend.

- **Jaarlijkse droogte-intensiteit [cum m<sup>3</sup>/s\*jaar]:** Zoals boven reeds vermeld, wordt de droogte-intensiteit gedefinieerd als een afvoertekort en wordt het gekwantificeerd als het cumulatief volume onder het P95-drempeldebiet. Die cumulatieve volumes worden per kalenderjaar beschouwd en kunnen ook gekenmerkt worden door een empirische terugkeerperiode.



Figuur 2-12 : De droogte-intensiteit wordt aangeduid als het volume (V1, V2, V3, etc.) onder het P95-debiet (drempel).



Naast de bovenstaande indicatoren, die specifiek zijn opgesteld om droogte-events te kunnen kwantificeren en te karteren volgens terugkeerperiode, wordt ook een verwerking doorgevoerd naar enkele standaardvariabelen inzake laagwaterstatistiek. Het betreffen volgende variabelen:

- **50-percentiel debiet (P50-debiet) [m<sup>3</sup>/s]:** Het P50-debiet is de mediaan van de 50 jaar lange debietreeksen.
- **90-percentiel debiet (P90-debiet) [m<sup>3</sup>/s]:** Het P90-debiet is de debietwaarde waarvoor 90% van de 50 jaar lange debietreeksen groter is.
- **Gemiddeld debiet [m<sup>3</sup>/s]:** Het gemiddeld debiet is het gemiddelde van de 50 jaar lange debietreeksen.

Deze zullen ook gekarteerd worden voor iedere waterloop en hebben specifieke doelen in het kader van het advisering in vergunningsaanvragen.

### 2.4.3 Verwerken van bodemvochtreesen tot droogtekaarten bodem

Voor het kwantificeren van de droogtetoestand in de bodem kan een gelijkaardige aanpak als voor de waterlopen worden gehanteerd. Er wordt hierbij gekeken naar een andere uitvoervariabele van het droogtemodel, maar de verdere verwerking tot het bekomen van de kaart blijft grotendeels gelijk. Het droogtemodel-instrument, meer bepaald het SWAP onderdeel of de component voor de modellering van de onverzadigde zone, berekent een relatief bodemvocht voor iedere 100x100m pixel over Vlaanderen. Het resultaat van de langetermijnsimulaties is voor iedere pixel een 50 jaar lange tijdreeks van relatief bodemvocht. Alvorens deze te verwerken naar droogte-indicatoren zullen ook deze reeksen eerst een pre-processing ondergaan. De relevante tijdschaal waarbij deze best bekeken worden, wordt sterk bepaald door de toepassing. Bodemvocht is vooral belangrijk voor de groei van gewassen en teelten. Wanneer er onvoldoende vocht in de bodem is, ondervindt het gewas of de teelt droogtestress, hetgeen onvermijdelijk gepaard zal gaan met opbrengstverlies. Landbouwgewassen zullen echter pas een sterk verminderde opbrengst geven of afsterven bij extreem laag bodemvocht over een periode van één of meerdere weken (sterk afhankelijk van het groeiseizoen). Daarom zal het bodemvocht aan de hand van een bewegend venster van 10-dagen worden bijgewerkt, waarbij voor ieder pixel de mediaan berekend wordt. De daaruit volgende relatieve bodemvochttime series worden vervolgens statistisch verwerkt tot droogte-indicatoren.

Eenzelfde droogte-indicatoren als voor de debieten worden beschouwd, al verschillen de drempels. Een eerste en meest eenvoudige indicator focust op de **jaarlijkse relatieve bodemvochtminima [%]**. Per kalenderjaar wordt het relatief bodemvochtminimum geselecteerd, waarna de reeks aan minima statistisch wordt geanalyseerd en de kans op voorkomen van de minima wordt ingeschat. Net als bij de laagwaterdebieten, krijgt het laagste relatief bodemvochtminimum uit de reeks een terugkeerperiode van 50 (=50/1) jaar, het tweede laagste relatief bodemvochtminimum een terugkeerperiode van 25 (=50/2) jaar, ..., en het hoogste relatief bodemvochtminimum een terugkeerperiode van 1 (=50/50) jaar.

Een tweede indicator schat de **duur van de droogte-events** in de bodem in. Opnieuw geldt hier eenzelfde definitie als voor droogte in de waterlopen. Van zodra het bodemvocht onder een drempelwaarde zakt, zal de indexatie van de agrarische droogte van start gaan. Deze duurt vervolgens net zolang totdat het bodemvocht weer boven deze drempelwaarde komt. Een vaste drempelwaarde, zoals het 95-percentiel debiet per pixel voor de hydrologische kaarten, is niet geschikt voor het inschatten van de duur van de droogte-events in de bodem. Anders dan voor debiet bieden de ruimtelijke

patronen in het aantal droogtedagen essentiële informatie. Een drempelwaarde berekend op basis van een percentiel per pixel geeft voor iedere pixel hetzelfde gemiddeld aantal droogtedagen. Een vaste drempelwaarde levert dus geen informatie over de rol van de bodem en/of het landgebruik.

Er wordt om deze redenen een variabele drempel in functie van de bodem en het landgebruik toegepast. De berekening van de drempelwaarden verschilt daarmee van de methodologie vooropgesteld in het vast gedeelte van de opdracht (IMDC, 2019). De drempel wordt hieronder kort beschreven en uitgebreid toegelicht in Bijlage E. De variabele drempel voor bodemvocht is afgestemd op de methodiek uit een parallel lopende project 'Vlaams Reactief Afwegingskader voor prioritair watergebruik', of kortweg 'VRAG' (VMM et al., 2021). Binnen dit project worden indicatoren gedefinieerd, die moeten toelaten om op ieder ogenblik de reële toestand van droogte en waterschaarste te bepalen en op basis van criteria (drempelwaarden voor de indicator) objectief te kunnen bepalen of er een watertekort dreigt (droogteniveau 1) of een watertekort zich effectief voordoet (droogteniveau 2) of niet. Het bodemvochtgehalte wordt hierbij beschouwd als indicator voor vegetatie, inclusief landbouwgewassen en (vooral regenwaterafhankelijke) terrestrische ecosystemen zoals infiltratiegebieden en vennen. De volgende twee drempelwaardes werden vastgelegd voor bodemvocht:

- Droogteniveau 1: dit is wanneer de gewasproductie onder druk begint te staan en huidmondjes bijgevolg sluiten (stressfactor = 0.9)
- Droogteniveau 2: dit is wanneer de gewasproductie een sterke impact ondervindt, neigt naar totale verdroging met onomkeerbare schade tot gevolg (stressfactor = 0.2).

Een agrarisch droogte-event vangt aan op het moment waarbij een gewas niet meer over voldoende vocht in de bodem beschikt om voor een optimale productie te zorgen. Dit komt overeen met een droogteniveau 1. Deze drempelwaarde zal bijgevolg verder worden uitgewerkt binnen deze opdracht. De drempelwaarde wordt gedefinieerd via een p-waarde, dit is een gewasspecifieke waarde die de gevoeligheid van het gewas aangeeft voor droogte. De drempelwaarde, uitgedrukt als relatief bodemvocht, wordt berekend met de formule:

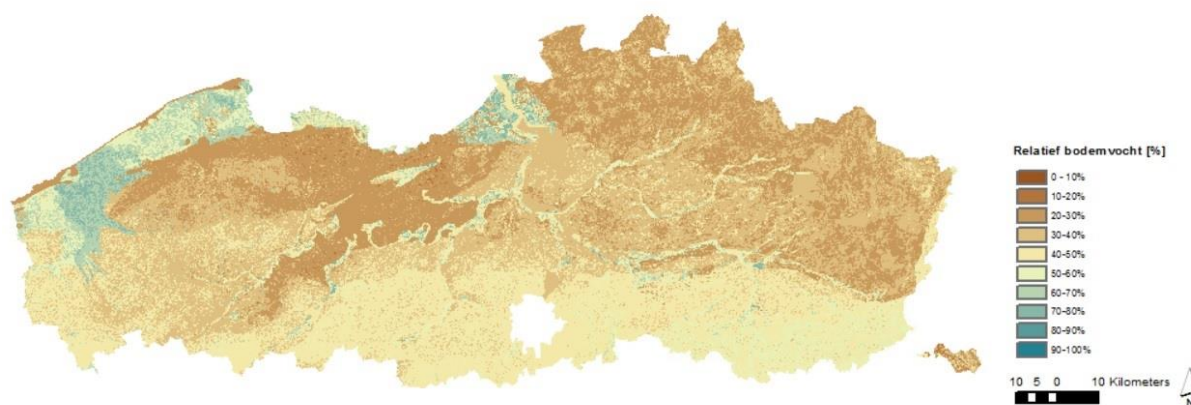
$$(1 - p) * TAW + PWP$$

met TAW de 'Total available water' (de totale hoeveelheid plant beschikbaar water) en PWP de 'Permanent Wilting Point' (permanent verwelkingspunt). In het VRAG-project worden de p-waarden berekend met het gewasgroeimodel Aquacrop en dit voor een aantal gewassen. Voor de overige gewassen wordt dan telkens de p-waarde overgenomen van een gewas met een gelijkaardige droogtegevoeligheid. De p-waarden aangenomen in het VRAG-project worden aangeduid in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 : De p-waarden in functie van het droogteniveau voor verschillende gewassen (VRAG project: VMM et al., 2021)

Gewas	Referentie	p-waarde droogteniveau 1	p-waarde droogteniveau 2
Aardappelen	Aquacrop	0.71	0.9
Wortel/spruitkool/glastuinbouw	Gevoelig	0.71	0.9
Bloemkool/prei	Gevoelig	0.71	0.9
Erwt	Gevoelig	0.71	0.9
Fruit en noten	Gevoelig	0.71	0.9
Boon	Aquacrop	0.74	0.92
Suikerbieten	Aquacrop	0.76	0.92
Mais	Aquacrop	0.88	0.97
Grasland	Ongevoelig	0.88	0.97

De parameters TAW en PWP, nodig voor de verdere berekening van de drempel, kunnen worden afgeleid uit de parameters  $O_{res}$  (residueel bodemvochtgehalte),  $O_{sat}$  (verzadigd bodemvochtgehalte),  $n_{par}$  (empirische parameter) en  $\alpha$  (empirische parameter). Die parameters zijn gekend over Vlaanderen voor een opeenvolging van profiellagen, meestal zeven tot tien lagen, via de GeoPEARL dataset (Joris et al., 2017; IMDC, 2019) achter het droogtemodel. De berekening gebeurt er volgens de methode geïmplementeerd in SWAP en resulteert in pixel specifieke waarden voor TAW en PWP over Vlaanderen. In combinatie met de gewas-specifieke p-waarden, leiden deze finaal tot gedetailleerde ruimtelijke info met betrekking tot drempelwaarden aan bodemvochtgehaltes voor de definitie van droogte-events in de bodem. Figuur 2-13 geeft deze drempelwaarden in relatief bodemvochtgehalte weer.



Figuur 2-13: Relatief bodemvocht drempelwaarden voor agrarische droogte-events.

Het voordeel van de nieuwe methode op basis van de modeloutput (PWP en TAW) ten opzichte van de P95-methode is dat de definitie van een droogtedag afhankelijk wordt van het bodemtype. Dit laat toe om pixels ruimtelijk te vergelijken. Via de p-waarde wordt de berekening ook afhankelijk van het gewas en/of vegetatie. In het huidig project worden deze bepaald via de NARA-T landgebruikskaart (Poelmans en Van Daele, 2014).

Door de lange termijn simulatiereeksen pixel per pixel af te toetsten aan zijn drempelwaarde kan per jaar het aantal droogtedagen worden bepaald. Een droogtedag wordt dan bepaald als een dag waarvoor het relatief bodemvocht kleiner is dan zijn

berekende drempel. Het aantal droogtedagen wordt berekend per kalenderjaar. Vervolgens wordt de reeks met aantal droogtedagen per kalenderjaar statistisch verwerkt, en worden er empirische terugkeerperiodes aan toegekend. Het grootste aantal droogtedagen heeft een terugkeerperiode van 50 (=50/1) jaar, het tweede grootste aantal droogtedagen heeft een terugkeerperiode van 25 (50/2) jaar, ..., en het kleinste aantal droogte dagen heeft een terugkeerperiode van 1 (50/50) jaar.

Een derde en laatste droogte-indicator om droogte in bodem te kwantificeren is de **jaarlijkse droogte-intensiteit** [cum  $m^3/m^3*$ jaar]. Deze droogte-intensiteit wordt gedefinieerd als het cumulatief relatief bodemvocht onder de drempelwaarde. Het is een maat voor het jaarlijks tekort aan bodemvocht opdat het gewas geen droogtestress zou ondervinden. Die volumes worden per kalenderjaar berekend. Uit de langetermijnsimulaties wordt zo'n reeks aan jaarlijkse volumes verkregen, waarbij door statistische analyses aan de grootteorde van de volumes een terugkeerperiode kan worden toegekend. Dit is hetzelfde principe als bij de droogtedagen, of voor de karakterisering en opstellen van kaarten voor hydrologische droogte.

## 2.5 Opstellen van gebiedsdekkende Vlaamse droogtekaarten

### 2.5.1 Samenstelling tot droogtekaarten Vlaanderen

De langetermijnsimulaties en statistische verwerkingen van de datasets met hydrologische informatie (§2.4.2 en §2.4.3) tot relevante droogte-indicatoren worden doorgevoerd voor de 17 stroomgebieden afzonderlijk (§2.3). De resultaten voor de verschillende stroomgebieden worden vervolgens gecombineerd tot gebiedsdekkende en Vlaamse droogtekaarten. De oefening wordt gemaakt voor de huidige klimaatcondities en toekomstige klimaatprojecties, vertegenwoordigd de lage of meest droge scenario-variant en dat zowel voor 2050 als voor 2100. Qua terugkeerperiodes worden 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar beschouwd en wordt voor de droogteduur en -intensiteit ook een gemiddelde berekend.

In totaal worden er 123 droogtekaarten opgesteld, welke onder te verdelen zijn in 3 types:

- **Agrarische droogtekaarten of droogtekaarten-bodem** (60 kaarten - 20 kaarten per klimaatscenario):
  - o **Jaarlijks relatief bodemvochtminimum (6 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.
  - o **Jaarlijks aantal droogtedagen (7 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor het gemiddeld jaarlijks aantal droogtedagen en voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.
  - o **Jaarlijkse droogte-intensiteit (7 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor de gemiddelde jaarlijks droogte-intensiteit en voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.
- **Hydrologische droogtekaarten of droogtekaarten-waterlopen** (60 kaarten - 20 kaarten per klimaatscenario):
  - o **Jaarlijks laagwaterminimum (6 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.
  - o **Jaarlijks aantal droogtedagen (7 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor het gemiddeld jaarlijks aantal droogtedagen en voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.

- **Jaarlijkse droogte-intensiteit (7 kaarten per klimaatscenario):** kaarten voor de gemiddelde jaarlijkse droogte-intensiteit en voor terugkeerperiodes 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar.
- **Laagwater percentielkaarten** (3 kaarten voor het huidig klimaatscenario):
  - **90-percentiel debietkaart**
  - **50-percentiel debietkaart**
  - **Gemiddeld debietkaart**

### 2.5.2 Rekening en opslag

Het doorrekenen van de langetermijnsimulaties en statistische naverwerking, zoals hierboven omschreven, is een omslachtig en tijdrovend werk. De simulaties werden op twee rekenservers uitgevoerd. Elke server beschikt over 16Gb RAM en vier cores. De 17 bekkens werden verdeeld over beide servers. Het doorrekenen van geheel Vlaanderen voor alle klimaatscenario's (huidig klimaat, 2050 en 2100) en post-processing duurt één week. Het simuleren (PDM, SWAP) werd verdeeld over meerdere cores. De resulterende netcdf-bestanden zijn 10 à 20 Gb groot (één voor iFramework en één voor SWAP). De resulterende droogtekaarten per klimaatscenario zijn ongeveer 0,5 à 1 Gb groot.

### 2.5.3 Nabewerking droogtekaarten Vlaanderen

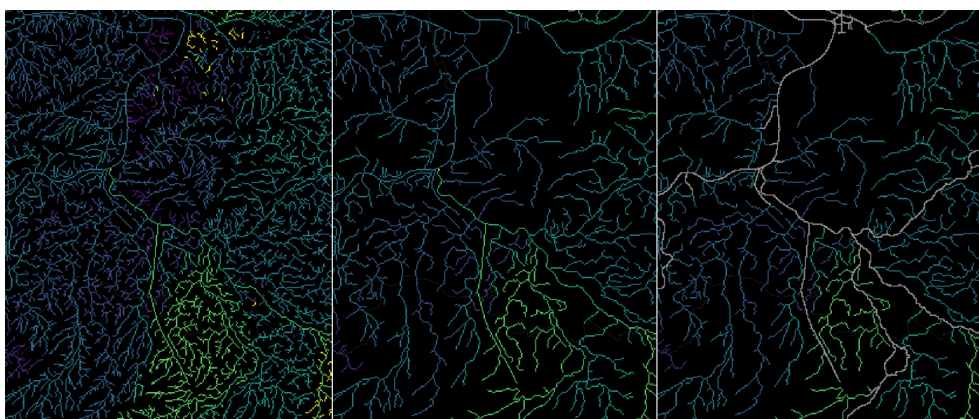
De hydrologische droogtekaarten, verkregen na statistische verwerkingen van de resultatenbestanden, zijn nog niet meteen een bruikbaar product. Er is nog een post-processing nodig tot het verkrijgen van het gewenste eindproduct. Deze naverwerking geldt eveneens voor de percentielkaarten.

- Wegfilteren afstroming over het land :
 

Een eerste nabewerking heeft betrekking op het wegfilteren van gesimuleerde afstroming buiten rivierpixels. Het neerslagafvoermodel geeft initieel een debiet voor iedere pixel met afwateringsgebied groter dan 10km<sup>2</sup>. Het model moet opgelegd worden waar de waterlooppixels zich situeren. Veel van de initieel ingekleurde pixels (Figuur 2-14–links) omvatten afvoer over het land. Via een rivierenbestand (pixelformaat) wordt duidelijk gemaakt waar de waterlopen zich bevinden en worden de resultaten met afstroming over land weggefilterd. Het rivierbestand is gebaseerd op de afbakening van de oppervlaktewaterlichamen (OWL-kaart). Het bestand bevat verder alle waterlopen tot en met 2<sup>de</sup> orde. Op die manier worden enkel resultaten gepresenteerd ter hoogte van die waterlopen.
- Maskeren grote, bevaarbare waterlopen en kanalen
 

Zoals eerder al vermeld (§2.3) is het niet relevant om resultaten te tonen voor de bevaarbare waterlopen. Na de berekeningen worden wel afvoerresultaten gegenereerd in de droogtekaarten voor deze waterlopen, maar deze resultaten zijn weinig zinvol en/of correct. De resultaten voor deze waterlopen worden echter niet weggefilterd zoals voor de neerslagafstroming over land, maar ze worden gemaskeerd door een extra waterlopenbestand. Er werd ook voor deze waterlopen een afzonderlijk rasterbestand aangemaakt, die als overlay dient gebruikt te worden bij de resultaten. Het geeft duidelijk de bevaarbare waterlopen weer (Figuur 2-14–rechts).
- Bijtellen droogweerafvoer

In alle modellen en simulaties wordt uitgegaan van een natuurlijke afstroming. Debietmetingen werden ter kalibratie van de modellen gecorrigeerd op externe aanvoer vanuit rioolwaterzuiveringsinstallaties (§2.1.2). Enkel op die manier konden betrouwbare modelparameters worden gevonden, die enerzijds het hydrologische gedrag van het stroomgebied nauwkeurig kunnen omvatten en die anderzijds een goede inschatting kunnen geven van de klimaatimpact. Ook voor dit laatste is het zeer belangrijk deze correcties te beschouwen. Het niet in rekening brengen van deze externe afvoeren, leidt tot overparameterisatie van de modellen en dus ook tot een overschatting van het klimaateffect. Na de modelparameterisaties en -simulaties dienen de externe aanvoeren terug bijgeteld te worden, indien we een goede inschatting van de laagwaterdebieten wensen te hebben. Een droogweerafvoerkaart werden opgesteld voor Vlaanderen binnen dit project en een extract werd reeds gepresenteerd voor de provincie Limburg in Figuur 2-1.



Figuur 2-14 : Debiet droogtekaarten voor en na toepassing van riviermask: links: oorspronkelijk resultaat; midden: na wegfilteren kleine waterlopen; rechts: na toepassing mask 'bevaarbare waterlopen'.

## 3 Agrarische droogtekaarten Vlaanderen

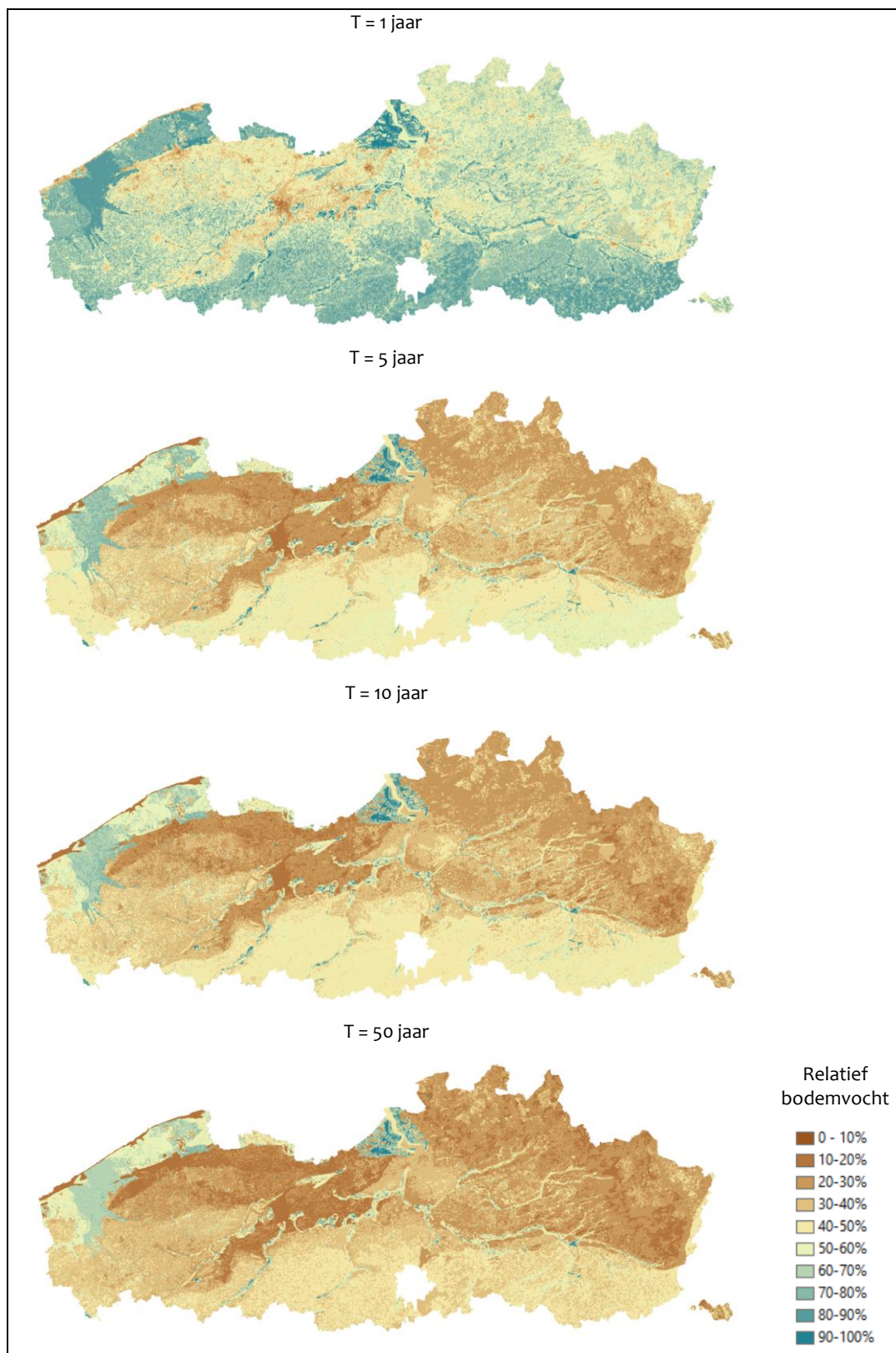
### 3.1 Agrarische droogtekaarten – huidig klimaat

In volgende secties worden de verschillende types agrarische droogtekaarten besproken. Enkele kaarten worden uitgelicht en gedetailleerd besproken.

#### 3.1.1 Jaarlijks relatief bodemvochtminimum

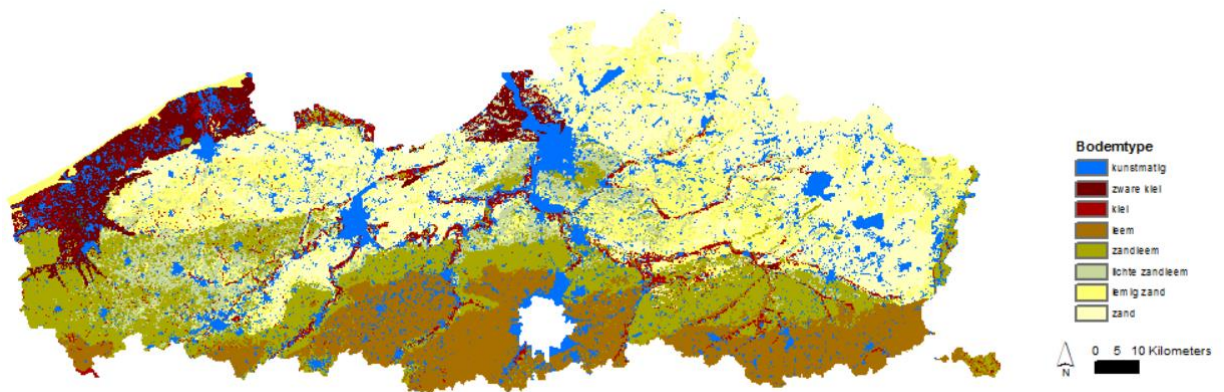
Figuur 3-1 toont het relatief bodemvochtminimum voor een 1, 5, 10 en 50-jarige terugkeerperiode over Vlaanderen. Hieruit volgt duidelijk een ruimtelijke variatie, met zones die gekarakteriseerd worden met hogere minima en zones met lage minima. Die ruimtelijke variatie is zichtbaar bij alle terugkeerperiodes. De zones met de laagste relatieve bodemvochtgehalten vallen samen met de zandige bodems in Kempen en de Vlaamse Vallei. Deze bodems kunnen weinig vocht vasthouden en zijn zeer droogtegevoelig. Ze vallen snel terug op lage hoeveelheden bodemvocht. De hoogste relatieve bodemvochtgehalten zijn aanwezig in de kleibodems van de kustpolders en de rivier valleien. Ook onder extreme condities – terugkeerperiode van 50 jaar - kunnen die bodems nog steeds een hoge hoeveelheid aan bodemwater omvatten. Ze drogen minder snel uit en kunnen vocht lang en onder extreme omstandigheden vasthouden. De zandleemstreek en leemstreek hebben intermediaire waarden tussen de zandige en kleiige bodems. Met andere woorden, het zijn de bodemtypes die de spreiding in de relatieve bodemvochtminima verklaren in de kaarten. Ter verificatie wordt de kaart met bodemtypes, zoals die is opgenomen in het droogtemodel, geïllustreerd in Figuur 3-2. Er blijkt geen duidelijke invloed van het landgebruik in de ruimtelijke patronen van de bodemvochtminima. Het effect is dus marginaal ten opzichte van de bodemtexturen. Dit werd ook reeds vastgesteld in het vast gedeelte van de opdracht (IMDC, 2019), maar wordt hierbij gestaafd op basis van de resultaten voor geheel Vlaanderen.

Het is duidelijk dat het minimale bodemvocht afneemt naarmate de toestand extremer wordt en naarmate de terugkeerperiode stijgt. Over Vlaanderen uitgemiddeld is het jaarlijks relatief bodemvochtminimum 62% voor een terugkeerperiode van 1 jaar, 46% voor een terugkeerperiode van 2 jaar, 40% voor een terugkeerperiode van 5 jaar, 38% voor een terugkeerperiode van 10 jaar, 35% voor een terugkeerperiode van 25 en 50 jaar. Een terugkeerperiode van 1 jaar komt overeen met de minst droge zomer van de voorbije 50 jaar. De vochtgehalten zijn dan ook redelijk hoog voor die terugkeerperiode. Deze zullen echter snel afnemen bij overgang naar een terugkeerperiode van 5 en 10 jaar. Bij nog extremere events zal het bodemvocht nog verder dalen, maar wel slechts in beperkte mate. Zo is het gemiddelde vochtgehalte bij een terugkeerperiode van 10 jaar niet danig verschillend van deze bij een terugkeerperiode van 50 jaar.



Figuur 3-1: Relatieve bodemvochtminima voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.





Figuur 3-2 : Bodemkaart Vlaanderen.

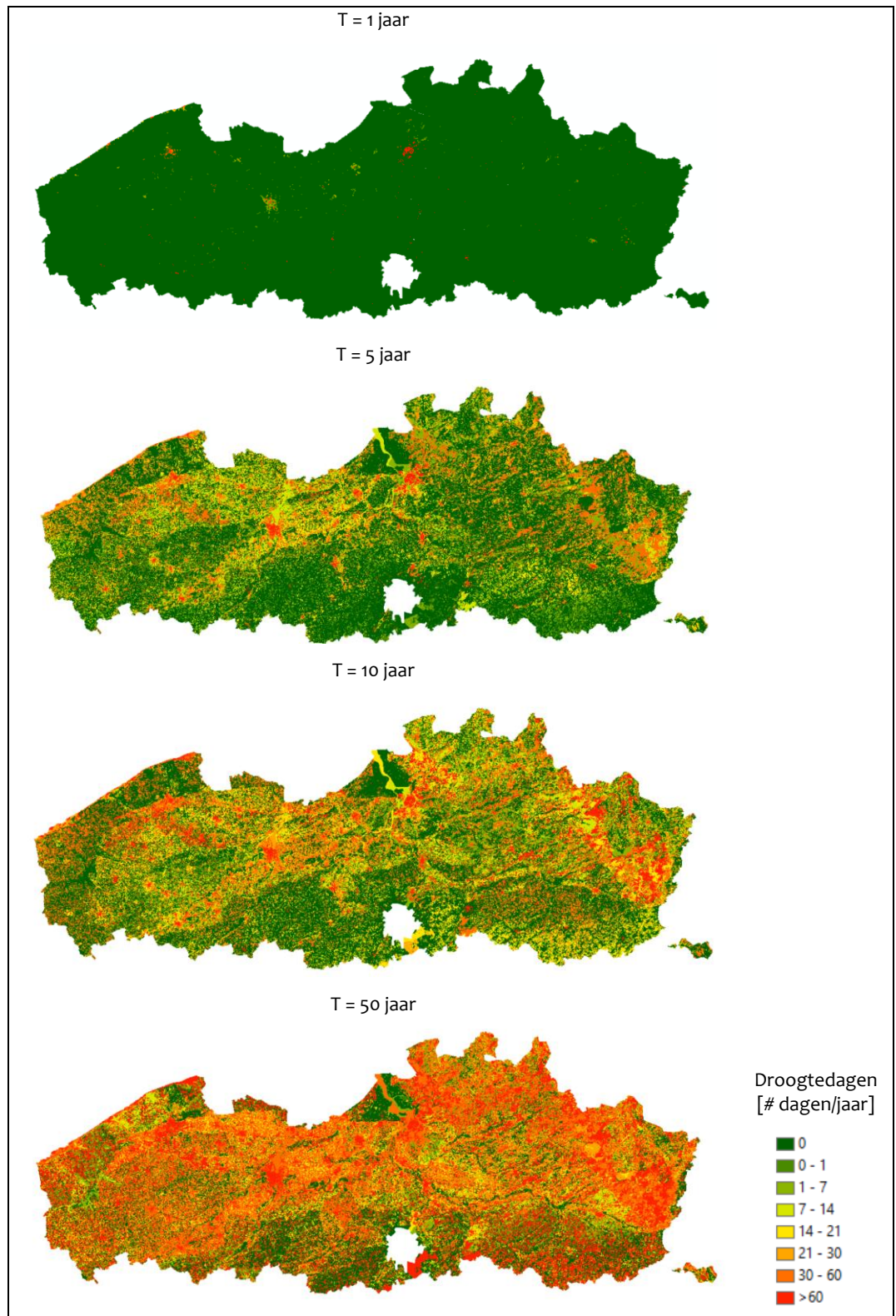
### 3.1.2 Jaarlijks aantal droogtedagen

De duur van droogte-events wordt gekwantificeerd per jaar en dat via een aantal droogtedagen. In Figuur 3-3 wordt het aantal droogtedagen voor Vlaanderen weergegeven voor een terugkeerperiode van respectievelijk 1 jaar, 5 jaar, 10 jaar en 50 jaar. Bij een terugkeerperiode van 1 jaar zijn er, op uitzondering van enkele steden, geen problemen met droogte in de bodem. Dit betekent dat voor het overgrote deel van Vlaanderen het bodemwater nog voldoende aangevuld kan worden. Echter, dit betekent ook dat ter hoogte van steden als Antwerpen, Gent en Brugge, zelfs in de meest natte zomer van de voorbije 50 jaar, het vochtgehalte in de bodem te laag is. Er kan onvoldoende neerslag infiltreren om het bodemvocht tot op een zeker niveau te brengen. Deze steden worden jaarlijks geconfronteerd met een tekort aan bodemvocht in de ondergrond.

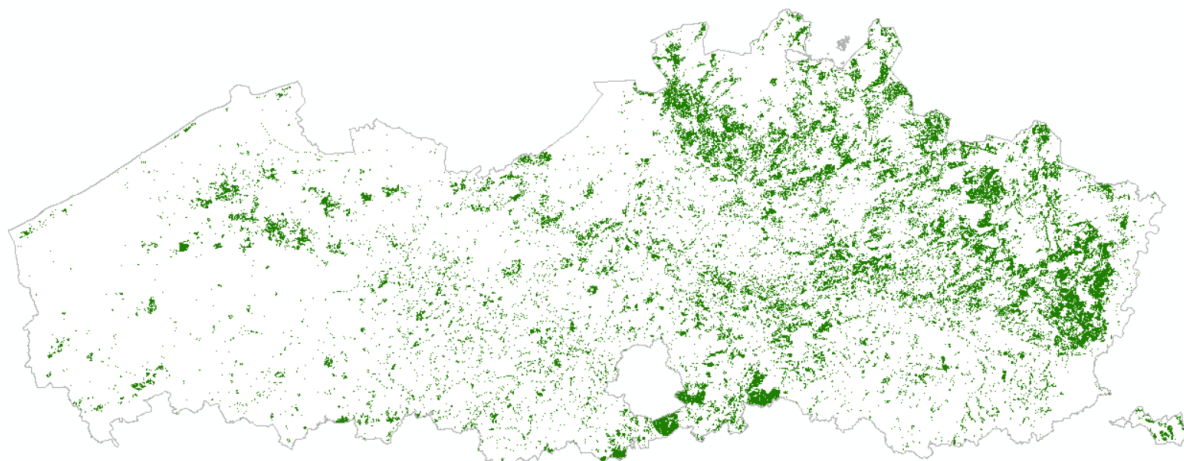
Bij een terugkeerperiode van 5 jaar en 10 jaar blijven steden de koploper in het aantal droogtedagen. Het aantal droogtedagen loopt er al op tot 3 maand en meer, of met andere woorden de duur van een volledige zomerperiode. Ook komen nieuwe hotspots naar voor die terug ter hoogte van steden zijn gelegen. Bij een terugkeerperiode van 5 jaar zijn Kortrijk, Roeselare, Ieper, Sint-Niklaas, Aalst, Mechelen, Vilvoorde, Leuven en Hasselt te onderscheiden, en bij een terugkeerperiode van 10 jaar vallen ook Dendermonde, Lokeren, Menen, Oudenaarde, Zele, Aarschot, Diest en Turnhout op in de kaart met een hoog aantal droogtedagen. Verder kunnen bij deze terugkeerperiodes ook al een aantal duidelijke patronen worden waargenomen. De zandstreek die gekenmerkt werd door de laagste bodemvochtminima, komt ook qua droogtedagen in de kaarten terug naar voor. Zandbodems zullen sterk reageren op weersomstandigheden. Ze vullen hun tekorten snel aan bij neerslag, maar drogen snel – sneller dan andere bodemtypes – uit wanneer er geen neerslag valt. Naast de steden springen deze zones er eerstvolgend uit. Binnen deze grote oppervlakte van de zandstreek zijn er ook duidelijk variaties waarneembaar aan droogteduren. Deze worden veroorzaakt door het landgebruik, de toegepaste teelt of gewas. Een agrarisch droogte-event vangt aan wanneer het bodemvochtgehalte onder een drempel duikt. Deze drempel is niet enkel afhankelijk van het bodemtype, maar is ook functie van het landgebruik (zie §2.4.3). De drempelwaarden aan bodemvocht zullen hierdoor binnen een zelfde textuur verschillen naargelang het landgebruik. Dit laat zich verder voelen in de bepaling van het aantal droogtedagen. Zo zal de klasse fruit en noten, waaronder ook de boomgaarden en bossen vallen, steeds het hoogste aantal droogtedagen hebben, en dus het meest gevoelig zijn voor droge periodes. Zo kunnen bij een terugkeerperiode van 10 jaar, al meerdere grote bossen onderscheiden worden, vooral boven zandbodems. Figuur 3-4 toont een kaart met het bosareaal in Vlaanderen. De overeenkomsten zijn treffend. Verder zijn ook de vele

boomgaarden in Haspengouw zichtbaar in de kaart bij een terugkeerperiode van 10 jaar. Dit houdt in dat eenmaal om de 10 jaar de fruitbomen een periode van droogtestress zullen ondervinden die tot 2 maanden kan duren. Ook het Zoniënwood laat zich al opmerken in de kaarten. Het Zoniënwood bevindt zich ten zuidoosten van het Brussels Gewest. Het situeert zich op een ondergrond uit leem, waardoor het wel droogtestress gaat ondervinden maar niet in die mate als de bossen op zandbodem.

Bij een droogte-event met een terugkeerperiode van 50 jaar zijn er nog weinig plaatsen in Vlaanderen waar er geen droogtestress plaatsvindt. Dezelfde tendensen zetten zich door waarbij steden nog steeds het meest droogtegevoelig blijken en het hoogste aantal droogtedagen hebben. Ze worden gevolgd door boomgaarden en bossen. Ook komen de zandbodems terug duidelijk naar voor als droogtegevoelige streek, terwijl dit veel minder kan gezegd worden van de kleiige kuststreek. Deze blijven een beperkte droogtegevoeligheid tonen, ongeacht de teelt of landgebruik. Ook de leemstreek in het zuiden van Vlaanderen ondervindt onder dergelijke extreme omstandigheden een beperkte droogtegevoeligheid. In dit gebied komt veel grasland voor volgens de gebruikte landgebruikskaart (Poelmans en Van Daele, 2014), en gras is een droogtebestendig gewas. Grasland, in combinatie met leembodems die hun bodemvocht lang kunnen vasthouden, zal goed weerstaan aan de droge condities. Echter, waar zich boomgaarden en bossen bevinden, zoals in het zuidoosten van de leemstreek, zijn terug oppervlaktes te herkennen met periodes van droogtestress tot één maand en meer. Ook op leembodems zullen de boomgaarden en bossen dermate transpireren bij een terugkeerperiode van 50 jaar zodat het vochtgehalte tot onder zijn stressdrempel duikt.

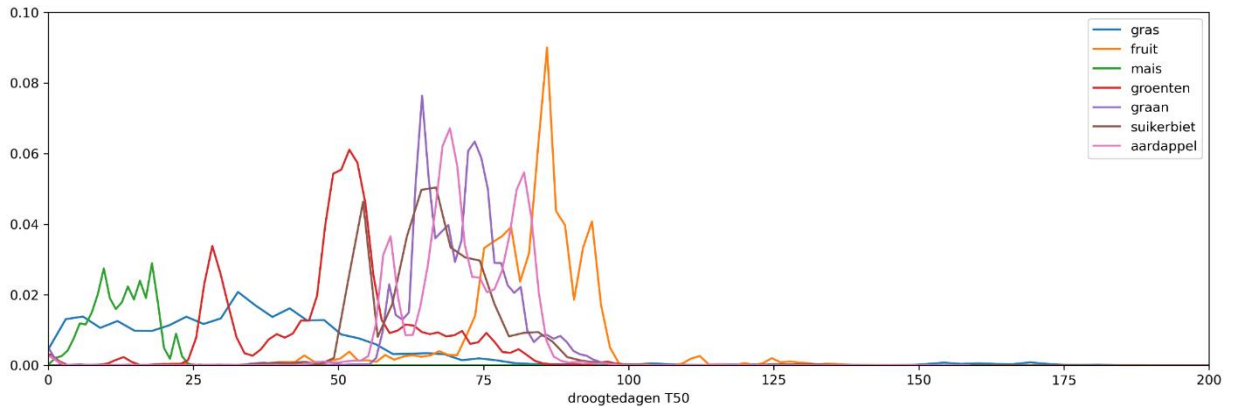


Figuur 3-3 : Duur van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.



Figuur 3-4 : Bosareaal in Vlaanderen (bron: Digitale Boswijzer 2015).

De duur van agrarische droogteperiodes is het gevolg van een complex samenspel tussen bodemtype en het landgebruik erboven. Enkele grote patronen kunnen worden herkend over Vlaanderen. Die patronen werden hierboven vermeld. Om de invloed van het landgebruik en bodemtype op de droogteduur verder te kunnen specificeren, wordt in Figuur 3-5 de relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode voor de verschillende landgebruiken berekend, ongeacht het type bodem. Voor boomgaarden en bos, deel uitmakend van het landgebruik fruit en noten, wordt inderdaad steeds een hoger aantal droogtedagen geregistreerd. Dat bevestigt de vaststelling uit de kaarten. Na bos volgen suikerbiet, graan en aardappel als droogtegevoelig gewas, met een duur van droogte in de range van 55-80 dagen. Deze brede range in het aantal droogtedagen voor een welbepaald landgebruik wordt verklaard door de bodemtextuur. Ook de verschillende pieken zijn toe te schrijven aan een specifiek bodemtype. Maïs kent steeds het laagste aantal droogtedagen (<25 dagen), alsook is er het minste variatie aan droogtedagen door het type bodem. Ongeacht waar maïs wordt geplant, het zal het steeds goed doen en een minimum aan droogtestress ondervinden. Opvallend is de grafiek van gras. De variatie aan droogtedagen van gras is eerder zeer groot. Gras kan naargelang zijn onderliggende bodem geen droogtestress ondervinden, zelfs niet bij een terugkeerperiode van 50 jaar, maar evengoed tot 50 dagen en meer hinder ondervinden. In vergelijking met de andere teelten zijn deze aantallen wel eerder laag. Een oorzaak is mogelijk te vinden in de grote oppervlakte aan grasland. Over Vlaanderen werd 56% als grasland gecatalogeerd, waarbij geen onderscheid werd gemaakt tussen natuur, weiland of parken. Door zijn aandeel zal grasland met zeer veel verschillende bodems gecombineerd worden en mogelijk hierdoor een brede waaier aan droogtedagen genereren. Het blijft een complexe en moeilijk te doorgronden interactie die aan de basis ligt hiervan.



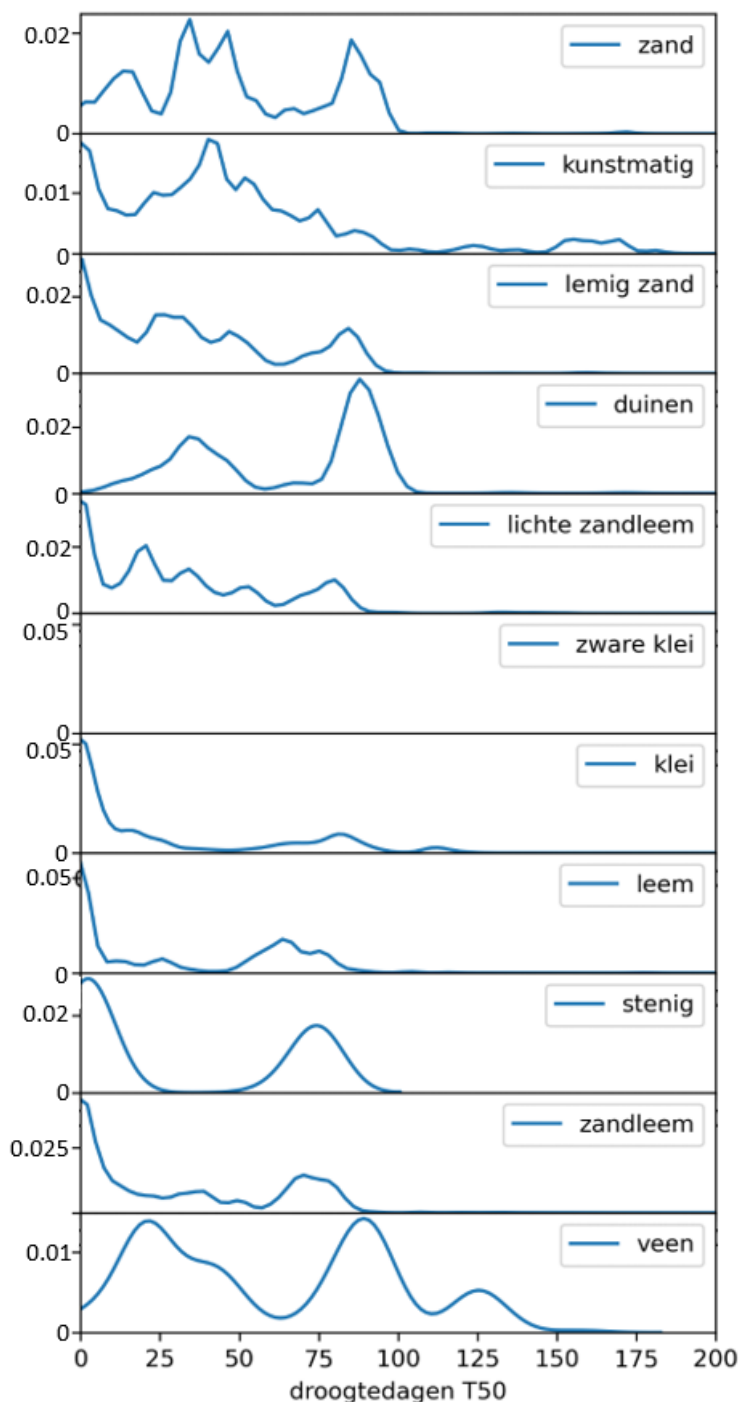
Figuur 3-5: De relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode per landgebruik.

Figuur 3-6 toont eenzelfde analyse, maar dan in functie van de bodemtextuur. De figuur toont de relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode voor verschillende bodemtexturen, ongeacht het landgebruik. Zoals al eerder opgemerkt in de kaarten, komende de zandige bodems (zand en duinen) als meest droogtegevoelig naar voor. Zij tonen bij eenzelfde terugkeerperiode een hoger aantal droogtedagen, wat inhoudt dat eenzelfde gewas op dit type bodems sneller droogtestress gaat ondervinden. Opnieuw is er een brede variatie aan droogtedagen, en zijn enkele opvallende pieken op te merken in de grafiek. Deze zijn toe te schrijven aan het specifieke gewas. In combinatie met de bovenstaande figuur kan ervan uitgegaan worden dat de hoogste piek – piek met hoogst aantal droogtedagen – toe te schrijven is aan boomgaarden en bosgebied, terwijl de laagste piek grasland zal omvatten. Naast de zanderige bodems vallen ook de kunstmatige bodems op. Dit zijn antropogene bodems ter hoogte van steden, en ze worden gekenmerkt door lange uitlopers aan droogtedagen. Een extreem droogte-event kan op deze bodems zeer lang aanhouden en tot een half jaar duren. Dit zijn wel eerder uitzonderingen, en op de meeste kunstmatige bodems situeert de duur zich tussen de 25 en 75 dagen bij een terugkeerperiode van 50 jaar.

Zandleem-, leem-, kleibodems zijn minder droogtegevoelig. Er kunnen in deze bodems nog wel droogte-events optreden, en bij een terugkeerperiode van 50 jaar kunnen deze ook tot 50 dagen en meer duren, maar het aandeel is eerder beperkt. In deze bodems zal de droogte vaak maar beperkt duren (tot 3 weken) bij een terugkeerperiode van 50 jaar. Het valt op dat het merendeel van die events in die bodems zich beperkt tot enkele dagen. Opnieuw speelt hier de combinatie van het landgebruik, waarbij voornamelijk de interactie met grasland aan de basis ligt. Deze combinatie leidt zelfs bij een terugkeerperiode van 50 jaar maar tot een beperkte droogtestress. Zware klei kent ook bij de hoogste terugkeerperiodes weinig impact en dat voor eender welk landgebruik. De zware kleibodems over Vlaanderen zijn echter ook beperkt in oppervlakte (5.3% van Vlaanderen).

Opmerkelijk zijn ook de resultaten van veen. Bij een tekort aan neerslag kan deze zeer hevig reageren, met sterke dalingen aan bodemvocht tot gevolg. De reactie hangt echter sterk af van het landgebruik. In combinatie met bepaalde teelten lijkt deze nog sterker te reageren dan de zanderige bodems en kan het lang duren alvorens de bodemvochttekorten terug aangevuld zijn. Dit kan oplopen tot 150 dagen. De meeste veenbodems tonen een duur tussen de 0 en 100 dagen. Het aandeel aan veenbodems in Vlaanderen is zeer beperkt (0.05%), dus deze resultaten zullen beperkt voorkomen, en moeilijk terug te vinden op een kaart.

Om dit luik rond agrarische droogtedagen af te sluiten, worden nog enkele gemiddelde cijfers over Vlaanderen meegegeven over de stijging aan duur van agrarische droogtes bij toenemende terugkeerperiodes. Op Vlaamse schaal zijn er gemiddeld 2 droogtedagen bij een terugkeerperiode van 2 jaar, 10 bij een terugkeerperiode van 5 jaar, 19 bij een terugkeerperiode van 10 jaar, 32 bij een terugkeerperiode van 25 jaar en 37 bij een terugkeerperiode van 50 jaar.



Figuur 3-6 : De relatieve frequentie van het aantal droogtedagen met een 50-jarige terugkeerperiode per textuur.

### 3.1.3 Jaarlijkse droogte-intensiteit

Naast de duur van de droogte-events in de bodem, werd ook de ernst ervan bepaald via een inschatting van de droogte-intensiteit. Zo is het mogelijk dat een droogtestressperiode lang aanhoudt, maar geen grote gevolgen heeft doordat het steeds kleine bodemvochtttekorten betreft. Het kan evenwel ook zijn dat het tekort aan bodemvocht niet lang duurt, maar wel zeer hevig is. Beide events kunnen als even ernstige worden gecatalogeerd, terwijl hun duur sterk verschilt. Beide indicatoren zijn dus nodig om droogte-events kunnen karakteriseren.

De intensiteit van agrarische droogte wordt gekwantificeerd als het totale volumetekort aan bodemvocht op jaarbasis. Er wordt gesproken van een tekort wanneer een specifieke bodemvochtdrempel wordt onderschreden (zie §2.4.3). Doordat het bodemvocht jaarlijks varieert tussen de 0% en 100%, en dit geldt voor iedere pixel in Vlaanderen, is het mogelijk de intensiteit over alle pixels over Vlaanderen te vergelijken en te beoordelen. Ondanks de complexe eenheid van het volumetekort als een cumulatief van een percentage bodemvocht, geven de kaarten een duidelijk inzicht in de ernst van de bodemvochtttekorten. Figuur 3-7 toont de intensiteitskaarten voor agrarische droogte voor de terugkeerperiodes van 1, 5, 10 en 50 jaar.

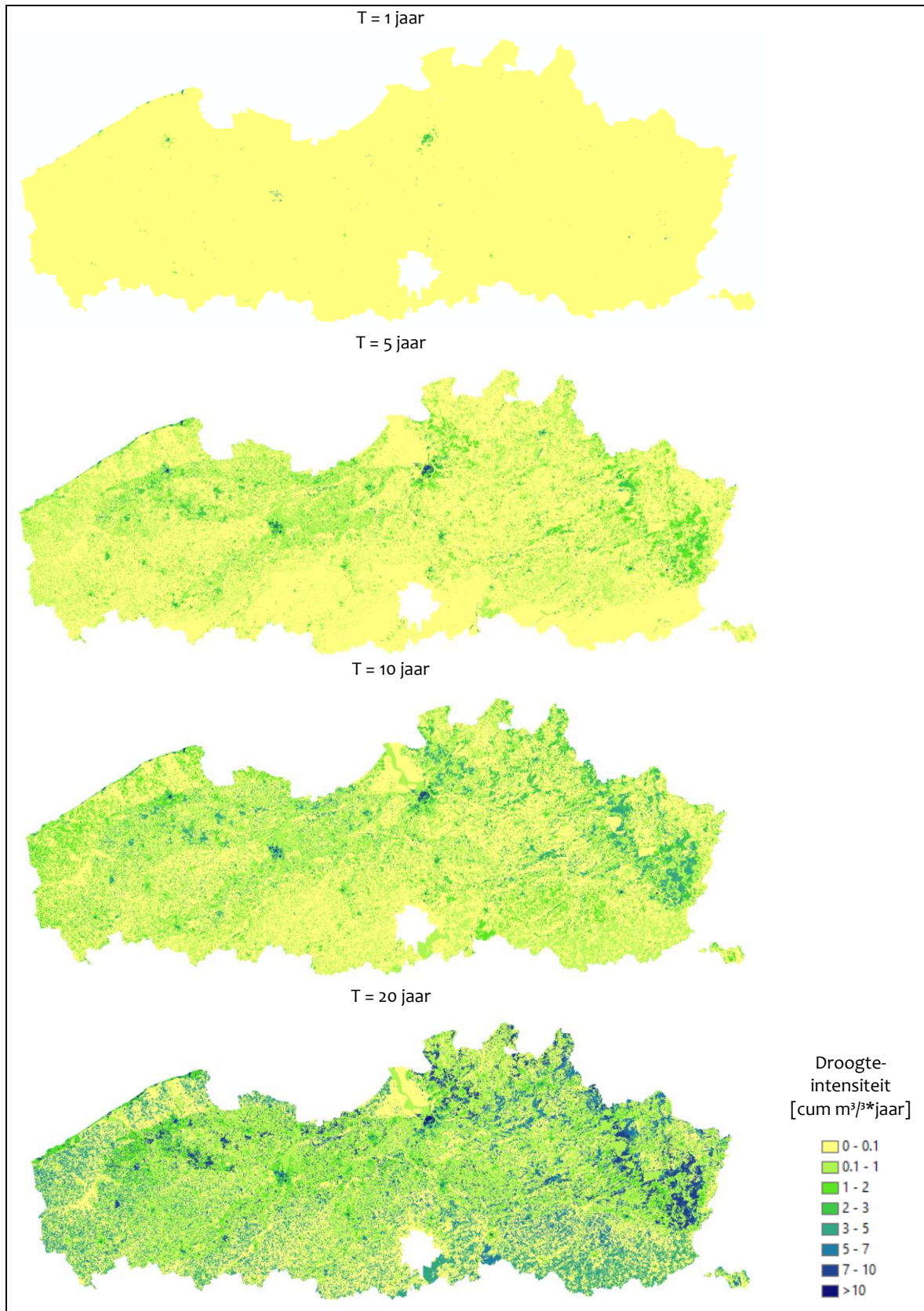
De resultaten liggen perfect in de lijn met de duurkaarten (§3.1.2). Bij de laagste terugkeerperiodes worden steden als Gent, Brugge en Antwerpen zichtbaar in de kaarten. Bij hogere terugkeerperiodes merken we ook boomgaarden en bosgebied, zandbodems en andere steden op in de kaarten. Later vertonen ook de overige landgebruiken en bodemtypes een zichtbare intensiteit. Deze overeenkomst met de duurkaarten is logisch, gezien pas een intensiteit kan berekend worden als er zich een droogte-event in de bodem voordoet. Dezelfde plaatsen zullen dus in dezelfde frequentiekaart naar voren komen. Uit de kaarten valt op te maken dat de zones met de hoogste intensiteit ook vaak de zones met het hoogste aantal droogtedagen zijn. Hoe langer een droogte-event duurt, hoe hoger zijn intensiteit. Zo zullen de steden bij een terugkeerperiode steeds gekenmerkt worden door de hoogste tekorten.

Door het grote verschil aan droogtedagen binnen eenzelfde frequentiekaart, is het moeilijk om de invloed van het landgebruik en bodemtype te analyseren op de intensiteit. Om dit verder te evalueren wordt de grootteorde van het bodemvochtttekort ingeschat, onafhankelijk van de duur van het event. Er wordt een bewerking doorgevoerd waarbij de intensiteit per droogtedag wordt berekend en dat voor de verschillende terugkeerperiodes. Op die manier wordt het mogelijk te achterhalen waar in Vlaanderen, en voor welke combinatie van bodemtype en landgebruik droogte in de bodem meteen hard kan toeslaan. Dit kan een aanleiding geven om daar eerst maatregelen te treffen wanneer een droogteperiode zich aankondigt. Deze kaarten worden getoond in Figuur 3-8 voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.

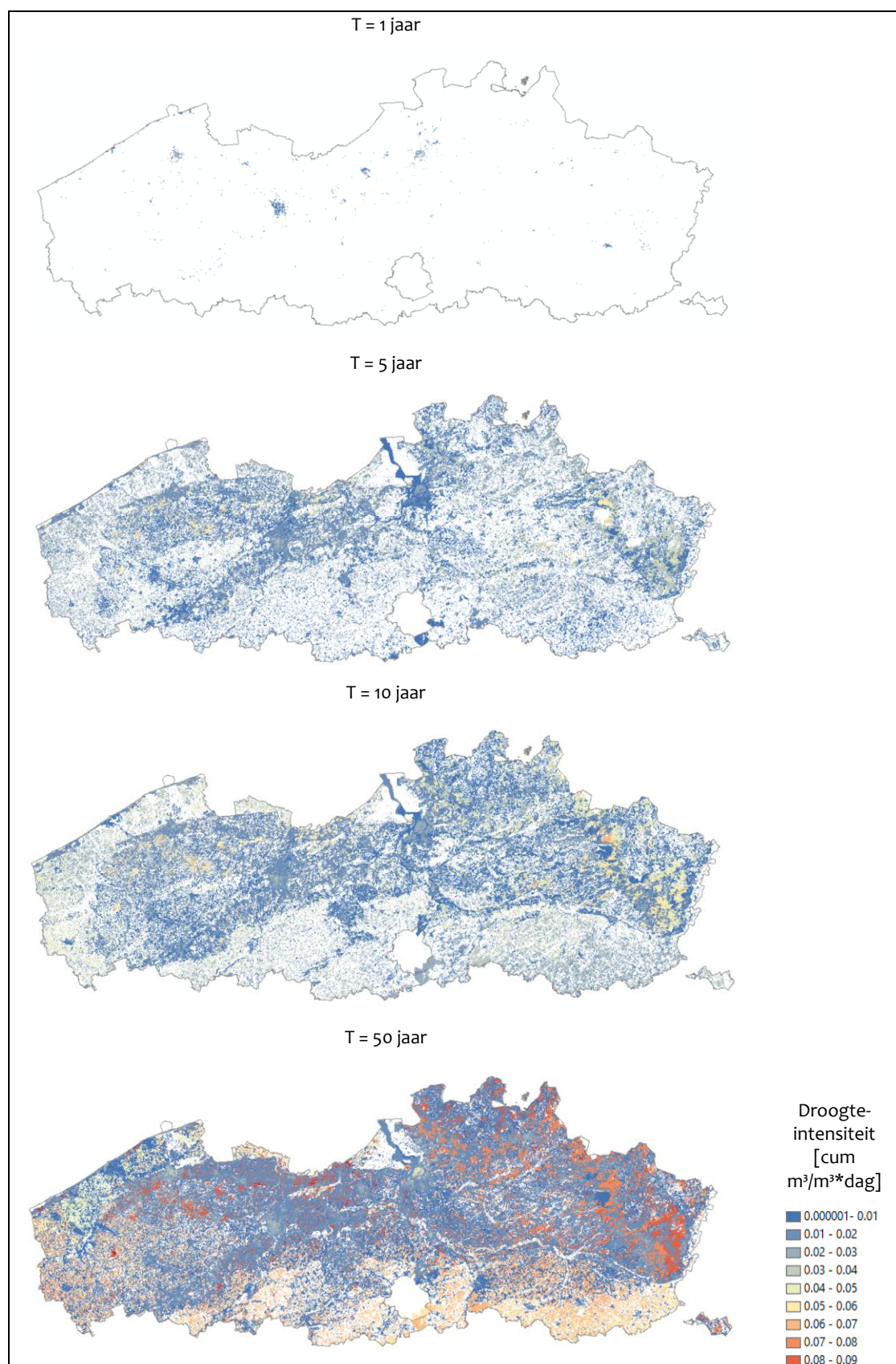
Ook in deze kaarten komen dezelfde resultaten naar voor bij een terugkeerperiode van 1 jaar. Daar zien we enkel de grootste steden, daar enkel ter hoogte van deze bodemvochtttekorten worden gemodelleerd. De steden komen echter minder naar voren bij de andere terugkeerperiodes. Dit houdt in dat de tekorten vaak beperkt zijn per dag, snel optreden, maar ook zeer lang aanhouden. Bij een terugkeerperiode van 5 en 10 jaar zien we opnieuw bekende patronen. Fruitgaarden en bossen worden zichtbaar en hebben meteen de hoogste intensiteit per dag. Hieruit kan men concluderen dat fruitgaarden en bossen veel bodemwater gaan onttrekken ter verdamping, en de drempel meteen goed gaan onderschrijven en dat ze dat ook vaak voor lange periodes zullen doen, zoals eerdere resultaten met betrekking tot de droogteduur al leerden. Qua bodem zijn er ook patronen te herkennen bij deze terugkeerperiodes. De kleizones aan de kust springen er ook uit. Ondanks de droogte-events er meestal van korte duur zijn, kunnen ze wel intens zijn. Eenzelfde vaststelling geldt voor de leembodems in het zuiden

van Vlaanderen. Ook zij zijn duidelijk te onderscheiden in de kaart qua hoge intensiteit per dag. De zandbodems zijn terug te herkennen, maar niet omwille van hun hoge intensiteit per dag; wel omdat ze bijna allemaal zijn ingekleurd met een lage intensiteit en dat reeds bij een terugkeerperiode van 5 jaar. Met andere woorden, droogte in zandbodems zal snel optreden, maar is qua dagelijks intensiteit niet het hoogste in Vlaanderen. Klei en leembodems doen op dat vlak slechter met een hogere intensiteit. Bij een terugkeerperiode van 50 jaar kunnen deze vaststellingen doorgetrokken worden, maar is het allemaal meer uitgesproken. Opvallend is zeker de hoge intensiteit per dag in de leemstreek.





Figuur 3-7 : Intensiteit van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.



Figuur 3-8 : Dagelijkse intensiteit van agrarische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.

## 3.2 Agrarische droogtekaarten – toekomstig klimaat

De droogtekaarten werden eveneens opgesteld voor de tijdshorizonten 2050 en 2100 (zie §2.4.3). In onderstaande secties worden deze agrarische kaarten toegelicht en vergeleken met deze uit de huidige klimaatcondities.

### 3.2.1 Jaarlijks relatief bodemvochtminimum

Net zoals in paragraaf 3.1.1 worden een aantal frequentiekaarten voor jaarlijks relatief bodemvochtminima getoond, maar hier worden ze vergeleken met dezelfde kaarten voor de tijdshorizonten 2050 en 2100.

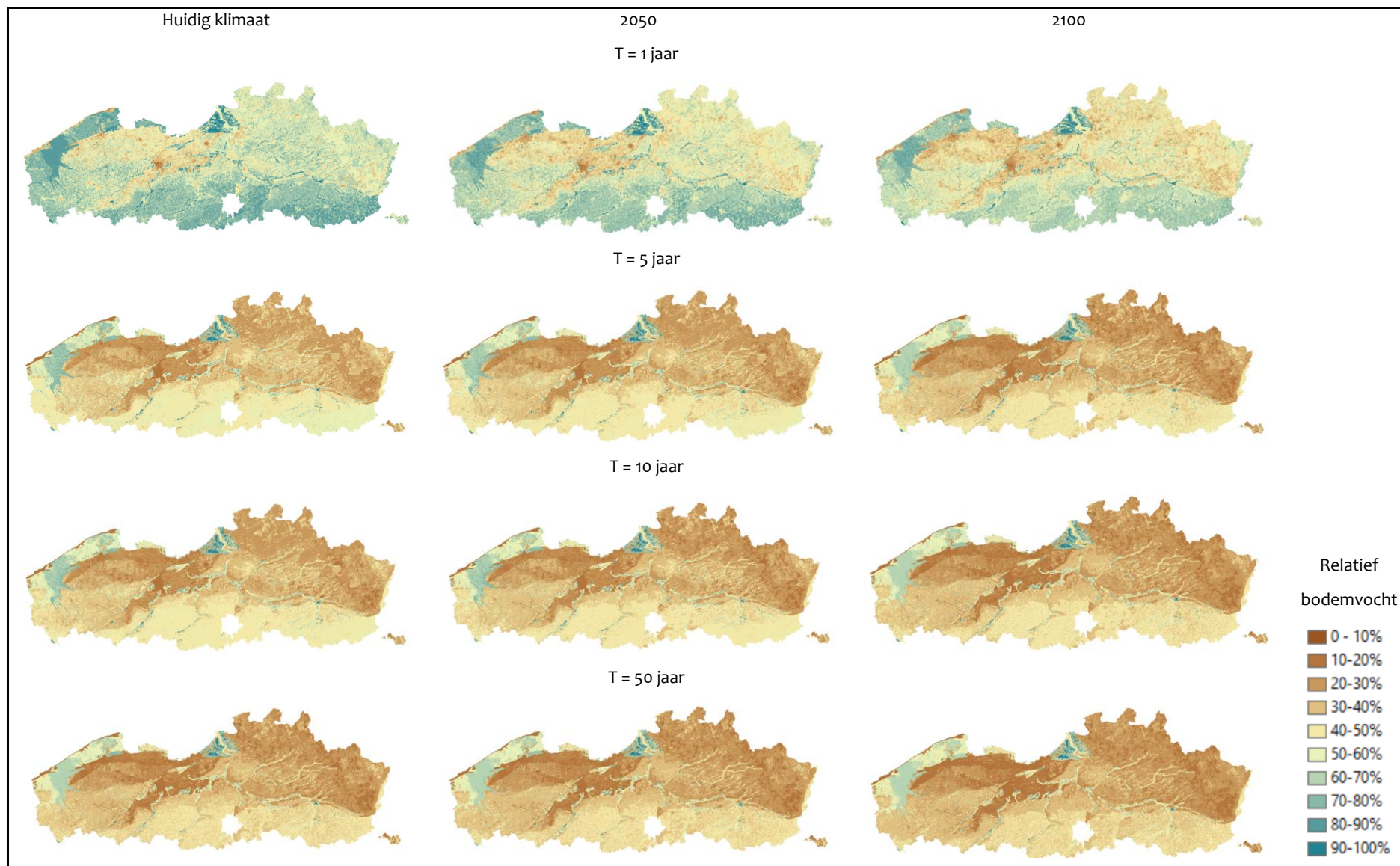
De patronen, zoals waarneembaar in de kaarten voor het huidige klimaat, en beschreven in paragraaf 3.1.1, blijven ook zichtbaar in de kaarten 2050 en 2100. De scenario's zullen een verdroging in de hand werken, gezien voor alle terugkeerperiodes lagere minima worden vastgesteld. Deze afnames zullen groter zijn naarmate we verder in de toekomst kijken. 2050 belooft dus lagere minima te geven dan de huidige minima en 2100 dan weer lagere minima dan 2050. Deze veranderingen zijn niet steeds makkelijk waarneembaar in de kaarten, maar Tabel 3-1 vat de resultaten over Vlaanderen samen in cijfers. Per terugkeerperiode werd de gemiddelde waarde en de totale range aan gesimuleerde minima over Vlaanderen berekend. Bij de hogere terugkeerperiodes blijkt de afname aan bodemvocht veel minder duidelijk. Er worden in het huidig klimaat bij hoge terugkeerperiodes reeds lage en minimale bodemvochtgehalten bereikt. Dergelijke minima zijn gekend als het residueel bodemvocht. Het residueel bodemvocht is het vochtgehalte van de bodem waarbij een verdere toename van de zuigspanning geen significante veranderingen in het vochtgehalte meer veroorzaakt. Eenmaal minima nabij dit residueel bodemvocht worden bereikt, kunnen de minima niet veel verder meer afnemen door drogere klimaatcondities, maar zullen die minima wel langer aanhouden. Hiervoor werden de overige droogte-indicatoren in het leven geroepen, die focussen op de duur en ernst van droogte-events. We verwijzen voor die resultaten naar de droogteduurkaarten en verandering in het aantal droogtedagen in paragraaf 463.2.2.

Tabel 3-1 : Overzicht aan bodemvochtminima over Vlaanderen voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.

Terugkeerperiode	Huidig klimaat		2050		2100	
	Gemiddeld [%]	Minimum - maximum [%]	Gemiddeld [%]	Minimum - maximum [%]	Gemiddeld [%]	Minimum - maximum [%]
1 jaar	62	16-100	57	15-100	53	16-100
2 jaar	46	14-100	42	13-100	38	11-98
5 jaar	40	13-98	38	11-98	36	10-98
10 jaar	38	11-97	37	11-98	35	10-98
25 jaar	35	10-96	35	10-96	34	10-96
50 jaar	35	10-96	34	10-96	33	9-96

De afname aan minima is wel duidelijk voor de lagere terugkeerperiodes. Voor een terugkeerperiode van 1 jaar – ofwel de natste zomer van de voorbije 50 jaar – zijn de bodemvochtminima nog relatief hoog ten opzichte van zijn residueel vochtgehalte, en zullen deze onder de droge klimaatscenario's nog aanzienlijk kunnen afnemen. Over Vlaanderen zakken deze van 62% in het huidig klimaat naar 57% voor 2050 en naar 53% voor 2100. Bij een terugkeerperiode van 2 jaar zijn de veranderingen van dezelfde grootteorde, met een gemiddeld vochtgehalte van 46%, 42% en 38% onder respectievelijk het huidig klimaat, 2050 en 2100. Voor een terugkeerperiode van 5 jaar zijn die veranderingen al beperkter, van 40% onder het huidig klimaat tot 36% in 2100.

De ranges met maximale en minimale waarden van bodemvocht zijn vrij constant over de verschillende terugkeerperiodes en de verschillende klimaatcondities. De pixels met maximale waarden bevinden zich vaak in valleien, alluviale vlaktes en kleiige zones, waar het klimaat weinig vat op heeft, maar de vochttoestand wordt bepaald door lokale condities, waardoor deze locaties steeds zeer vochtig blijven. Zoals eerder al gepresenteerd (§3.1.1) blijkt daarenboven (zware) klei zeer goed zijn bodemwater steeds op een hoog peil te houden. De minimale waarden uit de range zijn ook vrij constant over de terugkeerperiodes en klimaatsimulaties in vergelijking met de gemiddelde toestand in Vlaanderen. Dit is toe te schrijven aan de ondergrens van het bodemvocht. Zelfs bij lage terugkeerperiodes zijn er droge locaties te vinden, waar bodemwater niet kan worden vastgehouden. Hierbij denken we voornamelijk aan stedelijke omgevingen waar de neerslag onvoldoende kan infiltreren om het bodemvocht aan te vullen, of aan zandbodems, met een sterk transpirerende vegetatie. Op die locaties spelen andere factoren dan het klimatologische, en blijft het bodemvocht er permanent laag.



Figuur 3-9 : Minima aan relatieve bodemvochtgehalten voor een terugkeerperiode van 50 jaar voor huidig klimaat, 2050 en 2100.

### 3.2.2 Jaarlijks aantal droogtedagen

Eenzelfde analyse kan gemaakt worden voor de duur van de droogteperiodes. Figuur 3-10 toont aan hoe de duur van droogte-events volgens hun terugkeerperiode over Vlaanderen kan veranderen onder een toekomstig klimaat.

De kaarten geven meteen aan dat tegen 2050 en 2100 de duur van een droogte in de bodem hoger zal zijn voor eenzelfde terugkeerperiode. Waar bij de laagste terugkeerperiode slechts ter hoogte van enkele steden reeds onvoldoende bodemvocht werd vastgesteld, is dat bij 2050 in meer steden, en ook al in het buitengebied waar te nemen, en tegen 2100 is dat nog verder uitgebreid. De simulaties werden uitgevoerd met kaarten waarbij de verharding constant blijft in de tijd. Indien de toenemende verhardingsgraad in rekening gebracht zou worden, dan zou er een nog meer geprononceerd effect zijn. Niet alleen zullen het aantal zones met droogtestress toenemen door klimaatverandering, maar ook voor de zones die reeds geconfronteerd werden met een bodemvochttekort, zal het tekort langer aanhouden. Het aantal droogtedagen zal voor eenzelfde terugkeerperiode hoger liggen. De kleurveranderingen in de kaarten geven dit weer, maar dit wordt ook duidelijk via de gegevens uit Tabel 3-2. Die tabel presenteert gemiddeldes over Vlaanderen aan droogteduur, en dat zowel voor de verschillende terugkeerperiodes als voor de verschillende klimaatprojecties.

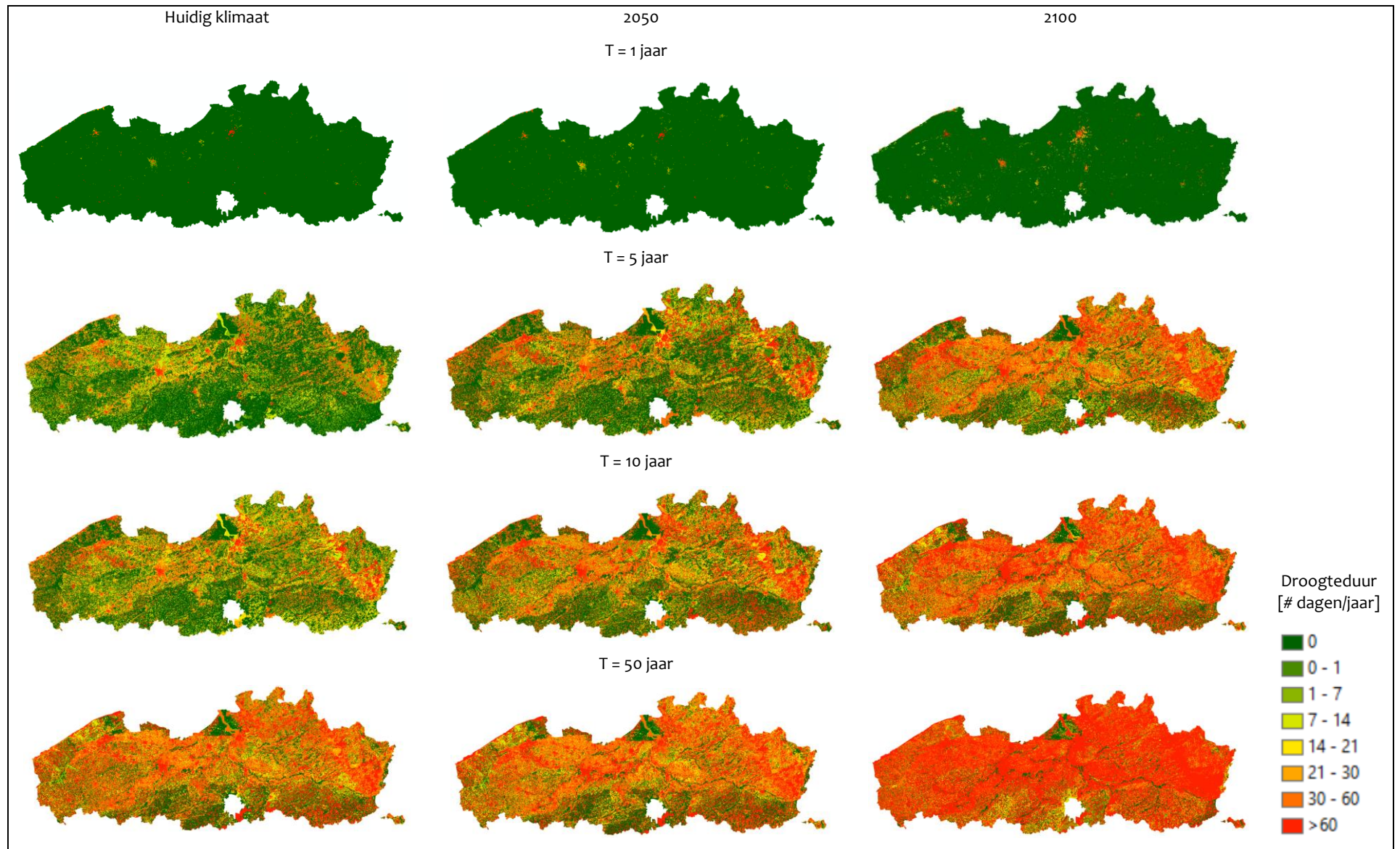
Tabel 3-2 : Overzicht van het aantal (bodemvocht) droogtedagen over Vlaanderen voor huidig klimaat, 2050 en 2100.

Terugkeerperiode	Huidig klimaat		2050		2100	
	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]
1 jaar	<1	0-163	<1	0-151	<1	0-150
2 jaar	2	0-249	6	0-246	17	0-252
5 jaar	10	0-281	20	0-290	34	0-302
10 jaar	19	0-326	28	0-336	48	0-326
25 jaar	32	0-352	38	0-355	59	0-361
50 jaar	37	0-365	42	0-357	76	0-365
Gemiddelde	6	0-249	10	0-250	20	0-253

De tabel en kaarten leren dat het klimaatsignaal over Vlaanderen uniform en zeer duidelijk is. We evolueren naar langer durende droogtestressperiodes. Voor events, die zich bijvoorbeeld om de 2 jaar voordoen, zal de gemiddelde duur stijgen van 2 dagen (huidig klimaat) naar 6 dagen (2050) en uiteindelijk naar 17 dagen (2100). Deze toename is vele malen groter bij een terugkeerperiode van 50 jaar waarbij men gaat van gemiddeld 37 dagen (huidig klimaat) naar 42 dagen (2050) en uiteindelijk naar 76 dagen (2100). We dienen hier wel rekening te houden met het feit dat de cijfers gemiddelden over Vlaanderen zijn. Bij een terugkeerperiode van 2 jaar zijn er nog weinig gebieden waar droogte in de bodem merkbaar is en ondervindt het merendeel van de oppervlakte geen droogte (= 0 droogtedagen). Onder de 2100 klimaatcondities is bij deze terugkeerperiode nog steeds maar een kleine oppervlakte met droogtestress gekenmerkt, waardoor de gemiddelde toename beperkt is. Bij hogere terugkeerperiodes zijn grote delen van Vlaanderen ingekleurd met droogtedagen onder het huidige klimaat. Enerzijds zal het aantal dagen sterk gaan toenemen voor deze zones en anderzijds komen er nog een aantal zones bij die meteen een hoog aantal droogtedagen zullen hebben tegen 2100. Waar onder het huidige klimaat zelfs onder de meest extreme omstandigheden van de voorbije 50 jaar, er nog

oppervlaktes konden teruggevonden worden zonder vochttekorten in de bodem, is deze oppervlakte tegen 2100 sterk gereduceerd. Steeds meer zones zullen geaffecteerd worden en de vegetatie of teelten erop zullen droogtestress gaan ondervinden door een tekort aan bodemvocht in de ondergrond, en dit voor periodes van één maand en langer. Er is eveneens een zeer grote spreiding waar te nemen over Vlaanderen. Dit werd ook al opgemerkt en besproken bij de kaarten onder het huidige klimaat (§3.1.2). Die spreiding is nagenoeg constant gebleven. Dat betekent dat er zones zijn in Vlaanderen waar de klimaatcondities weinig invloed hebben op het bodemvochtgehalte in de bodem. Enerzijds zijn er gebieden (pixels) waar permanent hoge vochtgehalten worden gerealiseerd. Dit zijn onder andere de kleibodems, valleigebieden, specifieke combinaties tussen landgebruik en bodemtypes. Anderzijds zijn er pixels die het ganse jaar door een tekort aan bodemvocht hebben. Het gaat hierbij vooral om de verstedelijkte zones, waar infiltratie sterk beperkt wordt. Dit verklaart mede de brede ranges aan droogtedagen bij de verschillende terugkeerperiodes.

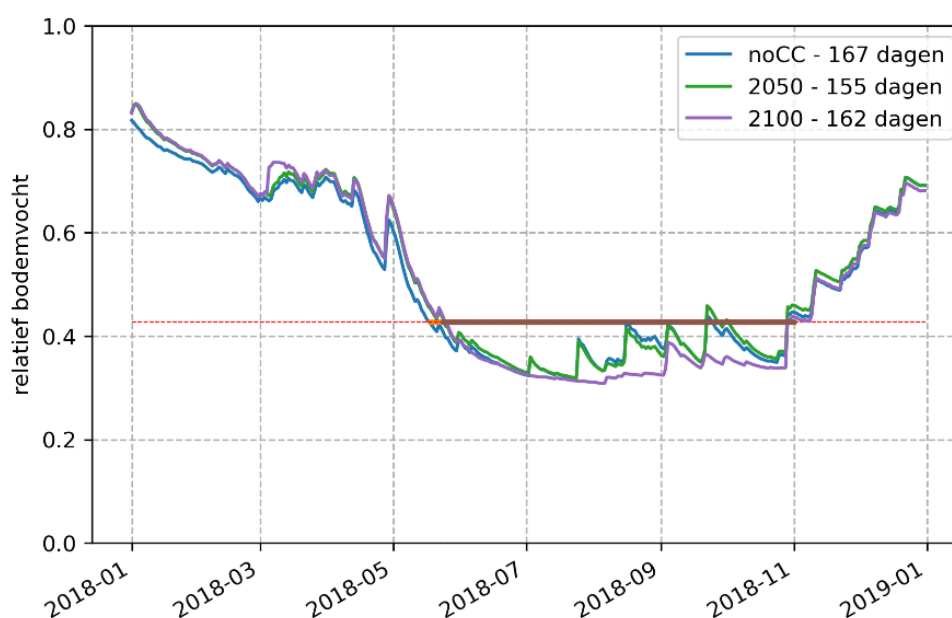
De impact van het gewijzigd klimaat is het sterkst merkbaar voor 2100. De toename in droogteduur is nog relatief klein van het huidige klimaat naar 2050 toe ten opzichte van de toename tussen 2050 en 2100. Tussen 2050 en 2100 worden zeer sterke stijgingen waargenomen in de duur van de droogteperiodes. Dit wordt ook teruggevonden in de kaarten uit Figuur 3-10 en Tabel 3-1. De toename in duur is dus eerder beperkt naar 2050 toe. Op lokale schaal kunnen zelf stagnaties en lichte afnames in duur worden vastgesteld voor 2050. Dit treedt op ter hoogte van specifieke combinaties van landgebruik en bodemtype, en die onder het huidige klimaat reeds een hoog aantal droogtedagen ondervinden. Dergelijke locaties zijn beschreven in §3.1.2. Als de droogte lang aanhoudt, kan ze seizoenen overspannen. Het klimaatveranderingssignaal werkt in op de seizoenen, waarbij elk seizoen een eigen typische verandering krijgt van zijn neerslag en evapotranspiratie. Voor de lente kan in het gebruikte laagscenario 2050, afhankelijk van de overschrijdingskans van het neerslagevent, een toename aan neerslag toegekend worden (Van Uytven en Willems, 2016). Deze toename aan neerslag is mogelijk te groot in vergelijking met de toename aan evapotranspiratie, waardoor dit leidt tot nattere condities in de lente. Hierdoor kunnen zones die onder het huidige klimaat gekenmerkt werden door een hoog aantal droogtedagen (over meerdere seizoenen), naar 2050 minder droogtedagen hebben door deze nattere condities in de lente. Een gelijkaardig fenomeen vindt plaats in de herfst en dit kan eveneens de verlenging van een droge periode verhinderen.



Figuur 3-10 : Jaarlijks aantal droogtedagen voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat en condities 2050 en 2100.



In Figuur 3-11 wordt dit geïllustreerd voor de droge zomer van 2018 aan de hand van een voorbeeld waarbij een vaste drempel wordt gehanteerd. Het voorbeeld is ter illustratie. In de droogtekaarten wordt gewerkt met een variabele drempel en is dit effect minder uitgesproken aanwezig. De figuur toont het simulatieresultaat voor bodemvocht onder de verschillende klimaatcondities, samen met de droogtedrempel. Door de natte condities (hogere neerslagvolumes) voor de lente in 2050 en 2100, wordt een hoger relatief bodemvocht gesimuleerd in het voorjaar ten opzichte de huidige klimaatcondities. Hierdoor zal de bodemvochtdrempel pas op een later tijdstip onderschreden worden, wat resulteert in een kortere droogteperiode. Tijdens de zomermaanden geven de klimaatscenario's, vooral het 2100-scenario, een duidelijke afname in neerslaghoeveelheden. Dit resulteert in een sterke afname van het relatief bodemvocht ten opzichte van de huidige condities. Hiermee gaat ook een grotere intensiteit gepaard omdat het totale volume onder de drempel voor 2100 groter is. Met andere woorden het klimaatveranderingssignaal kan resulteren in een stagnatie tot lichte afname aan droogteduur, maar zijn intensiteit kan daarbij wel sterk toenemen. Het is dus belangrijk steeds de verschillende indicatoren samen te beschouwen.



Figuur 3-11: Jaarlijks aantal droogtedagen en de droogte-intensiteit voor extreem zomerevent in het huidige klimaat en het overeenkomstig event in het toekomstig klimaat voor droogteID 133600009061 (gras/lemig zand), met p-waarde 0.71.

De klimaatverandering zal zich eveneens manifesteren in een frequentieverschuiving van de droogte-events. Dit betekent dat een extreem event in het huidige klimaat zich frequenter zal voordoen in een toekomstig klimaat. Als we ons baseren op de gemiddelde cijfers voor Vlaanderen (Tabel 3-2) zien we dat events met een terugkeerperiode van 50 jaar in het huidige klimaat gemiddeld 37 dagen duurt. Dit is ongeveer even lang als een event met een terugkeerperiode van 25 jaar in 2050 en met een terugkeerperiode van 5 jaar in 2100. Met andere woorden op basis van deze cijfers kan men besluiten dat een zeldzaam event dat zich vandaag eenmaal om de 50 jaar voordoet, tegen 2050 tweemaal zo vaak – om de 25 jaar - zal voorkomen, en tegen 2100 om de 5 jaar zal voorkomen. Dit is een vereenvoudigde inschatting via de gemiddelde cijfers, maar als we enkele punten uitlichten met verschillende combinaties van landgebruik en bodemtype komen dezelfde frequentieverschuivingen naar voor.

### 3.2.3 Jaarlijkse droogte-intensiteit

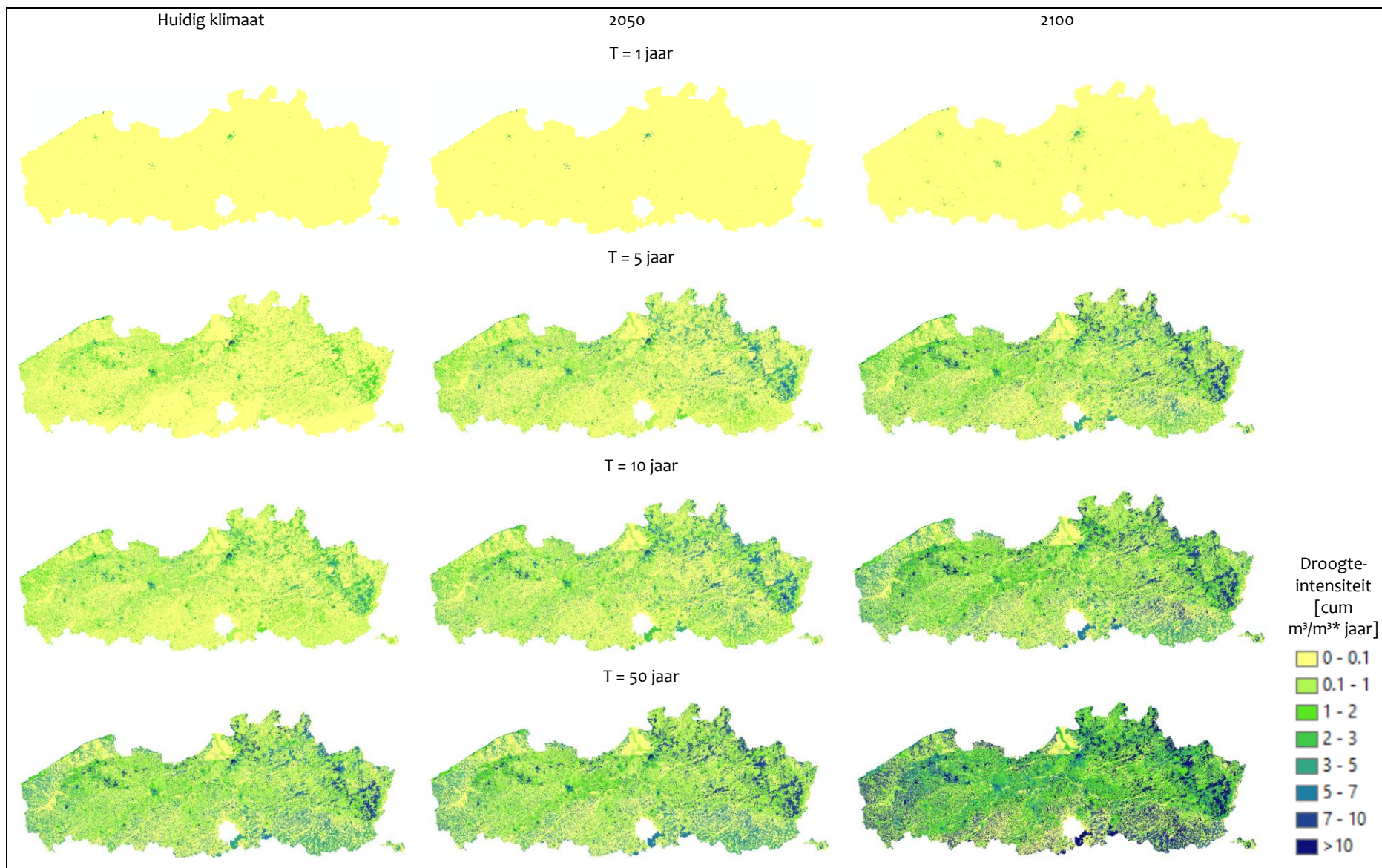
De droogte-intensiteit werd ook gekwantificeerd en gekarteerd voor het scenario 2050 en 2100. De kaarten worden getoond in Figuur 3-12. De resultaten zijn zeer gelijkaardig qua patronen in de droogte-duurkaarten. De indicatoren intensiteit en duur hangen immers sterk samen. Er kan pas een duur en intensiteit berekend worden als het bodemvocht voldoende laag is en er sprake is van een event. De ruimtelijke patronen bij de verschillende terugkeerperiodes zullen dus exact hetzelfde zijn.

Ook qua grootteorde van de intensiteiten tonen de verstedelijkte omgevingen de grootste tekorten onder het huidige klimaat (§3.1.3), en ook onder het scenario 2050. Voor 2100 wordt dit patroon doorbroken en worden de grootste tekorten niet langer daar aangetroffen, maar wel ter hoogte van de bossen en boomgaarden. De droogteduur blijft evenwel het hoogst in steden, hetgeen zoveel betekent als dat de droogtes in bossen en boomgaarden ten opzichte van steden korter duren maar wel intenser zijn onder extreme condities. Dit wordt opgemerkt vanaf een terugkeerperiode vanaf 50 jaar huidig klimaat en in de resultaten voor het horizont 2100.

Het klimaateffect wijst, net als de overige droogte-indicatoren, richting drogere condities, waarbij grotere tekorten aan bodemvocht worden vastgesteld voor 2050, en nog meer voor 2100. Opnieuw vallen ook de brede ranges aan intensiteit bij elke terugkeerperiode op, waarbij er steeds zones optreden met geen of amper droogteverschijnselen in de bodem, en andere die zeer hoge intensiteiten tonen. Zelfs naar 2100 zijn er zones waar het klimaat geen impact op heeft en die geen droogte tonen.

Tabel 3-3 : Overzicht aan (bodemvocht) droogte-intensiteit over Vlaanderen voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.

Terugkeer- periode	Huidig klimaat		2050		2100	
	Intensiteit [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Minimum- maximum [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Intensiteit [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Minimum- maximum [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Intensiteit [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Minimum- maximum [cum m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
1 jaar	0.01	0-13	0.01	0-13	0.01	0-13
2 jaar	0.04	0-20	0.14	0-21	0.64	0-22
5 jaar	0.27	0-24	0.74	0-25	1.4	0-26
10 jaar	0.57	0-25	1.11	0-26	1.59	0-28
25 jaar	1.38	0-27	1.55	0-27	2.62	0-30
50 jaar	1.63	0-28	1.86	0-28	4.03	0-33
Gemiddelde	0.18	0-20	0.36	0-21	0.84	0-22



Figuur 3-12 : Jaarlijks droogte-intensiteit voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.

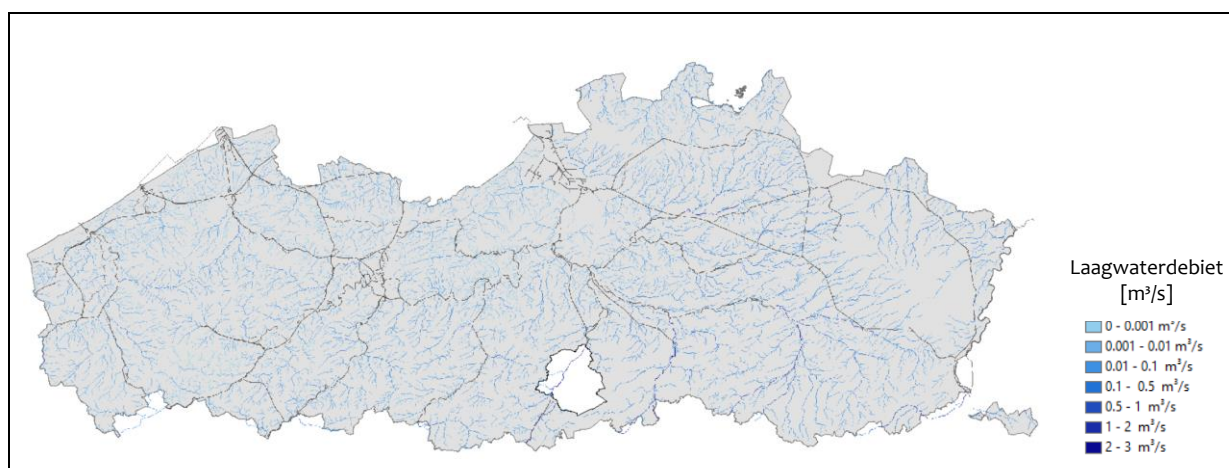
## 4 Hydrologische droogtekaarten Vlaanderen

Vergelijkbare kaarten als voor de droogteverschijnselen in de bodem konden opgemaakt worden voor de droogteverschijnselen in de waterloop. Hieronder worden deze nader toegelicht.

### 4.1 Hydrologische droogtekaarten – huidig klimaat

#### 4.1.1 Jaarlijks laagwaterminimum

Een eerste set aan kaarten focust op de laagwaterdebieten en geeft per rivierpixel weer wat zijn laagwaterdebiet is volgens een terugkeerperiode. Figuur 4-1 geeft het voorbeeld van de laagwaterdebieten met een terugkeerperiode van 10 jaar. Het is een zeer fijnmazige kaart met een grote hoeveelheid aan informatie. Ze omvat informatie voor de waterlopen tot op orde-niveau 2. Zoals onder weergegeven is het moeilijk de informatie af te lezen en daarom wordt slechts één enkele kaart getoond. Om vaststellingen te doen en conclusies hard te maken, moeten de kaarten worden geopend en geanalyseerd in een GIS-programma.



Figuur 4-1 : Laagwaterdebieten voor een terugkeerperiode van 10 jaar.

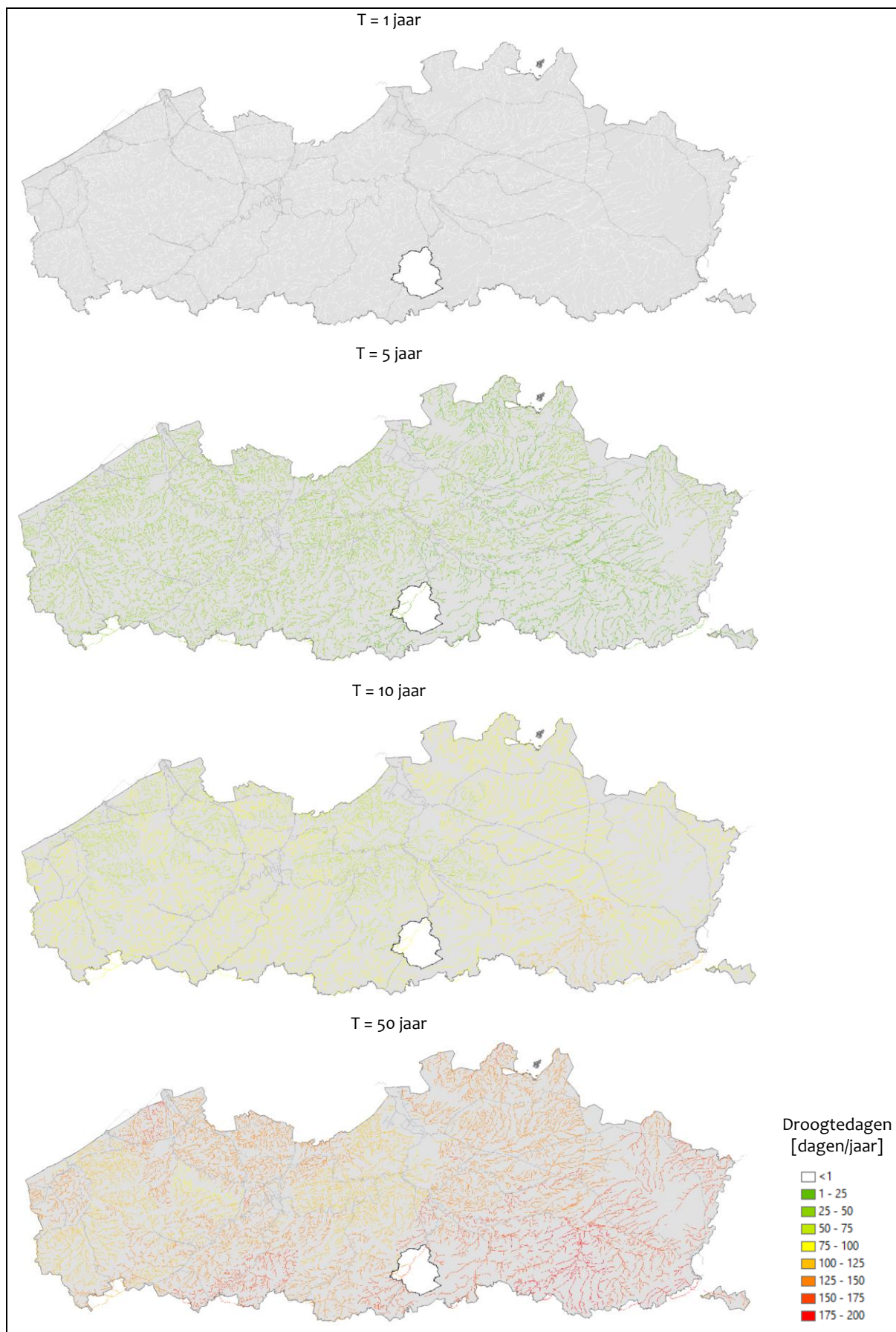
Over de verschillende terugkeerperiodes zien we een afname aan de lokale laagwaterdebieten. Naarmate de terugkeerperiode hoger wordt, zullen de laagwaterdebieten afnemen. Gezien de afvoer in de waterloop bepaald wordt door zijn opwaarts afwateringsgebied, heeft elk punt in de kaart een eigen laagwaterdebiet. In tegenstelling tot bodemvocht, die in elke pixel over Vlaanderen fluctueert tussen 0% en 100%, en de pixels onderling kunnen vergeleken worden, is dit weinig zinvol voor debiet.

Ook dienen we bij gebruik en interpretatie van deze kaarten rekening te houden met de achterliggende modellen. Deze modellen zijn gericht op de simulatie van natuurlijke afvoer, en de resultaten zullen bijgevolg het meest nauwkeurig zijn voor natuurlijk afwaterende gebieden zoals bovenlopen. Voor waterlopen met veel kunstwerken zoals sifons, kokers, stuwen, sterk gestuurde waterlopen zoals polderwaterlopen, maar ook waterlopen die samenvloeien, of op minder dan 100m (modelresolutie) van elkaar stromen moeten de resultaten met de nodige voorzichtigheid worden benaderd.

#### 4.1.2 Jaarlijks aantal droogtedagen

De laagwatersimulaties werden verwerkt tot droogteduren (zie §2.4.2). Figuur 4-2 geeft voor de waterlopen in Vlaanderen deze gesimuleerde droogteduren weer. Voor deze kaarten is het wel relevant ze te tonen en ze te vergelijken tussen de waterlopen, omdat het aantal droogtedagen wordt berekend per pixel en elke pixel een eigen specifieke drempel heeft waartegen de langetermijnsimulaties worden afgetoetst.

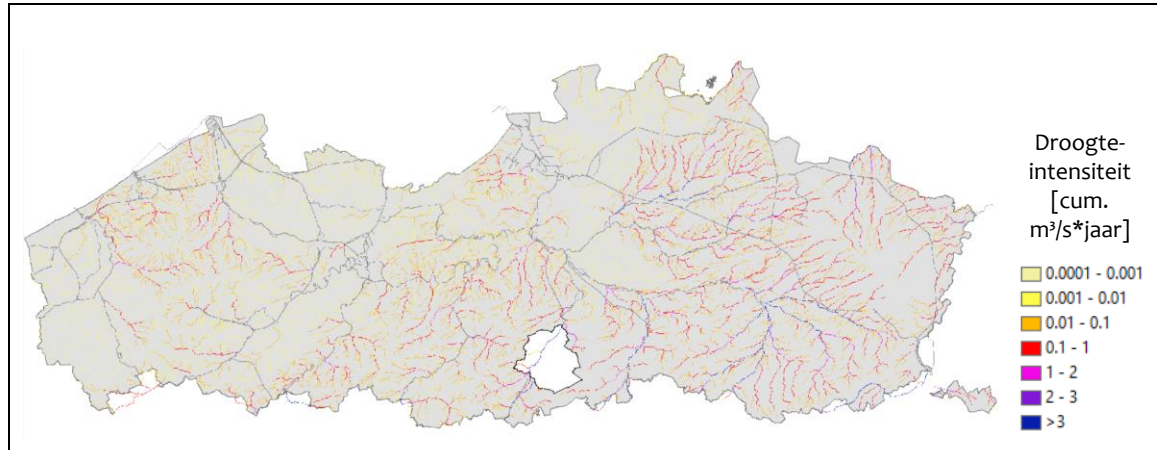
Voor een terugkeerperiode van 1 jaar valt op dat geen enkele waterloop droogte ervaart. De zomerdebieten zijn er van die aard, dat er nog steeds voldoende water beschikbaar is in de waterlopen. Bij een terugkeerperiode van 5 jaar wordt de laagwaterdrempel wel overschreden en dit in alle streken van Vlaanderen. De onderschrijding varieert er van 4 tot 56 dagen en duurt gemiddeld 1 maand (zie verder in Tabel 4-1). De ruimtelijke variatie is beperkt en de verschillen qua droogtedagen eerder klein. De westelijke bekkens lijken daarbij wel een hoger aantal droogtedagen te tonen dan de oostelijke stroomgebieden. Bij een terugkeerperiode van 10 jaar zijn de verschillen al veel groter, met variaties tussen de 48 en 120 dagen. De bekkens in het oosten van Vlaanderen blijken nu een hoger aantal droogtedagen te tellen. De laagwaterdebieten zullen er langer aanhouden. Eenzelfde verschijnsel zien we bij een terugkeerperiode van 50 jaar, waarbij de droogteduur er tot 6 maand kan duren. In het westen is dit iets beperkter. Een verklaring is niet eenduidig te vinden. Het kan toe te schrijven zijn aan de gebiedseigenschappen zoals topografie, maar ook de modelparametrisaties spelen mogelijk een rol. Het vergt dieper onderzoek om te achterhalen wat aan de basis ligt van de lokale verschillen.



Figuur 4-2 : Duur van hydrologische droogte-events voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar.

### 4.1.3 Jaarlijkse droogte-intensiteit

Figuur 4-3 toont de verdere verwerking naar de droogte-intensiteit, of het totale volumetekort in de waterloop ten opzichte van het 95-percentiel. Enkel de kaart voor een terugkeerperiode van 10 jaar wordt geïllustreerd. De droogte-intensiteit is namelijk terug afhankelijk van omvang van het afwateringsgebied. Hoe groter het afwateringsgebied, hoe hoger de drempel zal liggen, en hoe groter het volume onder de drempel. De intensiteit zal dus toenemen van opwaarts naar afwaarts en dat is ook zeer duidelijk te zien in de kaarten.

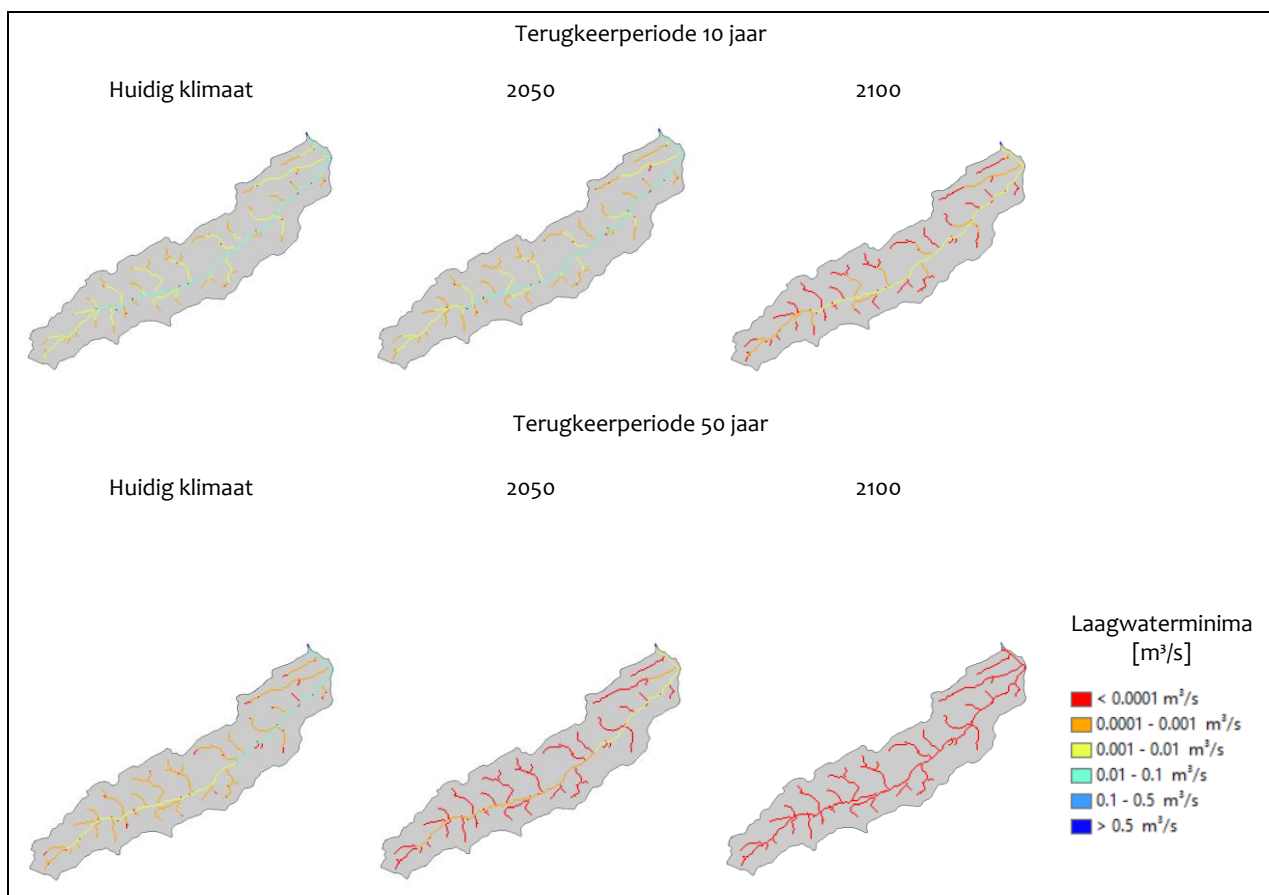


Figuur 4-3 : Intensiteit van hydrologische droogte-events voor een terugkeerperiode van 10 jaar.

## 4.2 Hydrologische droogtekaarten – toekomstig klimaat

### 4.2.1 Jaarlijks laagwaterminimum

De hydrologische droogtekaarten werden ook berekend voor de klimaattoestand in 2050 en 2100 en dat voor de verschillende terugkeerperiodes. De laagwaterminima nemen verder af. Zo zullen minimale afvoeren, die zich enkel opwaarts voordeden, zich naar afwaarts verschuiven. Figuur 4-4 toont dit voor de Velpe als voorbeeld voor een terugkeerperiode van 10 en 50 jaar. Voor de terugkeerperiode van 10 jaar zien we nog een duidelijke verschuiving van de laagwaterdebieten, terwijl dat voor een terugkeerperiode van 50 jaar al minder duidelijk is. Bij een dergelijk extreme terugkeerperiode neigen de laagwaterdebieten naar hun minimum – nuldebieten – en dreigen vele waterlopen droog te vallen. De afvoeren kunnen dan niet verder dalen, de droogte moet dan worden uitgedrukt in de duur dat dergelijke lage debieten aanhouden. Dit toont de noodzaak aan van de indicatoren rond droogteduur en -intensiteit. We zien deze dalingen aan minima over Vlaanderen. Er worden geen figuren voor Vlaanderen getoond, gezien de fijnmazigheid van de resultaten. De veranderingen aan laagwaterminima tonen zich vooral naar 2100. Het effect van de klimaatverandering is veel sterker van 2050 naar 2100, dan de sprong tussen het huidige klimaat en 2050. Het heeft weinig zin deze sprongen uit te drukken met een factor verandering, gezien de debieten zo klein zijn, en er in opwaartse waterlopen vaak amper verschillen zijn van het nuldebiet bij de hoogste terugkeerperiodes.



Figuur 4-4: Laagwaterminima voor de Velp voor a) terugkeerperiode van 10 jaar, en b) terugkeerperiode van 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.

#### 4.2.2 Jaarlijks aantal droogtedagen

Als de laagwaterminima niet verder kunnen dalen bij extreme events, is het beter te kijken naar de duur dat deze minima aanhouden. Tabel 4-1 geeft gemiddeldes voor Vlaanderen weer met de duur van de tekorten in de waterlopen, samen met de range aan minima en maxima. Bij een terugkeerperiode van 1 jaar zal ook naar de toekomst toe geen dreiging naar mogelijk droogte ontstaan. Bij een terugkeerperiode van 2 jaar waren de waterlopen nog gevrijwaard van tekorten onder de huidige klimaatcondities maar tegen 2050 zullen deze tekorten reeds beperkt optreden en tegen 2100 kan dit al behoorlijke proporties aannemen. Dit betekent dat om de 2 jaar in 2100 er gemiddeld over Vlaanderen zich 2 maand aan afvoertekorten zullen voordoen in de waterlopen. Los van enig gebruik van het water voor eender welke sector of doelstelling, zullen enkel door de drogere klimaatcondities de afvoeren dermate afnemen, dat deze tekorten zullen ontstaan. Figuur 4-5 toont verder dat bij een terugkeerperiode van 5 jaar, deze tekorten niet lokaal gebonden zijn, maar optreden over Vlaanderen. Elke waterloop zal geconfronteerd worden met lagere debieten, en onderschrijdingen van zijn laagwaterdrempel. Het gemiddeld stijgt van 1 maand aan tekorten in de huidige condities, tot 2 maand tegen 2050 en ruim 3 maand tegen 2100. Er zit nog wat spreiding op deze aantallen, maar zowel de minima en maxima van de ranges zullen toenemen door klimaatverandering. Deze stijging in duur is zowel absoluut in aantal dagen, als relatief in procentuele toename, het hoogst bij een terugkeerperiode van 5 en 10 jaar. Bij hogere terugkeerperiodes – 25 en 50 jaar - is er nog steeds een evolutie richting drogere condities, maar niet meer zo sterk. Hiertoe kan eenzelfde redenen aangehaald worden als voor de agrarische droogte. De duur is bij deze terugkeerperiode al zo hoog dat zij meerdere

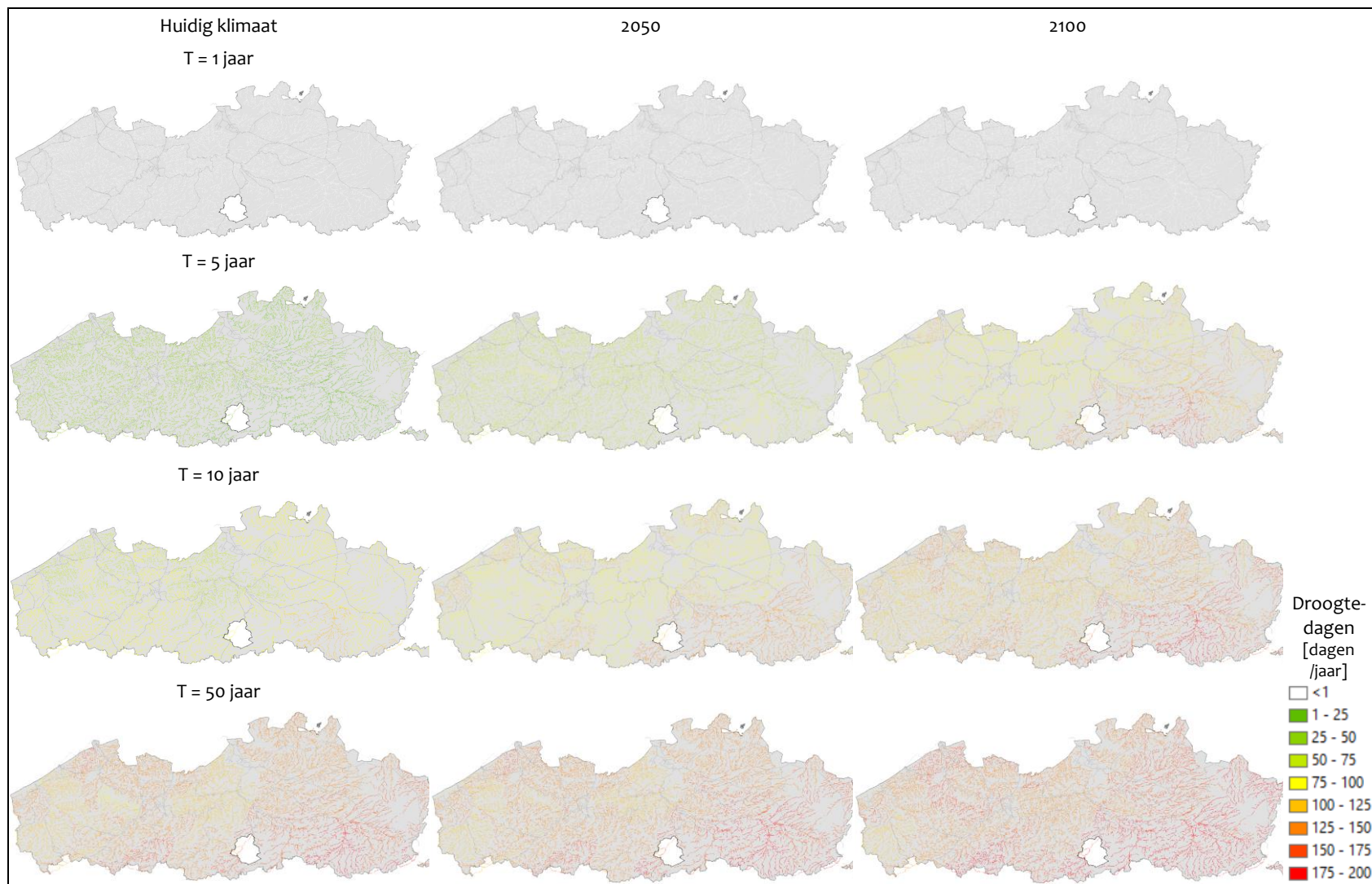


seizoenen overspant. Het klimaatveranderingssignaal werkt in op de seizoenen, waarbij elk seizoen een eigen typische verandering krijgt van zijn neerslag en evaporatie. Voor de lente en herfst wordt nog wel hogere evapotranspiratie voorspeld, maar kan het nattere condities qua neerslag geven, waardoor de toename aan droogtedagen beperkter blijft bij deze terugkeerperiodes. Desondanks blijft de gesimuleerde en voorspelde duur aan tekorten evenwel een zorgwekkende prognose.

De kaarten in Figuur 4-5 tonen ook regionale verschillen zowel in de geschatte duur van droogte-events volgens het huidige klimaat, als in de respons op de veranderingen van de neerslag- en evapotranspiratiepatronen. Een duidelijke link met gebiedseigenschappen is niet meteen gevonden, al komen er wel clusters aan stroomgebieden naar voor die op vergelijkbare wijze reageren.

Tabel 4-1 : Overzicht van het aantal (debiet) droogtedagen in de Vlaamse waterlopen voor het huidige klimaat, 2050 en 2100.

Terugkeerperiode	Huidig klimaat		2050		2100	
	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]	Duur [dagen/jaar]	Minimum-maximum [dagen/jaar]
1 jaar	0	0-0	0	0-0	0	0-0
2 jaar	<1	0-11	12	0-38	62	12-92
5 jaar	32	4-56	68	45-88	104	59-161
10 jaar	81	48-120	101	65-144	126	78-182
25 jaar	131	67-172	131	80-178	150	94-227
50 jaar	140	79-181	143	86-195	161	105-258
Gemiddelde	18	18	31	21-39	63	31-88



Figuur 4-5: Jaarlijks droogtedagen in de waterlopen voor een terugkeerperiode van 1, 5, 10 en 50 jaar voor het huidig klimaat en condities 2050 en 2100.

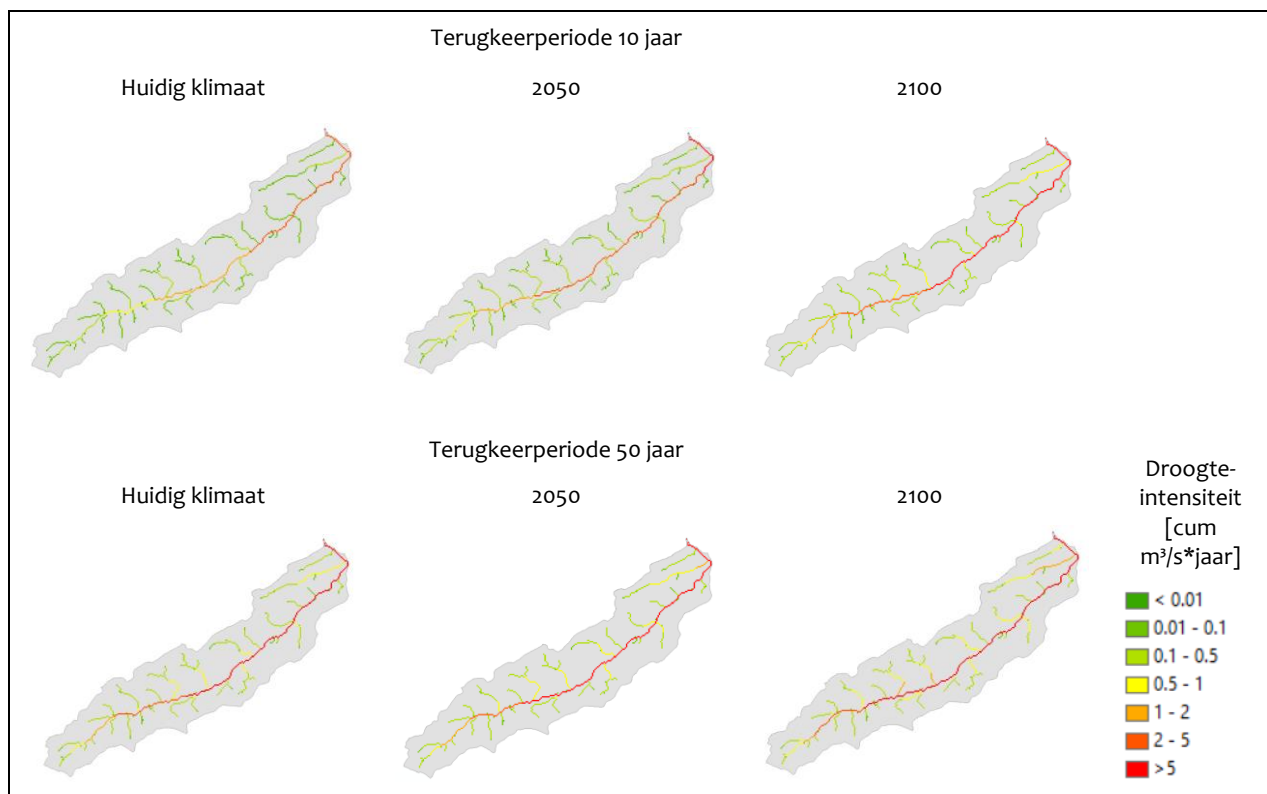
### 4.2.3 Jaarlijkse droogte-intensiteit

Ook de droogte-intensiteit werd berekend voor 2050 en 2100. Figuur 4-6 toont de verandering aan intensiteit voor het Velpse stroomgebied. De resultaten voor Vlaanderen zijn vergelijkbaar, maar voor de duidelijkheid van presentatie wordt er één stroomgebied uitgelicht. Net als de duur van de watertekorten, zullen ook voor het overgrote deel van Vlaanderen de totale volumetekorten toenemen naar 2050 toe, en nog meer naar 2100. Ook hier zien we opnieuw dat de sprong van 2050 naar 2100 groter zal zijn dan de veranderingen en tekorten die ons te wachten zullen staan in 2050. De stijgingen zijn niet te vatten met een constante factor, maar variëren van stroomgebied tot stroomgebied. Een duidelijke reden is hiervoor nog niet gevonden. Tegen 2050 stijgen de tekorten vaak met 150%, terwijl in 2100 een verdubbeling van het volumetekort wordt vastgesteld. Als de tekorten van de voorbije droge zomers 2017, 2018 en 2019 al problemen gaven, kunnen we nog grotere problemen verwachten in de toekomst.

De intensiteit kan niet vergeleken worden over de waterloop, gezien de tekorten functie zijn van de afvoer in de waterloop en deze op elk punt in de waterloop verschillend zijn. De grootste tekorten zullen afwaarts en in de hoofdtakken worden vastgesteld, en de veranderingen zullen ook groter zijn in deze stukken van de waterloop. Deze eigenschap van intensiteit maakt dat er geen vergelijkingen kunnen gemaakt worden over Vlaanderen.

Wel is opgemerkt dat de veranderingen van die aard zijn dat ze vaak een gelijke frequentieverschuiving aan tekorten geven over de waterlopen in Vlaanderen. Extreme tekorten die zich huidig eenmaal om de 50 jaar voordoen, zullen in 2050 tweemaal zo frequent voorkomen en tegen 2100 vijfmaal zo vaak. Met andere woorden een droogte-event met terugkeerperiode van 50 jaar, zal in 2050 om de 25 jaar optreden en in 2100 om de tien jaar. We zullen dus vaker te maken krijgen met dergelijke extreme events. De verschuivingen in de events met lagere terugkeerperiode is minder uitgesproken. De afvoertekorten met een terugkeerperiode van 10 jaar onder het huidige klimaat, zullen tegen 2050 een terugkeerperiode tussen de 5 en 10 jaar krijgen, en in 2100 om de twee tot vijf jaar voorkomen.

De informatie in de kaarten is eveneens bruikbaar om de ernst van events in te schatten. Wanneer zich in de toekomst nogmaals een droogte voordoet zoals die tijdens de zomer van 2017, 2018 of 2019, dan kan aan de hand van de kaarten ingeschat worden wat de terugkeerperiode van de mogelijk optredende tekorten zijn.



Figuur 4-6 : Droogte-intensiteit voor de Velpe voor een terugkeerperiode van a) 10 jaar en b) 50 jaar voor het huidig klimaat, 2050 en 2100.

## 5 Laagwaterpercentielkaarten

Naast de hydrologische droogtekaarten met absolute laagwaterdebieten volgens terugkeerperiode, wordt ook een verwerking van de debieten uitgevoerd volgens percentielen (50- en 90-percentiel) en een gemiddelde. Deze kaarten werden ontwikkeld in het kader van de adviesverlening bij omgevingsvergunningen. Binnen de dienst vergunning van de Vlaamse Milieumaatschappij worden 90-percentiel laagwaterdebieten gebruikt om effecten van lozings in de meest kritische perioden (met weinig verdunning) in te schatten. De mediane en/of gemiddelde debieten zijn nodig om de impact van een permanente lozing op lange termijn in te schatten. Deze gegevens zijn voor een goede inschatting nodig over de volledige lengte van de waterloop.

Met de Kaderrichtlijn Water is er steeds meer aandacht gekomen voor de link met de oppervlaktewaterkwaliteit en is impactinschatting een noodzakelijk onderdeel geworden in de adviesverlening. Vaak ontbreken echter de nodige meetgegevens om de lozingsimpact degelijk in te schatten. Verder is er in die context ook het Europese Wezer-arrest, dat stelt dat een lozing geen achteruitgang in de toestand mag veroorzaken of het halen van de doelstellingen in gevaar mag brengen. Informatie en kennis van debieten van de ontvangende waterlopen is daartoe onontbeerlijk.

Het modelinstrumentarium is in staat om voor de gemodelleerde waterlopen deze gegevens in te schatten. Er werden 3 kaarten opgesteld en dat enkel voor de huidige klimaatcondities. Het betreft een kaart met 90-percentieldebieten, een kaart met 50-percentieldebieten en een kaart met gemiddeld debieten (§2.4.2). De kaarten worden hier niet gepresenteerd, daar ze als figuur weinig zeggen door de hoeveelheid aan informatie die ze omvatten. Ze worden bij voorkeur gevisualiseerd en gebruikt via GIS-programma's. Net zoals bij de andere kaarten gelden hier dezelfde bemerkingen. De kaarten geven de beste resultaten voor natuurlijke waterlopen en gravitair afwaterende systemen.

De kaart en informatie rond percentieldebieten werd eveneens meegenomen in de validatie van de modelkalibraties (§2.1.4). Het is een zeer handige parameter voor de evaluatie van de laagwatersimulaties, gezien eenzelfde percentielen berekend worden voor de metingen ter hoogte van de limnigrafen.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

Het project ‘Kartering en kwantificering van droogte in Vlaanderen via hydrologische modeltoepassingen’ bestaat uit twee afzonderlijke opdrachten: een vast gedeelte (IMDC, 2019) en een voorwaardelijk gedeelte. In het vast gedeelte werd een modelinstrumentarium en methodologie ontwikkeld waarmee de droogte in Vlaanderen gekwantificeerd en gekarteerd kon worden. De focus lag hierbij op droogte in de bodem (agrarische droogte) en droogte in de waterlopen (hydrologische droogte). De methodologie en het modelinstrumentarium werden vervolgens getest op zes Vlaamse pilotgebieden. Gezien de goede resultaten op de pilotgebieden werden het model en de methodologie verder toegepast en uitgerold over Vlaanderen ter ontwikkeling van Vlaamse droogtekaarten.

De uitrol bracht enkele uitdagingen met zich mee ten opzichte van de pilotfase (IMDC, 2019). Die uitdagingen resulteerden in een aantal noodzakelijke uitbreidingen. Zo was het in rekening brengen van de droogweerafvoer in de modelleringen er één van. Er werd een droogweerafvoerkaart voor Vlaanderen opgesteld, die als basis meegenomen werd bij de kalibratie van de modellen. Een andere uitbreiding was de opname van een hydrologisch gecorrigeerd DTM in de modelopbouw. Dit type DTM laat toe om stroomgebieden beter af te bakenen en waterlopen beter af te leiden. Na aanpassing van modelinput en -code konden 93 modellen opgebouwd en geparametriseerd worden. De parametrisatie verliep op een automatische wijze en werd meermaals doorgevoerd telkens met verschillende parameterranges. De finale parametersets van deze 93 modellen werden geregionaliseerd tot gebiedsdekkende parameterkaarten voor Vlaanderen.

De modelinformatie werd verwerkt in 17 regionale modellen, die samen Vlaanderen dekken. De regionale modellen omvatten bekkens of grote delen ervan. Voor het opstellen van dergelijke complexe en omvangrijke stroomgebieden werd de modelcode uit de pilotfase verder aangepast. De regionale modellen werden ingezet voor het uitvoeren van langetermijnsimulaties. Uit de resultaten voor die langetermijnsimulaties werd via statistische verwerking droogte-informatie voor de opbouw van de droogtekaarten afgeleid. De verwerking van de datareeksen tot droogte-informatie bestaat enerzijds uit een rechtstreekse analyse van de modeloutput. Er worden jaarlijkse minima van bodemvocht en laagwaterdebieten gezocht en deze worden statistisch verwerkt naar hun kans op voorkomen. Anderzijds worden droogte-indicatoren opgezet rond de duur en de ernst van het droogte-event. Voor deze wordt gekeken naar de duur en omvang van de onderschrijding van een zekere minimale drempel. Voor bodemvocht is deze drempel vastgelegd op het vochtgehalte waarbij de teelt of vegetatie droogtestress ondervindt. Deze drempel is afhankelijk van de bodemtextuur en de teelt of vegetatie, en zal over Vlaanderen variëren. Voor debiet wordt deze drempel bepaald door zijn 95-percentiel. Aan de hand van deze drempels kon jaarlijks een droogteduur en -intensiteit bepaald worden, welke dan statistisch werd verwerkt tot een terugkeerperiode.

Op die manier werden er 123 droogtekaarten voor Vlaanderen geproduceerd, waarvan er 60 focussen op agrarische droogte, 60 op hydrologische droogte en 3 kaarten laagwaterpercentielen weergeven. Van de 60 agrarische/hydrologische droogtekaarten zijn er steeds 20 droogtekaarten voor het huidig klimaat, 20 kaarten voor het klimaatscenario 2050 en 20 kaarten voor het klimaatscenario 2100. Per klimaatscenario werden kaarten opgesteld voor de relatieve bodemvochtminima/laagwaterminima, droogtedagen en droogte-intensiteit, met terugkeerperiode 1, 2, 5, 10, 25 en 50 jaar. Voor duur en intensiteit werd ook een gemiddelde berekend.

De agrarische droogtekaarten met bodemvochtminima tonen een duidelijke ruimtelijke variatie, met zones die gekarakteriseerd worden met hogere minima en zones met lage minima, en dit is zichtbaar bij alle terugkeerperiodes. De zones met de laagste relatieve bodemvochtgehaltes vallen samen met de zandige bodems in Kempen en de Vlaamse Vallei. De natste zones liggen in poldergebieden en de rivier valleien. De bodemtextuur zal deze minima sturen. Dezelfde patronen zijn terug te vinden in de duur- en intensiteitskaarten rond bodemvochttekorten, maar de impact van het landgebruik komt er ook naar voor. Bodemvochttekorten zullen snel optreden ter hoogte van de steden en kunnen meteen meerdere maanden duren. Naast steden blijken zandige bodems gevoelig voor droogte, waarbij de combinatie met sterk evapotranspirerende landgebruiken als bos en boomgaarden hoger en langer durende tekorten tonen. De kleiige bodems blijken het best bestand tegen droogte, gevolgd door de leembodems. Vooral met grasland erop kunnen deze lang aan droge periodes weerstaan. Maar bij een extreem droogte-event - terugkeerperiode van 50 jaar – zullen ook deze tekorten gaan tonen en zijn er nog weinig plaatsen in Vlaanderen waar er geen droogtestress plaatsvindt.

Klimaatverandering gaat de droogte verder in de hand werken. Waar bij de laagste terugkeerperiode – 1 jaar - slechts ter hoogte van enkele steden reeds onvoldoende bodemvocht werd vastgesteld, is dat bij 2050 in meer steden, en ook al in het buitengebied waar te nemen, en tegen 2100 is dat nog verder uitgebreid. De droogte wordt bovendien nog sterk onderschat aangezien het gewijzigd landgebruik en de verhardingsgraad niet in rekening worden gebracht. Niet alleen zullen het aantal zones met droogtestress toenemen door klimaatverandering, maar ook voor de zones die reeds geconfronteerd werden met een bodemvochttekort, zal het tekort langer gaan aanhouden. De duur en intensiteit van de droogte-events zal voor eenzelfde terugkeerperiode door klimaatverandering gaan toenemen. De ruimtelijke patronen blijven evenwel sterk behouden. De impact van het gewijzigd klimaat is het sterkst merkbaar voor 2100. De veranderingen van het huidige klimaat naar 2050 zijn nog relatief beperkt ten opzichte van de toename tussen 2050 en 2100. Dit zorgt ook voor een frequentieverschuiving van de events, waarbij extreme events die nu eenmaal om de 50 jaar voorkomen, in 2050 tweemaal zo vaak, en in 2100 vijfmaal zo vaak – om de 10 jaar - zullen voorkomen.

De hydrologische droogtekaarten geven de kans op voorkomen van de laagwaterminima weer. Deze dalen naarmate de droogte-events extremer worden en de terugkeerperiode dus toeneemt. Onder de klimaatscenario's nemen deze minima nog verder af, maar de afname is vaak uiterst beperkt, gezien de minima neigen naar absolute ondergrenzen en nuldebieten. Er is geen vergelijking mogelijk over Vlaanderen qua laagwaterminima omdat elke waterloopsectie zijn eigen specifiek debiet heeft. Desalniettemin geven de kaarten een goede inschatting van laagwaterdebieten over Vlaanderen. Voor de analyse van droogte zijn de gegevens rond de duur en intensiteit van de afvoertekorten in de waterlopen relevanter. De waterlopen zullen pas bij een terugkeerperiode vanaf 5 jaar tekorten gaan tonen, en deze kan meteen lang aanhouden. Gemiddeld duren ze één maand, met lokale maxima tot bijna 2 maand. Voor de meeste extreme events – terugkeerperiode 50 jaar - lopen deze tot gemiddeld 5 maand op. Klimaatverandering zal deze aantallen nog doen toenemen. Dat betekent zeer lange periodes aan te lage afvoeren, ook bij de lage terugkeerperiode. Los van enig gebruik van het water voor eender welke sector of doelstelling, zullen enkel door de drogere klimaatcondities de afvoeren dermate afnemen, dat waterlopen tegen 2050 gemiddeld 2 maand tekorten hebben éénmaal om de vijf jaar, en tegen 2100 al per 2 jaar. Belangrijk hierbij is de modelstructuur indachtig te houden. Het model simuleert neerslag-afvoer en houdt daarbij geen rekening met hydraulica, kunstwerken en mogelijke sturingen in de waterlopen. De resultaten zijn het meest geschikt voor opwaartse waterlopen en gravitair afwaterende stroomgebieden.

Ook de intensiteit van de tekorten werd in kaart gebracht. Deze geeft een totaal volumetekort ten opzichte van het 95-percentieldebiet in de waterlopen per jaar weer. De grootteorde van de tekorten is afhankelijk van de afvoeren en zal variëren naargelang het waterloopsegment. Hoe groter de afvoer, hoe groter de tekorten zullen zijn. Maar verder is het moeilijk om vergelijkingen te maken over Vlaanderen. Door klimaatverandering zullen die tekorten verder toenemen. De toename is het grootst op de grotere waterlopen en naar 2100 toe. Het volumetekort is een geschikte indicator om de terugkeerperiode van droogteperiodes te bepalen.

Tot slot zijn er de percentielkaarten voor het 90-percentiel debiet, het 50-percentiel debiet en een kaart met gemiddelde debiet. Deze kaarten zijn ontworpen in het kader van adviesverlening voor omgevingsvergunningen. Maar daarnaast zijn zij ook zeer geschikt voor de evaluatie van de modelkalibraties.

## 6.2 Aanbevelingen

### 6.2.1 Droogte-instrumentarium en methodologie

Het modelinstrument laat toe om laagwater en bodemvocht te simuleren, maar heeft daartoe de nodige input nodig. Deze kan in de toekomst verfijnd worden zodat meer gedetailleerde informatie kan verkregen worden. Qua landgebruik wordt een beperkt aantal klassen gebruikt. Met een fijner landgebruik zou meer onderscheid gemaakt kunnen worden tussen gewassen met verschillende worteldieptes en droogtegevoeligheden. Zo zou bijvoorbeeld een onderscheid tussen verschillende types bos kunnen beschouwd worden. Ook voor het bodemtype kunnen updates doorgevoerd worden met meer recente gegevens. Zo wordt het havengebied van Antwerpen gekenmerkt door kleibodems in de toegepaste bodemkaart in het model, terwijl die bodems daar intussen zijn opgespoten met zand en dat de hoofdtextuur is geworden.

Ook wordt in de modelopbouw een vereenvoudigde dataset opgelegd als onderste randvoorwaarde. Er wordt gebruik gemaakt van de GHG-kaart (kaart met de gemiddelde hoogste grondwaterstand<sup>2</sup>). Deze kaart werd ook toegepast in GeoPearl Vlaanderen (Joris et al., 2017). Met oog op droogte is het meer aangewezen hiertoe de GLG-kaart (kaart met de gemiddelde laagste grondwaterstand<sup>3</sup>) te hanteren. Een dergelijke kaart bestaat echter voorlopig niet voor Vlaanderen en daarom werd er een alternatief beschouwd.

Het concept van droogtedagen is gebaseerd op een drempelwaarde en overschrijding ervan. Voor de droogtedrempel in de bodem wordt gebruikt gemaakt van een specifieke drempelwaarde per landgebruik en teelt, aangeduid als 'p-waarden'. Tijdens de uitvoering van de opdracht werden er slechts p-waarden berekend voor een beperkt aantal landgebruiksklassen. Voor de overige klassen werden de p-waarden toegekend op basis van gelijkaardige droogtegevoeligheidskenmerken. Idealiter wordt voor iedere landgebruiksklasse een specifieke p-waarde berekend via gewasgroeimodellen. Daarnaast is het aantal beschouwde landgebruiksklassen beperkt binnen het droogtemodel. Deze zouden uitgebreid kunnen worden zodat de droogtekaarten meer gedetailleerde droogte-info kunnen omvatten, zoals bijvoorbeeld ook één met focus op ecologie of op type bos. Verder werd ook een gemiddeld bodemvocht gebruikt bij de aftoetsing aan de drempel. Dit bodemvocht verschilt over het bodemprofiel en

---

<sup>2</sup> De GHG wordt berekend op basis van de gemiddelde van de 3 hoogste grondwaterstanden per jaar over minstens 8 jaar.

<sup>3</sup> De GLG wordt berekend op basis van de gemiddelde van de 3 laagste grondwaterstanden per jaar over minstens 8 jaar.



gewassen halen hun vocht op een verschillende diepte uit de bodem. Er zou een verdere afstemming kunnen gebeuren tussen het bodemvocht, de worteldiepte en de drempelwaarde. Dit zou de resultaten verder verfijnen.

### 6.2.2 Validatie droogtekaarten

Er zijn momenteel weinig data beschikbaar voor de validatie van de droogtekaarten. In de toekomst zouden relevante data ter validatie van de kaarten onderzocht kunnen worden. Enerzijds denken we hierbij aan een validatie van de bodemvochtsimulaties en zijn droogtekaarten. Een mogelijke optie hiervoor is het gebruik van satellietmetingen en de ERA5 land bodemvochtoutputs. Momenteel is de resolutie van de satellietbeelden vaak niet hoog genoeg. Het droogtemodel en zijn kaarten hebben een resolutie van 100x100m, hetgeen niet wordt bereikt in de satellietbeelden. Wanneer de satellieten wel hoge resolutiebeelden registreren, zoals de Sentinel-1, is de kwaliteit ervan niet voldoende. Het radar-signaal is er lastiger te vertalen naar een bodemvocht waarde. De radar backscatter is niet alleen afhankelijk van het vochtgehalte van de bodem maar ook van de vegetatie, de ruwheid van het oppervlak en de hoek waaronder gemeten wordt. Omdat deze factoren grotendeels onbekend zijn is het heel lastig om uit de Sentinel-1 beelden direct het bodemvocht per pixel te bepalen. Er zit dan teveel ruis en onzekerheid op de data om een vergelijking te maken. Anderzijds kan ook gedacht worden aan een validatie naar de duur van droogteperiodes en schade aan gewassen en vegetatie. Deze validatie kan eveneens bijdragen tot het optimaliseren van de drempelwaarden. Er is momenteel echter wel weinig informatie van op terrein gekend rond stressperiodes of opbrengstverliezen. Indien die beschikbaar komt, kan worden onderzocht of de drempelwaarde moet worden geoptimaliseerd richting de ervaren droogtedagen op het terrein.

### 6.2.3 Exploitatie Vlaanderen dekkende modellen

Er werd binnen dit project een Vlaams gebiedsdekkend model opgebouwd voor de simulatie van bodemvocht en laagwaterdebieten. Het model laat toe om langetermijnsimulaties uit te voeren en de resultaten te verwerken naar minimale bodemvochtresultaten en debieten. Dit is slechts één toepassing van het model. Het strekt tot de aanbeveling het model verder te gaan exploiteren, te onderhouden en gaandeweg te verbeteren met nieuwe inzichten en inputs. Het model kan eenvoudig ingezet worden om voorspellingen uit te voeren en zo te gaan gebruiken in een operationele context. Hiertoe dienen de verschillende deelmodellen gevoed te worden met real-time gegevens.

Een andere toepassing is het gebruik van het model voor indicatorbepalingen voor de actuele toestand van het bodemvocht en het laagwaterdebiet. In de pilootfase (IMDC, 2019) werden hieromtrent reeds enkele testen uitgevoerd, welke zeer veelbelovend waren. Dergelijke extra indicatoren kunnen een aanvulling zijn op de grondwaterstandsindicator en de gestandaardiseerde neerslagindex ('Standardized Precipitation Index' of 'SPI'). Op die manier kan het volledige spectrum van droogte beschreven worden: meteorologische droogte aan de hand van neerslag, agrarische droogte via bodemvocht, hydrologische droogte door middel van laagwaterdebieten in de waterloop en de droogte in de diepere ondergrond via grondwaterstijghoogtes. Het frequent rapporteren van deze indicatoren zou een vollediger beeld geven van de actuele droogtetoestand van het watersysteem.

## 7 Referenties

- Agentschap Informatie Vlaanderen (2020). Vervaardigen van een Hydrologisch gecorrigeerd DTM – Regionale aanpak. Eindrapport. Studie iov Vlaams Planbureau voor Omgeving en Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer, november 2020.
- Cabus P. (2008). River flow prediction through rainfall–runoff modelling with a probability-distributed model (PDM) in Flanders, Belgium. *Agricultural Water Management*, 95(7).
- Chang, H. et al. (2018). Regionalisation of a PDM Model for Catchment Runoff in a Mountainous Region of Korea. *KSCE J Civ Eng*, 22.
- Duan, Q., Gupta, V.K., Sorooshian, S. (1993) Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V.K. (1994) Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, 265–284.
- IMDC (2015) Next-Generation Tools m.b.t. hydrometrie, hydrologie en hydraulica in het operationele waterbeheer - uitbreiding iFramework. Eindrapport – versie 1.0. Studie iov Vlaamse Milieumaatschappij – Afdeling Operationeel Waterbeheer, oktober 2015.
- IMDC (2019). Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingen – vaste deel. Eindrapport – versie 3.0. Studie uitgevoerd in opdracht van Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer, juli 2019.
- Joris, I., Dams, J., Vanden Boer, D., Vos, J. (2017). Kartering van de kwetsbaarheid van het grondwater voor verontreiniging met pesticiden. Studie uitgevoerd in opdracht van: Vlaamse Milieumaatschappij, Afdeling Operationeel Waterbeheer 2017/RMA/R/1400.
- Li, H., Zhang, Y. (2016). Regionalising rainfall–runoff modelling for predicting daily runoff in continental Australia. *Hydrology Eand arth System Science Discussions*, doi:10.5194/hess-2016-464.
- Ntegeka, V., Wolfs, V., Willems, P. (2018). Aanpassen historische Ukkelreeksen aan huidig klimaat. Opdracht uitgevoerd door Sumaqua i.o.v. VMM. 42p.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, V., Le Moine, N. (2008), Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resources Research*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2005). A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9.
- Reichl, J.P.C., Western, A.W., McIntyre, N.R., Chiew, F.H.S. (2009). Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow, *Water Resources Research*, 45.
- Poelmans, L., Van Daele, T. (2014). Landgebruikskarta NARA-T 2014 : Studie uitgevoerd in opdracht van: INBO (in het kader van de Referentietoek Natuurrapportering Vlaanderen) - 2014/RMA /R /45. 2014. 55 blz.
- Reager, J.T., Famiglietti, J.S. (2009). Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE, *Geophysical Research Letters*, 36.
- Samaniego, L., Bárdossy, A., Kumar, R. (2010). Streamflow prediction in ungauged catchments using copulabased dissimilarity measures, *Water Resources Management*, 46.

- Samuel, J., Coulibaly, P., Metcalfe, R.A. (2011). Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16.
- Tran, Q.Q., Willems, P., Pannemans, B., Blanckaert, J., Pereira, F., Nossent, J., Cauwenberghs, K., Vansteenkiste, T. (2015). Flexible hydrological modeling – Disaggregation from lumped catchment scale to higher spatial resolutions. *Geophysical Research Abstracts: vol. 17. EGU General Assembly 2015. Vienna, Austria, 12-17 April 2015. Abstract No. EGU2015-6983.*
- Tran, Q.Q., De Niel, J., Willems, P. (2018). Spatially distributed conceptual hydrological model building: A generic top-down approach starting from lumped models. *Water Resources Research*, 54.
- Vansteenkiste, T., Dewelde, J., Cabus, P., De Jongh, I., Cauwenberghs, K. (2016). Concepts and applications of the Flanders Hydrological Model environment. 3rd European Conference on Flood Risk Management. E3S Web Conference. Lyon, France, 17-21 October 2016. Abstract No 20167.
- Van Uytven, E., Willems, P. (2016). *Climate Perturbation Tool - Manual*. KU Leuven.
- Van Uytven E. & Willems P. (2018). Greenhouse gas scenario sensitivity and uncertainties in precipitation projections for central Belgium. *Journal of Hydrology*, 11.
- Vlaamse Milieumaatschappij, De Vlaamse Waterweg, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Departement Landbouw en Visserij, Departement Omgeving, Agentschap Natuur en Bos, Departement Economie Wetenschap en Innovatie. (2021) Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste. Studie KU Leuven, departement Burgerlijke Bouwkunde, afdeling Hydraulica, Sumaqua, KMPC, Bodemkundige Dienst van België, Cycloop, Universiteit van Antwerpen voor Vlaamse Milieumaatschappij, De Vlaamse Waterweg, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Departement Landbouw en Visserij, Departement Omgeving, Agentschap Natuur en Bos, Departement Economie Wetenschap en Innovatie. Tussentijds syntheserapport. VMM/S004X/201119/2.0 Januari 2021

## **Bijlage A      Oplijsting van alle debietmeetstations uit WISKI-databank**

Onderstaande tabel lijst alle debietstations uit de WISKI-databank op. Dit overzicht dateert van november 2020.

X	Y	Stationsnummer	Naam
37270.64	203826.4	L01_48C	Nieuwpoort/Grote_Beverdijkvaart
53385.0	208930.0	L01_42E	Oudenburg/Magdalenakreek
143823.0	192755.0	L04_036	Liezele/Molenbeek
142637.0	191439.0	L04_037	Malderen/Grote_Molenbeek
149237.75	202925.6	L04_035	Aartselaar/Benedenvliet
247988.0	161922.0	L11_567	s-Gravenvoeren/Voer
59613.2	167505.5	L05_408	Geluwe/Geluwebeek
79991.2	181839.9	L05_409	Oostrozebeke/Mandel
74369.9	171172.9	L05_406	Harelbeke/Gaverbeek
72947.1	182811.2	L05_407	Meulebeke/Devebeek
63351.0	171794.0	L05_404	Moorsele/Heulebeek
251892.0	160893.0	L11_569	Sint-Martens-Voeren/Veurs
65436.0	181767.0	L05_402	Roeselare/Mandel
69971.0	170880.0	L05_403	Heule/Heulebeek
223071.0	213112.0	L11_021	Overpelt/Holvenloop
45964.93	185232.2	L01_499	Merkem/Steenbeek
187190.0	182934.0	Log_14A	Tielt/Grote_Motte
250142.0	162515.0	HIS_L11_568	s-Gravenvoeren/Noorbeek
35516.0	179376.0	L01_491	Oostvleteren/Poperingevaart
40291.0	171536.0	L01_493	Vlamertinge/Grote_Kemmelbeek
251916.0	160873.0	HIS_L11_564	Sint-Martens-Voeren/VeursHIS
183776.0	178068.0	HIS_Log_142	Houwaart/Winge
46069.0	179785.0	L01_497	Langemark/Martjevaart
45865.0	181140.0	L01_496	Merkem/Martjevaart
67378.0	205911.0	L02_423	Loppem/Kerkebeek
68972.0	207944.0	L02_422	Sint-Michiels/Kerkebeek
115.611.467	185460.4	L04_009	Massemen/Molenbeek
143965.0	205513.0	L04_008	Bazel/Barbierbeek
195292.0	188411.0	Log_147	Molenstede/Zwart_Water
71962.0	203035.0	L02_426	Oostkamp/Hertsbergebeek
195901.0	175823.0	Log_145	Ransberg/Velpe
68650.0	191397.0	L02_424	Zwevezele/Jobeek
96090.0	165660.0	HIS_LS06_34G	Nukerke/gracht-Marie_Barrebeek
204687.0	187574.0	Log_148	Lummen/Zwartebeek
158829.0	211766.0	L04_007	Wijnegem/Groot_Schijn
219513.0	193755.0	Log_16E	Helchteren/Broekbeek
231184.0	162620.0	L11_555	Nerem/Jeker
241673.0	168209.0	L11_553	Kanne/Jeker
220285.0	161686.0	HIS_LS09_16B	Vechmaal/Herkebeek
219207.0	175424.0	Log_16G	Wimmertingen/Oude_Mombeek
70372.0	171116.0	L05_40B	Heule/Heulebeek/Zeger_v_Heulestr

X	Y	Stationsnummer	Naam
55646.0	191502.0	Lo1_488	Kortemark/Handzamevaart
244761.0	161443.0	L11_561	Moelingen/Berwijn
220814.0	180617.0	Log_136	Hasselt/Demer
202117.0	171902.0	Log_154	Zoutleeuw/Kleine_Gete
188808.0	164451.0	Log_155	Oorbeek/Grote_Gete
204862.0	172521.0	Log_156	Rummen/Melsterbeek
201650.0	168010.0	Log_157	Zoutleeuw/Dormaalbeek
202765.0	182271.0	Log_152	Halen/Gete
201969.0	172796.0	Log_153	Budingen/Gete
252294.0	205738.0	HIS_L11_517	Kessenich/Witbeek
104176.0	218101.0	Lo3_438	Boekhoute/Leopoldkanaal
231382.0	176377.0	Log_168	Munsterbilzen/Munsterbeek
135082.0	174042.0	Lo7_286	Sint-Katarina-Lombeek/Hunselbeek
136445.0	173980.0	Lo7_287	Ternat/Steenvoorbeek
128025.0	173652.0	Lo7_284	Iddergem/Molenbeek
132234.0	175407.0	Lo7_285	Essene/Bellebeek
121745.0	179299.0	Lo7_282	Mere/Molenbeek
137117.0	185852.0	Lo7_281	Opwijk/Vondelbeek
224553.0	203273.0	L11_023	Peer/Dommel
223543.0	213792.0	L11_022	Overpelt/Dommel
114922.0	162546.0	Lo7_288	Geraardsbergen/Molenbeek
116339.0	159087.0	Lo7_289	Viane/Mark
70646.0	202308.0	Lo2_425	Oostkamp/Rivierbeek
54083.0	206315.0	Lo1_428	Gistel/Moerdijkvaart
41473.0	180300.0	Lo1_492	Reninge/Kemmelbeek
201394.0	201548.0	L10_083	Meerhout/Kleinbroekbeek
217387.0	171520.0	LS09_165	Wellen/Herk
85061.0	210892.0	Lo2_442	Maldegem/Ede
200840.0	197124.0	L10_087	Tessengerlo/Grote_Laak
143723.0	161692.0	Lo8_193	Lot/Zenne
173245.0	173018.0	Lo8_115	Heverlee/Molenbeek
176027.0	172276.0	Lo8_116	Ijzeren_Brugje/Molenbeek
158886.0	185228.0	Lo8_111	Elewijt/Barebeek
164126.0	186263.0	Lo8_110	Boortmeerbeek/Weesbeek
167377.0	172031.0	Lo8_113	Bertem/Voer
172637.0	173505.0	Lo8_112	Heverlee/Voer
165811.0	164434.0	Lo8_119	Huldenberg/Ijse
166664.0	162036.0	Lo8_118	Overijse/Laan
128443.0	181410.0	Lo7_28C	Aalst/Molenbeek
117035.0	166846.0	Lo7_28A	Ophasselt/Molenbeek
91482.8	215413.41	Lo2_444	Sint-Laureins/Eeklose_watergang
74659.0	219726.0	Lo2_456	Oostkerke/Zwinnevaart
71202.0	224806.0	Lo2_455	Heist/Isabellavaart

X	Y	Stationsnummer	Naam
229404.0	176385.0	Log_138	Bilzen/Demer
96714.0	167158.0	LS06_348	Etikhove/Marie_Borrebeek
177903.0	234285.0	L11_047	Minderhout/Mark
167986.0	225181.0	L11_046	Brecht/KleineAa
157682.59	236702.6	L11_042	Essen/Kleine_Aa
184940.0	233154.0	HIS_L11_049	BaarleHertog/Noordermark
181957.0	230268.0	L11_048	Merkspas/Mark
96655.0	168670.0	LS06_347	Etikhove/Molenbeek
235991.0	206947.0	L11_513	Bree/Abeek
194504.0	215516.0	L10_066	Kasterlee/Rodeloop
241437.0	197085.0	L11_518	Opoeteren/Bosbeek
114517.0	180508.0	Lo4_00C	Letterhoutem/Molenbeek_(Kottembeek)
94553.0	177767.0	LS06_34L	Huise/Plankbeek_Opw
94981.0	178155.0	LS06_34M	Huise/Plankbeek_Afw
179356.0	230878.0	L11_04B	Rijkevorsel/Laak
105739.0	164957.0	LS06_34A	Opbrakel/Vaanbuikbeek
97389.0	164829.0	LS06_34D	Nukerke/Molenbeek
100842.0	167851.0	LS06_34E	Maarke-Kerkem/Broekbeek
203795.0	163538.0	LS09_15B	Velm/Molenbeek
205040.0	157758.0	HIS_LS09_15C	Montenaken/gracht_Borlo
197417.0	161592.0	HIS_LS09_15A	Neerwinden/Waarbeek
207194.0	161591.0	LS09_15D	Muizen/Cicindria
209339.0	161565.0	LS09_15E	Mielen-boven-Aalst/Melsterbeek
42632.0	179766.0	Lo1_495	Boezinge/Ieperlee
138470.0	214461.0	Lo4_00E	Verrebroek/Waterloop_van_de_Hoge_Landen
194447.0	204051.0	L10_077	Geel/Grote_Nete
176382.0	181519.0	Log_143	Wezemaal/Grote_Losting
92847.0	174985.0	Lo6_34F	Wannegem-Lede/Stampkotbeek
175945.0	181147.0	Log_141	Rotselaar/Winge
152431.0	181725.0	Lo8_231	Grimbergen/Maalbeek
142262.0	160346.0	HIS_Lo8_192	Huizingen/Zenne
138935.0	163118.0	Lo8_233	Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek
198940.0	214637.0	L10_068	Retie/Kleine_Nete
221108.0	167309.0	HIS_LS09_16C	Kerniel/Sint-Annabeek
194688.0	215361.0	L10_067	Kasterlee/Wamp
219746.0	162375.0	LS09_16A	Heks/Herkebeek
218685.0	189489.0	Log_16F	Zonhoven/Laambeek
181532.0	210775.0	L10_063	Vorselaar/De_Aa
224051.0	165662.0	LS09_16D	Piringen/Fonteinbeek
225222.0	181675.0	Log_169	Diepenbeek/Stiemer
70074.0	225341.0	Lo2_43B	Lissewege/Leopoldkanaal
217382.0	171531.0	Log_165	Wellen/HerkL
219223.0	175460.0	Log_167	Wimmertingen/Mombeek

X	Y	Stationsnummer	Naam
208640.0	186448.0	Log_161	Lummen/Mangelbeek
209849.0	180023.0	Log_163	Spalbeek/Herk
207432.0	185774.0	Log_162	Lummen_Mangelbeek_Hemelrijkstr
169297.0	165863.0	Lo8_098	Sint-Joris-Weert/Dijle
92657.0	191849.0	HIS_L03_446	Nevele/Poekebeek
173733.0	179490.0	Lo8_093	Wilsele/Dijle
197223.0	186996.0	Log_126	Molenstede/Demer
182798.0	208493.0	L10_055	Herentals/KleineNete_Nederrij
101966.0	175227.0	Lo6_342	Nederzwalm/Zwalmbeek
98682.0	182170.0	Lo6_343	Eke/Beerhofbeek
161878	146765	SPW_L6640	Noirhat/Dyle
163837	146834	SPW_L5460	Suzeryl/Thyle
164640	152777	SPW_L6140	Limelette/Dyle
169653	161044	SPW_L6160	Florival/Dyle
83834.70	174336.30	K05_WM505	Waregem/stuw5/Gaverbeek
162301.0	212835.0	Lo4_00A	Wijnegem/Afvoergracht
223869.0	159193.0	HIS_L_860	Tongeren
190430.0	198098.0	HIS_L_994	Geel/Grote_NeteHIS
251817.0	160749.0	HIS_L_870	Sint-Martens-Voeren/Voer
218725.0	181317.0	HIS_L_538	Hasselt/DemerHIS
187054.0	184591.0	Log_144	Rillaar/Grote_Motte
228441.0	219669.0	L11_024	Achel/Warmbeek
199611.0	179091.0	HIS_L_577	Kortenaken
179372.0	194721.0	HIS_L_998	Hulshout
126441.0	182986.0	HIS_L_530-2	Aalst/Mere/Molenbeek
141399.0	163812.0	HIS_L_534	Sint-Pieters-Leeuw
189523.0	221264.0	L10_064	Turnhout/De_Aa
159592.0	239017.0	HIS_L_899	Essen
158191.0	186030.0	HIS_L_575	Zemst
104797.0	164023.0	HIS_L_902	Brakel/Sassegembeek
194015.0	196486.0	HIS_L10_086	Vorst/Grote_Laak
107198.0	175030.0	HIS_L_901	Zottegem
189695.0	211301.0	HIS_L_510-2	Kasterlee
172893.0	173325.0	HIS_L_705	Leuven/Dijle_HIS
130803.0	175026.0	HIS_L_30	Liedekerke
105103.0	173267.0	HIS_L_9501	Zwalm
202546.0	183436.0	Log_129	Halen/Demer
181532.0	210775.0	K10_133	Vorselaar/De_Aa/Stuw4
172927.0	173341.0	HIS_L_706	Leuven
101913.0	175181.0	HIS_L_894	Zwalm_2
45788.0	185237.0	Lo1_49A	Merkem/Steenbeek_A
108093.0	168206.0	HIS_L_895	Brakel/Zwalmbeek
217827.0	170798.0	HIS_L_515	Wellen



X	Y	Stationsnummer	Naam
188653.0	210428.0	HIS_L_511-2	Geel
171823.0	172751.0	HIS_L_703	Leuven/Voer
133463.0	175234.0	HIS_L_700-2	Affligem
213189.0	183781.0	HIS_L_514	Hasselt
161120.7	188703.7	Ko8_030	Muizen/Barebeek/uitwateringskunstwerk
245623.0	157427.0	DGRNE11_6390	Dalhem/Berwinne
141202.0	163718.0	Ko8_081	St-Pieters- Leeuw/Zuunbeek/_schuif_I_Volsembroek
199489.0	185188.0	Ko9_017	Webbekom/Pompgemaal
187826.0	220265.0	L10_06A	Turnhout/De_Aa/Veedijk
167300.0	166949.0	LS08_11U	Huldenberg/Langegracht
203310.0	161335.0	LS09_15F	Gingelom/Heulegracht
223149.1	216055.4	L11_026	Neerpelt/Dommel/De_Wulp
172853.0	184021.0	LS08_091	Rotselaar/Dijle
176150.0	208850.0	knt03a-1066	Grobbendonk_Troon/Kleine_Nete

## **Bijlage B      Overzicht van de RWZI-stations**

Nr.	Naam
2	Adinkerke
3	Wulpen
5	Ieper
6	Woumen
8	Lo
10	Zonnebeke
11	Poperinge
12	Harelbeke
13	Staden
14	Oostende
15	Jabbeke
17	Heist
18	Brugge
19	Knokke
20	Gent
21	Zelzate
23	Latem
24	Deurle
25	Aalter
26	Dendermonde
27	Aalst
28	Ninove
30	Geraardsbergen
31	Laarne (oud)
32	Zele
33	Berlare
34	Lokeren
35	Sinaai
36	Sint-Niklaas
37	Zwalm
38	Hamme
39	Mechelen - Noord
40	Duffel
43	Edegem
44	Hove
45	Boechout
46	Aartselaar
48	Sint-Amands
49	Burcht
50	Antwerpen-Zuid
51	Bornem
52	Brasschaat
53	Deurne

Nr.	Naam
54	Merksem
55	Antwerpen-Noord
56	Schoten
57	Schildre
58	Hoogstraten
59	Meer
60	Merksplas
61	Poppel
62	Ravels
63	Turnhout
64	Vosselaar
65	Zondereigen
66	Nijlen
67	Essen
68	Grobbendonk
69	Kalmthout
70	Malle
71	Pulderbos
72	Viersel
74	Brecht
75	Loenhout
76	Mol
78	Dessel
79	Geel
80	Retie
81	Tessenderlo
82	Westerlo
83	Morkhoven
84	Herentals
85	Hulshout
86	Itegem
87	Lichtaart
88	Beerse
89	Leuven
90	Tienen
91	Zemst - Hofstade
92	Beersel
97	Lanaken
99	Eisden
100	Borgloon - Tivoli
102	Tongeren
103	Sint-Truiden
104	Heusden

Nr.	Naam
105	Genk
106	Koersel
107	Beverlo
108	Zonhoven
110	Hasselt
111	Bree
112	BOCHOLT
113	Neeroeteren
114	Overpelt
115	Lommel
116	Hamont
117	Galmaarden
118	De Klinge
119	Oud-Heverlee
120	Oudenaarde
121	Maldegem
122	Tielt
123	Nevele
124	Dilsen
126	Kieldrecht
127	Eeklo
128	Watou
129	Kortenberg
130	Blaasveld
131	Moerbeke
132	Stekene
133	Riemst
134	Peer
135	Oud-Turnhout
136	Landen - Rumsdorp
137	Houthalen - Centrum
138	Achel
139	Evergem
140	Tervuren
141	Roeselare
142	Huldenberg
143	Ertvelde
144	Aalbeke - Tolpenhoek
145	Lede
146	Eksel
147	Vleteren
148	Helkijn
150	Halen

Nr.	Naam
151	Arendonk
152	Waregem
153	Houthalen - Oost
154	Boom
155	Zoutleeuw
156	Bilzen
157	Vlamertinge
158	Roesbrugge
160	Diest
161	Hoegaarden
162	Zolder
163	Kermt
164	Wimmertingen
165	Wommelgem
166	Lier
167	Avelgem
168	Brakel
169	Zandbergen
171	Kinrooi
172	Aarschot
174	Liedekerke
175	Ronse
176	Sint-Antelinks
177	Kinrooi-Kessenich
178	Heist-op-den-Berg
179	Berlaar
181	Boortmeerbeek
182	Grimbergen
183	Gelmen
184	Alken
185	Hoeselt
187	Overschelde
188	Wichelen
189	Kortemark
190	Lo-Reninge - Noordschote
192	Bonheiden
193	Neervelp
194	Roosbeek
195	Rotselaar
196	Zichem
197	Londerzeel
198	Zichen
199	Beveren

Nr.	Naam
200	Deinze
202	Heldergem
203	Bambrugge
204	Destelbergen
205	Eke
206	Kluisbergen
208	Melle
209	Merelbeke
210	Wetteren
211	Parike
212	Sint-Maria-Lierde
213	Lovie
214	Menen
215	Ingelmunster
217	Vissenaken
218	Sint-Pieters-Leeuw
220	Merchtem
221	Bierbeek
222	Hoepertingen
223	Riksingen
224	Olsene
225	Temse
226	Heule
227	Kampenhout
228	Engsbergen
229	Messelbroek
230	Beveren - Leie
234	Kruishoutem
238	Gavere
239	Zomergem
240	Pervijze
241	Loker
242	Moorslede
243	Schorisse
244	Geetbets
245	Sint-Joris-Winge
246	Melsbroek
247	Steenokkerzeel - Zuid
249	Ruisbroek
251	Lozen
252	Moelingen
253	Boekhoute
256	De Pinte - Zevegem

Nr.	Naam
258	Geel - Mosselgoren
259	Ieper - Hollebeke
261	Ninove - Rendestede
262	Mol - Postel
263	Zemst - Larebeek
264	Zemst - Kesterbeek
266	Bierbeek - Kleinbeek
268	Lebbeke - Rooien
271	Wolfsonk
272	Steenokkerzeel - Noord
273	Beernem
275	Ruddervoorde
276	Wingene
278	Rollegem
280	Proven
282	Baliebrugge
286	Elsegem
289	Kallo
291	Damme - Lapscheure
295	Beveren aan de IJzer
298	Avekapelle
303	Boorseme
305	Glabbeek-Kapellen
311	Sint-Jan-in-Eremo
312	Sint-Laureins - Sint-Margriete
313	Watervliet
314	Waterland - Oudeman
315	Leisele
318	Hoogstade
322	Mesen
342	Oplinter
343	Humbeek
350	Markegem
355	Dikkelvenne
357	Ouwegem
358	Wannegem - Lede
359	Oosterzele
360	Beauvoorde
361	Huise
364	Rillaar
365	Ledegem
369	Stavele

Nr.	Naam
373	Kemmel
381	Kruiseke
383	Pittem
384	Vlissegem
385	Zemst - Bosstraat
392	Berendrecht
396	Hertsberge
399	Nieuwerkerken - Wijer
401	Lennink-Varenbergbeek
402	Sint-Maria-Aalter
405	Gooik - Oetingen
406	Moerbeke – Kruisstraat
408	Landen - Eliksem
428	Sint-Lievens-Houtem – Bavegem
429	Wingene - Sint-Pietersveld
430	Asse - Bollebeek
431	Meise – Oppem
439	Brakel – Michelbeke
440	Zottegem - Sint-Maria-Oudenhove
448	Asse-Bekkerzeel
449	Koekelare
459	Borgloon-Jesseren
469	Houthulst- Terrest
470	Galmaarden-Waarbeke
471	Lokeren-Dooslaar
472	Wachtebeke-Overslag
474	Lummel-Geneiken
475	Bornem-Oude Schelde
476	Voeren-Veurs
479	Maarkedal-Oudenhove
481	Gistel-MOere
486	Lokeren-Daknam
492	Zottegem- Plankebeek
493	Zwalm-Rozebeke
494	Veurne-Steenkerke
499	Duffel-Mijlstraat
500	Anzegem-Centrum
509	Heuvelland-Westouter-Centrum
553	Langemark

**Bijlage C**      **Overzicht parameterranges gebruikt voor de  
automatische kalibratie**

De kalibratie van de PDM-modellen gebeurt volgens een automatische procedure, waarbij de optimale parameterset binnen een parameterrange geïdentificeerd wordt. In deze studie werden drie parameterranges beschouwd ter kalibratie. Die parameterranges worden gedefinieerd in onderstaande tabel.

	Set 1	Set 2 (Cabus, 2008)	Set 3
Toegepast in model	Model versie 3.1	Model versie 3.2	Model versie 3.3
Parameters			
Rainfac	1	1	1
Cmin	0-151	5	5
Cmax	152-2087	6-2087	6-2087
b (bpareto)	0.1-5	0.05-2	0.05-2
be (bevaporation)	2.5	2.5	2.5
Kg (kdrainage)	1000-25000	1000-50000	1000-50000
bg (bdrainage)	1	1	1
St (PDM.TG)	0-150	0-150	0-150
K1 (CK1)	1-50	1-50	1-50
K2 (CK2)	1-50	1-50	1-50
Kb (CKBF)	500-5000	0.001-5000	2-5000
Tdly	0-20	0-20	0-20



**Bijlage D**      **Gekalibreerde stroomgebieden als basis voor  
modellering Vlaanderen**

Onderstaande tabel lijst alle gekalibreerde stroomgebieden op waarvoor een PDM-model werd gekalibreerd.

X	Y	Stationsnummer	Naam
245623.0	157427.0	DGRNE11_6390	DalhemBerwinne
54083.0	206315.0	L01_428	Gistel/Moerdijkvaart
55646.0	191502.0	L01_488	Kortemark/Handzamevaart
35516.0	179376.0	L01_491	Oostvleteren/Poperingevaart
41473.0	180300.0	L01_492	Reninge/Kemmelbeek
40291.0	171536.0	L01_493	Vlamertinge/Grote_Kemmelbeek
45865.0	181140.0	L01_496	Merkem/Martjevaart
46069.0	179785.0	L01_497	Langemark/Martjevaart
45964.93	185232.2	L01_499	Merkem/Steenbeek
68972.0	207944.0	L02_422	Sint-Michiels/Kerkebeek
67378.0	205911.0	L02_423	Loppem/Kerkebeek
68650.0	191397.0	L02_424	Zwevezele/Jobeek
70646.0	202308.0	L02_425	Oostkamp/Rivierbeek
71962.0	203035.0	L02_426	Oostkamp/Hertsbergebeek
85061.0	210892.0	L02_442	Maldegem/Ede
91482.8	215413.41	L02_444	Sint-Laureins/Eeklose_watergang
74659.0	219726.0	L02_456	Oostkerke/Zwinnevaart
158829.0	211766.0	L04_007	Wijnegem/Groot_Schijn
143965.0	205513.0	L04_008	Bazel/Barbierbeek
115611.4	185460.4	L04_009	Massemen/Molenbeek
114517.0	180508.0	L04_00C	Letterhoutem/Molenbeek_(Kottembeek)
143823.0	192755.0	L04_036	Liezele/Molenbeek
142637.0	191439.0	L04_037	Malderen/Grote_Molenbeek
65436.0	181767.0	L05_402	Roeselare/Mandel
63351.0	171794.0	L05_404	Moorsele/Heulebeek
72947.1	182811.2	L05_407	Meulebeke/Devebeek
59613.2	167505.5	L05_408	Geluwe/Geluwebeek
101966.0	175227.0	L06_342	Nederzwalm/Zwalmbeek
98682.0	182170.0	L06_343	Eke/Beerhofbeek
92847.0	174985.0	L06_34F	Wannegem-Lede/Stampkotbeek
137117.0	185852.0	L07_281	Opwijk/Vondelbeek
121745.0	179299.0	L07_282	Mere/Molenbeek
128025.0	173652.0	L07_284	Iddergem/Molenbeek
132234.0	175407.0	L07_285	Essene/Bellebeek
135082.0	174042.0	L07_286	Sint-Katarina-Lombeek/Hunselbeek
136445.0	173980.0	L07_287	Ternat/Steenvoordebeek
114922.0	162546.0	L07_288	Geraardsbergen/Molenbeek
116339.0	159087.0	L07_289	Viane/Mark
117035.0	166846.0	L07_28A	Ophasselt/Molenbeek
128443.0	181410.0	L07_28C	Aalst/Molenbeek

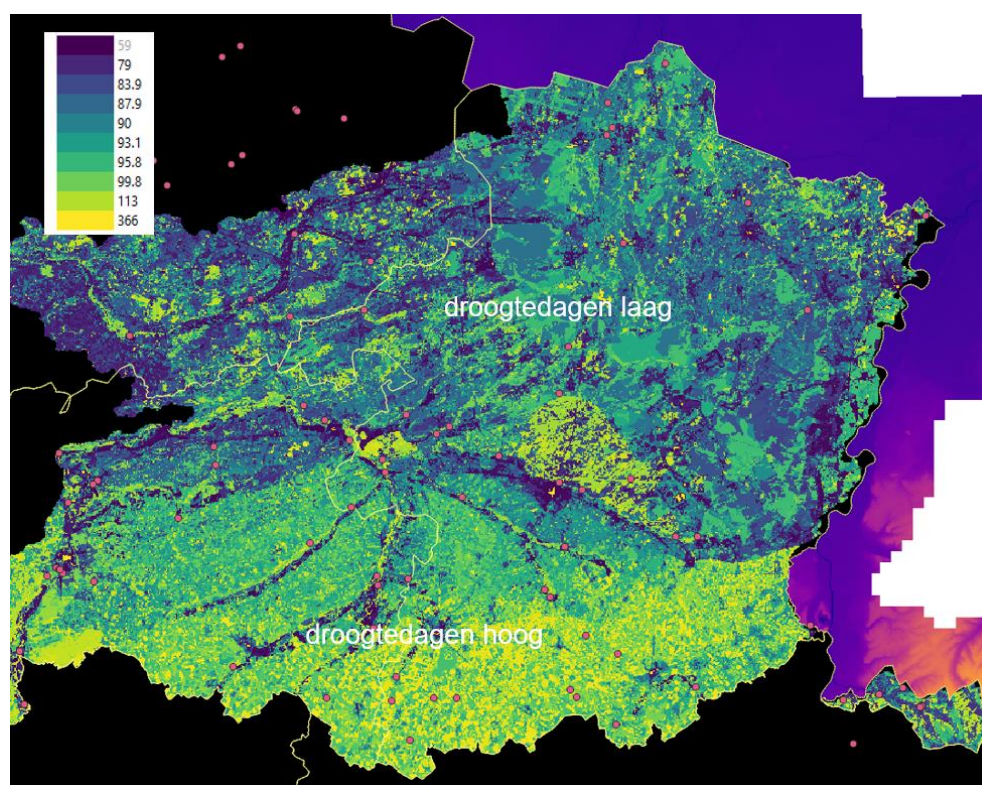
X	Y	Stationsnummer	Naam
173733.0	179490.0	Lo8_093	Wilsele/Dijle
169297.0	165863.0	Lo8_098	Sint-Joris-Weert/Dijle
172637.0	173505.0	Lo8_112	Heverlee/Voer
173245.0	173018.0	Lo8_115	Heverlee/Molenbeek
165811.0	164434.0	Lo8_119	Huldenberg/Ijse
143723.0	161692.0	Lo8_193	Lot/Zenne
152431.0	181725.0	Lo8_231	Grimbergen/Maalbeek
138935.0	163118.0	Lo8_233	Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek
197223.0	186996.0	Log_126	Molenstede/Demer
220814.0	180617.0	Log_136	Hasselt/Demer
229404.0	176385.0	Log_138	Bilzen/Demer
175945.0	181147.0	Log_141	Rotselaar/Winge
176382.0	181519.0	Log_143	Wezemaal/Grote_Losting
195901.0	175823.0	Log_145	Ransberg/Velpe
195292.0	188411.0	Log_147	Molenstede/Zwart_Water
204687.0	187574.0	Log_148	Lummen/Zwartebeek
187190.0	182934.0	Log_14A	Tielt/Grote_Motte
202765.0	182271.0	Log_152	Halen/Gete
188808.0	164451.0	Log_155	Oorbeek/Grote_Gete
209849.0	180023.0	Log_163	Spalbeek/Herk
231382.0	176377.0	Log_168	Munsterbilzen/Munsterbeek
218685.0	189489.0	Log_16F	Zonhoven/Laambeek
182798.0	208493.0	L10_055	Herentals/KleineNete_Nederrij
194504.0	215516.0	L10_066	Kasterlee/Rodeloop
194688.0	215361.0	L10_067	Kasterlee/Wamp
194447.0	204051.0	L10_077	Geel/Grote_Nete
201394.0	201548.0	L10_083	Meerhout/Kleinbroekbeek
200840.0	197124.0	L10_087	Tessengerlo/Grote_Laak
223543.0	213792.0	L11_022	Overpelt/Dommel
157682.59	236702.6	L11_042	Essen/Kleine_Aa
167986.0	225181.0	L11_046	Brecht/KleineAa
181957.0	230268.0	L11_048	Merksplas/Mark
235991.0	206947.0	L11_513	Bree/Abeek
241437.0	197085.0	L11_518	Opoeteren/Bosbeek
241673.0	168209.0	L11_553	Kanne/Jeker
231184.0	162620.0	L11_555	Nerem/Jeker
244761.0	161443.0	L11_561	Moelingen/Berwijn
251892.0	160893.0	L11_569	Sint-Martens-Voeren/Veurs
96655.0	168670.0	LS06_347	Etikhove/Molenbeek
96714.0	167158.0	LS06_348	Etikhove/Marie_Borrebeek
105739.0	164957.0	LS06_34A	Opbrakel/Vaanbuikbeek
97389.0	164829.0	LS06_34D	Nukerke/Molenbeek
100842.0	167851.0	LS06_34E	Maarke-Kerkem/Broekbeek

X	Y	Stationsnummer	Naam
94553.0	177767.0	LS06_34L	Huise/Plankbeek_Opw
94981.0	178155.0	LS06_34M	Huise/Plankbeek_Afw
207194.0	161591.0	LS09_15D	Muizen/Cicindria
209339.0	161565.0	LS09_15E	Mielen-boven-Aalst/Melsterbeek
194015.0	196486.0	HIS_L10_086	Vorst/Grote_Laak
176150.0	208850.0	knt03a-1066	Grobbendonk
158829.0	211766.0	Lo4_00A	Wijnegem/Afvoergracht
187054.0	184591.0	Log_144	Rillaar/Grote_Motte
228441.0	219669.0	L11_024	Achel/Warmbeek
223149.1	216055.4	L11_026	Neerpelt/Dommel_De_Wulp

**Bijlage E**      **Analyse van de drempelwaarden voor het definiëren van de bodemvocht droogtedagen en droogte-intensiteit**

## E.1 Een vaste drempelwaarde

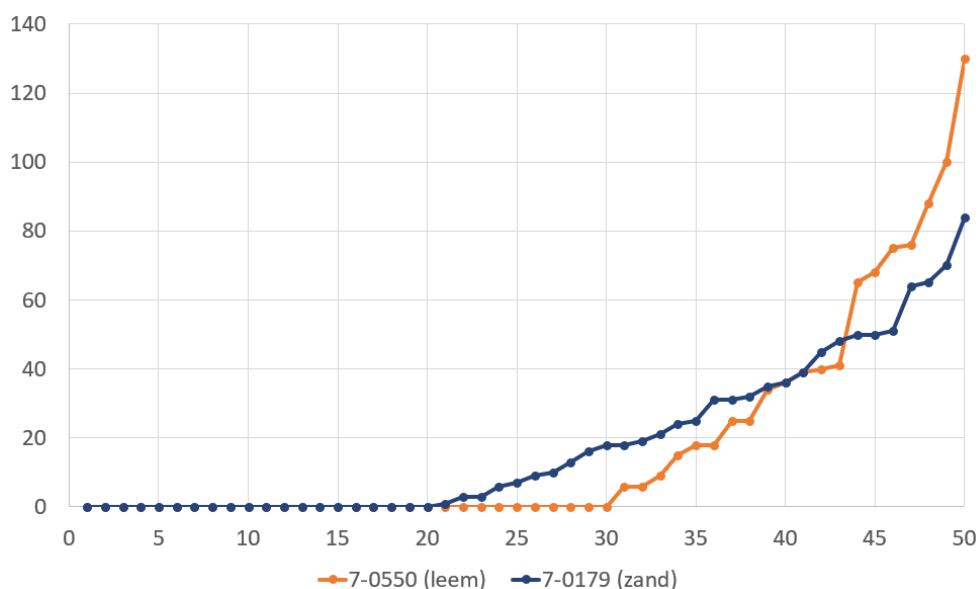
Een vaste drempelwaarde, zoals het 95-percentiel debiet per pixel voor de hydrologische kaarten, is niet geschikt voor het definiëren van het aantal bodemvocht droogtedagen. Anders dan voor debiet bieden de ruimtelijke patronen in het aantal bodemvocht droogtedagen essentiële informatie. Een drempelwaarde berekend op basis van een percentiel per pixel geeft voor iedere pixel hetzelfde gemiddeld aantal droogtedagen. Een vaste drempelwaarde levert dus geen informatie over de rol van de bodemtextuur en/of het landgebruik. Daarnaast kan het gebruik van een vaste drempelwaarde een vertekend beeld geven. Dit wordt geïllustreerd in Figuur Bijlage E- 1. Die figuur toont het aantal droogtedagen voor een 50-jarige terugkeerperiode voor Limburg. Het lemige zuiden heeft een hoog aantal droogtedagen, terwijl het zandige noorden en het Kempisch plateau een laag aantal droogtedagen heeft. Dit is niet correct en komt niet overeen met de ervaringen: het noorden van de provincie Limburg kampt immers met meer droogte door zijn zandige ondergrond.



Figuur Bijlage E- 1 : Aantal droogtedagen in Limburg voor een 50-jarige terugkeerperiode. Het 95-percentiel relatief bodemvocht per pixel werd gebruikt als drempelwaarde.

Het verschil in droogtedagen tussen noord en zuid Limburg was te wijten aan de statistische berekening van het 95-percentiel relatief bodemvocht en niet aan de droogtegevoeligheid van de regio's. Dit wordt geïllustreerd op basis van de tijdreeksen voor een aantal droogte ID's in Limburg met een verschillende textuurklasse. De relatieve bodemvocht-tijdreeksen voor de beschouwde droogte ID's, aangeduid met het putnummer en de textuurnaam, worden geëxtraheerd uit de langetermijnsimulaties. Vervolgens wordt het 95-percentiel relatief bodemvocht berekend, wordt per kalenderjaar het jaarlijks aantal droogtedagen berekend en wordt tenslotte de empirische terugkeerperiode berekend. Het aantal droogtedagen in functie van de empirische terugkeerperiode wordt weergegeven in Figuur Bijlage E- 2. Alle droogte ID's

en texturen hebben hetzelfde gemiddeld jaarlijks aantal droogtedagen, namelijk 18 dagen/jaar. Voor zand '7-0179 zand' zijn er 20 kalenderjaren zonder droogtedagen en 30 kalenderjaren met droogtedagen. Voor leem '7-0550 leem' zijn er 30 kalenderjaren zonder droogtedagen en 20 kalenderjaren met droogtedagen. Gezien er gemiddeld 18 droogtedagen per jaar zijn, zal het aantal droogtedagen in een extreem jaar kleiner zijn voor zand dan voor leem. Er kan bijgevolg geen uitspraak gedaan worden over welke textuur droogtegevoeliger is.



Figuur Bijlage E- 2 : Aantal droogtedagen (verticale as) in functie van de empirische terugkeerperiode (horizontale as) voor een droogte ID met textuurklasse leem en een droogte ID met textuurklasse zand.

Een vaste drempelwaarde kan dus gebruikt worden voor pixel specifieke analyses, bijvoorbeeld voor een vergelijking van het aantal droogtedagen tussen verschillende kalenderjaren of voor een klimaatimpactanalyse. Een vaste drempelwaarde kan niet gebruikt worden om pixels onderling te vergelijken. Er wordt daarom gezocht naar een variabele drempelwaarde.

## E.2 Een variabele drempelwaarde

### E.2.1 Droogte-indicator SWAP

Het SWAP model berekent zelf ook een droogte-indicator, met name de vermindering aan wateropname door plantwortels wanneer het bodemvocht onder een kritieke drempel wegzakt. Die kritieke drempel 'Treddry' is een optionele output van het SWAP-model, maar kan ook achteraf afgeleid worden uit de bodemvochtreesen. Ze worden immers berekend via de Van Genuchtenvergelijkingen. Een droogtedag is dan elke dag waarbij de Treddry-waarde groter is dan 0.

### E.2.2 Vlaams Reactief Afwegingskader

Een variabele drempelwaarde werd eveneens uitgewerkt binnen het parallel project 'Vlaams Reactief Afwegingskader' of kortweg 'VRAG' (VMM et al., 2021). Dit project beoogt een afwegingskader op te stellen dat toelaat om tijdens periodes van waterschaarste weloverwogen beslissingen te nemen en dit bij volgende twee droogteniveaus:

- Droogteniveau 1: Het watersysteem komt mogelijk onder druk met gevaar op waterschaarste voor één of meerdere sectoren en/of aan het watersysteem indien geen voorzorgsmaatregelen worden genomen. Dit niveau komt overeen met de fase "alarm".
- Droogteniveau 2: Het watersysteem bereikt een kritiek niveau, waarbij er zich effectief waterschaarste voordoet voor één of meerdere sectoren. Dit niveau komt overeen met de fase "crisis".

Waterschaarste wordt hierbij gedefinieerd als het probleem dat ontstaat wanneer de waterbeschikbaarheid te laag geworden is om aan de vraag naar water voor één of meer toepassingen te voldoen. Voor elk van de gedefinieerde toepassingen werden één of meerdere gangbare of potentieel bruikbare indicatoren geïdentificeerd. Deze indicatoren moeten toelaten om op ieder ogenblik de reële toestand van droogte en waterschaarste te bepalen en op basis van criteria (drempelwaarden voor de indicator) objectief te kunnen bepalen of er een watertekort dreigt (droogteniveau 1) of een watertekort zich effectief voordoet (droogteniveau 2) of niet. Het bodemvochtgehalte wordt hierbij beschouwd als indicator voor vegetatie, inclusief landbouwgewassen en (vooral regenwaterafhankelijke) terrestrische ecosystemen zoals infiltratiegebieden en vennen. De volgende twee drempelwaardes werden vastgelegd, namelijk voor:

- Droogteniveau 1: dit is wanneer de gewasproductie onder druk begint te staan en huidmondjes bijgevolg sluiten (stressfactor = 0.9); en
- Droogteniveau 2: dit is wanneer de gewasproductie een sterke impact ondervindt, en neigt naar totale verdroging met onomkeerbare schade tot gevolg (stressfactor = 0.2).



Deze drempelwaarde wordt vastgelegd via een p-waarde, dit is een gewas-specifieke waarde die de gevoeligheid van het gewas aangeeft voor droogte. De drempelwaarde kan omgezet naar een bodemvochtgehalte met de formule:

$$(1 - p) * TAW + PWP$$

met TAW de ‘Total available water’ (de totale hoeveelheid water) en PWP de ‘Permanent Wilting Point’ (het permanent verwelkingspunt). Met oog op consistentie tussen het VRAG-project en dit project, zou het overnemen van de p-waardes voor droogteniveau 1 wenselijk zijn. Echter, er zijn enkele verschillen met het VRAG-project:

- In dit project is er gedetailleerde informatie beschikbaar over elk bodemprofiel (profielopbouw en parameters per bodemlaag). Daarentegen, in het VRAG-project wordt enkel de textuurklasse beschouwd (Tabel Bijlage E- 1).
- Het VRAG-project evalueert enkel landbouwpercelen, terwijl in dit project ook niet-landbouw percelen geëvalueerd dienen te worden (bv. stedelijk, bos, natuur).
- Het VRAG-project en dit project maken gebruik van een verschillend bodemvochtmodel.

Tabel Bijlage E- 1 : Bodemparameters beschouwd in het VRAG-project (VMM et al., 2021).

Textuur	SAT (vol%)	FC (vol%)	PWP (vol%)	TAW (vol%)
zand & lemig zand	37	20	7	7.5
lichte zandleem & zandleem	43.5	27.5	9	16
leem	43	33	9	24
klei & zware klei	52.5	45	20	15.5

### E.2.3 GEOPEARL gebaseerde drempelwaarden ifv gewas en bodem (methode ‘by texture and crop’)

De drempelwaarden voor dit project zijn vooreerst gebaseerd op de methode met p-waarde uit VRAG. Daarnaast wordt er maximaal gebruik gemaakt van de informatie uit het gedetailleerde SWAP modelinstrument. Dit SWAP modelinstrument is de component van het droogtemodel verantwoordelijk voor de watertransfers in de onverzadigde zone. De parameters TAW en PWP worden afgeleid uit de parameters  $O_{res}$  (residueel bodemvochtgehalte),  $O_{sat}$  (verzadigd bodemvochtgehalte),  $n_{par}$  (empirische parameter) en  $\alpha$  (empirische parameter). Die parameters zijn gekend over Vlaanderen voor een opeenvolging van profiellagen, meestal zeven tot tien lagen, via het GeoPEARL model (Joris et al., 2017). De berekening gebeurt volgens de methode geïmplementeerd in SWAP, nl. de Van Genuchten vergelijking, met een grondwaterdruk van -15849cm (equivalent met -1.5MPa) voor het bodemvochtgehalte bij PWP en met -100cm voor het kritisch bodemvochtgehalte FC.

$$m = 1 - 1 / n_{par}$$

$$f_{pwp} = (1 + (\text{abs}(\alpha \times 15849))^{n_{par}})^m$$

$$PWP = O_{res} + (O_{sat} - O_{res}) / f_{pwp}$$

$$f_{fc} = (1 + (\text{abs}(\alpha \times 100))^{n_{par}})^m$$

$$FC = O_{res} + (O_{sat} - O_{res}) / f_{fc}$$

Voor elke profiellaag werden TAW en PWP berekend en vervolgens uitgemiddeld over de bovenste 70cm van het bodemprofiel. Met deze PWP en TAW-waarde werd vervolgens de drempelwaarde berekend als een bodemvochtgehalte en dat voor ieder punt over Vlaanderen. Uit een gevoeligheidsanalyse kon afgeleid worden dat de aggregatiemethode (over de bovenste 70cm) een beperkt effect heeft op de berekende drempelwaarden. Indien bijvoorbeeld enkel gekeken wordt naar de bovenste bodemlaag, dan verhogen de drempels bij de meeste profielen met ca. 0.02 en tot 0.05 voor een zandige textuur.

Het voordeel van de nieuwe methode op basis van GeoPearl (PWP en TAW) ten opzichte van de P95-methode is dat de definitie van een droogtedag afhankelijk wordt van het bodemtype. Zo kunnen pixels ruimtelijk vergeleken worden. Via de p-waarde wordt de berekening ook afhankelijk van het gewas. In het huidig project wordt het gewas bepaald via de landgebruikskaart. De p-waarde heeft een groot effect op het aantal droogtedagen en dus moet ook hier een goede keuze gemaakt worden. Dit kan op twee manieren:

- Ofwel wordt met één referentiegewas gewerkt ('by texture'). In dat geval toont de droogtekaart enkel de invloed van het bodemtype, alsof er overal het referentiegewas geplant wordt. Zo kunnen bodemregio's met elkaar vergeleken worden, los van het huidige landgebruik. Merk op dat het gewas wel al impliciet opgenomen zit in de berekening van SWAP (via o.a. worteldiepte).
- Ofwel wordt per pixel met een ander referentiegewas gewerkt ('by texture and crop'). In dat geval toont de droogtekaart zowel de invloed van het bodemtype als van het landgebruik. De grote patronen zijn minder zichtbaar en de kaart is vooral geschikt voor detailgebruik.

#### **Methode 'by texture'**

De methode 'by texture' werd getest met zowel een ongevoelige teelt (gras) als met gevoelige teelt (groenten). Zowel een lage p-waarde van 0.71 (typisch voor droogtegevoelige gewassen zoals fruit), als een hoge p-waarde van 0.88 (typisch zoals droogteresistente gewassen zoals gras en maïs) negeerden immers veel van de variatie tussen landgebruiktypes. In overleg met de opdrachtgever werd besloten verder te werken met drempelwaarde 'by texture and crop'.

#### **Methode 'by texture and crop'**

Voor methode 'by texture and crop' is een vertaalslag noodzakelijk tussen de landgebruikskaart en de beschikbare gewassen in Tabel Bijlage E- 2. Niet alle teelten beschouwd in dit project worden immers beschouwd in het VRAG-project (bijvoorbeeld groenten en graan). Sommige landgebruikstypes vertegenwoordigen ook niet echt een teelt (bijvoorbeeld bebouwing). In het VRAG-project worden de p-waarden berekend met het Aquacrop gewasgroeimodel en dit voor een aantal gewassen. Voor de overige gewassen werd dan telkens de p-waarde overgenomen van een gewas met een gelijkaardige droogtegevoeligheid. Zo wordt gras als droogtebestendig bestempeld en krijg het de p-waarde van maïs die ook als droogteresistent gekend is. Het omgekeerde geldt voor graan, welke gekend is al droogtegevoelig, en de p-waarde van de aardappelen meekreeg. Op die manier werden p-waarden voor de gewassen in VRAG bepaald en vertaald naar de landgebruiken binnen het droogtemodel. Voor aardappel, suikerbiet, groenten en maïs kon de p-waarde uit VRAG worden overgenomen. Voor

graan en fruit werd een conservatieve p-waarde genomen, dus gelijk aan de droogtegevoelige gewassen. Voor stedelijk weefsel werden grasvelden verondersteld en werd dus gekozen voor een ongevoelig gewas. Voor stedelijk landgebruik werd ook SWAP doorgerekend met een gras-gewas voor o.a. worteldiepte. De resultaten voor de vertaalslag worden aangeduid in Tabel Bijlage E- 3.

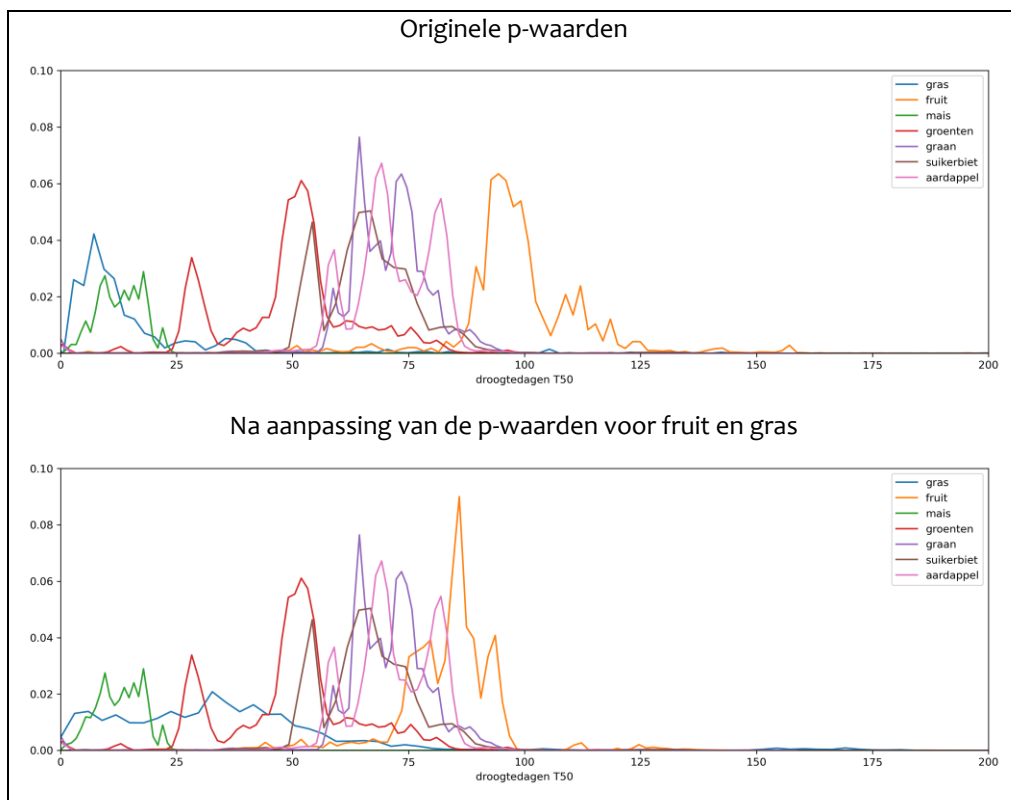
Tabel Bijlage E- 2 : De p-waarden in functie van het droogteniveau voor gewassen (VMM et al., 2021).

Gewas	Referentie	p-waarde droogteniveau 1	p-waarde droogteniveau 2
Aardappelen	Aquacrop	0.71	0.9
Wortel/spruitkool/Glastuinbouw	Gevoelig	0.71	0.9
Bloemkool/Prei	Gevoelig	0.71	0.9
Erwt	Gevoelig	0.71	0.9
Fruit en noten	Gevoelig	0.71	0.9
Boon	Aquacrop	0.74	0.92
Suikerbieten	Aquacrop	0.76	0.92
Maïs	Aquacrop	0.88	0.97
Grasland	Ongevoelig	0.88	0.97

Tabel Bijlage E- 3 : Koppeling GEOPAERL landgebruik aan VRAG gewassen en p-drempelwaarden.

GeoPeak Landgebruik	VRAG-gewas	p-waarde
01 - Aardappel	Aardappel	0.71
03 - Suikerbiet	Suikerbiet	0.76
06 - Gras	Gras	0.88 -> 0.84
10 - Stedelijk	Ongevoelig (-> gras)	0.88
12 - Fruit (+ bos en boomgaarden)	Gevoelig	0.71 -> 0.75
13 - Graan	Gevoelig (-> groenten)	0.71
14 - Groenten	Wortel, spruitkool, boon, bloemkool, erwt, prei, glastuinbouw	0.71
16 - Mais	Mais	0.88

Aanvankelijk werd gewerkt met p-waarden die varieerden tussen 0.71 (droogtegevoelig) en 0.88 (droogteresistent). Voor de meeste gewassen bleek de vertaalslag goede resultaten te geven. Maar voor de landgebruikstypes gras en fruit/bos waren de resultaten niet geschikt. Gras is droogteresistent en heeft een hoge p-waarde (0.88). Echter, voor veel bodemtypes resulteerde deze p-waarde in 0 droogtedagen, ook bij een terugkeerperiode van 50 jaar. Dit lijkt niet met de perceptie van de realiteit overeen te komen. Een mogelijke reden kan zijn dat gras minder droogteresistent is gedacht en een te hoge p-waarde werd toegekend. De p-waarde van gras werd niet berekend via het gewasgroeimodel, maar ze werd overgenomen van maïs op basis gelijkaardige droogtegevoeligheidskenmerken. Een andere reden is te vinden in de benadering van het bodemvocht bij de definitie van een droogte-event. Het aantal bodem-droogtedagen wordt bepaald aan de hand van een gemiddeld bodemvocht over het bodemprofiel (tot 70 cm) voor alle gewassen, terwijl deze werkelijk een verschillende worteldiepte hebben en hun vocht op verschillende dieptes uit de bodem halen. Over die 70 cm is het bodemvocht bij droogte ook steeds hoger dan in de top 30 cm. Concreet voor gras betekent dit dat het bodemvocht over die 70cm afgetoetst wordt aan zijn drempel, terwijl gras minder diep wortelt. Het vochtgehalte uit de toplaag (30 cm) wordt bijgevolg beter aan zijn drempel afgetoetst. Omdat het vochtgehalte over 70cm diepte steeds hoger is dan de toplaag, kan dit leiden tot een mogelijke onderschatting van het aantal droogtedagen. Om hierop te anticiperen werd de p-waarde geoptimaliseerd naar 0.84. Fruit heeft daarentegen een lage p-waarde (0.71) en is dus droogtegevoelig. Maar ook deze klasse omvat enkele subklassen, namelijk fruit, boomgaarden en bos. Vooral de bossen, die 90% van de klasse fruit vertegenwoordigen, kunnen via hun wortels vocht onttrekken uit de diepere bodemlagen. Ze zijn dus waarschijnlijk droogteresistentier dan hun p-waarde doet vermoeden. Het aantal droogtedagen voor bos wordt dan eerder overschat. Om dezelfde redenen werd de p-waarde voor fruit en bos daartoe geoptimaliseerd naar 0.75. De wijziging van p-waarden op de relatieve frequentie wordt aangeduid in Figuur Bijlage E- 3. De verhoging van de p-waarde voor fruit (inclusief bos en boomgaarden) resulteert in een afname van het aantal droogtedagen. De verlaging van de p-waarde voor gras resulteert in een grotere variatie van het aantal droogtedagen. Verder onderzoek naar deze p-waarde, en de relatie met worteldiepte en het uitmiddelen van bodemvocht over het bodemprofiel strekt tot de aanbeveling voor toekomstig onderzoek (§6.2).



Figuur Bijlage E- 3 : Relatieve frequentie van het aantal droogtedagen volgens p-waarde.