



WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM

FLANDERS HYDRAULICS
RESEARCH

OPSTELLEN VAN EEN METHODE VOOR HET INREKENEN VAN DE KLIMAATSVERANDERING IN DE COMPOSIETHYDROGRAMMETHODE

ALGEMEEN RAPPORT

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT
LEUVEN



Vlaamse Overheid
Departement Mobiliteit en Openbare Werken
Waterbouwkundig Laboratorium

Model 706/10-1

OPSTELLEN VAN EEN METHODE VOOR HET INREKENEN VAN DE KLIMAATSVERANDERING IN DE COMPOSIETHYDROGRAMMETHODE ALGEMEEN RAPPORT

november 2006

VOORWOORD

In het verleden werden waterbeheersingsplannen door de Vlaamse overheid opgesteld met de bedoeling dat overstromingen zich lokaal niet of nauwelijks konden voor doen. Hierbij werd het water vaak zo snel mogelijk afgevoerd. Stroomafwaarts kon dit echter voor problemen zorgen. Daarom wordt bij het opstellen van waterbeheersingsplannen steeds meer gefocust op het bieden van bescherming tegen schade. Uitgangspunt daarbij is de wetenschap dat overstromingen niet kunnen worden tegengehouden. Door overstromingen daar te laten plaats vinden waar ze het minst schade veroorzaken, worden andere, meer kwetsbare gebieden beter beveiligd.

De geactualiseerde waterbeheersingsplannen, die volgen uit deze vernieuwde visie m.b.t. waterbeheer, moeten uiteraard voor een voldoende lange periode (de zogenaamde planperiode) de bevolking en de aanwezige infrastructuur duurzaam tegen wateroverlast beschermen. Daarom wordt moet rekening gehouden worden met de verwachte klimaatverandering voor de komende eeuw. Zo wordt bvb. in het vernieuwde Sigmaplan rekening gehouden met de effecten van de verwachte zeespiegelstijging op het overstromingsrisico langs de Schelde.

Tot op heden was er nog weinig inzicht in het effect van de verwachte verandering van neerslagpatronen op de rivierdebieten. Met dit onderzoeksproject werd op deze lacune ingespeeld en werd een methode ontwikkeld om met deze effecten te kunnen rekenen bij het opstellen van waterbeheersingsplannen.

In dit rapport wordt de uitgewerkte methode beschreven en toegepast voor drie deelbekkens van de Dender. Uit de resultaten blijkt dat de kans op laagwatertekorten beduidend verhoogt. De toename van de overstromingskansen, die vaak met klimaatverandering wordt geassocieerd, blijkt minder eenduidig uit de resultaten. *Piekafvoeren* in een rivier zoals de Dender zullen in de meest extreme scenario's met niet meer dan 15% toenemen.

De uitgevoerde studie baseert zich op alle kennis en informatie die vandaag ter beschikking is. Hoewel er nog veel onzekerheden zijn, geven de eerste resultaten van deze studie belangrijke en duidelijke prognoses voor het waterbeheer in Vlaanderen.

Stef Michiels
Kwaliteitsbewakers

Peter Viaene

Wouter Vanneuville

Katrien Van Eerdenbrugh
Leidend ambtenaar

Frank Mostaert
Afdelingshoofd

Auteurs:

Omar Boukhris
Katholieke Universiteit Leuven

Patrick Willems
Katholieke Universiteit Leuven

Jean Berlamont
Katholieke Universiteit Leuven

Inhoud

1	Inleiding.....	1
2	Methode voor impactanalyse van klimaatverandering	2
2.1	Betrokken deelaspecten	2
2.2	Beschikbare methoden	4
2.3	Geselecteerde methode	5
3	Klimaatveranderingsscenario's voor Vlaanderen	6
3.1	Perturbatiefactoren J-P Van Ypersele & Tyndall Centre	6
3.2	PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren CCI-HYDR project	7
3.3	Seizoensvariatie perturbatiefactoren	8
3.3.1	Eerste methode seizoenvariatie: hydrologische seizoenen	8
3.3.2	Tweede methode seizoenvariatie: climatologische seizoenen	9
3.4	Overzicht seizoenale PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren	9
4	Controle consistentie klimaatveranderingsscenario's met historische neerslag te Ukkel	19
4.1	Consistentie controleperiode PRUDENCE RCM's	19
4.2	Consistentie perturbatiefactoren met empirische trends	27
5	Hydrologische impactanalyse voor een geselecteerd rivierbekken	30
5.1	Het Denderbekken	30
5.2	Het NAM-model	31
5.3	Frequentieanalyse hydrologische extremen	33
5.4	Impactanalyse klimaatverandering op hoogwaterfrequenties: perturbatiefactoren voor neerslag	34
5.4.1	Eerste methode seizoenvariatie	35
5.4.1.1	Uurlijkse piekdebieten neerslagafstroming	35
5.4.1.2	QDF-verbanden	42
5.4.2	Tweede methode seizoenvariatie	44
5.5	Impactanalyse klimaatverandering op hoogwaterfrequenties: toevoeging perturbatiefactoren voor evapotranspiratie	46
5.6	Impactanalyse klimaatverandering op laagwaterfrequenties	49
5.7	Impactanalyse klimaatverandering andere VHA-zones	51
5.8	Conclusies en discussie	52
6	Referenties	53
7	Appendix A: Hydrologische impact op uurlijkse piek- en laagwaterdebieten	56
8	Appendix B: Gemiddelde impact op hydrologische modelvariabelen	65
9	Appendix C: Grafische voorstelling ruimtelijke verschillen impact	70

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de resultaten bij de studie “*Opstellen van een methode voor het inrekenen van klimaatverandering in de composiethydrogrammethode*” dat door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven is uitgevoerd voor het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in Borgerhout van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, conform bestek nr. 16EB/04/30. In de studie is een methode uitgewerkt om de invloed van klimaatverandering op hydrologische extremen (hoogwater en laagwater) te kwantificeren, en dit ingepast in de huidige algemene modelleringsmethodologie van het WL. De K.U.Leuven heeft voor bepaalde deeltaken bij de studie een onderaannemingsovereenkomst afgesloten met ingenieursbureau IMDC. De studie loopt verder parallel met de studie rond “*Climate change impact analysis on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems*” (afkorting **CCI-HYDR**) zoals die gedurende 2006-2007 (in een eerste fase) en 2008-2009 (in een tweede fase) wordt uitgevoerd door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven en het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) voor Federaal Wetenschapsbeleid. De voorliggende studie maakt gebruik van de klimaatveranderingsscenario's zoals die in samenwerking met het KMI worden opgesteld in het CCI-HYDR project. Ook maakt zij gebruik van de resultaten van de gedetailleerde literatuurstudie die in dat project is uitgevoerd m.b.t. bestaande klimaatmodellen en bestaande technieken voor impactanalyse, en geeft zij feedback m.b.t. de ontwikkeling en toepassing van nieuwe, meer geavanceerde technieken.

In het CCI-HYDR project wordt een eerste tussentijdse presentatie van resultaten aan het Follow-up Committee bij het project voorzien voor de laatste week van september 2006, en een eerste definitieve rapportering van het literatuuronderzoek in december 2006. In bijlage bij dit rapport is reeds de voorlopige versie van het deelrapport rond dit literatuuronderzoek bijgevoegd:

“Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems – I. Literature review”, Interim report September 2006, by O.Boukhris & P.Willems (K.U.Leuven – Hydraulics Section)

De tweede bijlage bij dit rapport is een deelrapport rond de specifieke analyse van cyclische patronen en trends in de historische neerslagreeks te Ukkel:

“Mod. 706/10 Methode voor het inrekenen van de klimaatverandering in de composiethydrogrammethode. Deelrapport onderzoek cycli en trends in de historische neerslagreeks te Ukkel.”, november 2006, J.Blanckaert & P.Willems (K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica en IMDC)

2 Methode voor impactanalyse van klimaatverandering

2.1 Betrokken deelaspecten

Voor het kwantificeren van de impact van klimaatverandering op het hydrologisch systeem dient men de verschillende fysische componenten en variabelen en deelaspecten, zoals schematisch weergegeven in Figuur 1, in rekening te brengen.

Het uitvoeren van een hydrologische impactanalyse van klimaatverandering vereist dat het klimaatsysteem en het hydrologisch systeem gezamenlijk gemodelleerd worden, alsook hun interacties. Het klimaatsysteem bestaat hierbij uit vijf belangrijke componenten: de atmosfeer, de hydrosfeer, de cryosfeer, de landoppervlakte en de biosfeer. Een groot aantal interacties vinden plaats tussen deze individuele componenten en er bestaan heel wat externe invloedsfactoren, wat de fysische modellering van het klimaat, en zeker de klimaatverandering, bijzonder moeilijk maakt. Dit wordt later ook duidelijk op basis van de grote verschillen tussen de resultaten van de verschillende klimaatmodellen; de onzekerheden in de modellering en voorspelling van klimaatverandering zijn bijzonder groot. Door een relatief kleine wijziging aan te brengen aan één component van het klimaatsysteem, kan het systeem zich in zijn geheel sterk wijzigen. Onzekere wijzigingen in de samenstelling van de atmosfeer, door gewijzigde emissies van broeikasgassen, leidt tot een onzekere verandering van het klimaatsysteem en dus ook van de impact op hydrologische extremen.

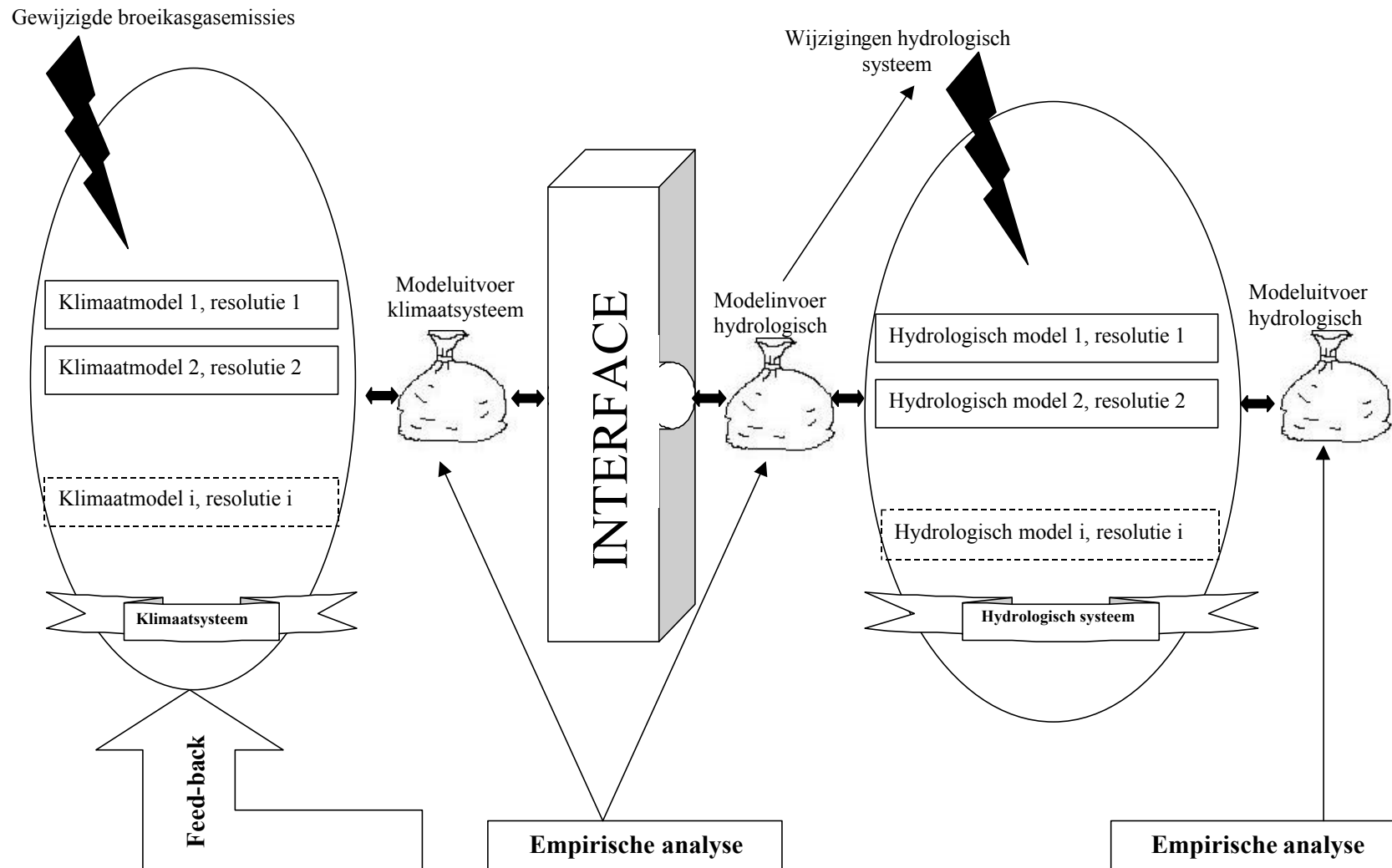
Voor de fysisch gebaseerde modellering van het klimaatsysteem bestaan er een groot aantal **klimaatmodellen**. Zij modelleren als uitvoer climatologische variabelen zoals luchttemperatuur, luchtvochtigheid, neerslag, zonnestraling, windsnelheid, enz. Bepaalde van deze climatologische variabelen kunnen gebruikt worden als invoer voor de modellering van het hydrologisch systeem, zoals de neerslag en de potentiële evapotranspiratie (ET_o), die uitgaande van de climatologische variabelen kan geschat worden. Modellen voor het hydrologisch systeem voorspellen verder de hydrologische uitvoervariabelen zoals debieten en waterhoogten.

Zowel de klimaatmodellen als de hydrologische modellen kunnen opereren onder verschillende tijds- en ruimteschalen. De standaard schalen voor de klimaatmodellen zijn hierbij typisch groter dan deze voor de hydrologische modellen, wat een schaling van de climatologische variabelen naar de hydrologische modelinvoervariabelen noodzaakt; de zogenaamde “**downscaling**” (zie de “Interface” tussen de klimaatmodellen en de hydrologische modellen in Figuur 1).

Verder kan men twee wegen bewandelen bij het inschatten van de invloed van klimaatverandering; via:

- **fysisch-gebaseerde modellen;**
- **empirische trendanalyse.**

Men kan inderdaad de invloed van de gewijzigde broeikasemissies op de climatologische variabelen doorrekenen via de fysisch-gebaseerde klimaatmodellen of men kan trachten om deze invloed empirisch te achterhalen op basis van een statistische analyse van trends of tijdsevoluties in de beschikbare lange-termijn historische meetreeksen. Men kan dit doen voor tijdreeksen bij de climatologische variabelen, de hydrologische modelinvoervariabelen (neerslag en ET_o) en/of de hydrologische modeluitvoervariabelen (waterhoogten en debieten langs de rivier). In deze studie wordt een combinatie van beide methoden gebruikt, die tevens toelaat om de consistentie van de voorspellingen op basis van de fysisch-gebaseerde modellen met de empirisch bepaalde trends te controleren (zie de “Feed-back” in Figuur 1).



Figuur 1. Schematisch overzicht van de verschillende deelmodellen en deelaspecten betrokken bij de impactanalyse van klimaatverandering.

2.2 Beschikbare methoden

In het CCI-HYDR project is een gedetailleerde literatuurstudie uitgevoerd m.b.t. recente en lopende onderzoeksprojecten over klimaatverandering en de gebruikte methoden (het gaat telkens om een combinatie van de verschillende deelaspecten voorgesteld in Figuur 1).

De verschillende methoden toepasbaar voor elk van deze deelaspecten kunnen als volgt worden ingedeeld:

- Soorten klimaatmodellen:
 - GCM's (General Circulation Models of Global Climate Models): mondiale klimaatmodellen (groschalig in tijd en ruimte: maandresultaten op een 300 km grid);
 - RCM's (Regional Climate Models): regionale klimaatmodellen (kleinschaliger: dagresultaten op een 25 tot 60 km grid).
- Soorten broeikasemissiescenario's (veronderstellingen over de toekomstige evolutie in de uitstoot van broeikasgassen en stofdeeltjes in de 21^e eeuw), op basis van aannames in de verdere ontwikkeling van de wereldbevolking, economie en techniek (de zogenaamde wereldbeelden):
 - A1: mondiale markt;
 - A2: veilig scenario;
 - B1: mondiale solidariteit;
 - B2: zorgzaam scenario.

De scenario's 1 (A1 en B1) gaan uit van een verdere mondialisering van de wereldbevolking en –economie, met een bevolkingsgroei die piekt in het midden van de 21^e eeuw en daarna daalt, en snelle economische veranderingen met sterke evolutie naar een diensten- en informatie-economie. De scenario's 2 (A2 en B2) veronderstellen daarentegen een evolutie naar een meer lokaal georiënteerde wereldbevolking en –economie, met meer gefragmenteerde technologische evoluties.

Het verschil tussen de scenario's 1 en 2 heeft dus in hoofdzaak te maken met het verschil tussen de evolutie naar een meer mondiale wereld of naar een meer regionaal georiënteerde wereld. Het verschil tussen de scenario's A en B heeft anderzijds te maken met de graad van milieuduurzaamheid in de verdere evolutie van de wereld. Bij de scenario's B gaat men uit van een evolutie die maximaal rekening houdt met de interacties tussen economie, sociale aspecten en de impact op het milieu, en die uitgaat van een algemene vermindering in het gebruik van materialen en de introductie van propere en duurzamere technologieën. De scenario's A gaan uit van een verdere economische groei met tragere technologische vernieuwingen.

Haast alle impactstudies rond klimaatverandering gaan uit van het A2-scenario, wat eerder een bovengrens geeft van de potentiële impact.

- Soorten schalingsmethoden:
 - Dynamische schaling vanuit GCM's gebruik makend van RCM's;
 - Statistische of empirische schaling: waarbij empirische of statistische verbanden worden gebruikt tussen de climatologische variabelen en de hydrologische modelinvoervariabelen; deze kunnen verder worden onderverdeeld in:
 - Regressietechnieken;
 - Stochastische methoden;
 - Selectie van historische gebeurtenissen met gelijkaardige meteorologische omstandigheden.

Een meer gedetailleerde beschrijving van deze technieken en hun voor- en nadelen kunnen gevonden worden in het CCI-HYDR tussentijds rapport.

In de meest gangbare aanpak wordt een combinatie gebruikt van een fysisch-gebaseerde methode voor het modelleren van de klimaatveranderingsscenario's op basis van mondiale klimaatmodellen (GCM's) en regionale klimaatmodellen (RCM's), waardoor gelijktijdig een dynamische schaling wordt doorgevoerd. Hierdoor worden dagwaarden gegenereerd op een ruimtelijke gridschaal van ongeveer 25 km tot ongeveer 50 of 60 km. Verdere schaling naar de ruimtelijke schaal van een deelbekken en naar de uurlijkse tijdschaal die nodig is in de hydrologische modellingsmethode van het WL, dient dan empirisch of statistisch te gebeuren. De meest eenvoudige methode hierbij, die in haast alle voorgaande studies rond hydrologische impactanalyse van klimaatverandering is toegepast, is de veronderstelling dat het procentueel verschil in de waarde van de hydrologische modelinvoervariabele voor de kleine schaal ten gevolge van klimaatverandering nagenoeg overeenstemt met het verschil voor de grote schaal. Deze veronderstelling wordt ook in deze studie gemaakt. In het CCI-HYDR project wordt deze veronderstelling verder onderzocht; er wordt nagegaan of het procentueel verschil eventueel afhankelijk is van de grootte van de meteorologische gebeurtenis (vb. groter procentueel verschil op de neerslagvolumes voor de meer uitzonderlijke buien?). Voorlopige resultaten geven aan dat de gangbare veronderstelling van een constant procentueel verschil gerechtvaardigd is. Ook de nieuwe klimaatscenario's van het KNMI geven slechts zeer kleine verschillen tussen de stijging in gemiddelde winterneerslag en de stijging in winterneerslag tijdens de natte dagen en de extreme dagneerslag (KNMI, 2006). Voor de zomer zijn de verschillen groter.

In het CCI-HYDR project worden de klimaatveranderingsscenario's gebaseerd op de resultaten van de RCM's die in het kader van het Europese onderzoeksproject PRUDENCE zijn afgeleid. Deze zijn voor deze studie aangevuld met schattingen over de toekomstige klimaatverandering voor Vlaanderen, zoals die recent door andere onderzoekers recent zijn afgeleid.

2.3 Geselecteerde methode

De resultaten van de RCM's afgeleid in het PRUDENCE project bestaan uit tijdreeksen met een totale lengte van 30 jaar voor de referentieperiode 1960 (of 1961) – 1990 en voor de verschillende doorgerekende scenario's naar de periode 2070 – 2100. Deze tijdreeksen hebben een dagelijkse tijdstap en stellen gridgemiddelde waarden voor. Door de waarden van de hydrologische modelinvoervariabelen (hierna ook hydrometeorologische variabelen genoemd; dus neerslag en evapotranspiratie) te vergelijken tussen de referentieperiode en de scenariosimulaties kunnen gemiddelde procentuele verschillen berekend worden. Deze verschillen worden hierna "perturbatiefactoren" genoemd en kunnen daarna worden toegepast op de hydrologische modelinvoerreeksen om de invloed van klimaatverandering (volgens verschillende klimaatmodellen en scenario's) door te rekenen in de hydrologische modellen. Een andere aanpak zou bestaan in het rechtstreeks doorrekenen van de RCM-tijdreeksen in de hydrologische modellen. Deze aanpak is niet toegepast omdat deze aanleiding kan geven tot systematische verschillen in de hydrologische modelresultaten (voor de referentieperiode) omwille van eventuele systematische afwijkingen tussen de resultaten van de klimaatmodellen en de werkelijke historische observaties voor de hydrometeorologische variabelen. De afwijkingen kunnen eventueel weggewerkt worden door toepassing van correctiefactoren, maar dit leidt tot een meer complexe aanpak die geen voordelen biedt t.o.v. de voorgestelde methode waarbij perturbatiefactoren worden toegepast op de historische hydrologische modelinvoertijdreeksen.

De toepassing van de geselecteerde methode wordt in deel 5 van dit rapport gedetailleerd toegelicht en geïllustreerd op basis van een toepassing in het Denderbekken.

3 Klimaatveranderingsscenario's voor Vlaanderen

3.1 Perturbatiefactoren J-P Van Ypersele & Tyndall Centre

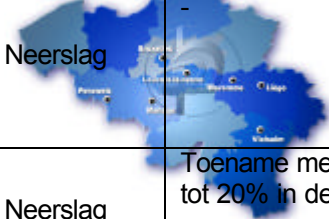
De Belgische climatoloog en lid van het Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) Prof. Jean-Pascal Van Ypersele vermeldde in het rapport bij zijn studie over "Climate change impact on Belgium" voor Greenpeace in 2004 dat:

"Precipitations increase moderately in winter (between 6 and 23% at the end of the century). They seem to decrease in summer, but the quantitative results diverge (from normal status to a fall of 50%), this is probably due to the current limitations of the models and largest variability of that season."

De resultaten zijn gebaseerd op vijf GCM's en twee scenario's (A2, B2) gesimuleerd door Van Ypersele (2004). Het model GFDL-R30 produceerde onverwachte resultaten met een sterke vermindering in neerslag ten gevolge van klimaatverandering onder het B2 scenario. Dit scenario veronderstelt beduidend kleinere CO₂ emissies in vergelijking met het A2 scenario.

Een tweede bron is het Tyndall Centre for Climate Research, dat in zijn technisch rapport no. 34-2005, aangeeft dat de neerslaghoeveelheden in België tegen het jaar 2050 zullen stijgen met 10 tot 20 % in de winter en dalen met 30 tot 40 % in de zomer. Deze resultaten zijn gebaseerd op verschillende regionale klimaatmodellen, ontwikkeld door het Hadley Center, onder de veronderstelling van het A2-broeikasgasemissiescenario en de veronderstelling van het stilvallen van de oceanische circulatie.

Tabel 1 geeft een overzicht van de gemiddelde perturbatiefactoren voor neerslag in België volgens de twee hierboven vermelde literatuurbronnen. Geen van beide bronnen maken evenwel melding van de tijdschaal voor dewelke de perturbatiefactoren gelden. Hier wordt aangenomen dat zij gemiddelde veranderingen voorstellen in de totale seizoenshoeveelheid van neerslag.

	Jaar: 2050	Jaar: 2100	Scenario	Bron
 Neerslag		Toename met 6% tot 23% in de winter	A2	Greenpeace 2004 rapport, J-P Van Ypersele
		Afname tot 50% in de zomer	A2	
Neerslag	Toename met 10% tot 20% in de winter Afname met 30% tot 40% in de zomer	-	A2	Tyndall Centre for Climate Research, Technical Report 34, 2005
			A2	

Tabel 1. Perturbatiefactoren voor neerslag in België.

Enkel twee jaarseizoenen (winter en zomer) zijn opgenomen in Tabel 1. De resultaten van Van Ypersele en het Tyndall Centre geven geen informatie over de lente en de herfst. Daarom werd voor deze studie in eerste instantie een twee-stap seizoensvariatie verondersteld voor de perturbatiefactoren, met een lange winterperiode en een lange zomerperiode.

De toegepaste seizoensafhankelijke perturbatiefactoren zijn +10% voor de winterperiode (periode van 1 oktober tot en met 31 maart) en -50% voor de zomerperiode (van 1 april tot 30 september). Deze perioden zijn in overeenstemming met de definitie van het hydrologisch jaar. De perturbatiefactoren zijn toegepast op de volledige neerslaginvoerreeksen bij de hydrologische modellen met het oog op het analyseren van de impact van klimaatverandering tot 2050; de uurlijkse neerslaginvoerreeksen zijn vermenigvuldigd met een factor 1,1 voor de winter, en een factor 0,5 voor de zomer.

Om de inschatting te maken tot het einde van deze 21ste eeuw (2100) zijn +23% voor de winter en -50% voor de zomer toegepast, overeenkomstig Van Ypersele (2004).

3.2 PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren CCI-HYDR project

De seizoensvariatie in de perturbatiefactoren is voor het bestuderen van klimaatverandering in hydrologische toepassingen onvoldoende beschreven in de rapporten van Van Ypersele en het Tyndall Centre. Bovendien zouden de perturbatiefactoren afhankelijk kunnen zijn van de regenbueigenschappen (vb. neerslagintensiteit), waarbij de afhankelijkheid verder seizoensvariabel zou kunnen zijn. Verder vermeldde Van Ypersele in zijn Greenpeace-rapport van 2004 dat de afgeleide perturbatiefactoren afkomstig zijn van vijf GCM's. Deze GCM's opereren voor grote ruimtelijke schalen en tijdschalen, en geven aanleiding tot grote onzekerheden in de simulatie van klimaatverandering voor een kleinschalig gebied als België.

Om tegemoet te komen aan deze nadelen, en om een nauwkeurigere hydrologische impactanalyse van klimaatverandering te kunnen doorvoeren, is een tweede methode toegepast die toelaat om met de seizoensafhankelijkheid van de perturbatiefactoren rekening te houden. In het Europese PRUDENCE-project zijn verscheidene regionale klimaatmodellen toegepast. Een groot aantal simulaties zijn uitgevoerd met deze modellen voor verschillende broeikasgasemissiescenario's. De verschillen in resultaten tussen de verschillende klimaatmodellen leveren bovendien informatie om de onzekerheid in de RCM-simulatieresultaten te evalueren.

De PRUDENCE RCM-simulatieresultaten zijn geproduceerd voor een "controleperiode" van 30 jaar (1961-1990), op basis van dewelke de RCM's zijn geëvalueerd aan historische neerslagmeetwaarden, en een "scenarioperiode" van 30 jaar (2071-2100) voor verschillende emissiescenario's; telkens in de vorm van een tijdreeks van dagwaarden. De controleperiode wordt ook wel "baseline scenario" genoemd. Door vergelijking van de neerslagwaarden in de scenarioperiode met deze in de controleperiode kan de impact van klimaatverandering op toekomstige neerslagwaarden, en dus ook de perturbatiefactoren, afgeleid worden.

De perturbatiefactoren kunnen per tijdstap (per dag) bepaald worden, maar hierdoor wordt mogelijks een droge dag vergeleken met een extreem natte dag, of omgekeerd. Na cumulatie per seizoensperiode stelt dit probleem zich niet. De PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren zijn daarom afgeleid door de cumulatieve neerslagvolumes per seizoensperiode te vergelijken tussen de controleperiode en de scenarioperiode. Hier wordt dus de intrinsieke veronderstelling gemaakt dat de perturbatiefactoren onafhankelijk zijn van de tijdschaal; zoals in deel 2.2 besproken wordt dit verder onderzocht in het CCI-HYDR project.

De PRUDENCE RCM-modelresultaten zijn afgeleid door de projectpartners van het KMI in het kader van het parallelle onderzoeksproject CCI-HYDR. Voor het huidige project zijn de resultaten gebruikt van 10 regionale klimaatmodellen (met telkens 1, 2, 3 of 4 simulaties volgens verschillende initiële condities; ook zogenaamde "ensemble-members" genoemd). De klimaatmodellen hebben beperkte verschillen in de ruimtelijke resolutie en zijn doorgerekend voor de A2- en B2-broeikasgasemissiescenario's (Tabel 2).

Naam regionaal klimaatmodel en simulatie	Ruimtelijke resolutie (km)	Temporele resolutie	Controle-periode	Scenario-periode	Broeikasgas-emissiescenario
HC1	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
HC2	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
HC3	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
DMI25	25	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
DMI-ECS	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
DMI-ECC	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
DMI-ECC	50	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	B2
METNO	53	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
METNO	53	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	B2
CRNM-DC9	59	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
CRNM-DE5	59	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
CRNM-DE6	59	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2

CRNM-DE7	59	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
ETH	55	Dagelijks	1960-1990	2070-2100	A2
GKSS	55	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
GKSS-sn	55	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
ITCP	52	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
ITCP	52	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	B2
KNMI	47	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
SHMI-HC	49	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
SHMI-HC	49	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	B2
SHMI-HC22	24	Dagelijks	1961-1990	2071-2100	A2
SHMI-MPI	49	Dagelijks	1960-1990	2071-2100	A2
SHMI-MPI	49	Dagelijks	1960-1990	2071-2100	B2

Tabel 2. Eigenschappen van de geselecteerde simulaties met PRUDENCE regionale klimaatmodellen.

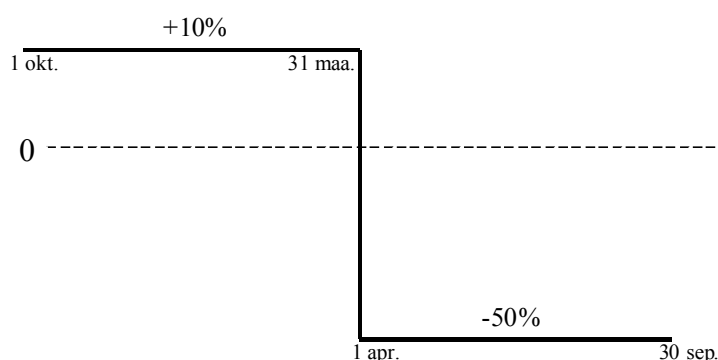
Voor elk van de PRUDENCE RCM-simulaties zijn modelresultaten afgeleid voor neerslag en potentiële evapotranspiratie (ET_o), alsook voor de climatologische variabelen die nodig zijn om op basis van de Bulthot-methode de ET_o te berekenen. De Bulthot-methode wordt immers standaard toegepast door het KMI voor het berekenen van de historische ET_o. Omwille van de consistentie met de historische gegevens van ET_o voor grondstations (vb. Ukkel) is dezelfde methode hier toegepast. Er is dus niet rechtstreeks gebruik gemaakt van de RCM modelresultaten voor ET_o.

3.3 Seizoensvariatie perturbatiefactoren

De seizoensvariatie is in deze studie ingerekend via twee methoden, die hierna de “eerste” en “tweede” methode voor inrekening van seizoensvariatie worden genoemd.

3.3.1 Eerste methode seizoensvariatie: hydrologische seizoenen

De eerste methode voor seizoensvariatie wordt geïllustreerd in Figuur 2, specifiek voor de perturbatiefactoren van Van Ypersele (2004) voor het klimaat in 2050. Het is een twee-stapsvariatie volgens de twee hydrologische seizoenen, hierbij het hydrologisch jaar in België volgend. De winterperiode loopt hierbij van oktober tot maart en de zomerperiode van april tot september.

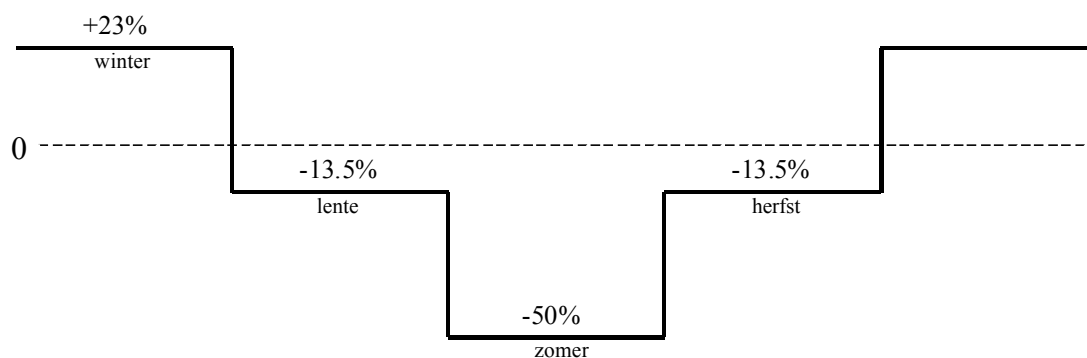


Figuur 2. Illustratie eerste methode seizoensvariatie.

Deze eerste methode werd eerder ook toegepast in de WL-studie over “Water beschikbaarheid in Vlaanderen” (Michielsens et al., 2005). De perturbatiefactoren waren in die studie gebaseerd op de simulatieresultaten van drie GCM's afgeleid door Gellens & Roulin (1996, 1998) uit het tweede IPCC-rapport (IPCC Second Assessment Report, 1995). De drie GCM's zijn GFDL, HADLEY en MPI; zij werden allen gesimuleerd onder de veronderstelling van een verdubbeling in the huidige broeikasgasconcentratie.

3.3.2 Tweede methode seizoensvariatie: climatologische seizoenen

De tweede methode voor de inrekening van seizoensvariatie wordt geïllustreerd in Figuur 3. Hier wordt een vier-stapsvariatie gebruikt volgens de climatologische seizoenen: de winterperiode gedurende de maanden december, januari en februari, de lente voor maart, april en mei, de zomer voor juni, juli en augustus, en de herfst voor september, oktober en november. Voor het specifieke voorbeeld van de perturbatiefactoren van Van Ypersele (2004) voor het klimaat in 2100, is een factor van +23% toegepast voor de wintermaanden, en een factor -50% voor de zomermaanden. Voor de lente en herfst wordt het rekenkundig gemiddelde tussen de winter- en zomerfactoren toegepast. Deze tweede methode wordt ook "trappenperturbatie" genoemd. Deze tweede methode rekent de seizoensvariatie vollediger / gedetailleerder in dan de eerste methode.



Figuur 3. Illustratie tweede methode seizoensvariatie.

3.4 Overzicht seizoenale PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren

In Tabel 3 en Tabel 4 is een overzicht gegeven van de berekende seizoensgemiddelde perturbatiefactoren, specifiek voor de simulatieresultaten met de PRUDENCE klimaatmodellen, zowel volgens de eerste als de tweede methode van seizoensvariatie. In Tabel 3 zijn de climatologische seizoenen gebruikt (tweede methode seizoensvariatie), en in Tabel 4 de hydrologische seizoenen (eerste methode seizoensvariatie).

In Tabel 5 worden de overeenkomstige perturbatiefactoren teruggevonden voor ETo.

Naam regional klimaatmodel en simulatie	Neerslagvolumes controleperiode (mm in 30 jaar)				Neerslagvolumes scenarioperiode (mm in 30 jaar)				Broeikasgas- emissiescenario	Perturbatiefactor
	Winter	Lente	Zomer	Herfst	Winter	Lente	Zomer	Herfst		
HC1	6915.97				6889.21				A2	1.00
		6324.7				4322.7			A2	0.68
			6702.71				5838.45		A2	0.87
				7434.83				8173.44	A2	1.10
HC2	6383.05				7377.88				A2	1.15
		6084.76				4796.12			A2	0.78
			6525.15				5877.3		A2	0.90
				7191.46				8473.1	A2	1.17
HC3	6578.37				7684.96				A2	1.16
		5646.99				4064.47			A2	0.72
			5867.88				5343.61		A2	0.91
				7343.31				8902.63	A2	1.21
DMI25	6281.65				6593.54				A2	1.04
		5688.33				4618.6			A2	0.81
			6375.08				5935.5		A2	0.93
				6661.18				7615.16	A2	1.14
DMI-ECS	7514.17				10675.2				A2	1.42
		7463.87				6582.5			A2	0.88
			8751.33				2849.79		A2	0.32
				8671.29				7321.47	A2	0.84
DMI-ECC	7514.17				6940.81				A2	0.92
		7463.87				5493.66			A2	0.73
			8751.33				7194.89		A2	0.82
				8671.29				9852.44	A2	1.13
DMI-ECC	7514.17				7891.54				B2	1.05
		7463.87				6358.11			B2	0.85
			8751.33				8034.67		B2	0.92
				8671.29				9754.25	B2	1.12
METNO	6839.69				7748.99				A2	1.13
		6421.29				4733.58			A2	0.73
			7574.02				6550.51		A2	0.86
				7656.74				8774.85	A2	1.14
METNO	6839.69				7080.23				A2	1.06
		6421.29				4964.72			B2	1.03
			7574.02				5873.93		B2	0.77
				7656.74				9248.46	B2	0.77
CNRM-DC9	9347.45				9578.08				B2	1.20
		7228.45				6594.5			A2	0.91
K.U.Leuven – Afde			5758.22				4964.47		A2	0.86
				5773.2				5849.68	A2	1.01

CNRM-DE5	9347.45				9555.34				A2	1.02
		7228.45				7602.66			A2	1.05
			5758.22				4902.1		A2	0.85
				5773.2				5754.74	A2	0.99
CNRM-DE6	9347.45				10539.79				A2	1.12
		7228.45				7014.59			A2	0.97
			5758.22				4332.42		A2	0.75
				5773.2				6253.3	A2	1.08
CNRM-DE7	9347.45				9506.08				A2	1.01
		7228.45				7993.21			A2	1.15
			5758.22				4756.69		A2	0.82
				5773.2				5982.47	A2	1.03
ETH	5712.2				5968.1				A2	1.04
		5113				3969.0			A2	0.77
			5667				4767		A2	0.84
				5916.2				6527.3	A2	1.10
GKSS	8015.56				8816.14				A2	1.09
		6823.74				5739.57			A2	0.84
			8285.29				7858.9		A2	0.95
				9462.78				10409.81	A2	1.10
GKSS-sn	5902.79				6005.58				A2	1.01
		4926.17				3994.7			A2	0.81
			5901.59				5216.87		A2	0.88
				6473.15				7267.2	A2	1.12
ITCP	8400.2				8005.43				A2	0.95
		8371.38				7591.76			A2	0.90
			7849.05				7505.65		A2	0.95
				7846.49				9030.77	A2	1.15
ITCP	8400.2				7824.63				B2	0.93
		8371.38				7168.23			B2	0.85
			7849.05				7770.96		B2	0.99
				7846.49				8975.08	B2	1.14
KNMI	5524				5901				A2	1.06
		5110.6				3787.5			A2	0.74
			5681.2				5374.9		A2	0.94
				6251.8				6888.1	A2	1.10

Tabel 3. PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren voor neerslag (climatologische seizoenen).

Naam regionaal klimaatmodel en simulatie	Neerslagvolumes controleperiode (mm in 30 jaar)		Neerslagvolumes scenarioperiode (mm in 30 jaar)		Broeikasgas- emissiescenario	Perturbatiefactor
	Winter	Zomer	Winter	Zomer		
HC1	13806.87		14171.19		A2	1.03
		13163.97		10468.03	A2	0.80
HC2	13091.76		14630.44		A2	1.12
		12281.71		11262.5	A2	0.92
HC3	13390.17		15542.53		A2	1.16
		11580.28		9861.44	A2	0.85
DMI25	12266.81		13337.49		A2	1.09
		12303.55		10848.5	A2	0.88
DMI-ECS	15290.42		18889.8		A2	1.24
		16523.31		7600.41	A2	0.46
DMI-ECC	15290.42		14821.22		A2	0.97
		16523.31		13765.49	A2	0.83
DMI-ECC	15290.42		16550.09		B2	1.08
		16523.31		14885.45	B2	0.90
METNO	13800.75		15338.87		A2	1.11
		14149.21		11692.17	A2	0.83
METNO	13800.75		14820.1		B2	1.07
		14149.21		11885.61	B2	0.84
CNRM-DC9	15529.36		15577.77		A2	1.00
		11542.57		10434.31	A2	0.90
CNRM-DE5	15529.36		16252.02		A2	1.05
		11542.57		10782.63	A2	0.93
CNRM-DE6	15529.36		17394.41		A2	1.12
		11542.57		101.35.42	A2	0.88
CNRM-DE7	15529.36		16578.04		A2	1.07
		11542.57		10723.59	A2	0.93
ETH	15630		17687		A2	1.07
		12080		9785	A2	0.81
GKSS	16206.78		17958.77		A2	1.11
		15838.09		13944.58	A2	0.88
GKSS-sn	11644.01		12.484.34		A2	1.07
		11220.21		9404.68	A2	0.84
ITCP	16163.21		16320.15		A2	1.01
		15917.35		15121.77	A2	0.95
ITCP	16163.21		16071.47		B2	0.99
		15917.35		15163.16	B2	0.95

KNMI	11182.69		11596.38		A2	1.04
		11007.56		9703.35	A2	0.88
SHMI-HC	13077.89		13966.67		A2	1.06
		12855.15		10667.05	A2	0.83
SHMI-HC	13078		13380		B2	1.02
		12855		10999.4	B2	0.85
SHMI-HC22	13467.92		15418.77		A2	1.14
		13468.9		11518.56	A2	0.85
SHMI-MPI	14552.63		13822.84		A2	0.95
		15160.14		13684.15	A2	0.90
SHMI-MPI	14552.63		16065.95		B2	1.10
		15160.14		13826.98	B2	0.91

Tabel 4. PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren voor neerslag (hydrologische seizoenen).

Naam regionaal klimaatmodel en simulatie	Broeikasgas- emissiescenario	Seizoen	Perturbatiefactor
HC1	A2	Winter	1.16
	A2	Zomer	1.21
HC2	A2	Winter	1.18
	A2	Zomer	1.14
HC3	A2	Winter	1.25
	A2	Zomer	1.14
DMI25	A2	Winter	1.11
	A2	Zomer	1.18
DMI-ECS	A2	Winter	1.16
	A2	Zomer	1.04
DMI-ECC	A2	Winter	1.40
	A2	Zomer	1.35
DMI-ECC	B2	Winter	0.95
	B2	Zomer	0.88
METNO	A2	Winter	1.23
	A2	Zomer	1.22
METNO	B2	Winter	1.22
	B2	Zomer	1.17
CNRM DC9	A2	Winter	1.16
	A2	Zomer	1.06
CNRM DE5	A2	Winter	1.18
	A2	Zomer	1.07
CNRM DE6	A2	Winter	1.22
	A2	Zomer	1.10
CNRM DE7	A2	Winter	1.18
	A2	Zomer	1.07
ETH	A2	Winter	1.21
	A2	Zomer	1.17
GKSS	A2	Winter	1.08
	A2	Zomer	1.19
GKSS-sn	A2	Winter	1.13
	A2	Zomer	1.20
ITCP	A2	Winter	-
	A2	Zomer	-
ITCP	B2	Winter	-
	B2	Zomer	-
KNMI	A2	Winter	1.16
	A2	Zomer	1.16
SHMI-HC	A2	Winter	1.12
	A2	Zomer	1.23
SHMI-HC	B2	Winter	1.06
	B2	Zomer	1.17
SHMI-HC22	A2	Winter	1.13
	A2	Zomer	1.14
SHMI-MPI	A2	Winter	1.34
	A2	Zomer	1.41
SHMI-MPI	B2	Winter	1.27
	B2	Zomer	1.25

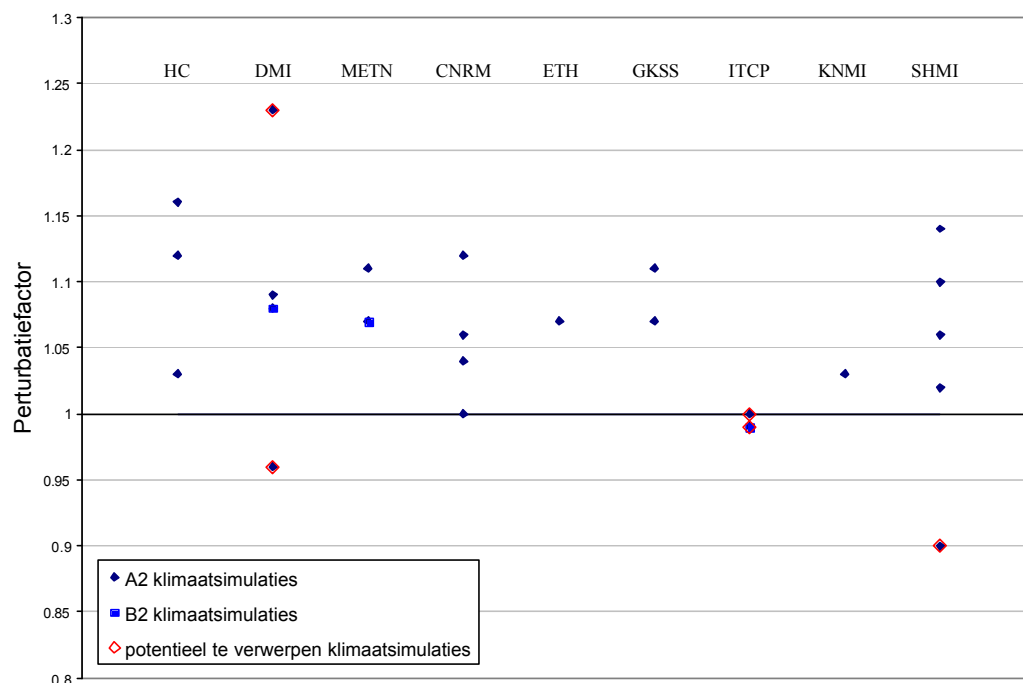
Tabel 5. PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren voor ETo (hydrologische seizoenen).

Voor de hydrologische seizoenen wordt in Tabel 6 een overzicht gegeven van de gemiddelde en boven- en ondergrenzen van de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren.

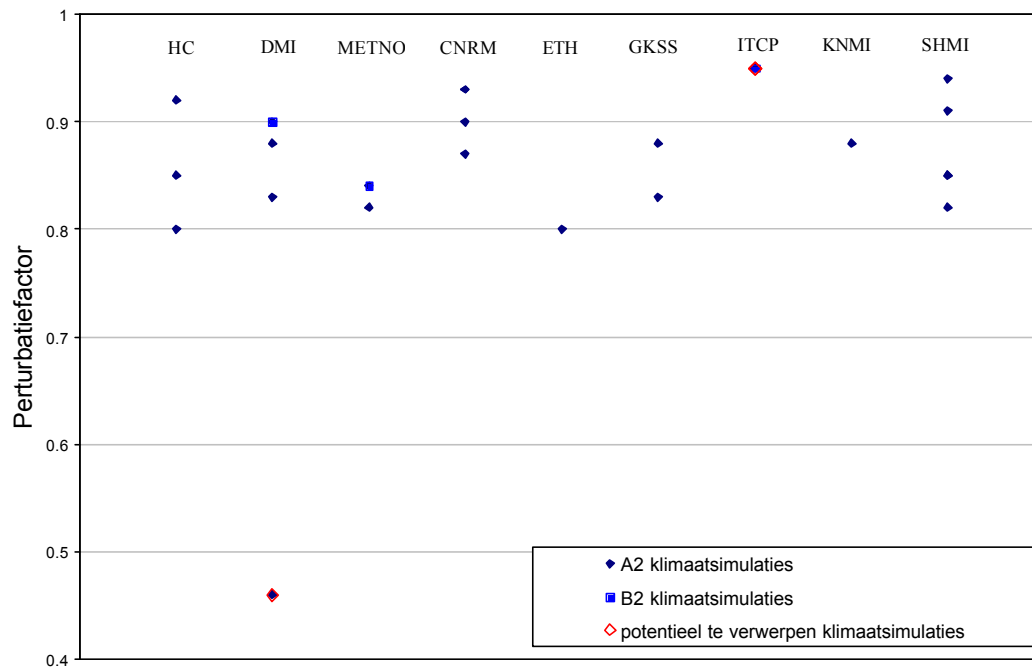
Variabele	Seizoen	Ondergrens	Gemiddelde	Bovengrens
Neerslagperturbatie	Winter	0.97	1.07	1.24
	Zomer	0.46	0.85	0.95
ETo-perturbatie	Winter	0.95	1.18	1.40
	Zomer	0.88	1.16	1.41

Tabel 6. Gemiddelde en boven- en ondergrenzen van de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren, zonder verwerping klimaatsimulaties.

In Figuur 4 is een grafisch overzicht gegeven van de verschillende perturbatiefactoren voor de winterneerslag; idem voor de zomerneerslag in Figuur 5. De factoren verschillen sterk afhankelijk van het gekozen klimaatmodel, simulatie en scenario. De onzekerheid op de potentiële klimaatveranderingsscenario's is dus bijzonder groot. De vraag stelt zich of deze onzekerheid verder gereduceerd kan worden door bepaalde klimaatmodellen of perturbatiefactoren via statistische analyse te verwerpen. Een mogelijke methode bestaat er in om via een statistische hypothesetoetsing de consistentie te controleren van de simulatieresultaten met de klimaatmodellen voor de controleperiode met de historische waarnemingen te Ukkel. Probleem hierbij is evenwel dat een grote afwijking met de historische neerslag niet noodzakelijk impliceert dat ook de voorspelde effecten van klimaatverandering onnauwkeurig zijn. Relatieve verschillen tussen het huidig en het toekomstig klimaat kunnen immers nauwkeurig voorspeld worden indien het klimaatmodel de fysische processen die aan de basis liggen van de klimaatverandering nauwkeurig beschrijft, zelfs indien er absolute afwijkingen zijn met de werkelijkheid. Daarom is de vergelijking met de Ukkel-neerslag enkel doorgevoerd voor de simulaties met de klimaatmodellen waarvoor zeer hoge of zeer lage perturbatiefactoren worden gevonden (dus voor de klimaatsimulaties die sterk afwijken van de andere simulaties). Het al dan niet weglaten van klimaatsimulaties die zich in het bereik van de andere simulaties bevinden, maar die grote absolute afwijkingen vertonen met de historische neerslag, heeft trouwens weinig invloed op de hierna afgeleide klimaatveranderingsscenario's.

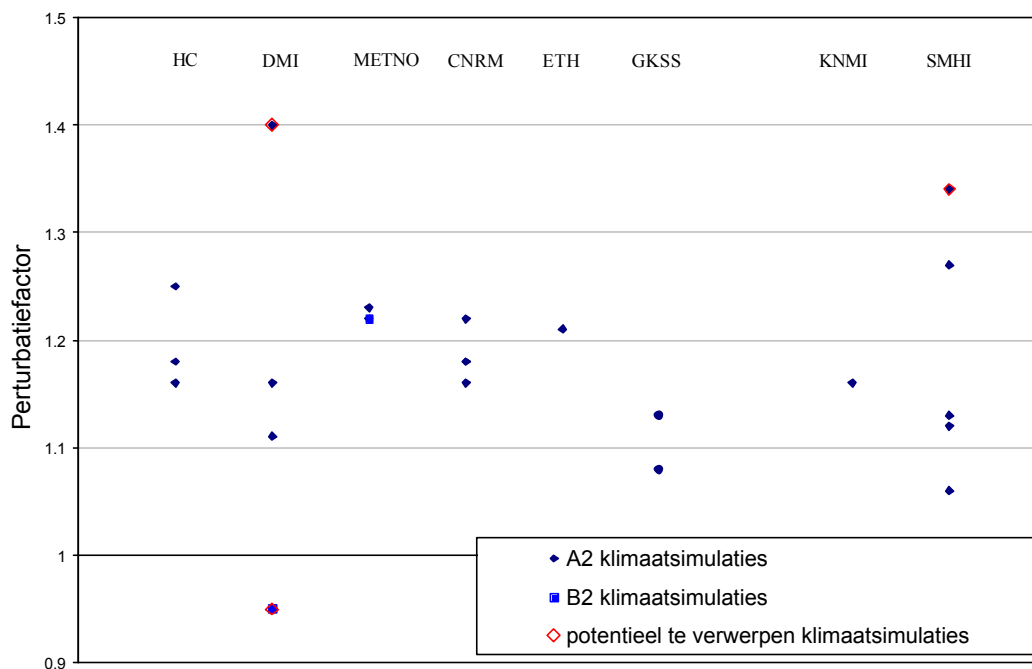


Figuur 4. Overzicht perturbatiefactoren voor de winterneerslag.

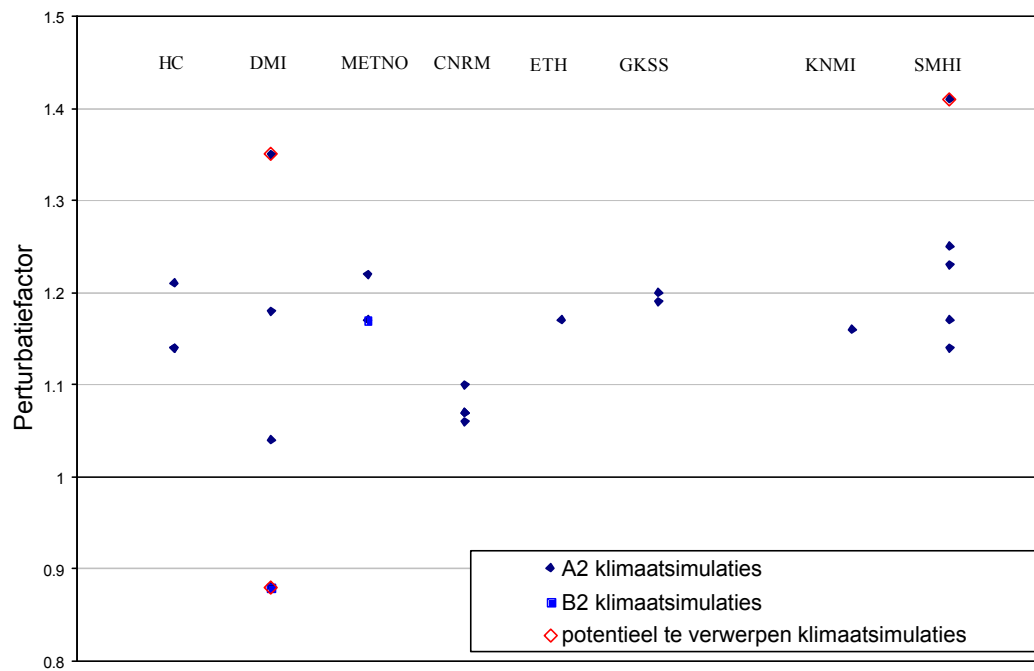


Figuur 5. Overzicht perturbatiefactoren voor de zomerneerslag.

In Figuur 4 en Figuur 5 zijn deze klimaatsimulaties, die in aanmerking komen voor potentiële verwerping, aangeduid. In deel 4 is voor deze klimaatsimulaties, voor de controleperiode, de vergelijking met de Ukkel-neerslag gemaakt. Het zijn voor de winter twee klimaatsimulaties van het Deens Meteorologisch Instituut: DMI-ECS en DMI-ECC-A2, de twee simulaties (A2 en B2) van ITCP, en de SMHI-mpi1 simulatie. Voor de zomer komen drie van deze kandidaten voor potentiële verwerping terug: DMI-ECS en de twee simulaties van ITCP.



Figuur 6. Overzicht perturbatiefactoren voor de winter-ETo.



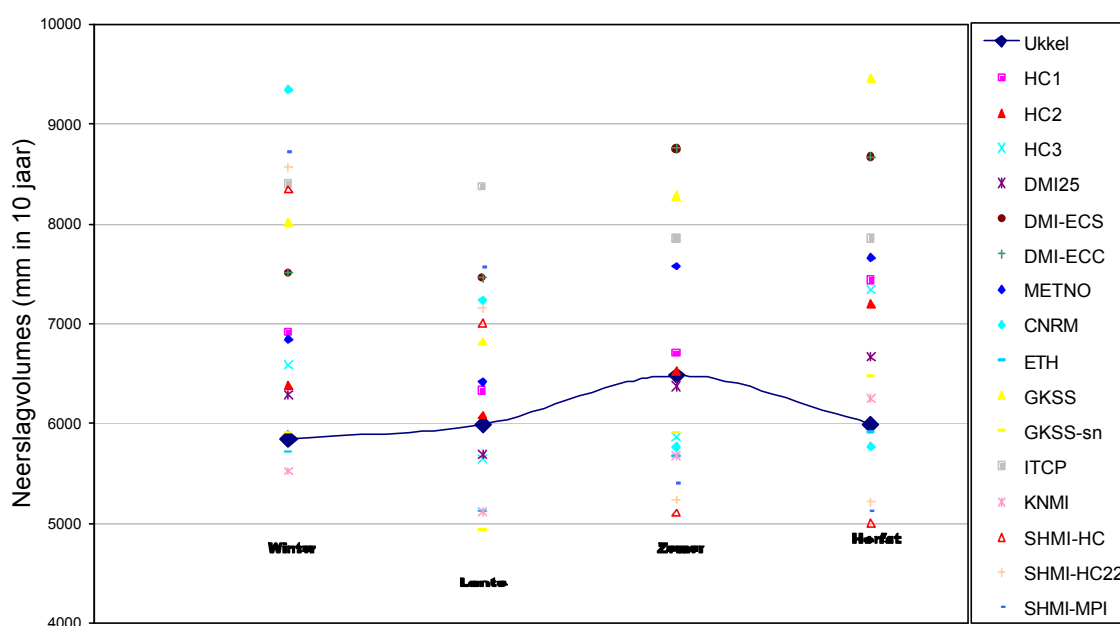
Figuur 7. Overzicht perturbatiefactoren voor de zomer-ETo.

Voor ETo komen voor zowel de winter als de zomer de SMHI-mpi1 simulatie en de twee DMI-ECC simulaties (A2 en B2) in aanmerking voor potentiële verwerping, alsook de twee simulaties van ITCP (niet beschouwd); zie Figuur 6 en Figuur 7.

4 Controle consistentie klimaatveranderingsscenario's met historische neerslag te Ukkel

4.1 Consistentie controleperiode PRUDENCE RCM's

In Figuur 8 zijn de gemiddelde seizoensvolumes in neerslag vergeleken tussen de klimaatsimulaties met de RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990. Al de klimaatsimulaties die in deel 3.4 geselecteerd zijn als potentieel te verwerpen blijken voor de controleperiode sterk af te wijken van de historische Ukkel-neerslag, en kunnen dus effectief worden verworpen.



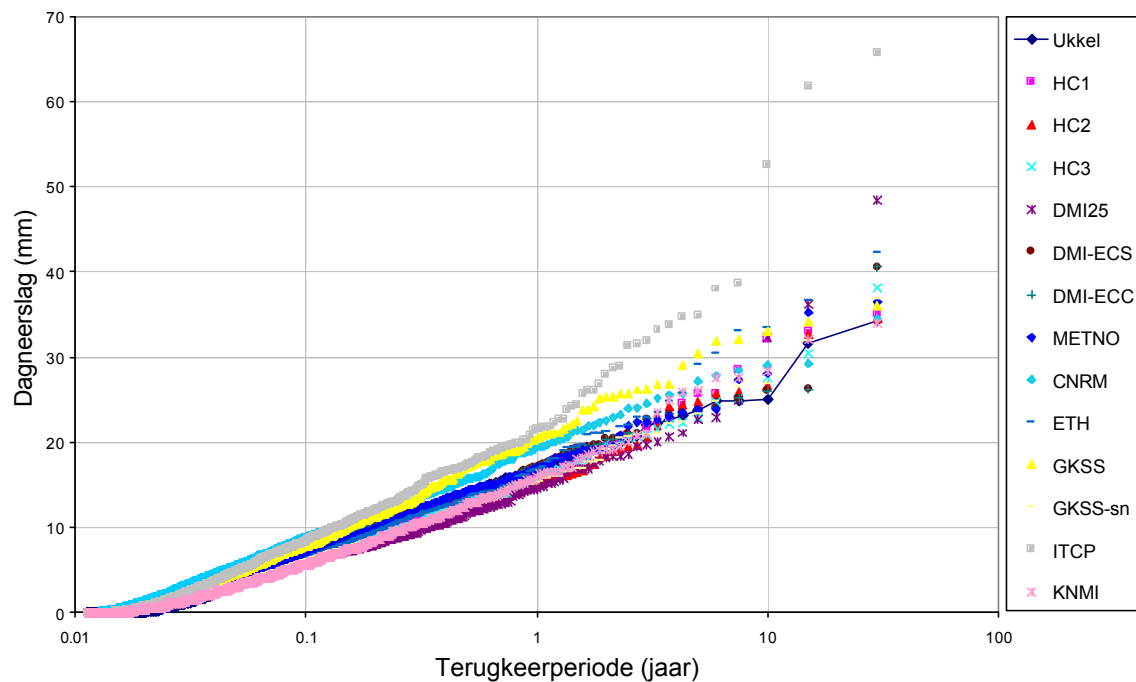
Figuur 8. Vergelijking gemiddelde seizoensvolumes in neerslag tussen de PRUDENCE RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990.

Om na te gaan of deze verwerping van klimaatsimulaties afhankelijk is van de tijdschaal is in Figuur 9 ook de frequentieverdeling van de dagneerslag voor de winterperiode vergeleken, en in Figuur 10 voor de zomerperiode. De ITCP-klimaatsimulaties blijken ook voor de dagneerslag in de winter sterk af te wijken. Deze kunnen dus in zijn geheel worden verworpen. Voor de andere verworpen klimaatsimulaties zijn de verschillen voor de frequentieverdeling van dagneerslag minder groot dan voor de seizoensgemiddelde volumes.

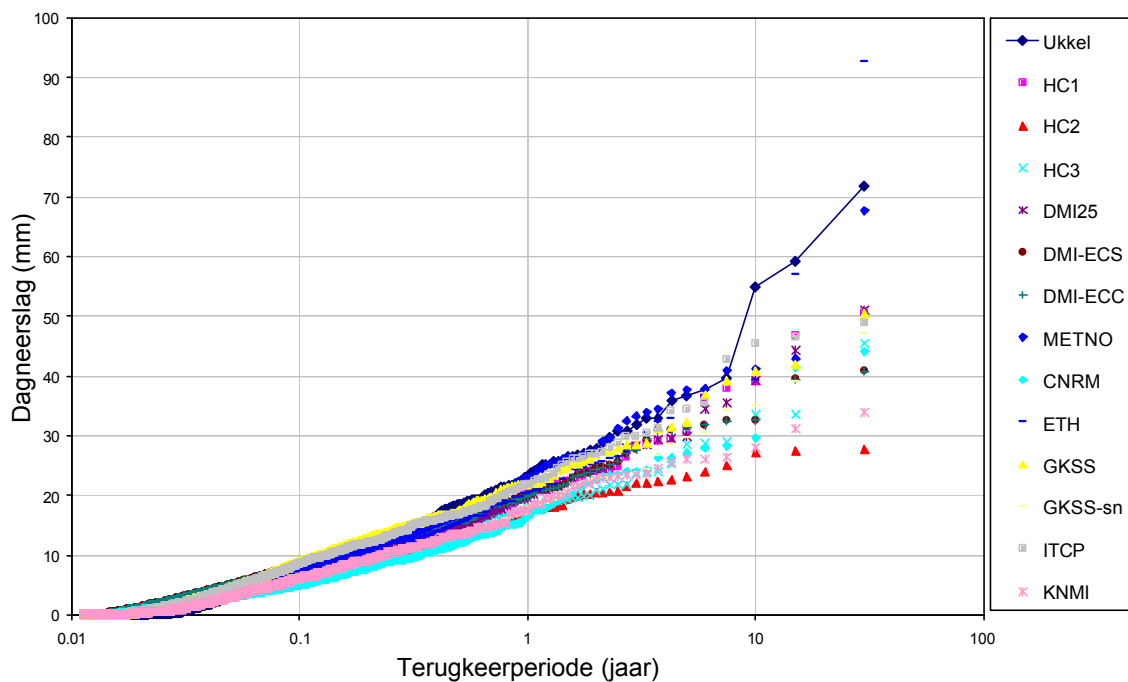
In Figuur 11 en Figuur 12 is verder een vergelijking gemaakt van de frequentieverdeling van de seizoensvolumes tussen de klimaatsimulaties en de Ukkel-neerslag. Ook hier blijken de ITCP-klimaatsimulaties sterk af te wijken van Ukkel.

De selectie van klimaatscenario's zal in het CCI-HYDR project verder verfijnd worden: de verschillen tussen de verschillende tijdschalen zullen geanalyseerd worden (verschillende aggregatieniveaus), de selectie zal naast de neerslag ook gebaseerd worden op de ETo, de temperatuur en de windrichting (controle van de nauwkeurigheid van de klimaatmodellen in de modellering van veranderingen in de atmosferische circulatie). Ook dient er rekening gehouden te worden met de verschillen in de ruimtelijke resolutie van de verschillende klimaatmodellen en de verschillen ten gevolge van de veronderstelde broeikasgasemissiesscenario's. De verwerping van klimaatmodellen, al dan niet gezamenlijk voor alle simulaties of voor geselecteerde simulaties, zal op een meest objectieve wijze gebeuren via statistische hypothesetoetsing. Deze laatste methode vereist een inschatting van de onzekerheden in de frequentieverdeling (vb. verschillen tussen de controlesimulaties met de klimaatmodellen en de historische Ukkel-neerslag, die het gevolg kunnen zijn van

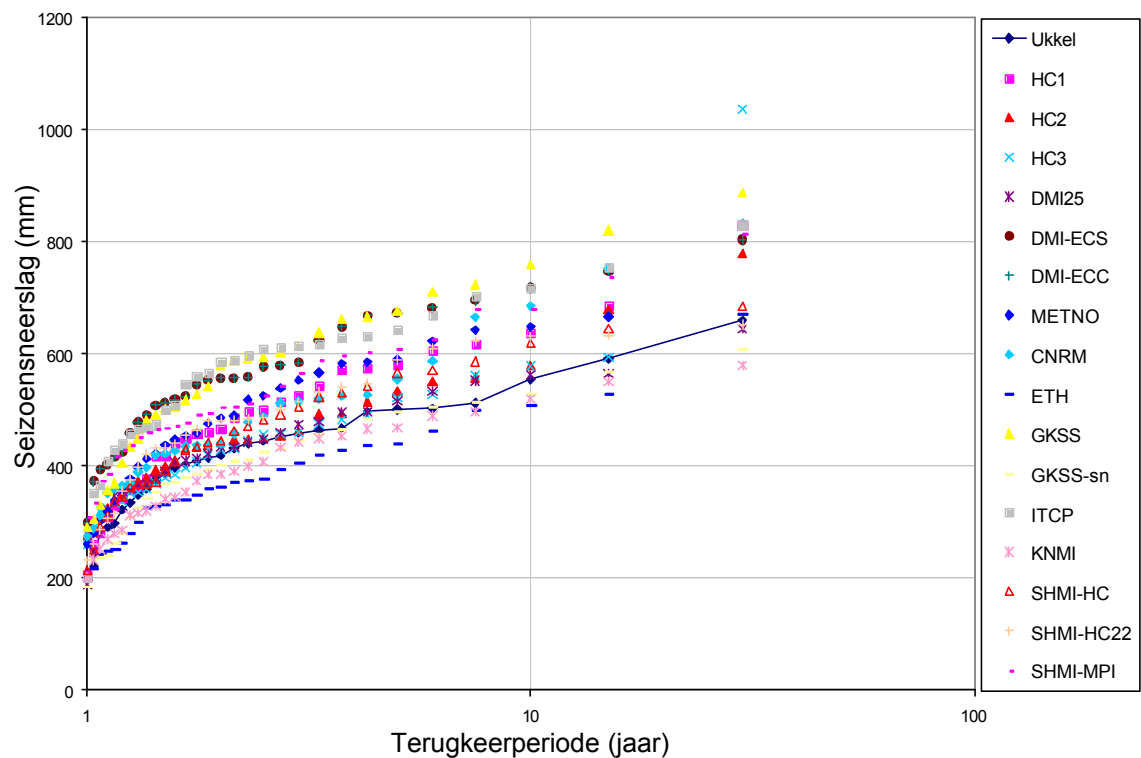
willekeur door de beperkte lengte van de beschouwde tijdreeksen) en van de verschillen tussen puntneerslag en ruimtelijk gemiddelde neerslag voor de ruimtelijke resoluties van de klimaatmodellen.



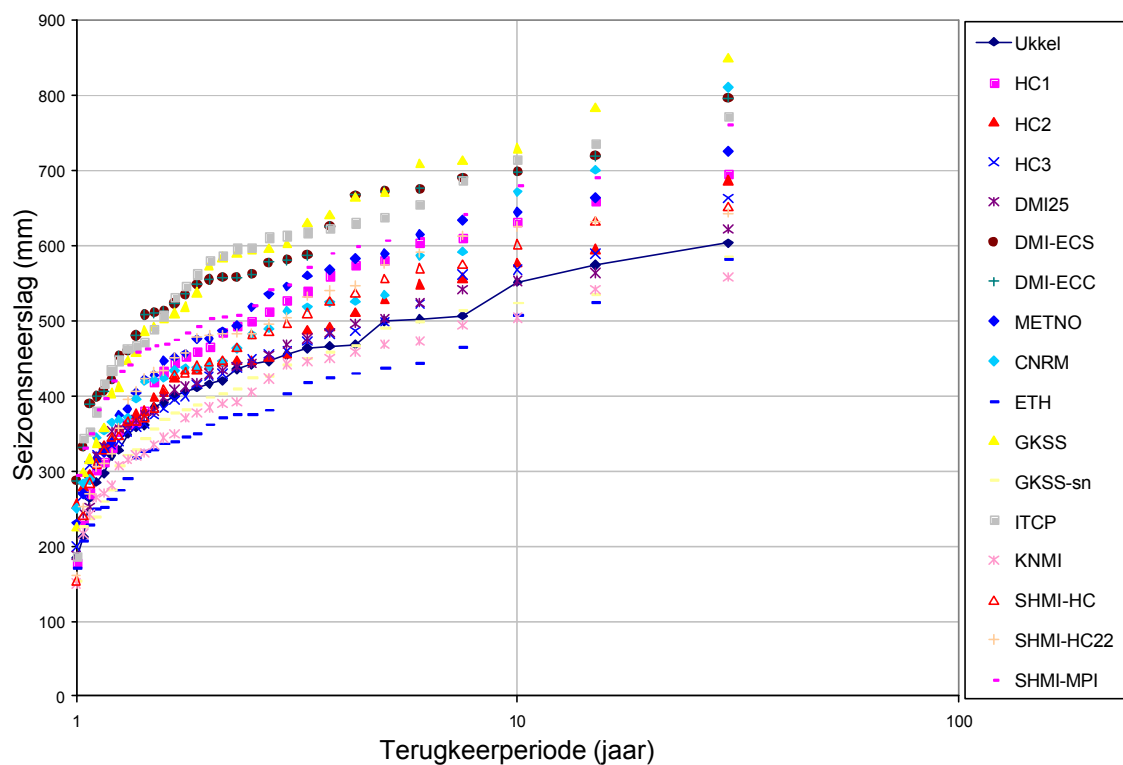
Figuur 9. Vergelijking frequentieverdeling dagneerslag voor het winterseizoen tussen de PRUDENCE RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990.



Figuur 10. Vergelijking frequentieverdeling dagneerslag voor het zomerseizoen tussen de PRUDENCE RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990.



Figuur 11. Vergelijking frequentieverdeling winterneerslag tussen de PRUDENCE RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990.



Figuur 12. Vergelijking frequentieverdeling zomerneerslag tussen de PRUDENCE RCM's en de Ukkel historische neerslag, telkens voor de periode 1960-1990.

Tabel 7 beschrijft voor de perturbatiefactoren in winter en zomer de gemiddelde waarden, de ondergrenzen en de bovengrenzen, na verwerping van de meest inconsistente klimaatsimulaties.

Variabele	Seizoen	Ondergrens	Gemiddelde	Bovengrens
Neerslagperturbatie	Winter	1.00	1.08	1.16
	Zomer	0.80	0.87	0.94
ETo-perturbatie	Winter	1.06	1.17	1.27
	Zomer	1.04	1.15	1.25

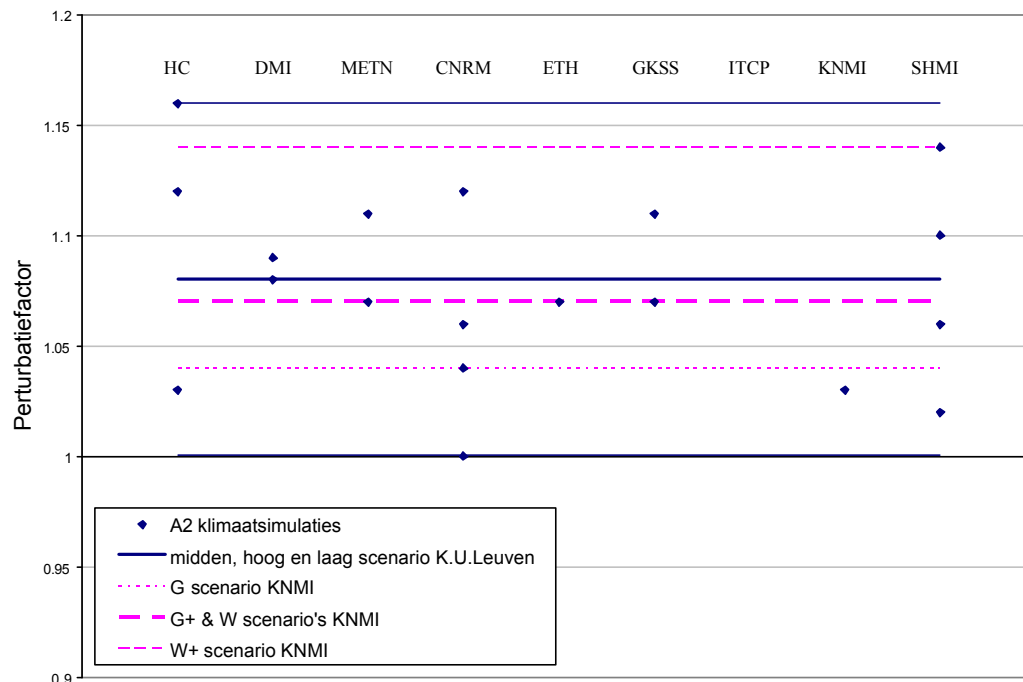
Tabel 7. Gemiddelde en boven- en ondergrenzen van de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren, na verwerping meest inconsistente klimaatsimulaties.

De ondergrens- en bovengrenswaarden voor de perturbatiefactoren in Tabel 7 zijn uiteraard niet als absolute onder- en bovengrenzen te beschouwen. Ook kunnen wij er voorlopig geen kansen mee associëren. Zij dienen beschouwd te worden als 'lage' en 'hoge' scenario's, die een aanduiding geven van de onzekerheid die betrokken is in de inschatting van de impact van klimaatverandering. Het gebruik van de gemiddelde, ondergrens- en bovengrenswaarden wordt daarom hierna het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario genoemd.

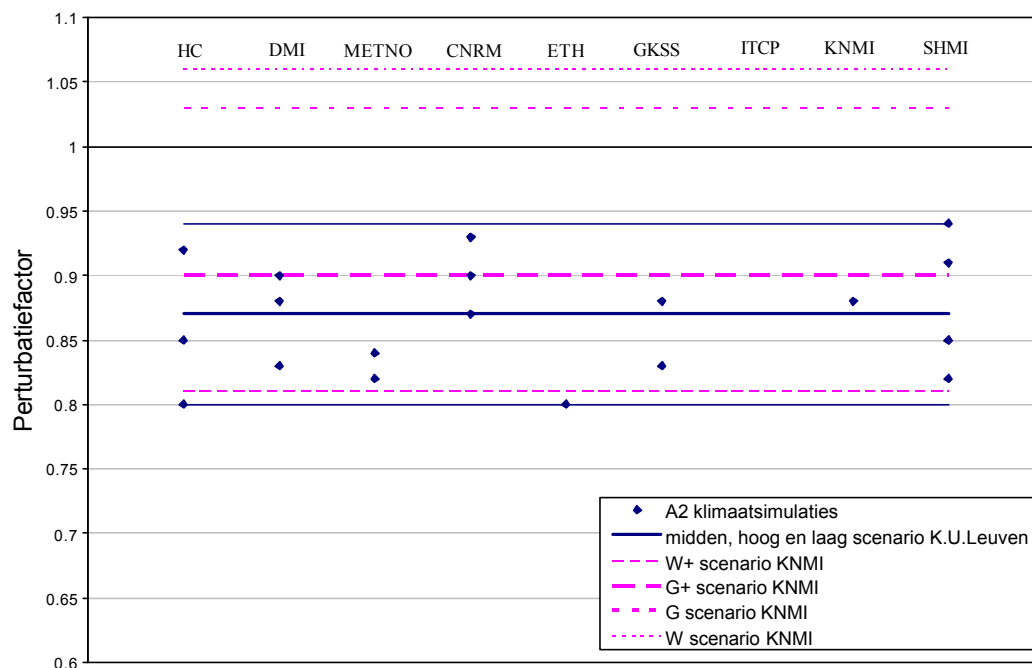
In Tabel 8 is een vergelijking gemaakt met de recent voorgestelde nieuwe klimaatscenario's van het KNMI (KNMI, 2006). Het KNMI heeft een gemiddelde en een hoog scenario, overeenkomstig de veronderstelling van een gemiddelde temperatuurstijging met 1°C (het zogenaamde scenario G: gematigd scenario) of 2°C (het zogenaamde scenario W: warm scenario). Verder hebben zij bij het simuleren van de klimaatmodellen twee opties verondersteld: een sterke en een minder sterke verandering in de atmosferische circulatie. De zogenaamde scenario's G+ en W+ veronderstellen een sterke verandering. Beide opties blijken immers zeer grote verschillen in resultaten te geven, vooral m.b.t. de zomerneerslag. Veranderingen in de atmosferische circulatie geeft minder zomerbuien, maar meer vanuit oostelijke richting, en bijgevolg gemiddeld lagere neerslagvolumes in de zomer. De nieuwe KNMI-klimaatscenario's geven evenwel geen aanduiding van de verandering in winterevapotranspiratie.

Variabele	Seizoen	Gemiddelde, weinig verandering in atmosf. circulatie (G)	Gemiddelde, sterke verandering in atmosf. circulatie (G+)	Bovengrens, weinig verandering in atmosf. circulatie (W)	Bovengrens, sterke verandering in atmosf. circulatie (W+)
Neerslagperturbatie	Winter	1.04	1.07	1.07	1.14
	Zomer	1.03	0.90	1.06	0.81
ETo-perturbatie	Winter	-	-	-	-
	Zomer	1.03	1.08	1.07	1.15

Tabel 8. Perturbatiefactoren volgens de nieuwe KNMI-klimaatscenario's (KNMI, 2006).



Figuur 13. Perturbatiefactoren voor de winterneerslag volgens het midden, hoog en laag scenario, en vergelijking met de KNMI-2006 klimaatscenario's.



Figuur 14. Perturbatiefactoren voor de zomerneerslag volgens het midden, hoog en laag scenario, en vergelijking met de KNMI-2006 klimaatscenario's.

Samenvattend kan gesteld worden dat de KNMI-neerslagperturbaties voor de winter van dezelfde grootteorde zijn als deze afgeleid in onze studie (vergelijk Tabel 8 met Tabel 7 of Figuur 13): 0% tot 15% toename in de winterneerslag, met een gemiddelde schatting van 7 of 8%. Voor de zomerneerslag zijn de KNMI-resultaten totaal afhankelijk van de veronderstelling m.b.t. de verandering in atmosferische circulatie. De meest waarschijnlijke resultaten, die een verandering van de atmosferische circulatie veronderstellen, zijn meest consistent met deze afgeleid in onze studie: daling van de cumulatieve zomerneerslag met 5% tot 20% (Figuur

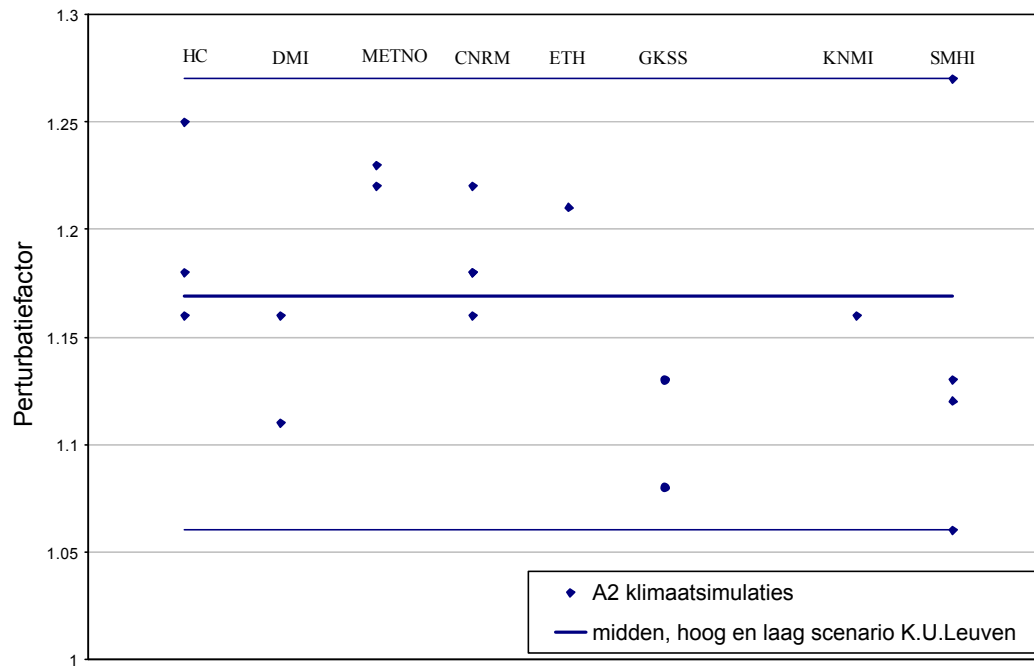
14). Voor de zomerextremen kan deze daling evenwel worden omgebogen in een stijging. Voor de winter worden lagere verschillen verwacht tussen de seizoensgemiddelde perturbatiefactoren en deze voor de neerslagextremen. Voor een terugkeerperiode van 10 jaar schat het KNMI dat de winterperturbatiefactoren voor de extremen maximaal slechts 1% hoger liggen dan voor de cumulatieve neerslagvolumes. Voor de zomer kan deze stijging hoger zijn: tot 20% hoger; wat uiteraard gecompenseerd moet worden door minder zomerbuien (tot 20% minder natte dagen). Voor de Belgische gegevens wordt dit op dit ogenblik onderzocht in het CCI-HYDR project. Eerste resultaten gaan in dezelfde richting: winterextremen vertonen geen significant verschillende perturbatie in vergelijking met de cumulatieve of gemiddelde winterneerslagvolumes, terwijl zomerextremen (extreme dagneerslag voor terugkeerperioden groter dan 0.5 jaar in de zomer) een perturbatiefactor hebben die tot 20% groter kan zijn dan voor de cumulatieve zomerneerslag. Tabel 9 toont de voorlopige resultaten voor enkele geselecteerde RCM's. In het CCI-HYDR wordt daarom een methode uitgewerkt om voor de zomerperiode de gemiddelde seizoensperturbatie te vervangen door een methode waarbij de perturbatie afhankelijk is van de terugkeerperiode, en waarbij het aantal buien in de tijd worden vermindert.

Klimaat-simulatie	Winter		Zomer	
	Seizoens-gemiddelde perturbatiefactor	Perturbatiefactor voor extreme dagneerslag	Seizoens-gemiddelde perturbatiefactor	Perturbatiefactor voor extreme dagneerslag
HC2	1.12	1.14	0.92	1.00
METNO-A2	1.11	1.13	0.83	1.01
METNO-B2	1.07	1.03	0.84	0.90
GKSS	1.11	1.09	0.88	1.05

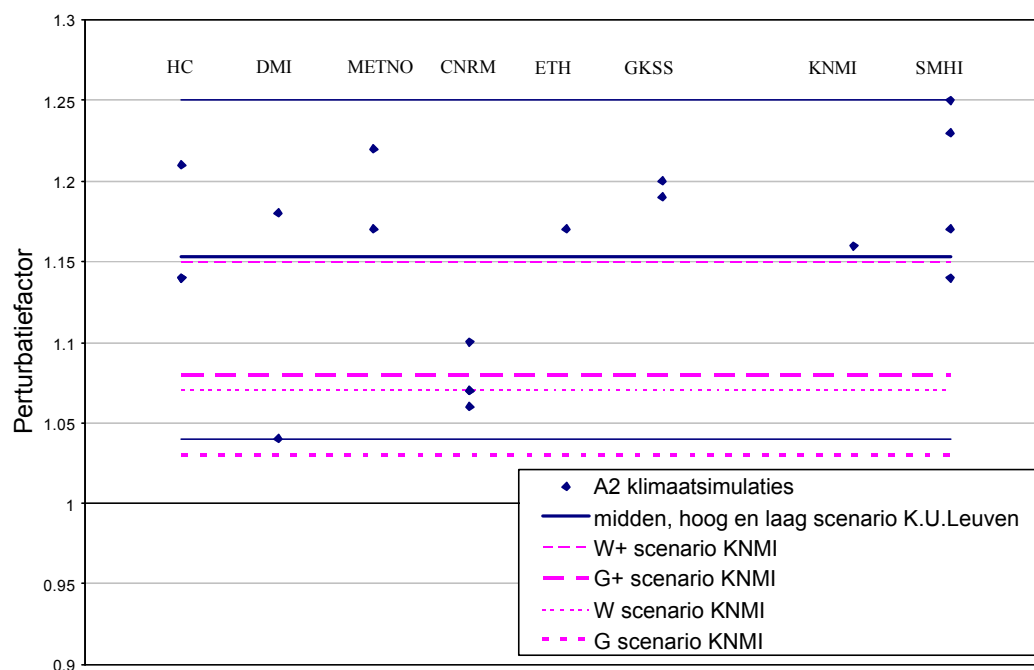
Tabel 9. Gemiddelde en boven- en ondergrenzen van de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren, na verwerping meest inconsistente klimaatsimulaties.

Voor ETo zijn de verschillende klimaatsimulaties, samen met het midden, hoog en laag klimaatveranderingsscenario weergegeven in Figuur 15 (winter-ETo) en Figuur 16 (zomer-ETo). De KNMI (2006) resultaten bevatten enkel waarden voor de zomer-ETo. Deze blijken vergelijkbaar met het midden en laag scenario van deze studie (Figuur 16).

Bij toepassing van het midden, hoog en laag klimaatveranderingsscenario voor hydrologische impactanalyse dienen de perturbatiefactoren voor de zomer gecombineerd te worden met deze voor de winter, en deze voor neerslag gecombineerd met deze voor ETo. Het is duidelijk dat de meest extreme wintertoestanden m.b.t. overstromingsrisico's langs rivieren bekomen worden door de bovengrenswaarden voor de neerslag te combineren met de ondergrenswaarden voor de ETo. Voor laagwaterrisico's worden de meest extreme toestanden bekomen door de ondergrenswaarden voor neerslag te combineren met bovengrenswaarden voor ETo. Of deze combinaties ook gerechtvaardigd zijn heeft te maken met de correlaties die er bestaan tussen de perturbaties in winter en zomer en deze tussen neerslag en ETo. In Figuur 17 tot Figuur 20 zijn deze correlaties onderzocht samen met de hierboven voorgestelde combinaties die leiden tot de meest extreme hydrologische condities. Deze combinaties zijn in Tabel 10 samengesteld volgens het midden, hoog en laag scenario, waarbij het hoog scenario de meest extreme hydrologische condities oplevert m.b.t. overstroming, en het laag scenario de meest extreme condities m.b.t. laagwater.



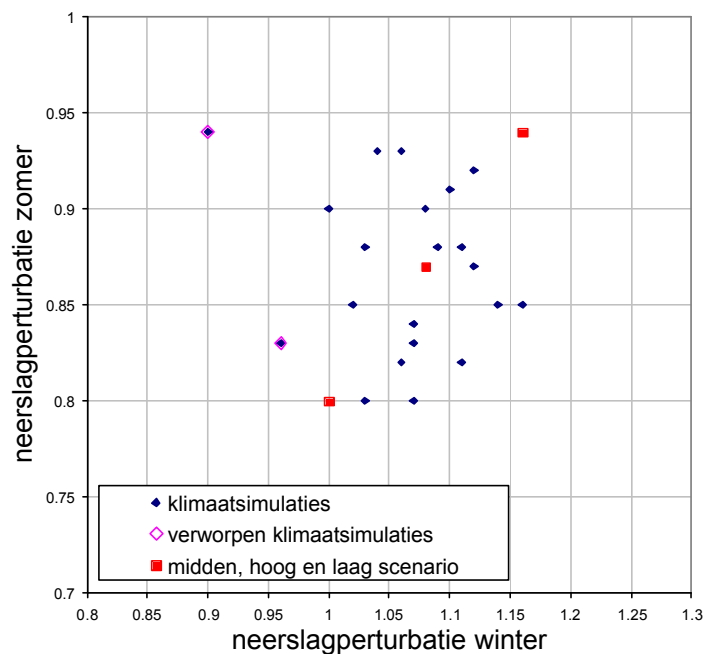
Figuur 15. Perturbatiefactoren voor de winter-ETo volgens het midden, hoog en laag scenario.



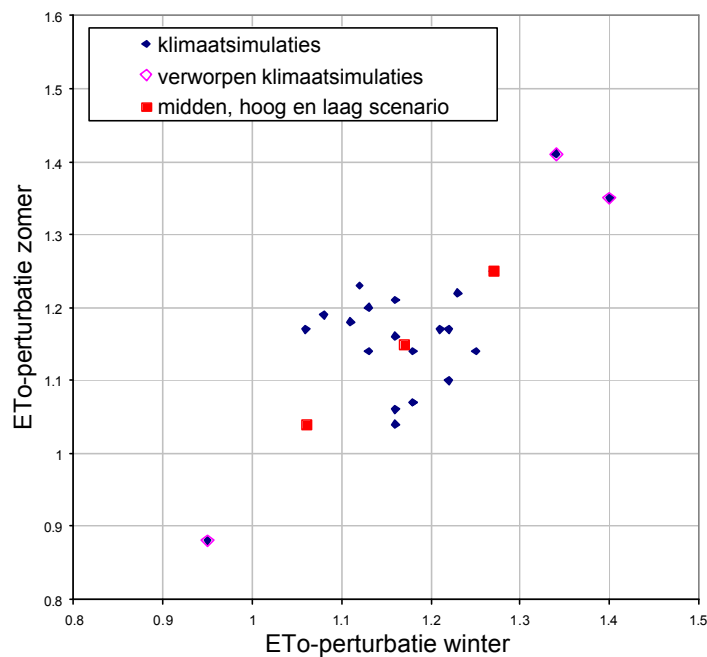
Figuur 16. Perturbatiefactoren voor de zomer-ETo volgens het midden, hoog en laag scenario, en vergelijking met de KNMI-2006 klimaatscenario's.

Variabele	Seizoen	Laag scenario	Midden scenario	Hoog scenario
Neerslagperturbatie	Winter	1.00	1.08	1.16
	Zomer	0.80	0.87	0.94
ETo-perturbatie	Winter	1.27	1.17	1.06
	Zomer	1.25	1.15	1.04

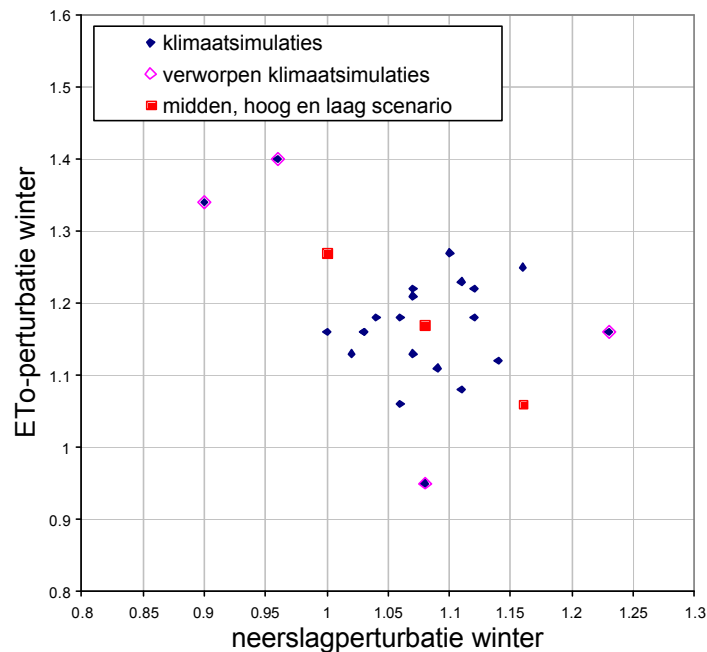
Tabel 10. Perturbatiefactoren in het laag, midden en hoog klimaatveranderingsscenario.



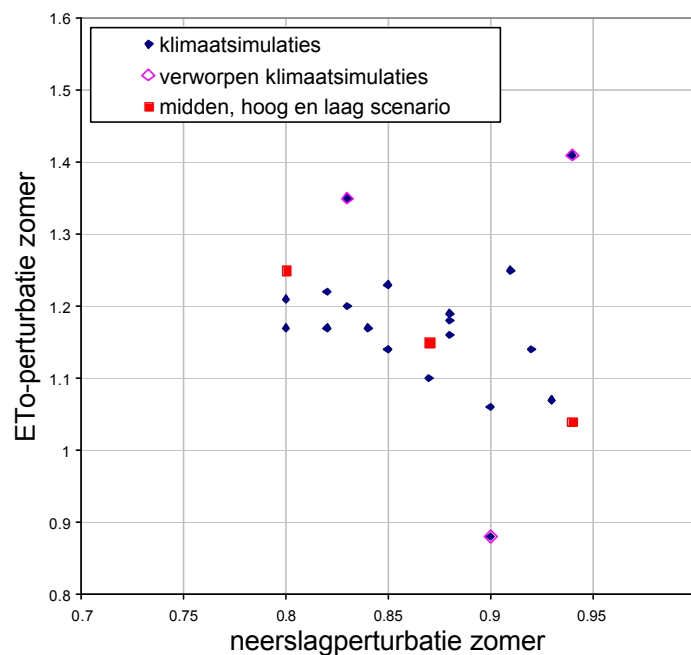
Figuur 17. Verband tussen de neerslagperturbaties in winter en zomer.



Figuur 18. Verband tussen de ETo-perturbaties in winter en zomer.



Figuur 19. Verband tussen de neerslag- en ETo-perturbaties in winter.



Figuur 20. Verband tussen de neerslag- en ETo-perturbaties in zomer.

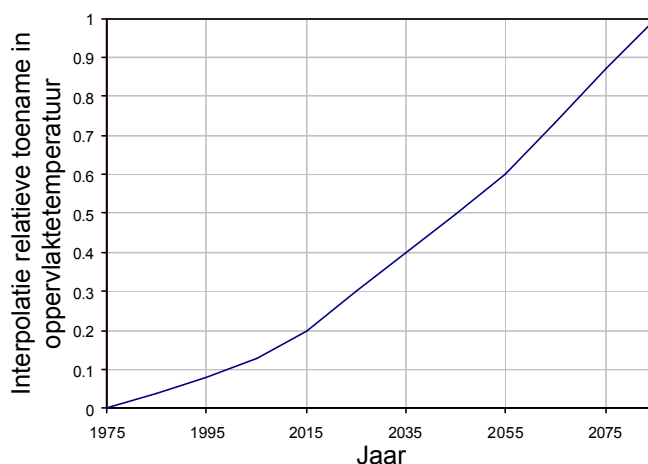
4.2 Consistentie perturbatiefactoren met empirische trends

Een bijkomende methode om de perturbatiefactoren te testen is door vergelijking met historisch vastgestelde trends in de neerslag- en ETo-meetreeksen. Probleem hierbij is dat de perturbatiefactoren gemiddelde veranderingen voorstellen van de controleperiode 1960-1990 tot de scenarioperiode 2070-2100, terwijl de historische meetreeksen slechts toelaten een zeer beperkt deel van deze veranderingen te controleren (op basis van de huidige meetgegevens tot 2004). Door aan de totale perturbatie van 1990 tot 2100 een tijdsvariatie te geven, overeenkomstig de recente historische en toekomstig veronderstelde evoluties in de broeikasgasemissies, kan tot 2004 de consistentie met de historische meetreeksen gecontroleerd worden. Hierbij moet uiteraard worden rekening gehouden met de grote onzekerheden in de historisch afgeleide trends.

Samen met Joris Blanckaert (IMDC) is een deelstudie uitgevoerd naar trends in de neerslagextremen op basis van de tijdreeks van meer dan 100 jaar uurlijkse neerslag te Ukkel. Deze analyse omvat een analyse van cycli/clusters om een onderscheid te kunnen maken tussen de trend veroorzaakt door klimaatverandering en natuurlijke klimaatschommeling. De resultaten zijn gerapporteerd in een afzonderlijk deelrapport:

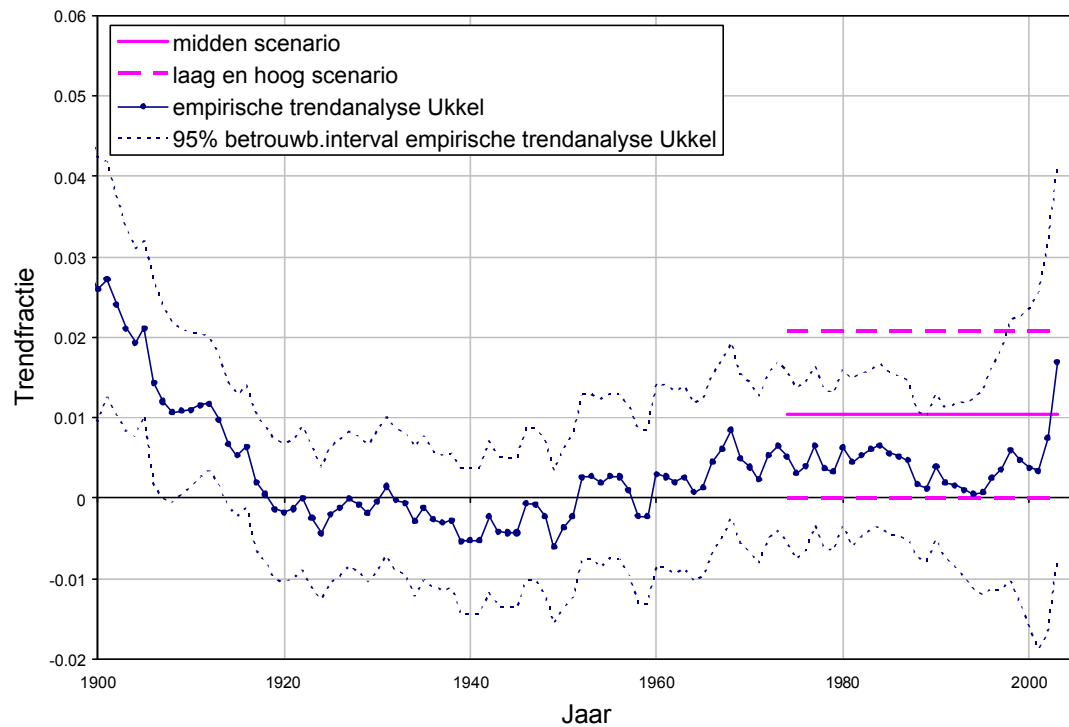
“Mod. 706/10 Methode voor het inrekenen van de klimaatverandering in de compositiehydrogrammethode. Deelrapport onderzoek cycli en trends in de historische neerslagreeks te Ukkel.”, november 2006, J.Blanckaert & P.Willems (K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica en IMDC)

De resultaten van de historische trendanalyse te Ukkel zijn hieronder vertaald naar de fractie toename in neerslagvolume, gemiddeld over een periode van 30 jaar. Voor de laatste 30 jaar (1974-2003) zijn deze resultaten vergeleken met het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario. Omdat de scenario's in Tabel 10 de totale fractie toename in neerslag voorstellen tot 2100 is een interpolatie gemaakt van 1974 (midden van de controleperiode 1960-1990) tot 2003, volgens de historische en veronderstelde toename in de broeikasgasemissies en oppervlaktetemperatuur. Figuur 21 beschrijft deze toename afgeleid uit IPCC (2001).



Figuur 21. Jaarlijkse interpolatie van de totale toename in de broeikasgasemissies en oppervlaktetemperatuur van de controleperiode 1960-1990 tot 2070-2100, afgeleid uit IPCC (2001).

Volgens de interpolatiecurve van Figuur 21 bedraagt de neerslagtoename tijdens de laatste 30 jaar 13% van de totale toename van de controleperiode 1960-1990 tot de scenarioperiode 2070-2100. Dit betekent dat de historische toename in neerslagvolume tijdens de laatste 30 jaar te Ukkel moet vergeleken worden met een toename gelijk aan 13% van de totale toename in de klimaatveranderingsscenario's van Tabel 10. Deze vergelijking wordt voor de winterperiode getoond in Figuur 22. De historische neerslagtoename is in het deelonderzoek van de trendanalyse te Ukkel afgeleid via een waveletanalyse op een glijdende periode van 30 jaar. De gemiddelde neerslagtoename tijdens perioden van 30 jaar is jaar per jaar herberekend. De resultaten van deze berekening voor de laatste 30 jaar blijken consistent met het bereik van neerslagtoenames gedefinieerd door het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario.



Figuur 22. Vergelijking van de fractie in neerslagtoename tijdens perioden van 30 jaar in de historische winterneerslag te Ukkel (volgens de waveletanalyse) en de geïnterpoleerde fractie volgens het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario.

5 Hydrologische impactanalyse voor een geselecteerd rivierbekken

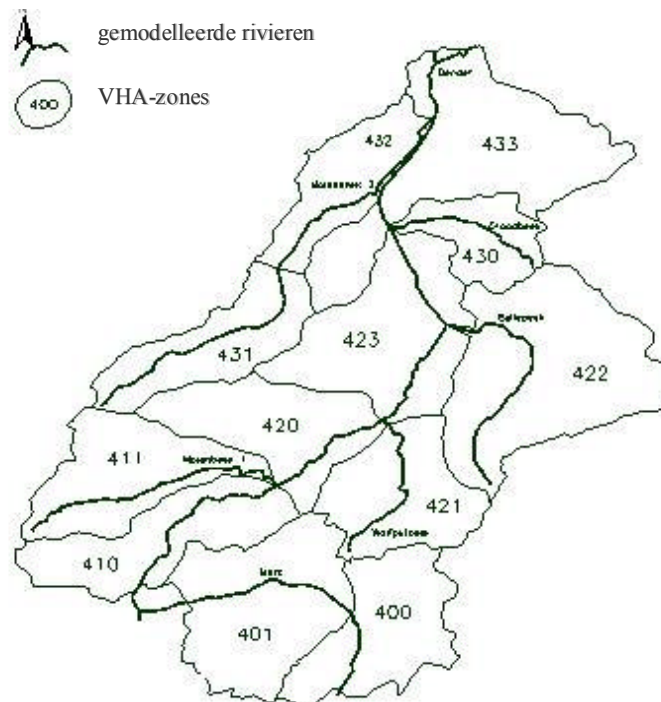
In dit deel wordt de methode voor het doorrekenen van de klimaatverandering (via de verschillende perturbatiefactoren) diepgaander toegelicht en geïllustreerd door toepassing in het Vlaamse Denderbekken. Vooreerst wordt in deel 5.1 een korte beschrijving gegeven van het Denderbekken en de motivatie van de keuze voor dit bekken, in deel 5.2 van de gebruikte hydrologische NAM-modellen, en in deel 5.3 van de methode voor de berekening van hoog- en laagwaterfrequenties en compositiehydrogrammen. In de delen daarna worden de hydrologische impactresultaten voor dit rivierbekken voorgesteld en besproken. Hierbij wordt de methode toegepast die hiervoor in deel 2.3 is beschreven, gebruik makend van de perturbatiefactoren opgelijst in deel 3 en de hydrologische impactanalysemethode conform de methodologie van het WL voor het modelleren van bevaarbare waterlopen in Vlaanderen (verder kortweg “Algemene methodologie” genoemd; Willems et al., 2000).

5.1 Het Denderbekken

Het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven heeft in het verleden uitgebreide hydrologische en hydrodynamische modellering doorgevoerd voor het Vlaams gedeelte van het Denderbekken.

Door middel van het NAM modelleringssysteem zijn door Rombauts & Willems (2004) gebiedsgemiddeld conceptuele hydrologische modellen afgeijkt voor elk van de 12 VHA-zones (als deelbekkens) in het Denderbekken (Figuur 23). Dit is in eerste instantie gedaan voor de bemeten deelbekkens, opwaarts van de 8 debietmeetstations (limnigrafen) in Tabel 11. Daarna zijn de NAM-modelparameters vastgelegd voor de andere onbemeten deelbekkens op basis van empirische verbanden tussen de modelparameters en gebiedseigenschappen. De neerslaginvoerreeksen zijn bepaald op basis van lokale neerslagmeetreeksen en de NAM-modellen gecalibreerd en gevalideerd op basis van de debietmeetreeksen voor historisch beschikbare meetperioden vanaf 1986. De NAM-modellen zijn daarna doorgerekend voor de volledig beschikbare historische meetreeksen van neerslag vanaf 1967, extreme-waarden-analyses uitgevoerd op de gesimuleerde tijdreeksen van neerslagafstromingsdebieten, vergeleken met de extreme-waarden-analyses gebaseerd op de historische debietmeetreeksen, debiet/duur/frequentie-verbanden (QDF-verbanden) bepaald en compositiehydrogrammen berekend. Al deze modelleringen en analyses zijn doorgevoerd conform de modelleringmethodologie zoals toegepast bij het WL overeenkomstig de “Algemene methodologie” van Willems et al. (2000).

De NAM-modelleringssoftware is onderdeel van de MIKE11-riviermodellingssoftware (DHI, 2004) die door het WL standaard wordt gebruikt in haar riviermodellingsstudies. Naast de NAM hydrologische modellen is voor het Denderbekken ook een volledig hydrodynamisch MIKE11-model opgebouwd voor de Dender en de afwaartse gedeelten van de Mark, de Molenbeek langs Erpe-Mere en de Bellebeek, telkens afwaarts van de limnigrafen (Willems et al., 2002a, 2002b, 2003).



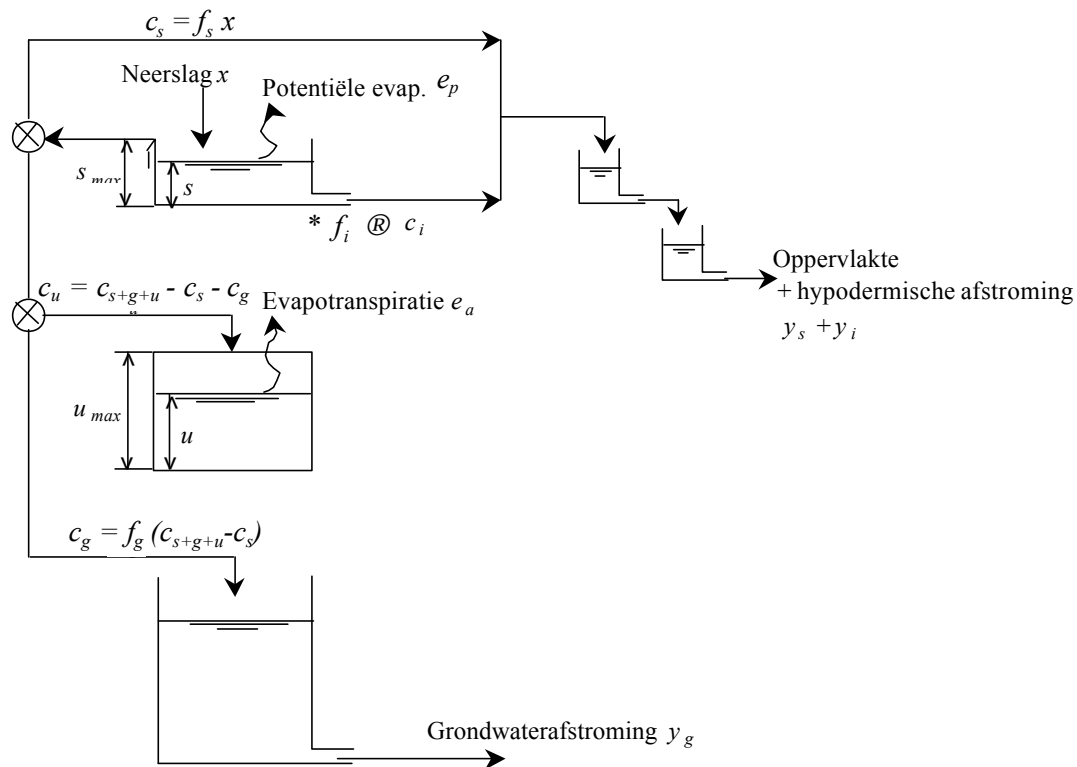
Figuur 23. De 12 VHA-zones (deelbekkens) in het Vlaamse Denderbekken.

Limnigraafcode	Locatie limnigraaf	Rivier	Opwaartse oppervlakte (km ²)
281	Opwijk	Vondelbeek	8
282	Erpe-Mere	Molenbeek	46.07
284	Iddergem	Molenbeek	15.56
285	Essene	Bellebeek	88.4
286	Lombeek	Lombeekse Beek	21.49
287	Ternat	Steenvoordebeek	25.4
288	Geraardsbergen	Molenbeek	19.1
289	Viane	Mark	167.44

Tabel 11. Overzicht van de 8 limnigrafen en bemeten deelbekkens in het Denderbekken.

5.2 Het NAM-model

De structuur van het NAM hydrologisch model wordt in Figuur 24 schematisch weergegeven, met een voorstelling van de toestandsvariabelen en de structuur die consistent is met de notaties van de "Algemene methodologie".



Figuur 24: NAM-modelstructuur.

In dit model vult de neerslag x eerst een oppervlaktebergingsreservoir met bergingscapaciteit s_{max} . De berging s aan de oppervlakte wordt geleidigd door de potentiële evapotranspiratie e_p en de neerslagbijdrage tot de hypodermische afstroming c_i . Hypodermische afstroming wordt dus beschreven via de lediging van het lineair oppervlaktebergingsreservoir (met recessieconstante k_i). Deze afstroming treedt dus enkel op zolang de oppervlakteberging gevuld is. Enkel vanaf een volledige lediging van de oppervlakteberging wordt de berging in de onverzadigde zone geleidigd door de evapotranspiratie e_a . Deze evapotranspiratie is bij een beperkte vulling van de berging kleiner dan de potentiële evapotranspiratie.

Wanneer tijdens het begin van een neerslaggebeurtenis de oppervlakteberging zich volledig vult, treedt een overstorting op die water beschikbaar stelt voor zowel de oppervlakteafstroming als voor infiltratie in de ondergrond. De overblijvende neerslag c_{s+g+u} splitst zich dus op in een neerslagbijdrage c_s tot oppervlakteafstroming en een ander deel dat infiltreert naar de ondergrond. Dit laatste deel verdeelt zich verder over een neerslagbijdrage c_u tot berging in de ondergrond en een neerslagbijdrage c_g tot grondwaterafstroming. De neerslagbijdrage tot berging in de ondergrond wordt hierbij gemodelleerd als restterm:

$$c_u = c_{s+g+u} - c_s - c_g$$

De neerslagbijdragen tot de verschillende deelstromen worden verder nog gerout door lineaire reservoirmodellen. Zoals hoger beschreven gebeurt de routing van de hypodermische afstroming via het oppervlaktebergingsreservoirmodel met recessieconstante k_i . Deze afstroming wordt samen met de neerslagbijdrage c_s gerout door twee lineaire reservoirmodellen in serie (met recessieconstanten $k_{s,1}$ en $k_{s,2}$). De routing van de oppervlakteafstroming gebeurt dus via een cascade van twee lineaire reservoirmodellen, terwijl voor de routing van de hypodermische afstroming drie reservoirmodellen optreden. De routing van de grondwaterdeelstroom gebeurt tenslotte via één enkel lineair reservoirmodel met reservoirconstante k_g .

Voor de modellering van de scheiding in deelstromen worden de neerslagbijdragen tot oppervlakteafstroming en tot grondwaterafstroming gemodelleerd via een afhankelijkheid met de berging in de ondergrond. Voor beide neerslagbijdragen worden lineaire afhankelijkheden verondersteld:

$$f_s = j \frac{\frac{u}{u_{\max}} - u_{tr,s}}{1 - u_{tr,s}}$$

$$f_g = \frac{\frac{u}{u_{\max}} - u_{tr,g}}{1 - u_{tr,g}}$$

Ook de neerslagbijdrage tot hypodermische afstroming wordt beperkt op basis van zulk verband met het relatief verzadigingsgehalte:

$$f_i = \frac{\frac{u}{u_{\max}} - u_{tr,i}}{1 - u_{tr,i}}$$

De drempelwaarden u_{tr} geven hierbij aan dat er slechts een neerslagbijdrage bestaat tot elke deelstroom wanneer het relatief verzadigingsgehalte een bepaalde minimale waarde overschrijdt. Ze kunnen verschillend gespecificeerd worden voor de drie deelstromen: $u_{tr,s}$, $u_{tr,i}$, $u_{tr,g}$.

Het evapotranspiratiemodel gaat uit van het meest eenvoudige lineair verband met het relatief verzadigingsgehalte:

$$e_a = e_p \frac{u}{u_{\max}}$$

De oppervlakte-afstroming wordt gerout door 2 identieke lineaire reservoirs, met recessieconstante $k_{s,1} = k_{s,2}$. Bij het tweede reservoir is recessieconstante $k_{s,2}$ beperkt afhankelijk gemaakt van de neerslagintensiteit. Dit gebeurt via een verband met de neerslagbijdrage c_s tot de oppervlakte-afstroming:

$$k_{s,2}^* = \left(\frac{c_s}{c_s^*} \right)^{-0.4} k_{s,2}$$

c_s^* is hierbij de neerslagbijdrage waarvoor de ingevoerde parameterwaarde $k_{s,2}$ geldt. Hiervoor wordt steeds een waarde van 0.4 mm/h genomen.

5.3 Frequentieanalyse hydrologische extremen

De methode voor de frequentieanalyse van hydrologische extremen volgens de “Algemene methodologie” omvat in een eerste stap de afleiding van “nagenoeg onafhankelijke” extreme waarden uit de debietijdreeksen gesimuleerd met de NAM hydrologische modellen. Deze selectie van nagenoeg onafhankelijke extremen (hoogwater- en laagwaterdebieten) gebeurt via een algoritme, volgens een methode gelijkaardig aan de ‘Peak-over-Threshold’ (POT) methode. De extremen worden geselecteerd voor verschillende aggregatieniveaus (=uitmiddelingduren) (vb. 1, 3, 12, 24, 48, 120, 360 en 720 uur).

Vervolgens wordt voor elk van de geanalyseerde aggregatieniveaus de extreme-waarden-verdeling gekalibreerd, gebruik makend van de exponentiële verdeling of de veralgemeende Pareto extreme-waarden-verdeling (Generalized Pareto Distribution; GPD) en via regressie in Q-Q plots (Willems, 1998).

Op basis van de individuele kalibratieresultaten voor de verschillende aggregatieniveaus worden verbanden gecalibreerd tussen de parameters van de extreme-waarden-verdeling en het aggregatieniveau. Deze verbanden vormen dan de basis voor de opmaak van gecalibreerde QDF-relaties en compositiehydrogrammen (als maatgevende afvoeren bij verschillende terugkeerperioden).

De frequentieanalyse wordt ondersteund door het WETSPRO-werkboek in MS Excel/VBA (Willems, 2004a, 2004b).

5.4 Impactanalyse klimaatverandering op hoogwaterfrequenties: perturbatiefactoren voor neerslag

Om de impact van klimaatverandering door te rekenen, zijn in eerste instantie de hoger gedefinieerde perturbatiefactoren toegepast op de uurlijkse NAM modelinvoerreeksen voor neerslag en potentiële evapotranspiratie (ET_o). Voor elk uur in deze tijdreeksen is dus een constante seizoensvariabele perturbatiefactor gebruikt. De methode is toegepast voor de volgende drie VHA-zones of deelbekkens in het Denderbekken (Figuur 25): VHA-zones 410 (langs Molenbeek Geraardsbergen), 431+432 (langs Molenbeek Erpe-Mere) en 433 (langs Vondelbeek Opwijk). Deze drie zones zijn geselecteerd uit de 12 VHA-zones omdat ze voor het Denderbekken de meest variërende gebiedseigenschappen omvatten. VHA-zone 410 (blauw in Figuur 25) is een stedelijk deelbekken met beperkte ruimtelijke topografische variaties en een leem-ondergrond. Zone 433 (groen in Figuur 25) is het meest stedelijk deelbekken. Het omvat gedeelten van de steden Aalst en Dendermonde, en heeft een meest vlakke topografie. De VHA zones 431 en 432 zijn samengevoegd (hierna ook kort als zone 4312 benoemd; geel gebied in Figuur 25) en bestaat opwaarts uit een landelijk gebied met een ruime landbouwoppervlakte en een relatief steile topografie. Door vergelijking van de impactresultaten voor deze drie deelbekkens, wordt een indicatie bekomen van de ruimtelijke variaties in de impactresultaten binnen eenzelfde bekken ten gevolge van ruimtelijke verschillen in de gebiedseigenschappen zoals topografie en landgebruik. Voor de drie deelbekkens wordt de impact van klimaatverandering doorgerekend tot het jaar 2100.



Figuur 25. De drie geselecteerde deelbekkens in het Denderbekken.

Hierna wordt de methode van impactanalyse eerst gedetailleerd geïllustreerd voor VHA-zone 410, door de perturbatiefactoren enkel voor neerslag toe te passen (de ET_o blijft ongewijzigd), en voor een beperkte set van simulaties met regionale klimaatmodellen. Dit heeft tot doel de methode te beschrijven. Daarna zijn de resultaten voorgesteld na toepassing van perturbatiefactoren voor zowel neerslag als ET_o.

De methode voor impactanalyse bestaat erin om met de gewijzigde (geperturbeerde) modelinvoerreeksen NAM modelsimulaties uit te voeren voor een historische periode (gebaseerd op lokale neerslagmetingen in de omgeving van het rivierbekken en op een uurlijkse tijdschaal), daarna via statistische naverwerking de nagenoeg onafhankelijke hydrologische hoogwater- en laagwater te selecteren (via de POT methode) voor verschillende aggregatieniveaus, de QDF-verbanden (voor hoogwater en laagwater) te herberekenen, alsook de compositietranden voor hydrodynamische hoogwatersimulaties.

Hierna wordt eerst door de verschillende stappen gegaan, specifiek voor enkele geselecteerde PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren en de perturbatiefactoren van Van Ypersele (2004), gebruik makend van de eerste methode voor het inrekenen van seizoensvariatie, en voor de impactanalyse op hoogwaterdebieten. Daarna wordt ook de tweede methode voor seizoensvariatie toegepast en de onderlinge verschillen vergeleken.

5.4.1 Eerste methode seizoensvariatie

5.4.1.1 Uurlijkse piekdebieten neerslagafstroming

Figuur 26 en Figuur 27 geven de resultaten weer van de uurlijkse POT piekafvoeren in vergelijking met de terugkeerperiode voor deelbekken 410 (Figuur 26 voor de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren en Figuur 27 voor de Van Ypersele (2004) perturbatiefactoren).

De hogere piekafvoeren x , boven een drempelwaarde x_t , volgen een exponentiële verdeling met cumulatieve verdelingsfunctie:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_t}{\beta}\right)$$

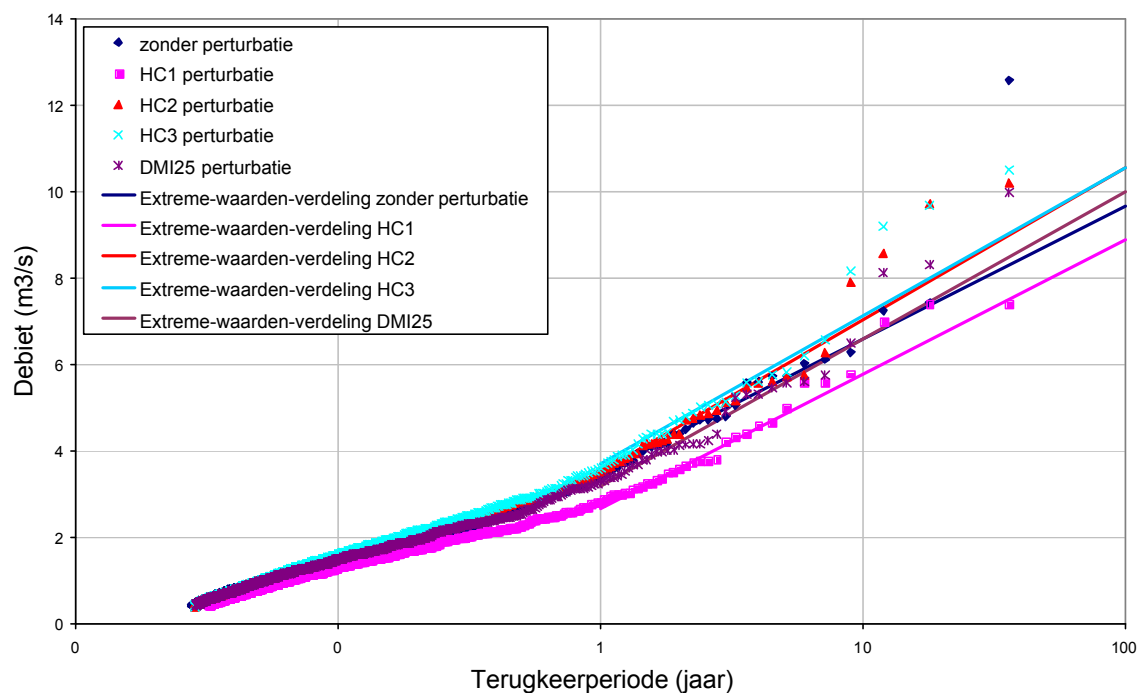
met parameters β en x_t . Beide parameters zijn bepaald door gewogen lineaire regressie in de exponentiële Q-Q plot, zoals beschreven in de "Algemene methodologie". De parameter β is de inverse helling van het lineair regressieverband boven de drempel x_t . De optimale waarde van deze drempel wordt bepaald door minimalisatie van de gemiddeld kwadratische afwijking tussen de empirische piekdebieten en de regressielijn (Willems, 1998).

Wanneer de calibratie van $F(x)$ is gebaseerd op debietpiekwaarden geselecteerd in een tijdreeks met een lengte van n jaar, dan wordt de terugkeerperiode of gemiddelde herhalingstijd T van een debiet x gegeven door:

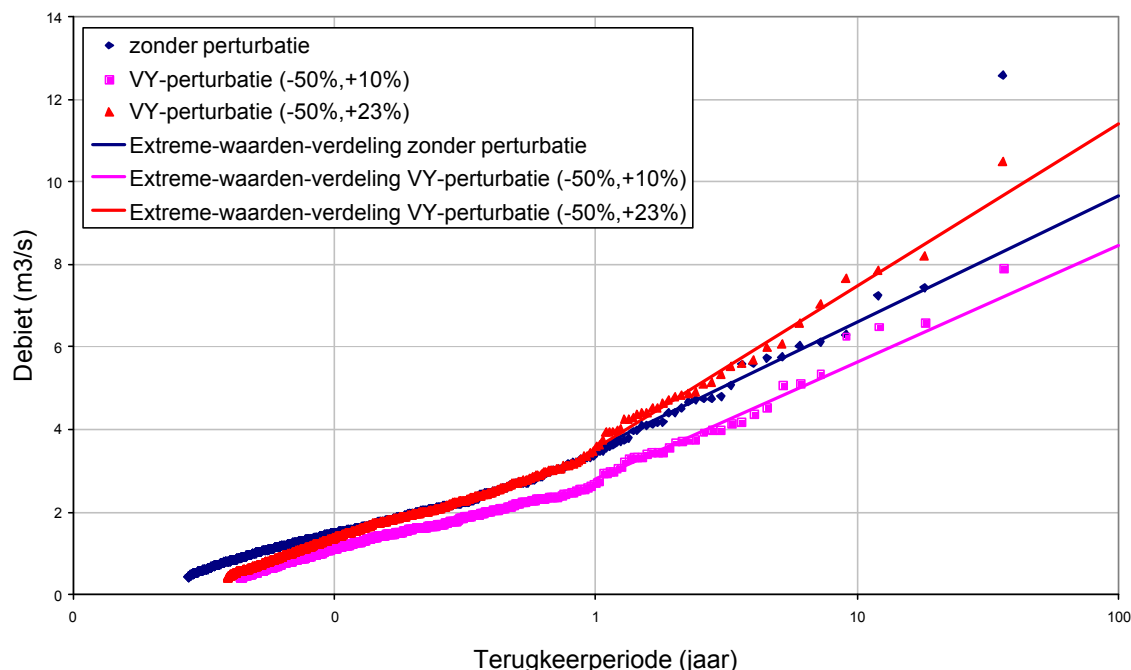
$$T(\text{jaar}) = \frac{n}{t} \frac{1}{1 - F(x)}$$

$$F(x) = 1 - \frac{n}{tT}$$

Door de log-schaal voor de terugkeerperiode in Figuur 26 en Figuur 27, wordt de exponentiële verdeling lineair geplot. In Figuur 26 en Figuur 27 wordt voor alle perturbatiefactoren een lineair staartgedrag vastgesteld en is telkens de gecalibreerde exponentiële extreme-waarden-verdeling verdeling weergegeven. Deze kunnen gebruikt worden om extrapolaties te maken naar grotere terugkeerperioden.



Figuur 26. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor enkele geselecteerde PRUDENCE RCM-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 27. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor de VY-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2050 en 2100).

Voor de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren worden slechts kleine verschillen waargenomen in de extreme piekafvoerdebieten. Afwijkingen blijken vooral op te treden voor terugkeerperiodes groter dan 0.5 jaar. Voor HC1 worden zelfs dalingen vastgesteld. Voor HC2 en HC3 blijkt de trend evenwel lichtjes stijgend. Let wel dat HC1, HC2 en HC3 'ensemble members' zijn van hetzelfde klimaatmodel. De impactresultaten zijn duidelijk verschillend afhankelijk van het type klimaatmodel en het veronderstelde broeikasgasemissiescenario, maar ook van de initiële condities gebruikt in de simulatie van de klimaatmodellen. Door vergelijking van de resultaten voor de verschillende simulaties met de klimaatmodellen en de verschillende emissiescenario's wordt een aanduiding bekomen over de onzekerheden in de voorspelde impact van klimaatverandering.

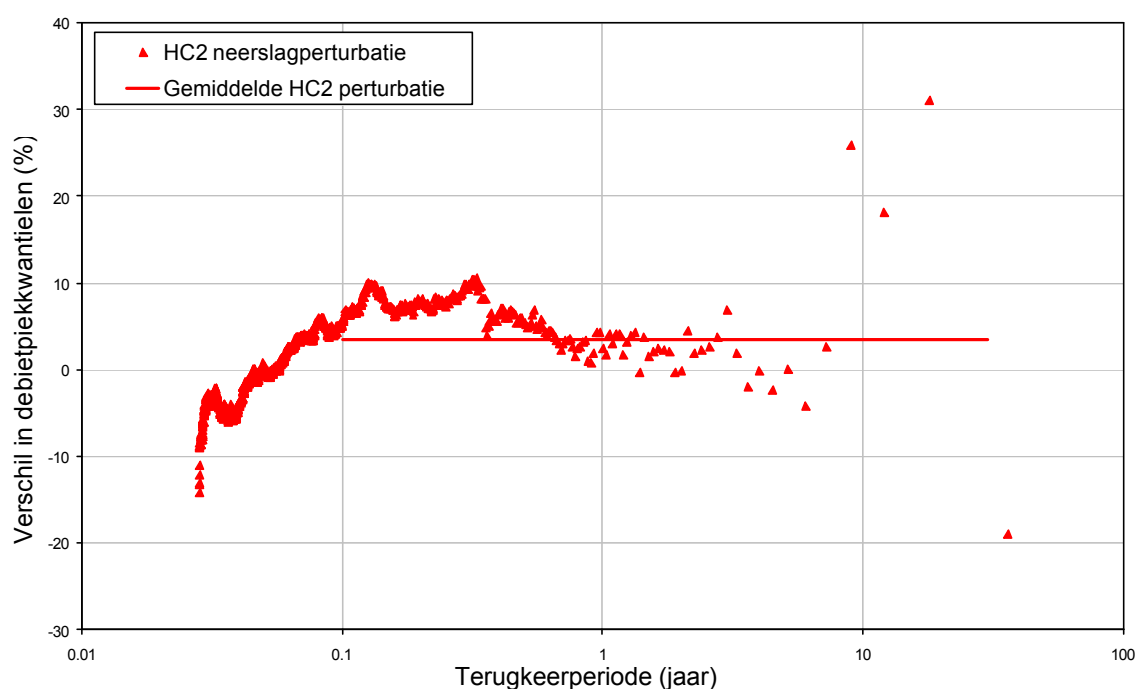
Voor de Van Ypersele (2004) perturbatiefactoren zijn de verschillen beduidend groter en sterk afhankelijk van de veronderstelde verhouding tussen de positieve perturbatiefactor in de winter en de negatieve perturbatiefactor in de zomer.

Welke perturbatiefactor ook wordt toegepast, hetzelfde type exponentiële extreme-waarden-verdeling blijkt geldig; enkel een hercalibratie van de parameters van de verdeling blijkt nodig. Op basis van deze parameters kunnen kwantielen (debietwaarden bij bepaalde overschrijdingskansen of terugkeerperiodes) afgeleid worden. Kwantielen van rivierdebieten worden vaak gebruikt in het waterbeleid en aan de basis van waterbouwkundige ontwerpen. In Tabel 12 wordt voor de verschillende perturbatiefactoren een vergelijking gemaakt van de kwantielwaarden voor terugkeerperiodes van 1 jaar, 30 jaar en 100 jaar. Deze blijken volgens de klimaatscenario's voor 2100 -17% tot +5% toe te nemen ten opzichte van het huidige klimaat voor een terugkeerperiode van 1 jaar, en -12% tot +12% voor 100 jaar.

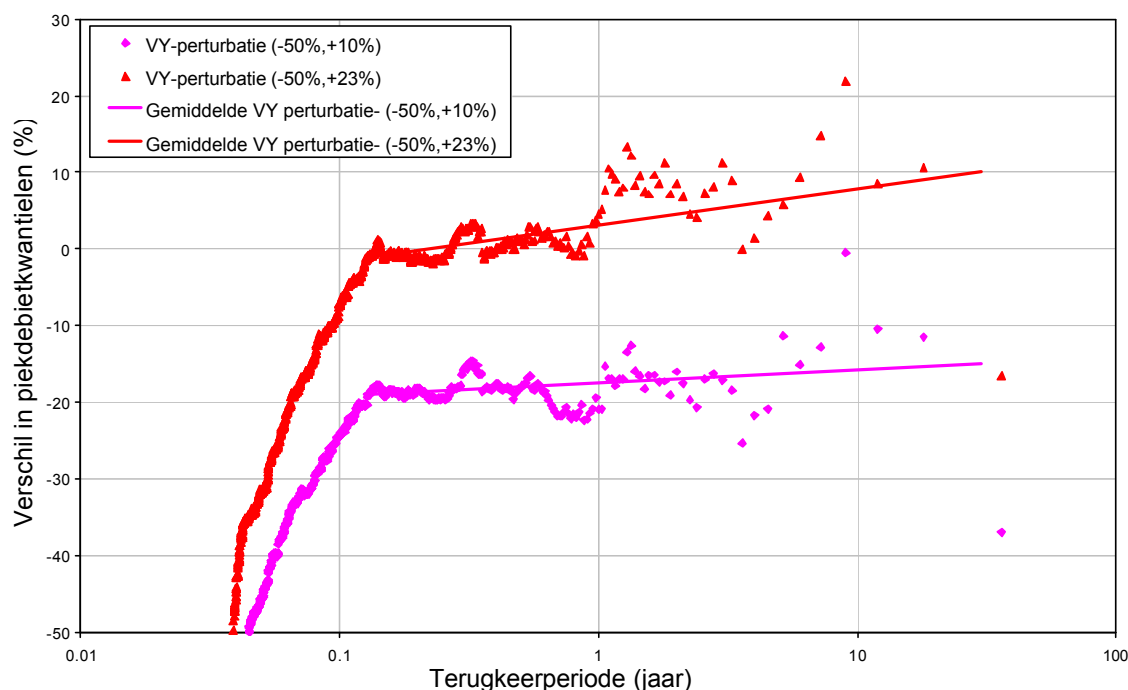
	Terugkeerperiode		
	1 jaar	30 jaar	100 jaar
zonder perturbatie	3.46	7.55	9.00
HC1	2.96	6.62	7.81
HC2	3.62	8.09	9.54
HC3	3.71	8.28	9.77
DMI25	3.37	7.48	8.82
METNO-A2	3.18	7.16	8.46
METNO-B2	3.19	7.19	8.49
ITCP-A2	3.24	7.22	8.53
ITCP-B2	3.15	7.04	8.30
VY (+10% -50%)	2.73	6.05	7.23
VY (+23%, -50%)	3.51	8.17	9.82

Tabel 12. Uurlijkse piekdebietkwantielen (in m^3/s) voor een terugkeerperiode van 30 jaar, voor VHA-zone 410 en verschillende neerslagperturbatiefactoren.

Het is duidelijk dat de impact van klimaatverandering op de rivierdebieten afhankelijk is van de terugkeerperiode. In Figuur 28 en Figuur 29 wordt het percentage verschil in uurlijkse POT-debietpieken voorgesteld in functie van de terugkeerperiode. Dit verschil in debietkwantielen is berekend door voor de debietreeksen zonder en met toepassing van een perturbatiefactor de POT-debietpieken te selecteren, deze te rangschikken van groot naar klein, en door de debietwaarden met hetzelfde rangschikingsnummer te vergelijken. Terwijl de verschillen voor de kleine POT-debietpieken (voor terugkeerperioden kleiner dan 0.1 jaar) sterk negatief zijn, zijn deze voor de grote debietpieken (voor terugkeerperioden groter dan 0.5 jaar) positief en meer constant. Voor deze debieten is voor elk van de toegepaste perturbatiefactoren zowel een gemiddeld debietverschil berekend, als de variatie van het debietverschil met toenemende terugkeerperiode gecalibreerd (zie calibratie lineair regressieverband in Figuur 28 en Figuur 29).



Figuur 28. Percentage verschil in uurlijkse piekdebietkwantielen voor VHA-zone 410 en de PRUDENCE HC2-neerslagperturbatiefactor (klimaat 2100).



Figuur 29. Percentage verschil in uurlijkse piekdebietkwantielen voor VHA-zone 410 en de VY-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2050 en 2100).

In Tabel 13 worden gemiddelde verschillen in debietvariatie weergegeven voor de grote POT-debietpieken (voor terugkeerperioden groter dan 0.5 jaar). Voor de perturbatie volgens het HC2 regionaal klimaatmodel wordt een gemiddelde stijging met 4% gevonden in de extreme debietpieken. Voor de VY-perturbatiefactoren (+10%,-50%) dalen deze debietpieken gemiddeld met 12%. Voor de VY-perturbatiefactoren (+23%,-50%) wordt deze daling omgebogen in een stijging van gemiddeld +7.7%. Figuur 30 geeft aan hoe dit percentage voor de VY-perturbatiefactoren varieert met het percentage stijging in winterneerslag. Hiertoef zijn twee bijkomende neerslagperturbaties gesimuleerd: (+15%,-50%) en (+18%,-50%). Het is op basis van deze figuur en de resultaten in Tabel 13 duidelijk dat de hydrologische impact van klimaatverandering in grote mate afhankelijk is van de toegepaste neerslagperturbatiefactoren.

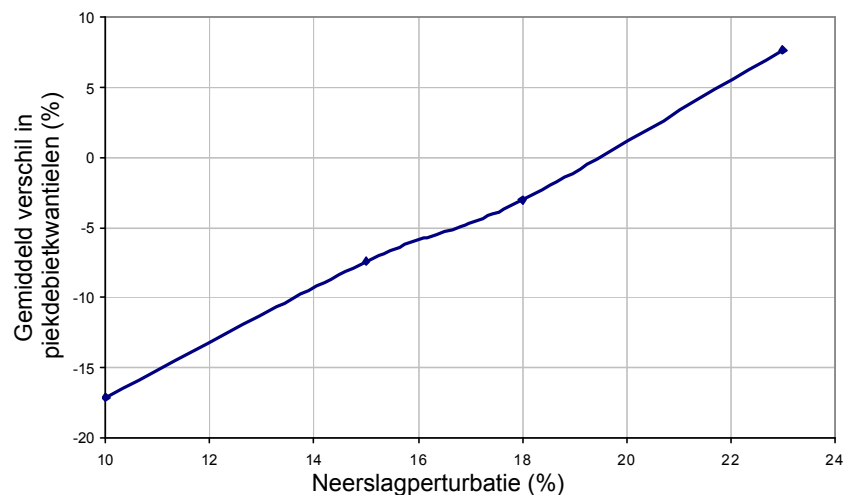
Uiteraard wordt deze variatie in hydrologische impact verklaard door de invloed van de veranderingen in neerslagvolumes op het verzadigingsgehalte van de ondergrond. Door de afname in de zomerneerslag daalt het vochtgehalte in de ondergrond tijdens de zomermaanden, waardoor de natte winterperiode begint met een lager vochtgehalte, en dus met een groter potentieel voor berging van water in de ondergrond. Of de wijziging van de neerslagvolumes in de winter de vochtgehalteveranderingen kunnen doen omkeren van een daling in de zomer naar een stijging in de winter, hangt af van de relatieve verhouding van de toename in het neerslagvolume in de winter ten opzichte van de neerslagafname in de zomer. Voor de Van Ypersele (2004) perturbatiefactoren, wordt voor de meeste winters een daling van het bodemvochtgehalte of verzadigingsgraad vastgesteld voor het scenario (+10%,-50%), die wordt omgebogen naar een stijging voor het scenario (+23%,-50%) (Figuur 31). Naarmate er meer neerslagvolume wordt geïntroduceerd in de winter, neemt de verzadigingsgraad toe, en bijgevolg ook de neerslagafstromingscoëfficiënt, de snelheid van de neerslagafstroming (hogere fractie in de snelle deelstroom) en de overstromingskans. Figuur 31 geeft aan hoe de tijdsvariatie in verzadigingsgraad kan wijzigen.

Naast de debietextremen zijn in Tabel 13 ook de cumulatieve debietvolumes vergeleken. Ook deze blijken sterk te variëren met de toegepaste perturbatiefactor. Het verschil in de debietvolumes t.g.v. de klimaatverandering kan zowel stijgend als dalend zijn, afhankelijk van de verhouding tussen het debietverschil bij de extreme debietpieken en het debietverschil bij de lagere debietpieken (zie de negatievere debietverschillen voor kleine piekafvoeren in Figuur 28 en Figuur 29). Bij toepassing van de zeer extreme -50% Van Ypersele (2004) neerslagperturbatiefactor is de daling in cumulatief neerslagafstromingsvolume zeer groot: tot

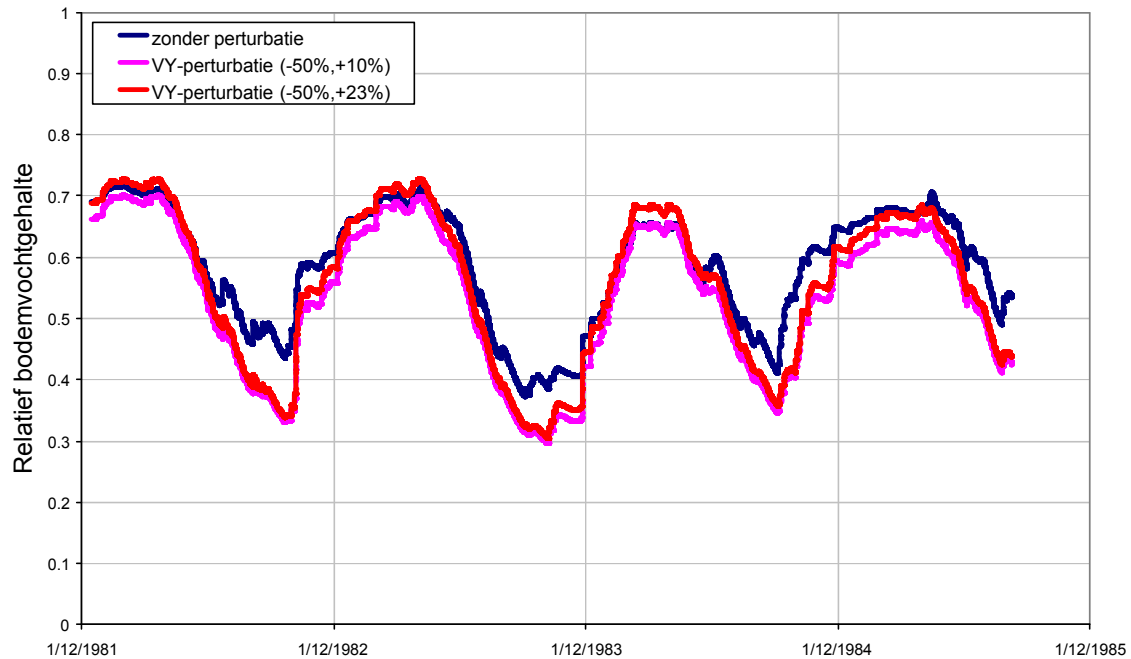
30%. Zoals aangegeven door Van Ypersele (2004) dient deze factor beschouwd te worden als een bovenlimiet van de mogelijke neerslagdaling in de zomer.

	Variatie in POT piekdebieten (%)	Variatie in cumulatieve debietvolumes (%)
HC1	-11	-14
HC2	+3.4	+3.2
HC3	+6.7	+3.7
DMI25	-3.5	-1.4
METNO-A2	-12.4	-12.87
METNO-B2	-14	-74
ITCP-A2	-5	-8.7
ITCP-B2	-7	-10.64
VY (+10% -50%)	-12	-31
VY (+23%, -50%)	+7.7	-18

Tabel 13. Gemiddeld percentage verschil in extreme uurlijkse piekdebietskantielen en cumulatieve debietvolumes voor VHA-zone 410 en verschillende neerslagperturbatiefactoren.



Figuur 30. Variatie in het percentage verschil in uurlijkse piekdebietskantielen voor VHA-zone 410 met de grootte van de VY-neerslagperturbatiefactor voor de winter.



Figuur 31. Variatie in het tijdsverloop van het relatief verzadigingsgehalte van de ondergrond voor VHA-zone 410 en de VY-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2050 en 2100).

Het cumulatief effect op het neerslagafstromingsvolumes, zoals weergegeven in Tabel 13, is het gevolg van een groot aantal interagerende hydrologische componenten of deelstromen. Om duidelijker de hydrologische veranderingen van klimaatverandering te onderzoeken zijn in Tabel 14 de overeenkomstige veranderingen weergegeven voor de voornaamste hydrologische deelstromen en bergingsvolumes, zoals gedefinieerd in deel 5.2:

- de oppervlakteafstroming y_s (snelste hydrologische deelstroom)
- de infiltratie in de ondergrond c_u
- de percolatie naar het grondwater c_g
- de oppervlakteberging s
- het bodemvochtgehalte l (of verzadigingsgraad u/u_{max})
- de actuele evapotranspiratie e_a
- de grondwater- en de hypodermische afstroming $y_i + y_g$ (trage hydrologische deelstromen).

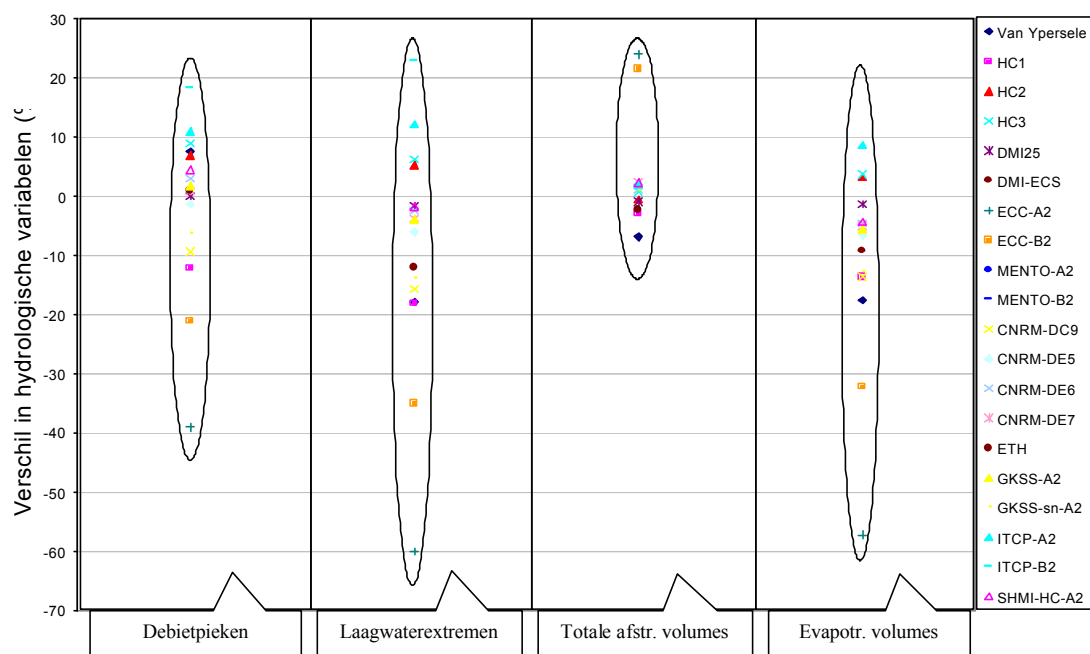
Elk van deze hydrologische componenten is gebiedsgemiddeld voor het volledige deelbekken (VHA-zone) beschouwd (conform de gebiedsgemiddelde conceptuele hydrologische modelleringsaanpak op basis van NAM).

Op basis van de resultaten in Tabel 14 blijkt dat de verschillen in cumulatieve oppervlakteafstroming gelijk lopen met de verschillen in totaal cumulatief neerslagafstromingsdebiet. Het is evenwel enkel tijdens perioden met een hoog verzadigingsgehalte dat het totaal neerslagafstromingsdebiet zich nagenoeg volledig in de vorm van oppervlakteafstromingsdebiet voordoet. Bij een verminderd bodemvochtgehalte zijn de neerslagafstroming, de infiltratie, de percolatie en de evapotranspiratie direct proportioneel met de verzadigingsgraad (de hoeveelheid water in de oppervlakteberging s en de bodemvochtberging u).

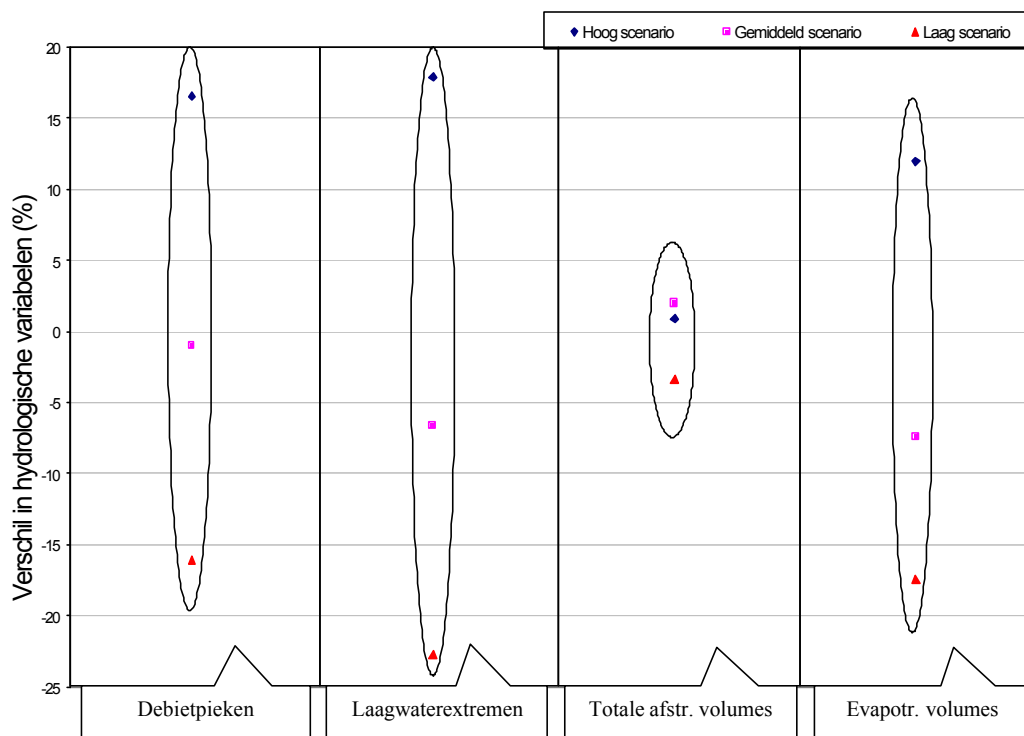
	y_s	c_u	c_g	s	u	e_a	y_i+y_g
HC1	-18	-3.1	-16	-2.6	-2.5	-3.0	-12.2
HC2	+5.3	+0.6	+3.1	-2.0	+1.1	-0.6	+2.5
HC3	+6.2	+0.8	+3.7	-2.7	+1.4	-0.7	+2.9
DMI25	-1.6	-0.3	-2.0	-1.8	+0.2	-0.9	-1.3
VY (+10% -50%)	-36.14	-8.81	-33.41	-1.44	-9.96	-8.60	-29.29
VY (+23%, -50%)	-17.57	-5.31	-18.47	-2.44	-6.56	-6.81	-17.21

Tabel 14. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 en verschillende perturbatiefactoren.

In Figuur 32 wordt voor de uurlijkse piekdebieten, de uurlijkse laagwaterextremen, de cumulatieve totale neerslagafstromingsdebieten en de cumulatieve werkelijke evapotranspiratievolumes de variaties in de hydrologische impactresultaten grafisch voorgesteld. In Figuur 33 worden de overeenkomstige resultaten voor het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario weergegeven.



Figuur 32. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische impact op basis van vier hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 en de verschillende neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 33. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische impact op basis van vier hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 en de neerslagperturbatiefactoren van het midden, laag en hoog scenario (klimaat 2100).

5.4.1.2 QDF-verbanden

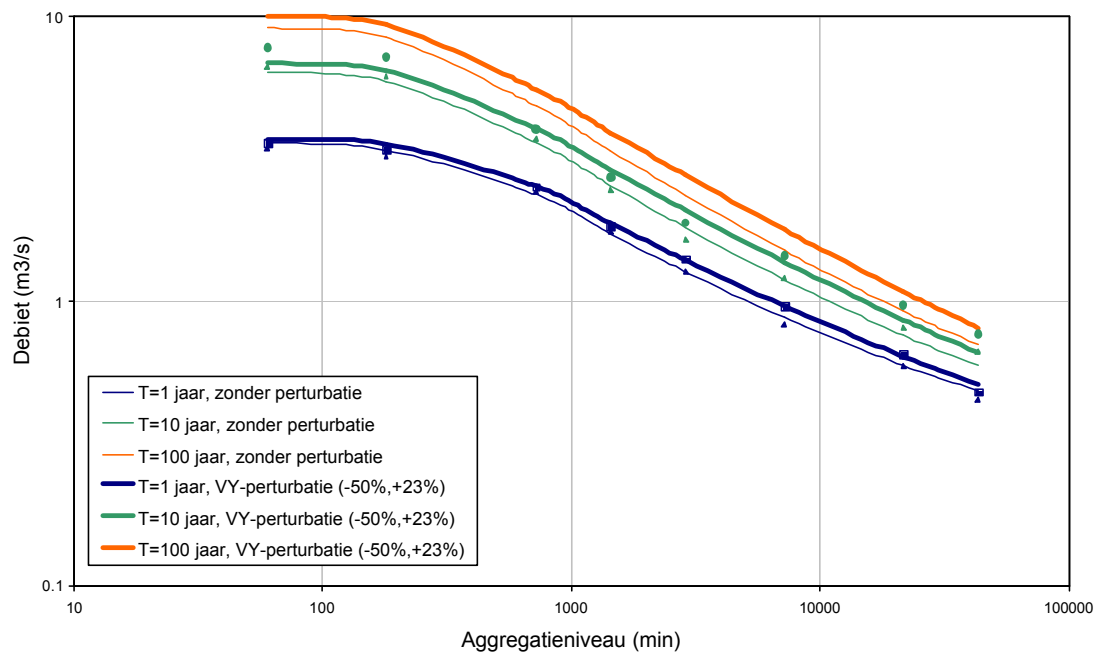
De hiervoor voorgestelde frequentieanalyse voor de hydrologische variabelen is voor de piekdebieten telkens gebaseerd op de uurlijkse debietwaarden. In dit deel zijn de impacts ook voor andere tijdschalen geanalyseerd. Het is duidelijk dat wanneer de debieten worden uitgemiddeld over bredere tijdsvensters (de zogenaamde aggregatieniveaus), dat voor eenzelfde terugkeerperiode het debiet afneemt bij toenemend aggregatieniveau. Verder is het duidelijk dat het debiet toeneemt bij een grotere terugkeerperiode. Deze verbanden worden grafisch voorgesteld in QDF-verbanden: verbanden tussen het debiet (Q), het aggregatieniveau of uitmiddelingstijd (D) en de voorkomingsfrequentie (F). De voorkomingsfrequentie is hierbij rechtstreeks gerelateerd aan de terugkeerperiode. Hier zijn de QDF-verbanden afgeleid door een exponentiële extreme-waarden-verdeling te calibreren voor elk van de bestudeerde aggregatieniveaus, en verbanden te calibreren tussen de parameters van deze verdeling en het aggregatieniveau. QDF-verbanden kunnen in het waterbeheer worden gebruikt om voor verschillende toepassingen (bij verschillende relevante tijdschalen) de overschrijdingskansen van welbepaalde debietextremen af te leiden. Binnen de “Algemene methodologie” van het WL worden ze ook gebruikt als basis voor de opmaak van de compositiehydrogrammen. Alzo hebben verschuivingen in de QDF-verbanden directe economische implicaties op toekomstige waterbeheersprojecten. Eventuele grote verschuivingen in de QDF-verbanden zouden de economische kost van toekomstige hydraulische uitvoeringsprojecten op kritieke wijze kunnen verhogen.

In dit deel is onderzocht hoe de QDF-verbanden verschuiven door toepassing van de verschillende perturbatiefactoren. Zo stelt zich de vraag of bij toepassing van een constante neerslagperturbatiefactor voor de winter, de QDF-verbanden parallel verschuiven in een $\log(Q) - \log(D)$ grafiek (dit laatste zou betekenen dat de debieten bij alle tijdschalen met eenzelfde proportionaliteitsfactor verhogen of verlagen), of de debietvariatie sterk afhankelijk is van de tijdschaal.

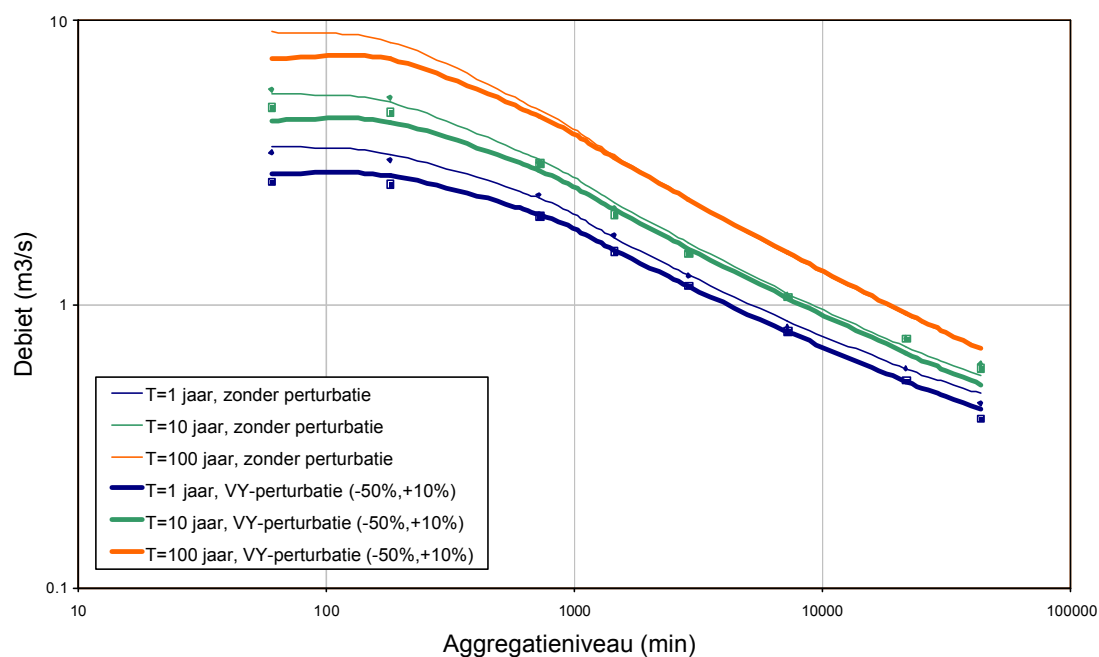
In Figuur 34 en Figuur 35 worden de variaties getoond na toepassing van de Van Ypersele (2004) perturbatiefactoren. Bij een toename van +23% in de winterneerslag wordt een duidelijke stijging in de debietextremen vastgesteld tot een aggregatieniveau van ongeveer 1 maand. Voor grote tijdschalen, dus voor de cumulatieve debietvolumes, wordt een daling

waargenomen (zoals ook hiervoor afgeleid in Tabel 15). De oorspronkelijke en gewijzigde QDF-verbanden kruisen elkaar dus bij een aggregatieniveau van ongeveer 1 maand (zie Figuur 34).

Bij een lagere toename van +10% in de winterneerslag wordt een systematische daling gevonden voor alle aggregatieniveaus (zowel de uurlijkse debietpiekextremen als de cumulatieve debietvolumes dalen; zie ook de analyse hiervoor in Tabel 13). De QDF-verbanden vertonen een nagenoeg parallele verschuiving, die evenwel voor de meer extreme debietcondities (grotere terugkeerperioden) minder groot is, indien de debietvariaties groter worden bij toenemende terugkeerperiode (stijgend verloop van het percentage verschil in piekdebietkwantielen versus terugkeerperiode, zoals in Figuur 29).

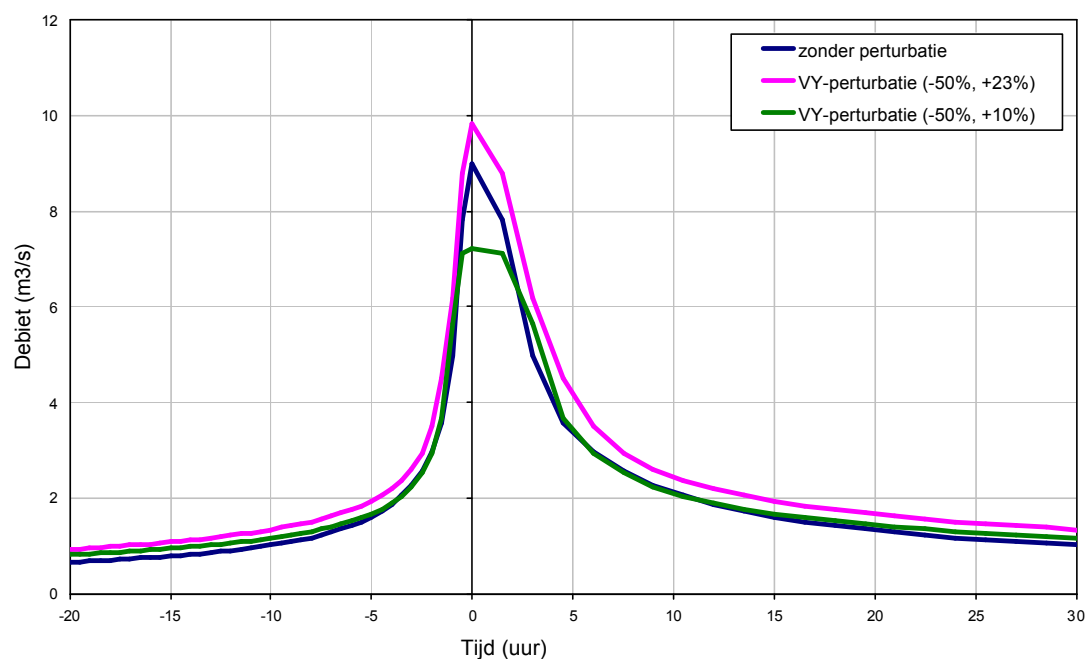


Figuur 34. Verschuiving in QDF-verbanden voor VHA-zone 410 en de VY-neerslagperturbatiefactor (+23%,-50%)



Figuur 35. Verschuiving in QDF-verbanden voor VHA-zone 410 en de VY-neerslagperturbatiefactor (+10%,-50%).

In Figuur 36 worden de overeenkomstige veranderingen in compositiehydrogrammen getoond, voor het voorbeeld van een compositiehydrogram voor 100 jaar en de twee Van Ypersele (2004) neerslagperturbatiefactoren. De debietpiekwaarden in deze hydrogrammen variëren volgens de verschillen aangegeven in Tabel 12.



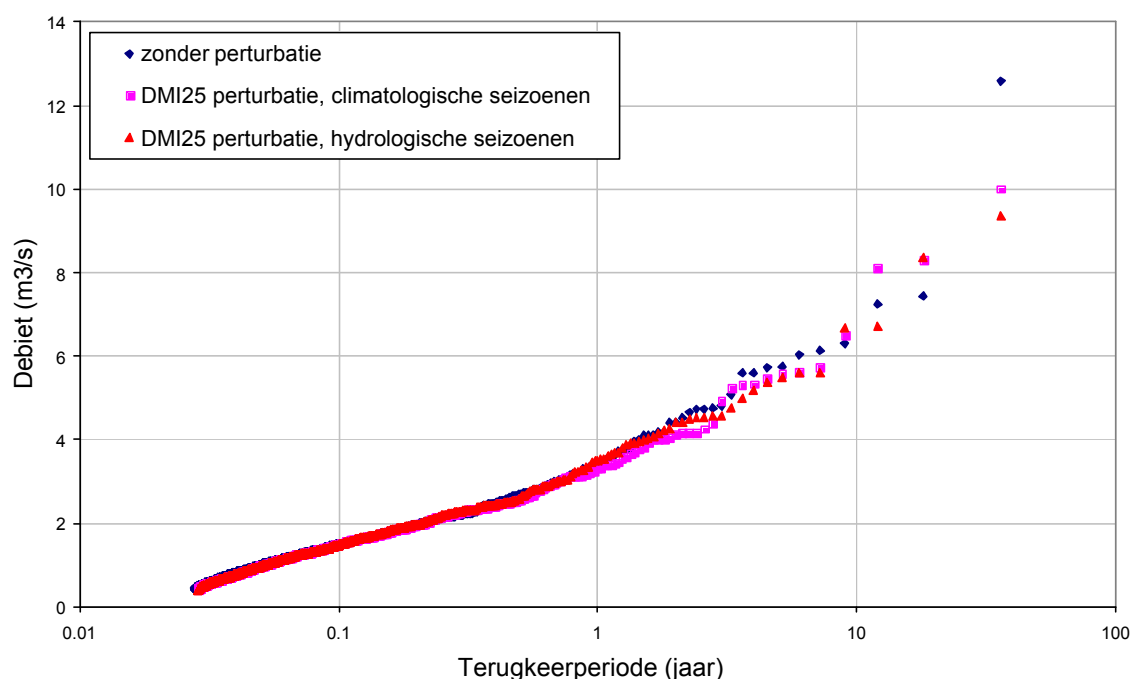
Figuur 36. Compositiehydrogrammen bij een terugkeerperiode van 100 jaar voor VHA-zone 410 en de VY-perturbatiefactoren (klimaat 2050 en 2100).

5.4.2 Tweede methode seizoensvariatie

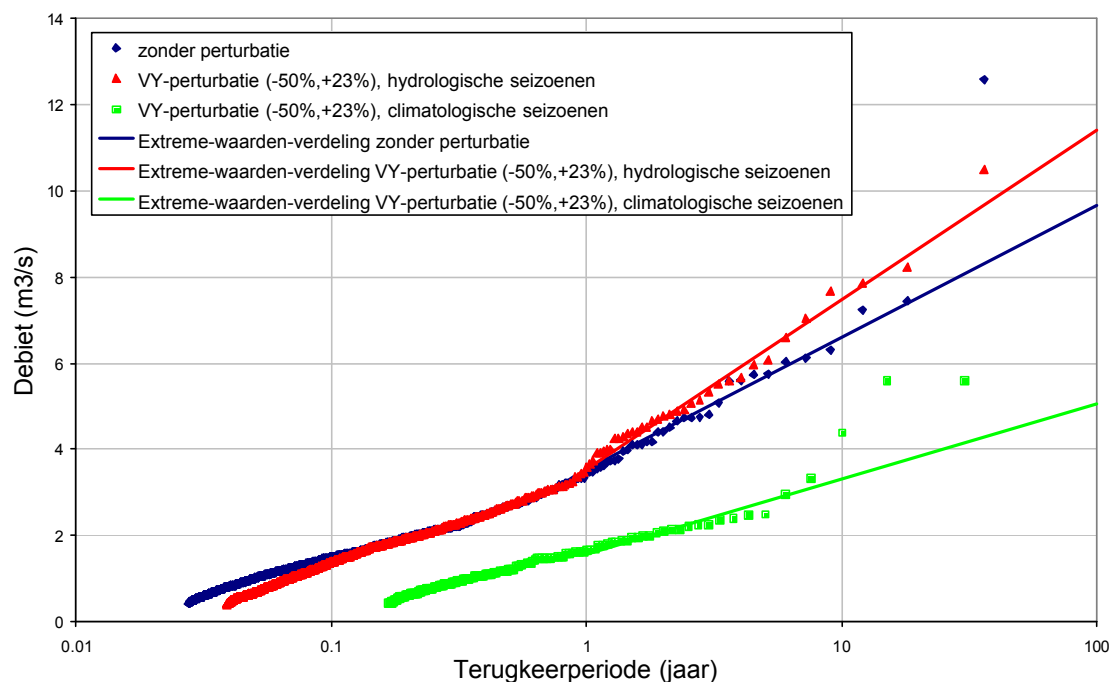
In het vorig deel is steeds gebruik gemaakt van de eerste methode voor het inrekenen van de seizoensvariatie (d.i. de hydrologische seizoenen). Hierna wordt de invloed onderzocht van de gevoeligheid van de hydrologische impactresultaten voor de toegepaste methode voor K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium

seizoensvariatie. Hierna worden enkele van de voorgaande plots herhaald, met een vergelijking van de resultaten tussen de eerste en de tweede methode van seizoensvariatie (climatologische versus hydrologische seizoenen).

Voor de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren zijn de verschillen zeer klein en te verwaarlozen in de verdere analyse (Figuur 37). Voor de Van Ypersele (2004) perturbatiefactoren zijn de verschillen groter (Figuur 38), door de zeer lage -50% perturbatie voor de zomerneerslag. Bij het gebruik van climatologische seizoenen worden door deze lage waarde ook lage negatieve neerslagperturbaties gebruikt voor de lente en de herfst, waardoor drie kwart van het jaar zulke sterke daling in neerslagvolume kent. Bij het gebruik van hydrologische seizoenen wordt dat beperkt tot de helft van het jaar, wat de grote verschillen verklaart. Zoals eerder gesteld is de -50% neerslagperturbatie voor de zomer een absolute ondergrens, en wordt verwacht dat de PRUDENCE RCM-gebaseerde perturbaties meer realistisch zijn. De keuze van de methode voor het inrekenen van de seizoensvariatie hoeft ons dus niet verder bezig te houden. Voor de verdere analyses worden daarom steeds hydrologische seizoenen gebruikt.



Figuur 37. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor de PRUDENCE DMI25-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2100): vergelijking eerste en tweede methode seizoensvariatie.

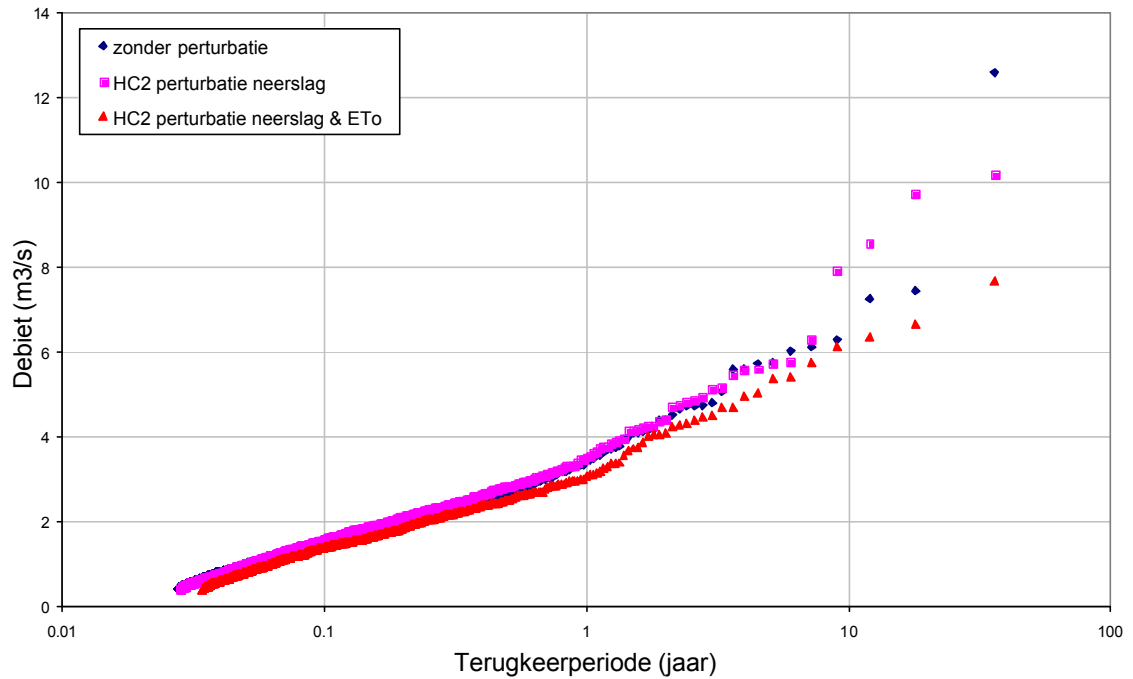


Figuur 38. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor de VY-neerslagperturbatiefactoren (klimaat 2100): vergelijking eerste en tweede methode seizoensvariatie.

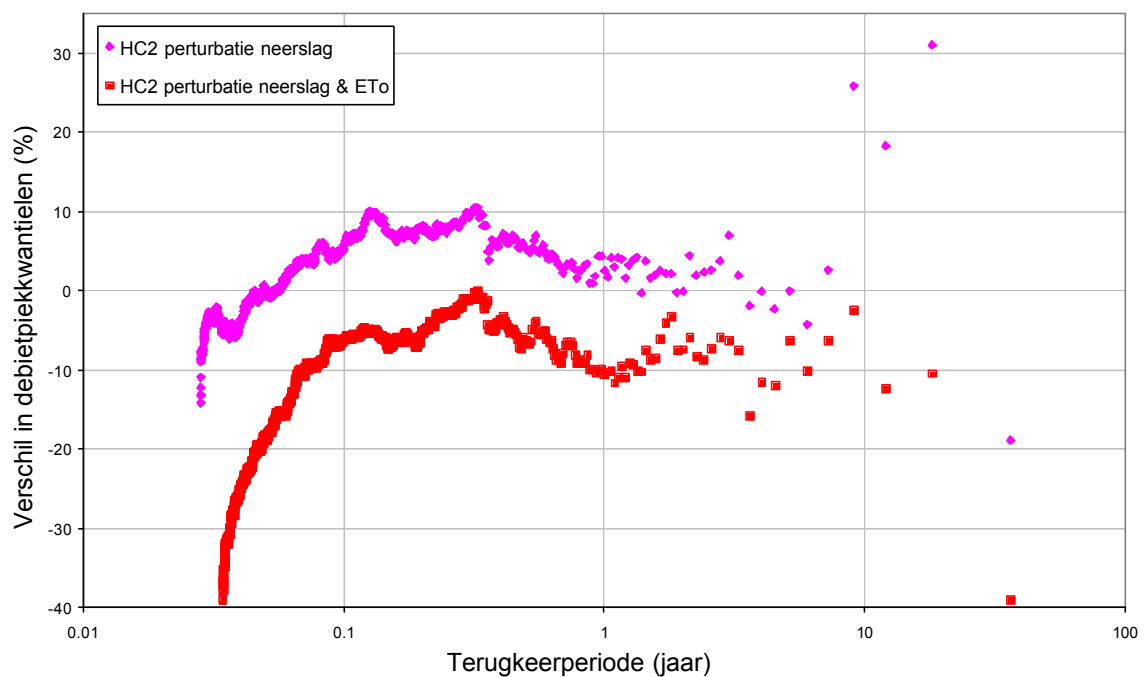
5.5 Impactanalyse klimaatverandering op hoogwaterfrequenties: toevoeging perturbatiefactoren voor evapotranspiratie

In dit deel worden naast de neerslagperturbaties gelijktijdig ook perturbaties op de potentiële evapotranspiratieinvoer (ETo) voor de hydrologische modellen toegepast. De historische ETo-reeks die in de NAM-modellen is gebruikt is deze van Ukket (tevens berekend op basis van de Bulthot-methode). Door vergelijking tussen de ETo-reeks berekend op basis van de climatologische variabelen voor de controlesimulatie en deze voor de scenario's, zijn de ETo-perturbatiefactoren afgeleid en toegepast op de ETo-modelinvoer op basis van de historische Ukket-gegevens.

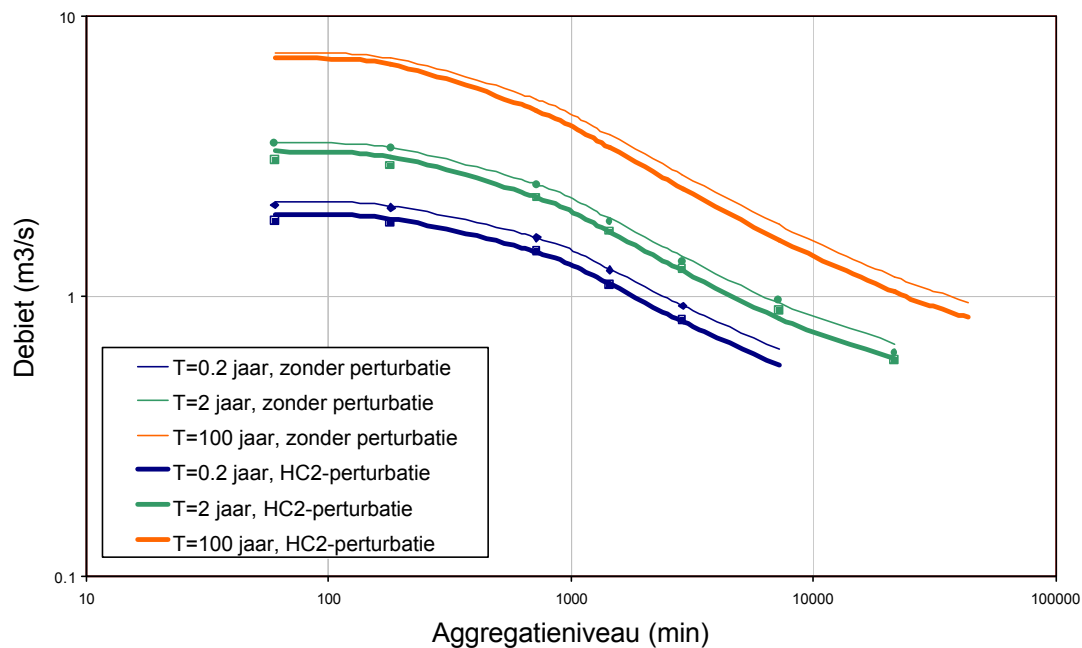
In Figuur 39 wordt een vergelijking gemaakt van de uurlijkse rivierdebietpieken versus terugkeerperiode voor de oorspronkelijke NAM-modelresultaten zonder toepassing van perturbatiefactoren, na toepassing van enkel een neerslagperturbatie, en na toepassing van zowel een neerslagperturbatie als een ETo-perturbatie (voor het voorbeeld van HC2). Zoals verwacht dalen de rivierdebietpieken na toepassing van de ETo-perturbaties; de extreme rivierdebietpieken gaan over van een kleine stijging (na toepassing van enkel een neerslagperturbatie) naar een kleine daling (na toepassing van zowel neerslagperturbatie als ETo-perturbatie). Voor HC2 gaat deze daling van +3.4% naar -8.6%: zie Figuur 40. Op basis van deze analyse, dus op basis van de PRUDENCE RCM-klimaatmodellen en de seizoenaal constant veronderstelde perturbatiefactoren, is het lang niet zeker dat klimaatverandering aanleiding geeft tot een stijging van de overstromingskansen en -risico's. Bijlagen A en B geven een overzicht van de resultaten voor alle PRUDENCE RCM's. Het is op basis van deze resultaten duidelijk dat de onzekerheden in de hydrologische impactresultaten groot zijn. Resultaten blijken sterk afhankelijk te zijn van de verhouding tussen de toename in de winterneerslag, enerzijds, en de afname in de zomerneerslag en de toename in de ETo, anderzijds.



Figuur 39. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 40. Percentage verschil in uurlijkse piekdebietkwantielen voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 41. Verschuiving in QDF-verbanden voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

De resultaten van de gemiddelde verschillen in extreme rivierdebietpieken en cumulatieve debietvolumes zijn samengevat in Tabel 15 en Tabel 16. Cumulatieve neerslagafstromingsvolumes dalen nu systematisch.

	Variatie in POT piekdebieten (%)	Variatie in cumulatieve debietvolumes (%)
HC1	-30	-30
HC2	-8.6	-14
HC3	-7.7	-17
DMI25	-17	-23
DMI-ECS	-18	-35
DMI-ECC-A2	-35	-57
DMI-ECC-B2	-16	-32

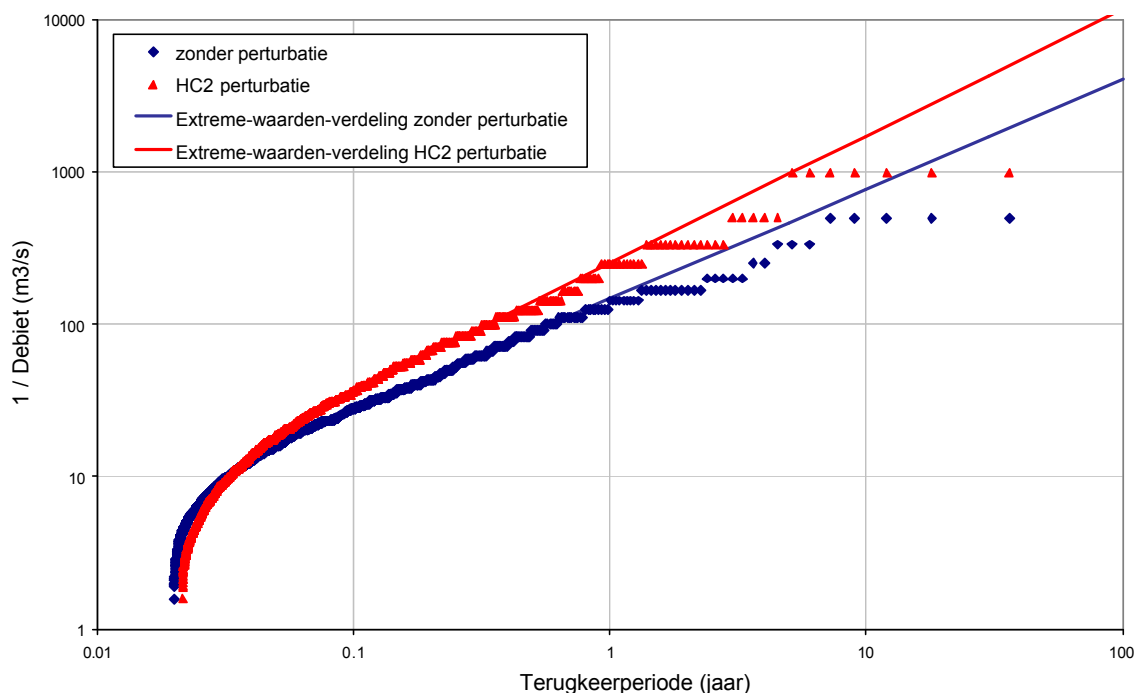
Tabel 15. Gemiddeld percentage verschil in extreme uurlijkse piekdebietskwantielen en cumulatieve debietvolumes voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de verschillende neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

	y_s	c_u	c_g	u	l	e_a	$y_i + y_g$
HC1	-36	+9.4	-30	-4.7	-9.6	+8.9	-27
HC2	-14	+5.2	-11	-8.0	-6.4	+13	-15
HC3	-17	+5.3	-14	-8.2	-8.0	+13	-18
DMI25	-26	+6.2	-21	-7.8	-9.5	+14	-23
DMI-ECS	-35.90	-7.00	-32.81	-5.91	-15.92	0.12	-35.68
DMI-ECC-A2	-63.97	13.42	-54.88	-13.71	-22.85	24.81	-55.30
DMI-ECC-B2	-35.55	12.29	-27.86	-12.20	-12.72	21.60	-31.43

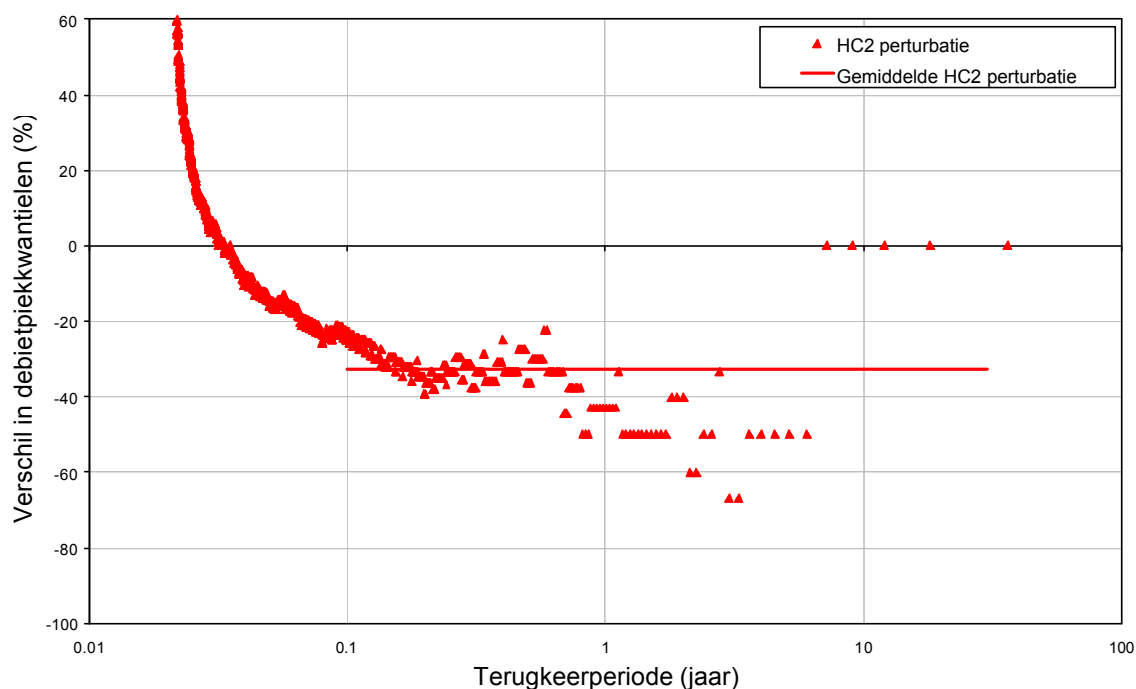
Tabel 16. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de verschillende neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

5.6 Impactanalyse klimaatverandering op laagwaterfrequenties

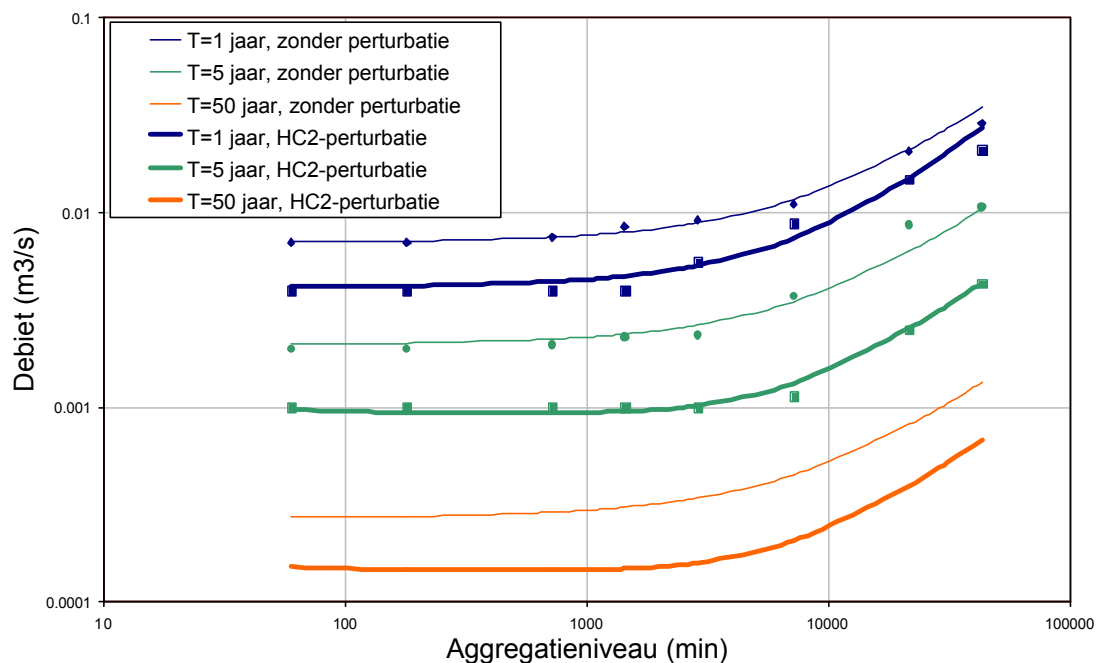
Op gelijkaardige wijze is ook de impact op de laagwaterdebieten onderzocht. In de terugkeerperiodeplot zijn nu de inverse rivierdebieten ($1/q$) geplot: zie het voorbeeld voor HC2 in Figuur 42 en Figuur 43. Het is duidelijk dat door de daling in de cumulatieve neerslagvolumes, veroorzaakt door de daling de zomerneerslag en de stijging in de ETo, de laagwaterdebieten in sterke mate dalen, en dit voor alle aggregatieniveaus (Figuur 44; Tabel 17 en Tabel 18). Het is op basis van de laagwater-QDF-verbanden duidelijk dat dit zware consequenties kan hebben voor de toekomstige beschikbaarheid van water.



Figuur 42. Uurlijkse laagwaterdebieten versus terugkeerperiode voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 43. Percentage verschil in uurlijkse laagwaterkwantielen voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).



Figuur 44. Verschuiving in laagwater-QDF-verbanden voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

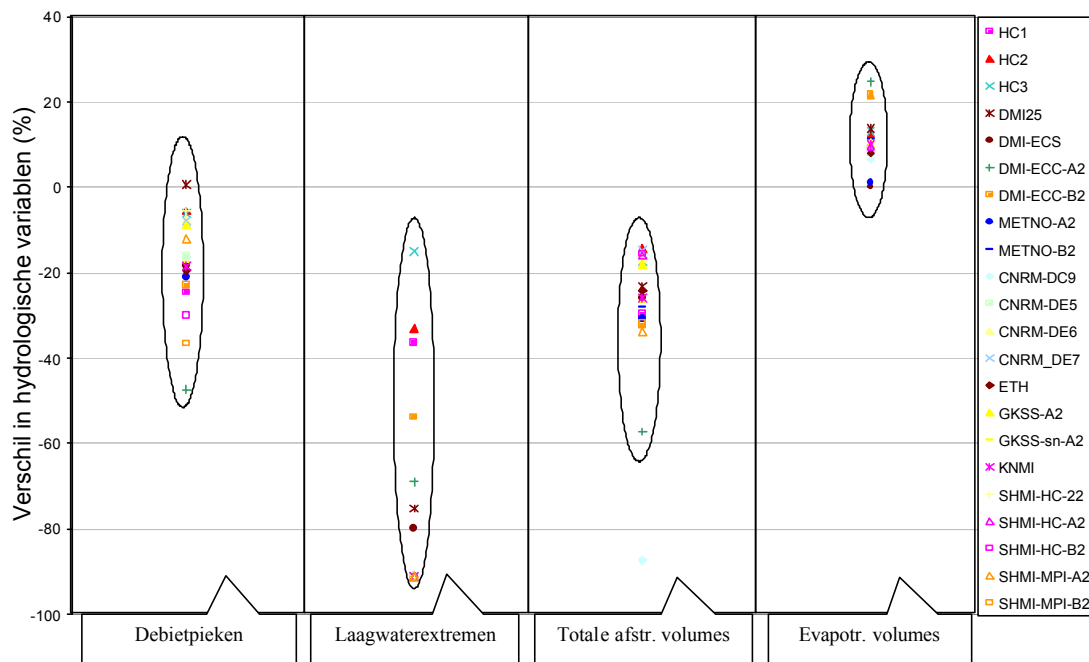
	Variatie in laagwaterextremen (%)
HC2	-36.3
HC3	-33.1
DMI25	-14.9
DMI-ECS	-75.1
DMI-ECC-A2	-79.8
DMI-ECC-B2	-68.9

Tabel 17. Gemiddeld percentage verschil in extreme uurlijkse laagwaterdebieten voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de verschillende neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

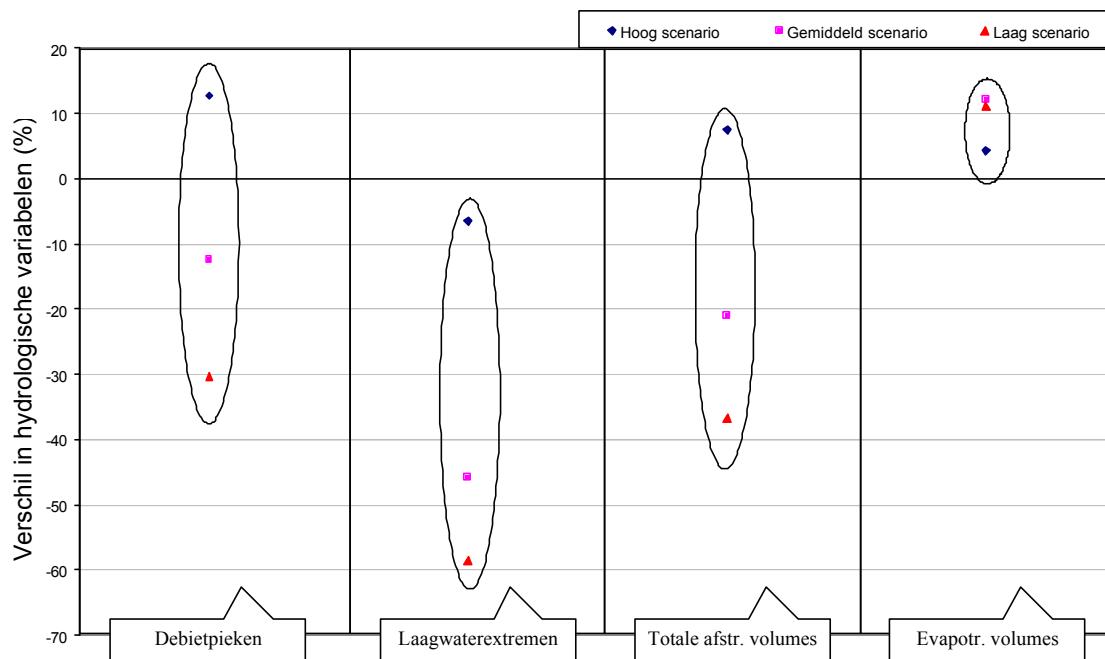
Aggregatieniveau:	Variatie in laagwaterextremen (%)
1 uur	-36.3
1 dag	-38.3
1 week	-37.1
1 maand	-27.6

Tabel 18. Gemiddeld percentage verschil in extreme laagwaterdebieten bij verschillende aggregatieniveau's voor VHA-zone 410 voor en na toepassing van de PRUDENCE HC2-neerslag- en ETo-perturbatiefactoren (klimaat 2100).

Samenvattende overzichtsfiguren voor de impact op uurlijkse piekafvoeren, uurlijkse laagwaterextremen, totale afstromingsvolumes en werkelijke evapotranspiratievolumes zijn gegeven in Figuur 45 voor de verschillende PRUDENCE RCM neerslag- en ETo-perturbatiefactoren en in Figuur 46 voor het midden, laag en hoog scenario.



Figuur 45. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische impact op basis van vier hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 en de neerslag- en ETo-perturbatiefactoren van de aanvaarde PRUDENCE RCM's (klimaat 2100).



Figuur 46. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische impact op basis van vier hydrologische modelvariabelen voor VHA-zone 410 en de neerslag- en ETo-perturbatiefactoren van het midden, laag en hoog scenario (klimaat 2100).

5.7 Impactanalyse klimaatverandering andere VHA-zones

De finale berekeningen op basis van een combinatie van de neerslag- en ETo-perturbatiefactoren, en zowel voor de analyse van hoogwater- als laagwaterfrequenties, zijn herhaald voor alle acht beschouwde PRUDENCE RCM-klimaatmodellen en voor de drie geselecteerde VHA-zones in het Denderbekken: zones 410, 4212 en 433. Voor zone 410 zijn K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium

de voornaamste resultaten hiervoor weergegeven in deel 5.5 voor de hoogwater-impactanalyse en in deel 5.6 voor de laagwater-impactanalyse. In bijlage A en B kunnen alle resultaten voor de drie geselecteerde VHA-zones worden teruggevonden.

Uit de resultaten blijkt dat de hydrologische impactresultaten van klimaatverandering voor de drie VHA-zones zeer gelijklopend zijn. In alle gevallen voorspelt het DMI-ECC-klimaatmodel voor het A2 broeikasgasemissiescenario de grootste impact op de neerslagafstromingsvolumes. Dalingen tot 75% worden teruggevonden voor de cumulatieve neerslagafstromingsvolumes in zones 433 en 4312. Dit wordt veroorzaakt door de grote ETo-perturbaties van +35% in de winter en +40% in de zomer voor dit model. In vergelijking met de andere klimaatmodellen voorspellen HC2 en HC3 meer gematigde variaties in neerslagafstromingsvolume, maar toch nog oplopend tot een daling van 20% voor HC2 in de zones 433 en 4312. Wat de invloeden op de hydrologische modelvariabelen betreft, blijkt dat de invloed op de piekdebieten en de andere hydrologische variabelen het grootst is voor zone 433, waarschijnlijk door de hoge verstedelijkingsgraad van dit deelbekken (meer verharding).

In alle gevallen blijken de hydrologische impactresultaten zeer gevoelig te zijn voor de veronderstelde neerslag- en ETo-perturbatiefactoren tijdens de winter- en zomerperiodes, en voor het veronderstelde broeikasgasemissiescenario. Grootste effecten worden gevonden voor het A2-scenario, zowel voor de hoogwater- als de laagwatercondities. De invloeden op de hoogwaterdebieten zijn soms dalend, soms stijgend (afhankelijk van het klimaatmodel en het emissiescenario), maar worden positiever (in vergelijking met de oorspronkelijke toestand zonder klimaatverandering, hogere percentages verschil in rivierdebietextremen) met toenemende terugkeerperiode. Voor de laagwaterdebieten worden ze negatiever (sterkere daling in laagwaterextremen) voor toenemende terugkeerperiode.

5.8 Conclusies en discussie

In de voorliggende studie is een methode uitgewerkt om de invloed van klimaatverandering door te rekenen op de hydrologische extremen, conform de "Algemene methodologie" van het WL. De methode maakt gebruik van seizoensgemiddelde perturbatiefactoren toegepast op de tijdreeksen van neerslag en potentiële evapotranspiratie (ETo) die als invoer worden gebruikt in de hydrologische modellen. Na simulatie van de geperturbeerde invoerreeksen in het hydrologisch model, kunnen de gesimuleerde tijdreeksen van neerslagafstromingsdebieten (hydrologische modeluitvoer) statistisch verwerkt worden, waarna nagenoeg onafhankelijke debietpieken en laagwaterextremen geselecteerd, de kansverdeling van de extreme hydrologische condities gecalibreerd voor verschillende aggregatieniveaus, QDF-verbanden afgeleid en compositiehydrogrammen opgesteld.

In de studie zijn perturbatiefactoren afgeleid op basis van simulaties met tien PRUDENCE regionale klimaatmodellen (RCM's). Deze simulaties zijn door het KMI verwerkt in het kader van het lopend CCI-HYDR onderzoeksproject voor Federaal Wetenschapsbeleid. De PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren zijn vergeleken met enkele andere perturbatiefactoren, die in het kader van vroegere studies voor België zijn afgeleid, zoals de perturbatiefactoren van Van Ypersele (2004) en het Tyndall Centre (2005). Deze laatste worden beschouwd als minder nauwkeurig omdat ze gebaseerd zijn op mondiale klimaatmodellen i.p.v. de voor de lokale schaal meer nauwkeurige regionale klimaatmodellen, en blijken limietwaarden te vormen van ten opzichte van de PRUDENCE RCM-gebaseerde factoren.

Verschiedende perturbatiefactoren zijn afgeleid voor de zomer- en de winterperiode. Het gebruik van hydrologische seizoenen (jaarlijkse tweestapsvariatie) blijkt voldoende nauwkeurig om de seizoensvariatie in te rekenen. Toepassing van een vierstapsvariatie (climatologische seizoenen) bleek immers in de studie t.o.v. de tweestapsvariatie (hydrologische seizoenen) slechts een verwaarloosbaar verschil in hydrologische impactresultaten te geven voor de PRUDENCE RCM-perturbatiefactoren.

De perturbatiefactoren zijn zeer sterk afhankelijk van het type klimaatmodel en de stijging in broeikasgasemissies dat voor de toekomst (tot 2100) is verondersteld in de simulaties met de klimaatmodellen. De onzekerheid op deze perturbatiefactoren is dus groot, wat ook de hydrologische impactanalyse van klimaatverandering zeer onzekerheid maakt.

De voorgestelde methode is geïllustreerd en de onzekerheid op de hydrologische impactresultaten geanalyseerd door toepassing op de bestaande NAM-hydrologische modellen voor de VHA-zones 410, 4312 (samenvoeging van zones 431 en 432) en 433 in het

Denderbekken. Ondanks de grote onzekerheden konden toch een aantal duidelijke conclusies worden getrokken. Zo is op basis van de toepassing voor het Denderbekken vastgesteld dat voor alle beschouwde klimaatsimulaties de laagwaterdebieten afnemen. De cumulatieve neerslagafstromingsvolumes nemen voor de meeste klimaatsimulaties af, terwijl de actuele evapotranspiratievolumes meestal toenemen. Voor de hoogwaterdebieten is er onduidelijkheid. Er zijn klimaatsimulaties met een positieve trend, en andere met een negatieve trend. Het teken van de trend op de piekafvoerdebieten blijkt afhankelijk van het relatieve belang van de toename in de winterneerslag versus de afname in de zomerneerslag, en van het relatieve belang van de trends in de neerslag versus de toename in de evapotranspiratie. Dit relatieve belang blijkt sterk te wijzigen van klimaatmodel tot klimaatmodel. In ieder geval is het reeds duidelijk dat de droogteproblematiek in de toekomst zal toenemen, in grotere mate dan dit voor de overstromingsproblematiek het geval zal zijn.

Verder zijn de simulatieresultaten van de klimaatmodellen voor de recente historische periode (controleperiode 1960-1990) vergeleken met de neerslagmetingen voor Ukkel, met het oog op het eventueel verwerpen van bepaalde klimaatmodellen en alzo de grote onzekerheid op de hydrologische impactresultaten verder te reduceren. Een grote afwijking tussen de historische neerslag te Ukkel en de simulatieresultaten met een klimaatmodel voor de controleperiode, impliceert evenwel niet dat ook de voorspelde effecten van klimaatverandering onnauwkeurig zijn. Daarom zijn enkel de simulaties met de klimaatmodellen, die in vergelijking met de andere simulaties zeer grote of lage perturbaties hebben, in aanmerking genomen voor potentiële verwerping.

In de Dendertoepassing zijn alle mogelijke perturbatiefactoren doorgerekend; de verschillen in impactresultaten geven dan een indicatie van de globale onzekerheid. Omdat het meermaals doorrekenen van het hydrologisch model en het meermaals statistisch naverwerken van de hydrologische modelresultaten een tijdrovende bezigheid is, is een vereenvoudigde methode voorgesteld waarbij drie simulaties worden uitgevoerd: op basis van perturbatiefactoren bij het midden, hoog en laag klimaatveranderingsscenario. Door het uitvoeren van deze drie simulaties en het vergelijken van de resultaten wordt een eerste indicatie bekomen van de onzekerheid in de hydrologische impactresultaten. De onzekerheid kan evenwel nog groter zijn, vb. indien de klimaatmodellen een aantal fysische processen die essentieel zijn voor het voorspellen van de lange-termijn trends en eventuele trendbreuken in het klimaat niet bevatten door beperkingen in de huidige wetenschappelijke kennis over het klimaat. Zoals door Kroonenberg (2006) is aangetoond voor het voorbeeld van de Kaspische Zee, blijkt het immers zeer moeilijk om trendbreuken in hydrometeorologische trends te voorspellen.

De huidige impactanalyse is gebaseerd op de Ukkel-neerslag. In Vlaanderen komen evenwel ruimtelijke variaties voor (vb. lagere neerslagvolumes aan de kust). Hiermee wordt bij de hydrologische modellering rekening gehouden door lokale neerslagreeksen te gebruiken voor elk rivierbekken en deelbekken (cfr. Algemene methodologie NAM-modellering en neerslaginvoerberekening WL). Het is duidelijk dat indien de Ukkel-reeks omwille van zijn lengte wordt gebruikt als neerslaginvoer in deze modellen om overstromingskansen te berekenen, correctiefactoren dienen toegepast te worden. De afleiding van deze factoren valt buiten het bestek van deze studie. Ook voor de perturbatiefactoren, die in deze studie worden gebruikt om de invloed van klimaatverandering door te rekenen, zou kunnen nagegaan worden of deze regionale verschillen vertonen voor Vlaanderen. Dit wordt verder onderzocht in het CCI-HYDR project. Voorlopig wordt verondersteld dat de perturbatiefactoren afgeleid op basis van Ukkel geldig zijn voor het ganse Vlaamse gebied. Ook wordt in het CCI-HYDR project nog verder onderzocht of de perturbatiefactoren voor extreme neerslag- en ETo-condities verschillen van de seizoensgemiddelde factoren, zoals in deze studie gebruikt, en hoe de perturbatiemethode overeenkomstig kan worden verfijnd.

6 Referenties

- Castillo, E., 1988. "Extreme Value theory in engineering", San Diego, Academic Press.
- Claps, P., et al., 2003. "Peak over threshold analysis of flood and rainfall frequency curves", Hydrological RISK workshop, Bologna, Italy, Oct 24-25, 2003.
- DHI, 2004. "MIKE11 – Reference & User's Manual", DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.

Gellens, D., et al., 1998. "Stream flow response of Belgian Catchments to IPCC Climate change scenarios", Royal Meteorological Institute of Belgium KMI/RMI.

Gumbel, E., 1958. "Statistics of extremes", New York, Colombia University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1995. "Second Assessment Report (SAR)" 1995.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. "Third Assessment Report (TAR)", 2001.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000. "Special Report for Emission Scenarios (SRES)", 2000.

KNMI, 2006. "Klimaat in de 21^e eeuw: vier scenario's voor Nederland", Koninklijk Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.

Kroonenberg S., 2006. "De menselijke maat – De aarde over tienduizend jaar", Uitgeverij Atlas, Amsterdam/Antwerpen.

Michielsen, S., Baetens, J., Van Eerdenbrugh, K., 2004. "Waterbeschikbaarheid in Vlaanderen", WL rapport, september 2005.

Nigel, A., et al., 2005. "Vulnerability to abrupt climate change in Europe", Tyndall Centre for Climate Change Research, Technical report 34, Nov 2005.

Rombauts, S., Willems, P., 2004. "Inventarisatie, Opmaak van numerieke hydrologische modellen en opstellen van composiethydrogrammen voor het Denderbekken", Rapport door Afdeling Hydraulica K.U.Leuven in opdracht van AWZ - Afdeling waterbouwkundig laboratorium en hydrologisch onderzoek, i.s.m. IMDC, Bestek nr. 16EB/02/19, 5 deelrapporten, april 2004.

Tyndall Centre for Climate Research, 2005. "Vulnerability to abrupt climate change in Europe", Technical report 34.

Pickand, J., 1975. "Statistical interference using order statistics", Annuals of statistics, 3, 119-131.

Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J., 2002. "100 years of rainfall registration: are there trends?", Water science and technology, vol. 45(2), 55-61.

Van Ypersele, J.P., Marbaix, P., 2004. "Climate Change Impact on Belgium", Greenpeace report on climate change, UCL, July 2004.

Willems, P., 1998. "Hydrological applications of extreme value analysis", In: Hydrology in a changing environment, H. Wheater and C. Kirby (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, vol. III, 15-25; (ISBN 0-471-98680-6).

Willems, P., 1999. Stochastic generation of spatial rainfall for urban areas. Water Science and Technology 39 (9), 23-30.

Willems, P., 2000. "Compound Intensity/Duration/Frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types", Journal of Hydrology, 233, 189-205.

Willems, P., Qvick, A., Vaes, G., Berlamont, J., Christiaens, K., Feyen, J., 2000. "Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen", Rapport door K.U.Leuven in opdracht van AWZ – Afdeling waterbouwkundig laboratorium en hydrologisch onderzoek, april 2000.

Willems P., Timbe, L., Campling, P., 2002a. 'Dwarssectieverwerking en DTM correctie voor quasi 2D hydraulische overstromingsmodellering: methodologie, toepassing Mike11 Dendermodel, en nauwkeurighedsanalyse', Rapport door Afdeling Hydraulica K.U.Leuven in opdracht van AWZ - Afdeling waterbouwkundig laboratorium en hydrologisch onderzoek, maart 2002,

Willems, P., Timbe, L., Popa, D., Berlamont, J., 2002b. 'MIKE11-Dender model', Rapporten en nota's door Afdeling Hydraulica K.U.Leuven: Rapport versie april 2002; Nota aanpassingen december 2002, Nota aanpassingen februari 2003.

Willems, P., Timbe, L., Campling, P., Thompson, S., Barbieri, M., 2003. 'Flood risk and damage Assessment using Modelling and Earth observation techniques (FAME)', project

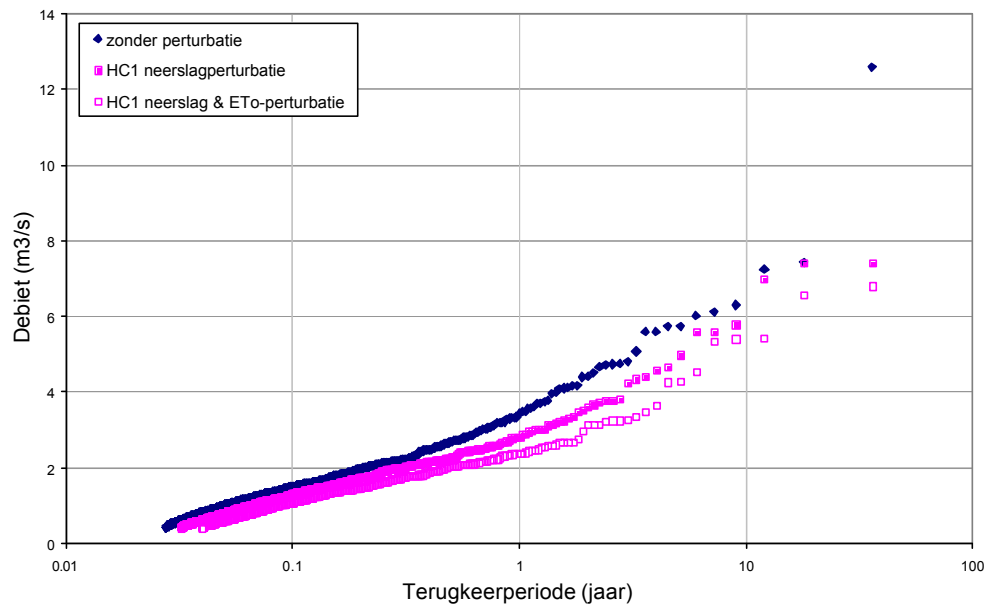
funded by the Data User Programme (DUP-2) of the European Space Agency (ESA), Dender
case Interim Report, 2002; Final Report, 2003.

Willems, P., 2004a. "ECQ: Hydrological Extreme Value Analysis Tool", Afdeling Hydraulica
K.U.Leuven.

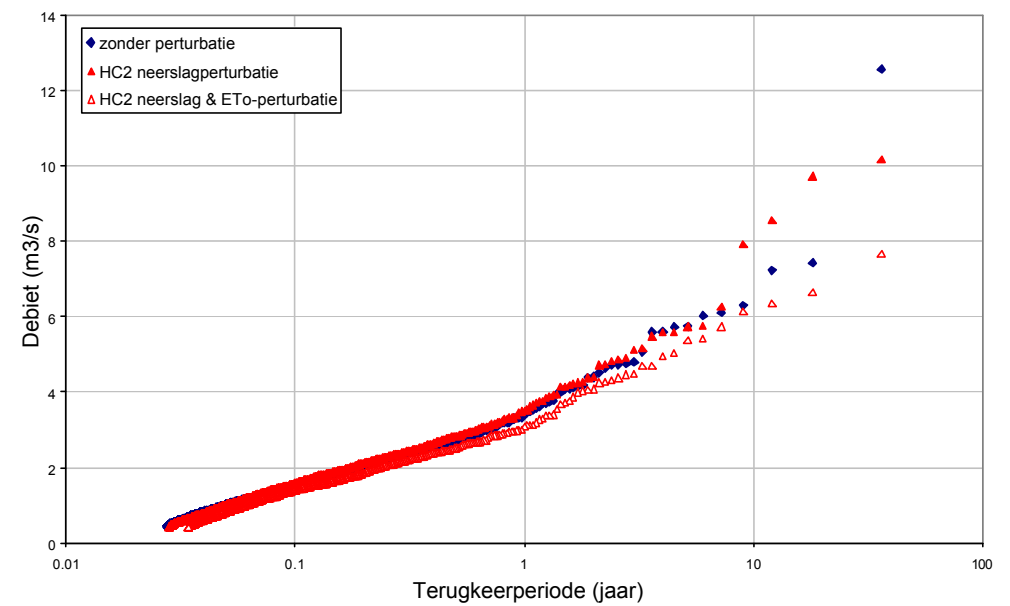
Willems, P., 2004b. "WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool", Afdeling
Hydraulica K.U.Leuven.

7 Appendix A: Hydrologische impact op uurlijkse piek- en laagwaterdebieten

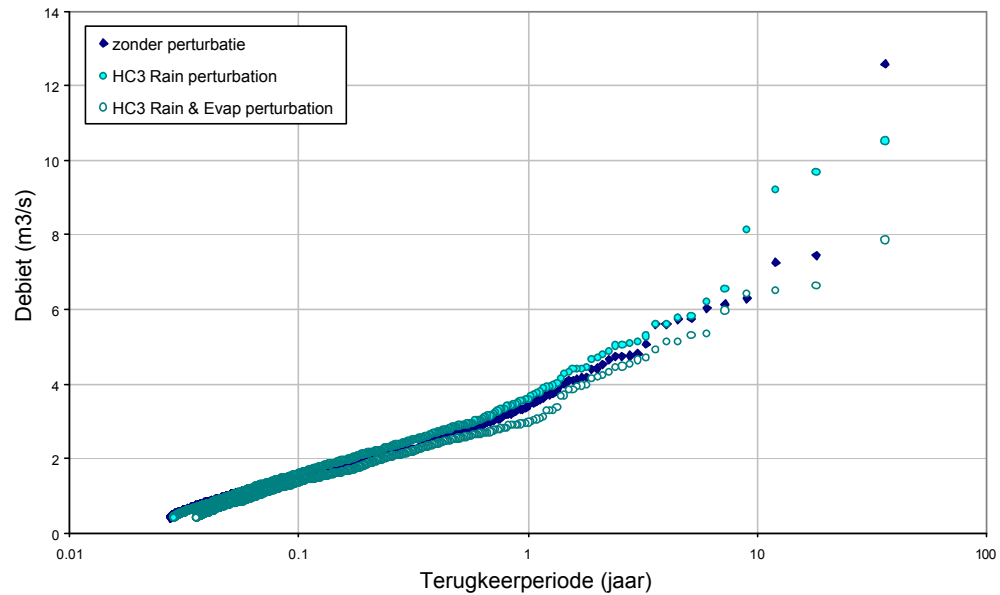
PRUDENCE HC1-klimaatmodel voor en na neerslag- en ETo-perturbaties



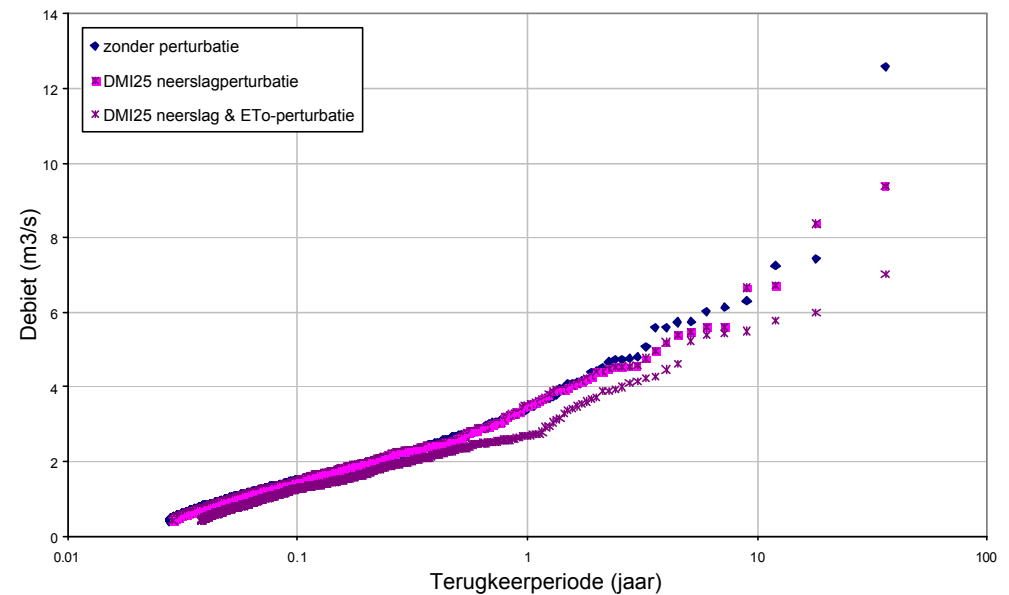
PRUDENCE HC2-klimaatmodel voor en na neerslag- en ETo-perturbaties



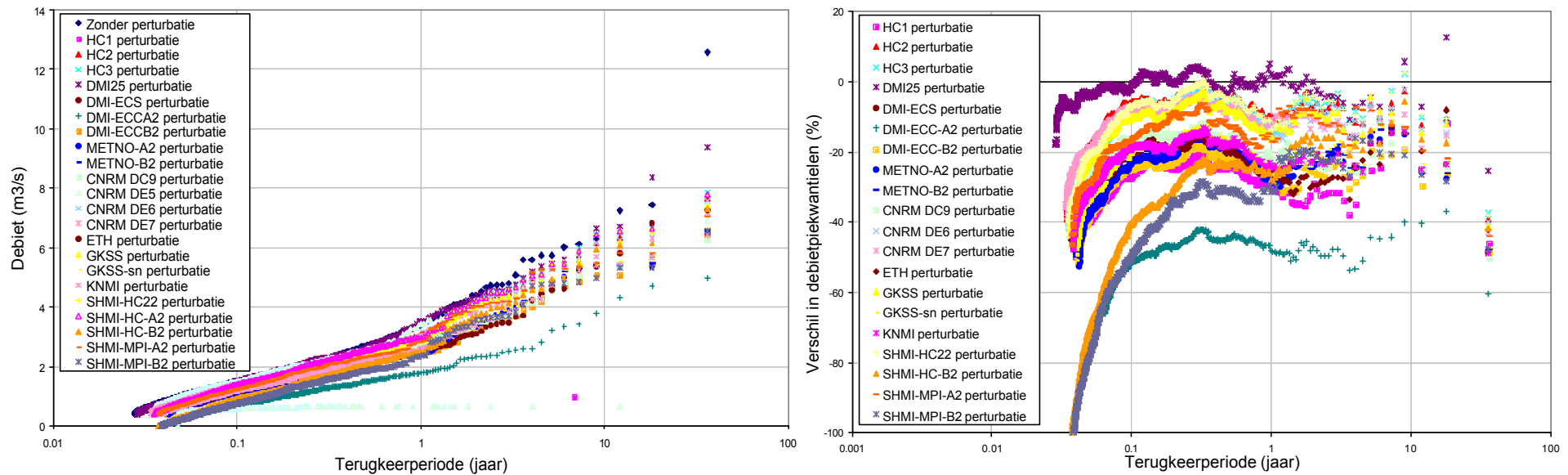
PRUDENCE HC3-klimaatmodel voor en na neerslag- en ETo-perturbaties



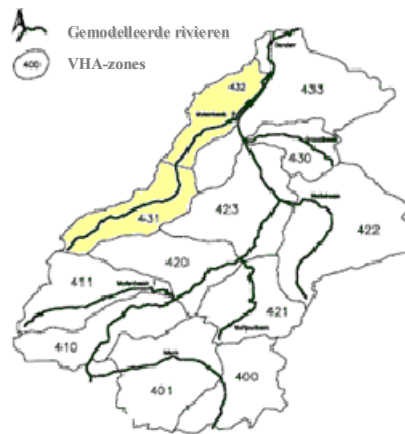
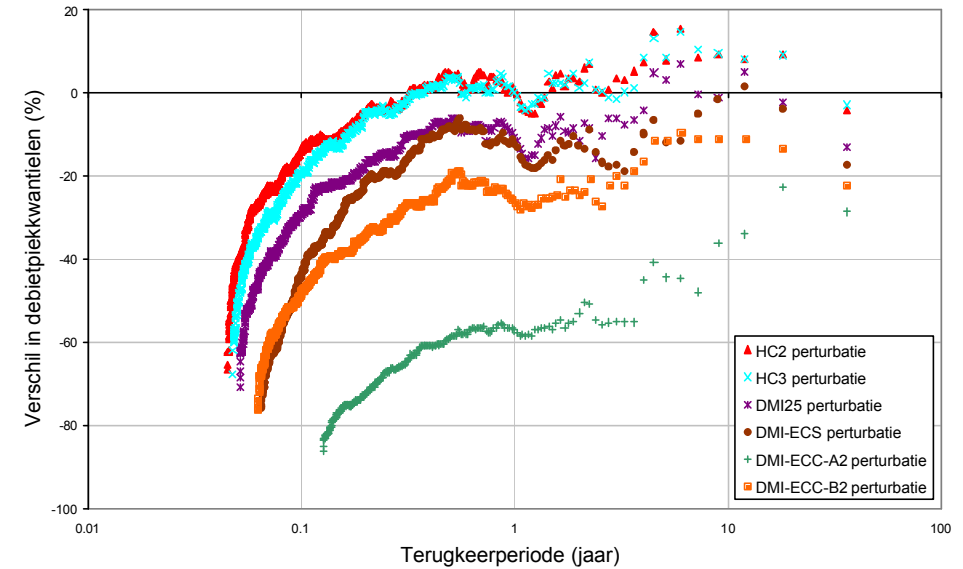
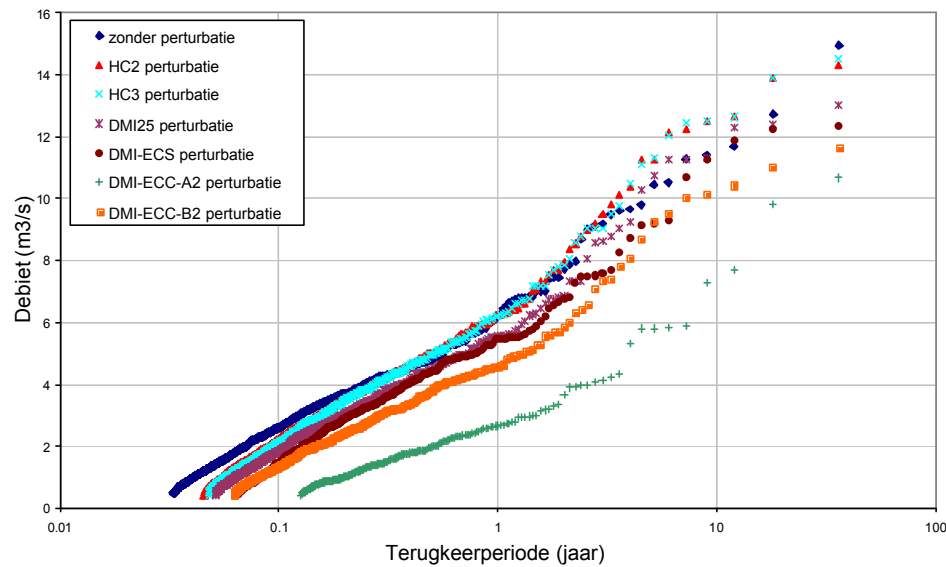
PRUDENCE DMI25-klimaatmodel voor en na neerslag- en ETo-perturbaties



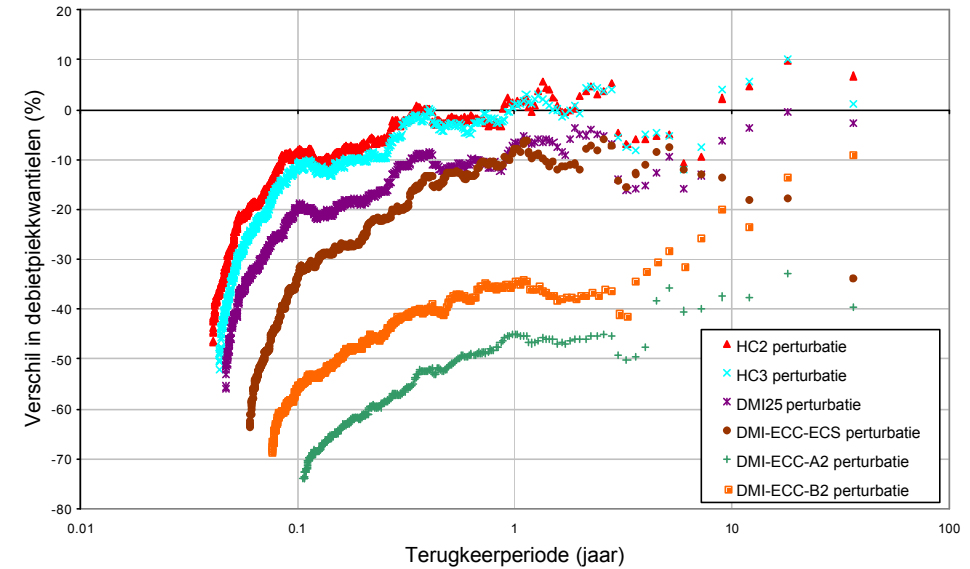
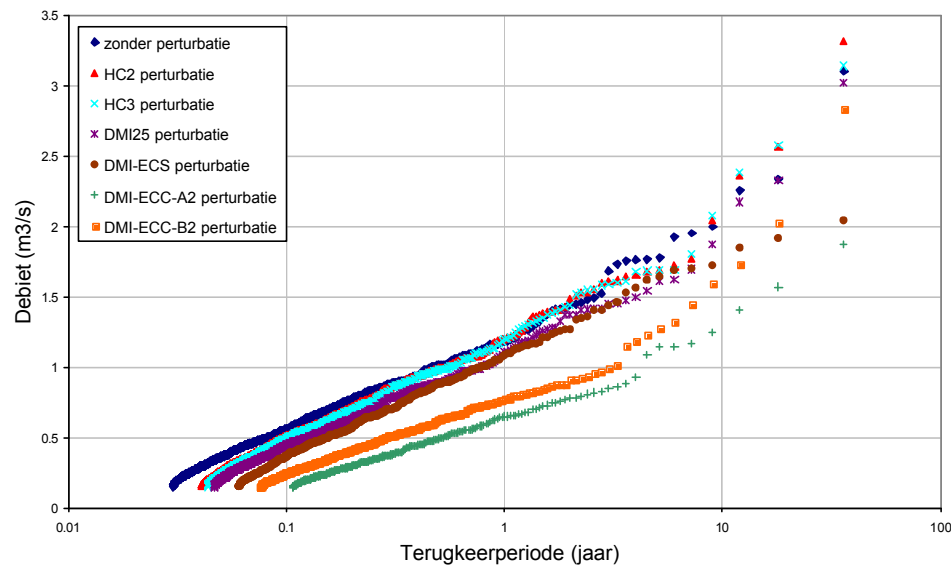
PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag-perturbaties: impact op uurlijkse piekdebieten



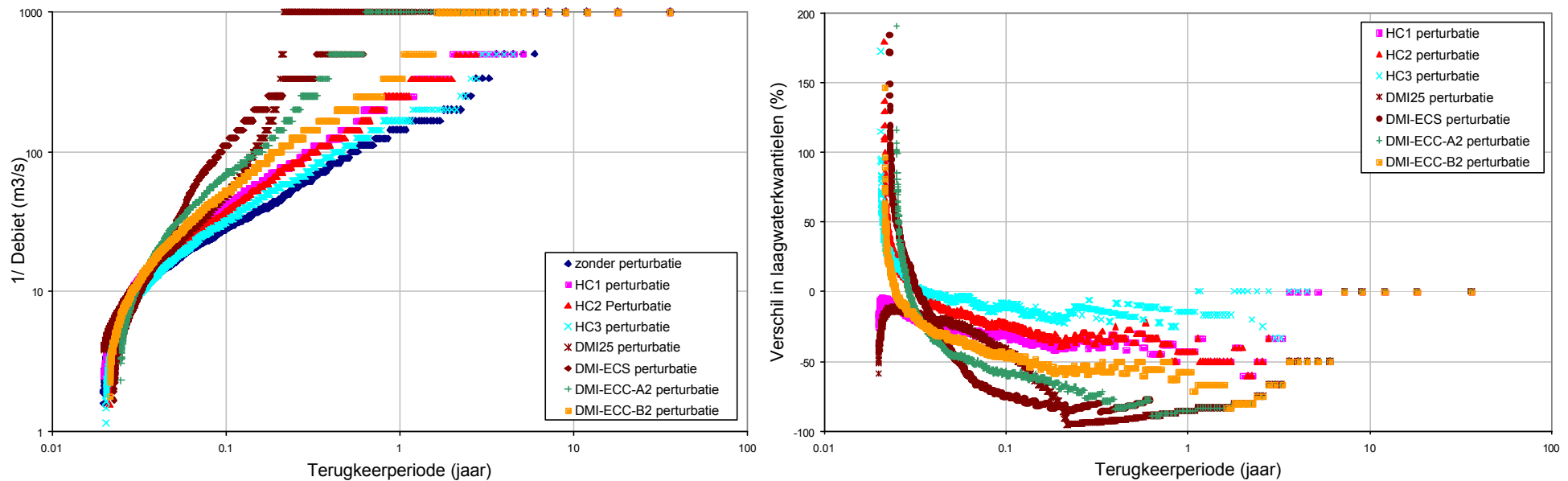
PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag- en ETo-perturbaties: impact op uurlijkse piekdebieten



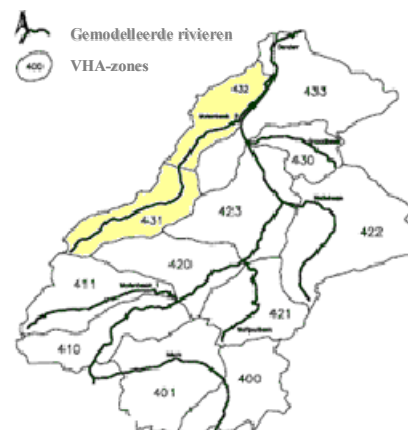
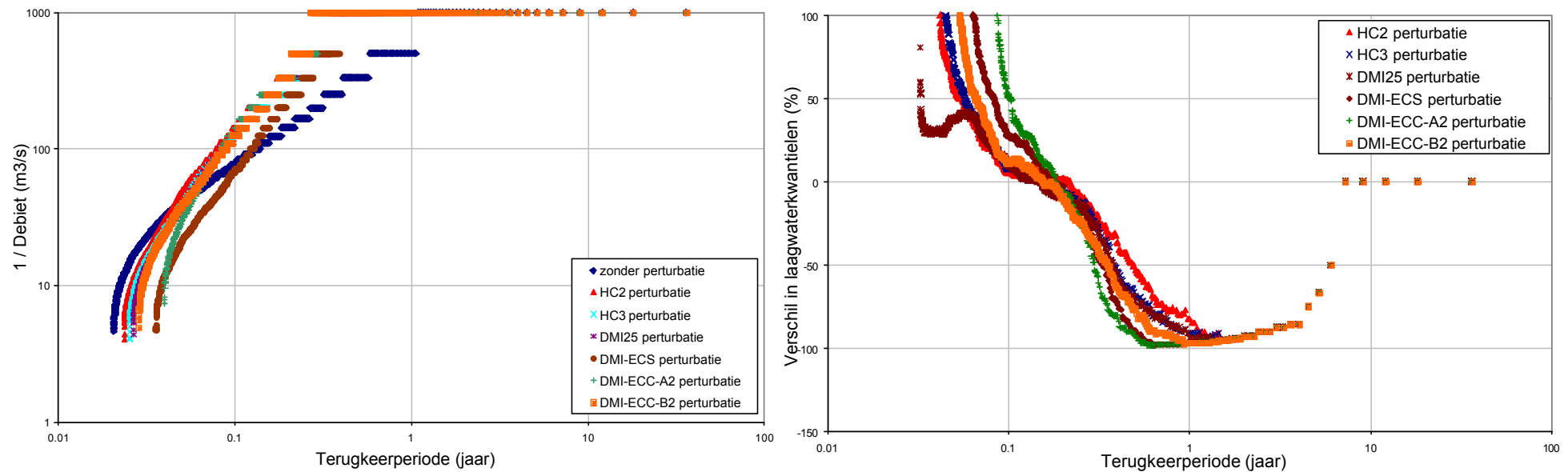
PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag- en ETo-perturbaties: impact op uurlijkse piekdebieten



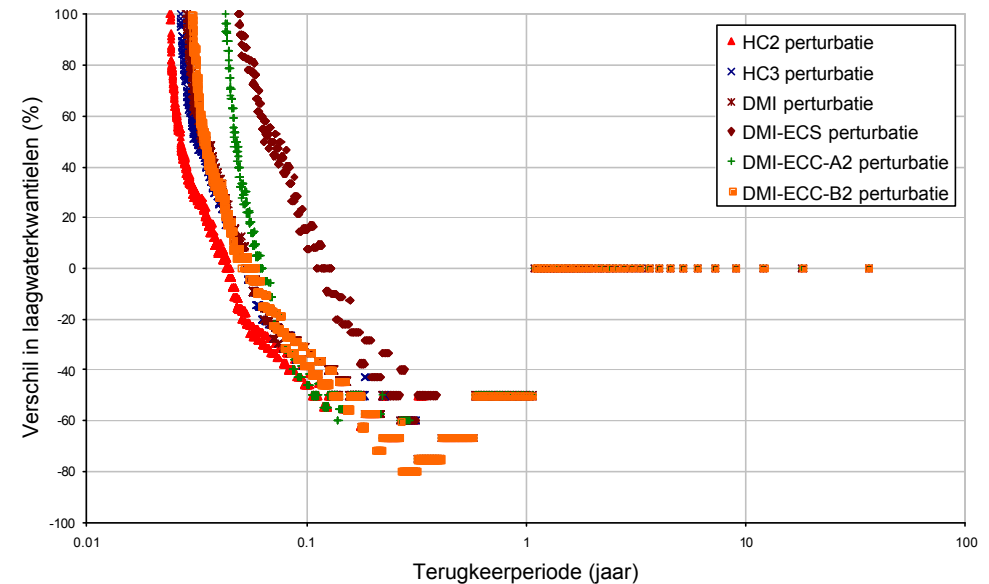
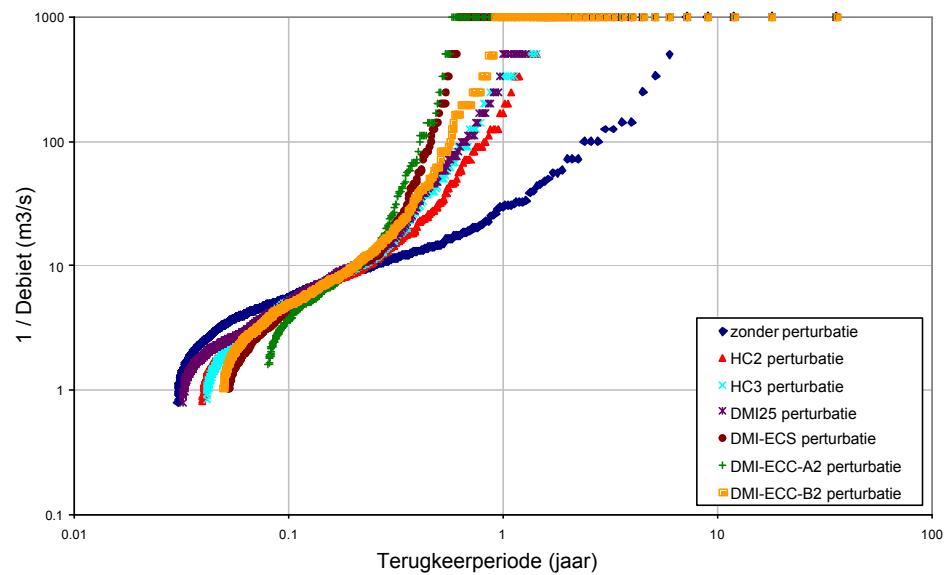
PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag- en ETo-perturbaties: impact op uurlijkse laagwaterdebieten



PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag en ETo-perturbaties: impact op uurlijkse laagwaterdebieten



PRUDENCE RCM-klimaatmodellen voor en na neerslag- en ETo-perturbaties: impact op uurlijkse laagwaterdebieten



8 Appendix B: Gemiddelde impact op hydrologische modelvariabelen



DENDERbekken
VHA-zone **410**
Opp.: 19.05 km²
Periode: 1967-2003 (uurlijks)

Percentage verschil in **VOLUME** voor de hydrologische variabelen in vergelijking met de controleperiode

Perturbatie in neerslag en ETo volgens klimaatsimulaties:

HC2
HC3
DMI25
DMI-ECC-ECS
DMI-ECC-A2
DMI-ECC-B2

Verschied totaal
neerslagafstromingsvolume

-14.19
-17.32
-23.18
-57.21
-32.13
-35.46

Oppervl.afstr.	Infiltratie	Percolatie	Grondw.berging	Oppervl.berging	Actuele evapotr.	Grondw. + hypod. afstr.
-14.08	5.23	-11.5	-8	-6.5	12.5	-15
-17.20	5.34	-14	-8	-8	13	-17
-25.53	6.24	-21	-7.5	-9	3.78	-23
-35.90	-7.00	-32.81	-5.91	-15.92	0.12	-35.68
-63.97	13.42	-54.88	-13.71	-22.85	24.81	-55.30
-35.55	12.29	-27.86	-12.20	-12.72	21.60	-31.43

DENDERbekken
VHA-zone **4312 (431+432)**
Opp.: 48 km²
Periode: 1967-2003 (uurlijks)



Percentage verschil in **VOLUME** voor de hydrologische variabelen in vergelijking met de controleperiode

Perturbatie in neerslag en ETo volgens klimaatsimulaties:

HC2
HC3
DMI25
DMI ECC-ECS
DMI ECC-A2
DMI ECC-B2

Verskil totaal
neerslagafstr.volume

-20.81
-25.19
-32.69
-46.15
-75.95
-46.62

Oppervl.afstr.	Infiltratie	Percolatie	Grondw.berging	Oppervl.berging	Actuele evapotr.	Grondw. + hypod. afstr.
-17.73	-0.08	-17.36	-7.22	-7.36	10.86	-21.29
-21.72	4.31	-20.89	-7.69	-9.28	11.14	-25.74
-32.12	5.29	-29.34	-6.74	-10.92	11.75	-32.12
-43.49	-7.70	-40.58	-8.23	-18.39	-2.45	-45.87
-81.75	9.35	-71.53	-32.71	-27.74	20.17	-74.99
-49.97	10.97	-40.82	-13.98	-14.81	19.27	-46.06

DENDERbekken
VHA-zone **433**
Opp.: 8 km²
Periode: 1967-2003 (uurlijks)



Percentage verschil in **VOLUME** voor de hydrologische variabelen in vergelijking met de controleperiode

Perturbatie in neerslag en ETo volgens klimaatsimulaties:

HC2
HC3
DMI25
DMI-ECS
DMI-ECC-A2
DMI-ECC-B2

Verskil totaal
neerslagafstr.volume

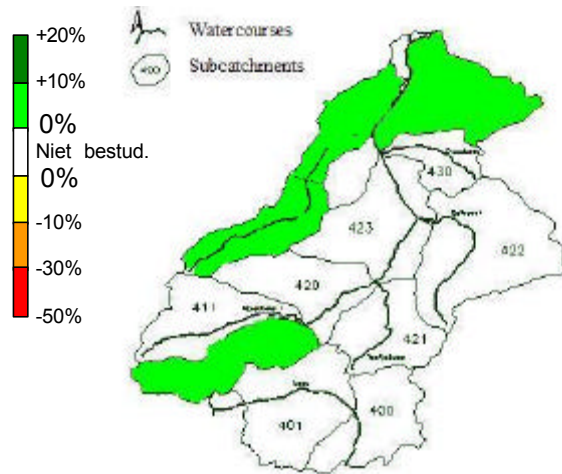
-20.64
-25.20
-32.48
-46.90
-74.67
-45.70

Oppervl.afstr.	Infiltratie	Percolatie	Grondw.berging	Oppervl.berging	Actuele evapotr.	Grondw. + hypod. afstr.
-18.83	4.63	-18.77	-9.18	-7.05	10.72	-21.04
-23.13	4.69	-22.92	-9.87	-8.85	11.00	-25.60
-31.50	5.52	-31.14	-9.04	-10.52	11.55	-32.69
-45.12	-7.90	-44.54	-10.75	-17.42	-2.39	-47.30
-74.44	9.31	-73.51	-19.22	-27.01	19.37	-74.72
-44.56	11.02	-43.61	-15.80	-14.50	18.70	-45.95

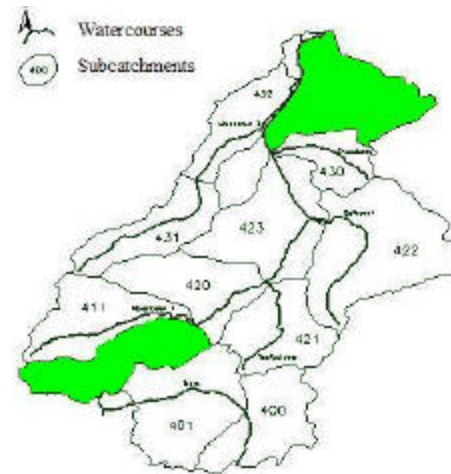
9 Appendix C: Grafische voorstelling ruimtelijke verschillen impact

Model: HC1

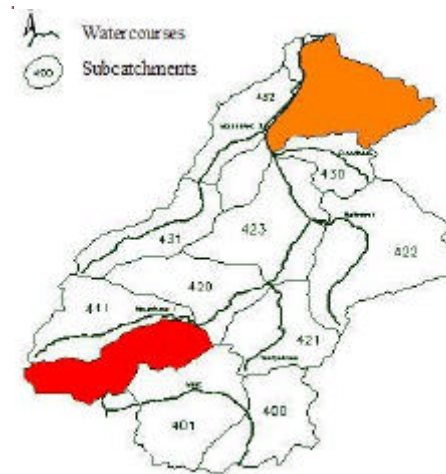
Evapotranspiratievolumes.



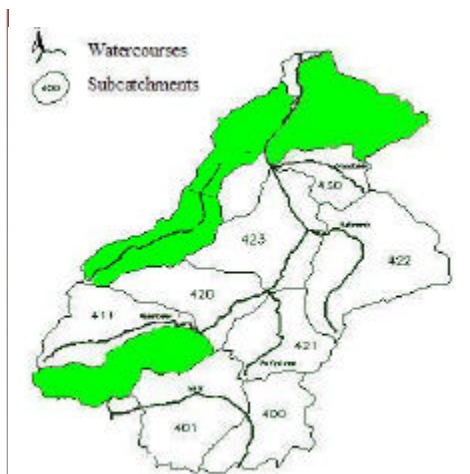
Infiltratievolumes



Oppervl.afstr. volumes

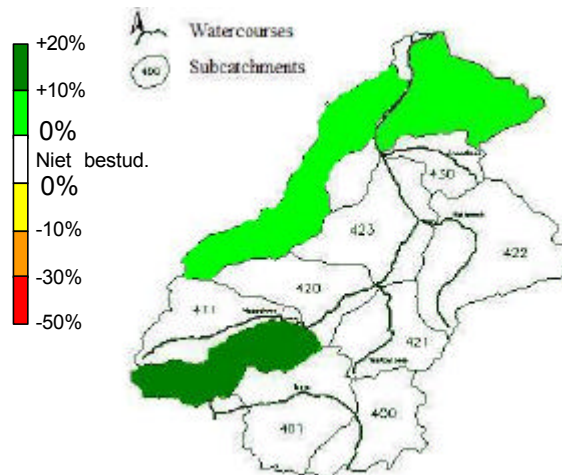


Debietpieken

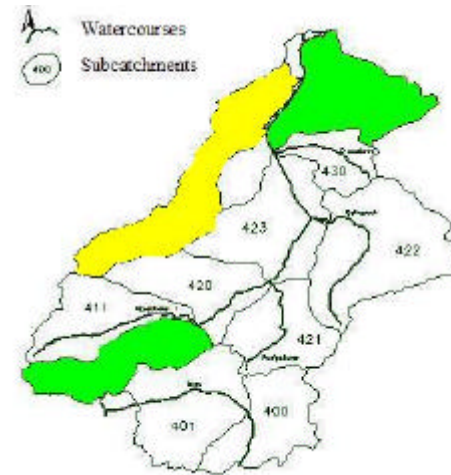


Model: HC2

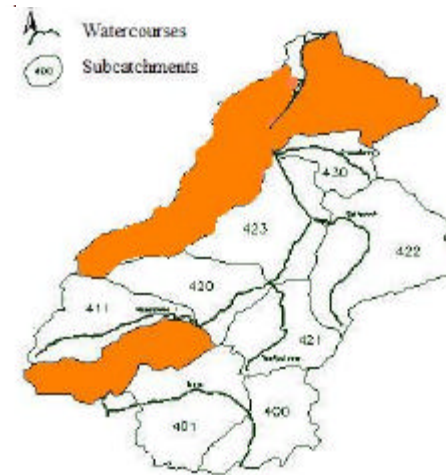
Evapotranspiratievolumes.



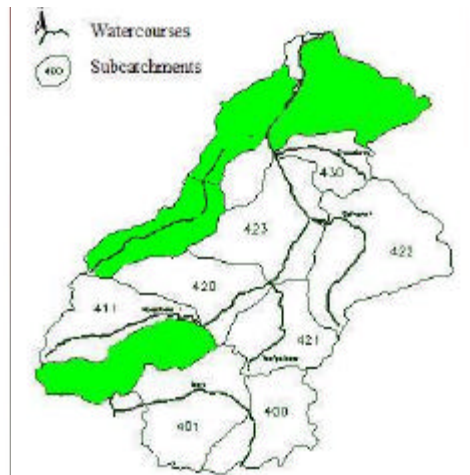
Infiltratievolumes



Oppervl.afstr. volumes

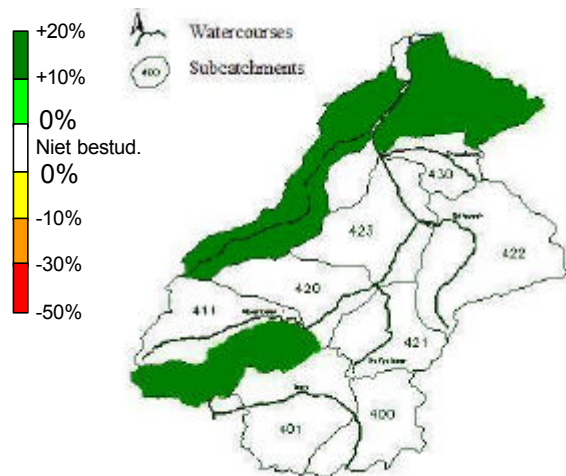


Debietpieken



Model: HC3

Evapotranspiratievolumes.



Infiltratievolumes



Oppervl.afstr. volumes

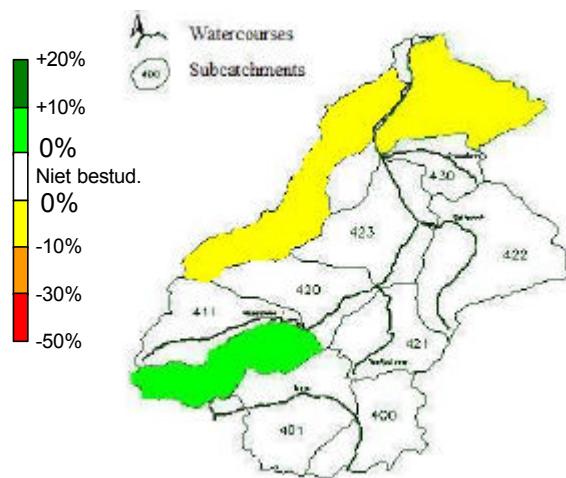


Debietpieken

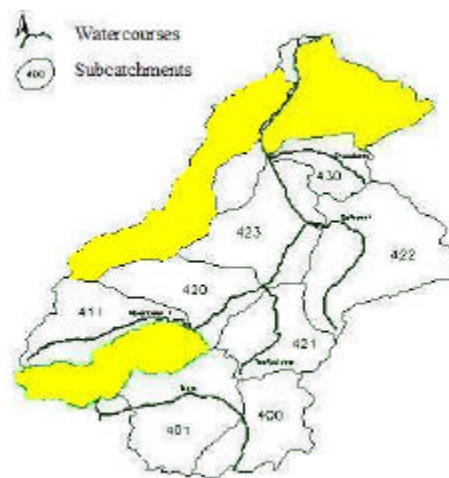


Model: METNO

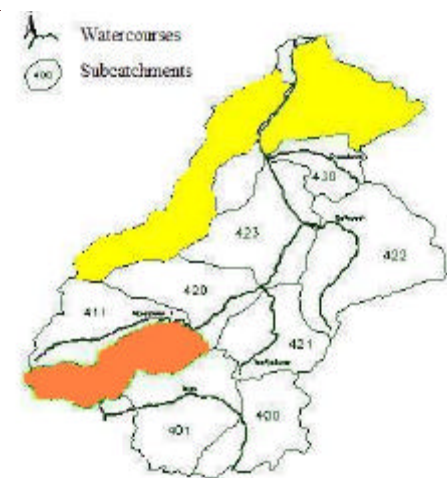
Evapotranspiratievolumes.



Infiltratievolumes



Oppervl.afstr. volumes

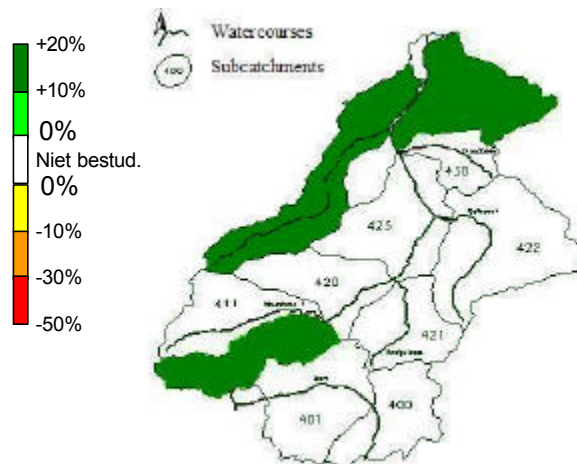


Debietpieken

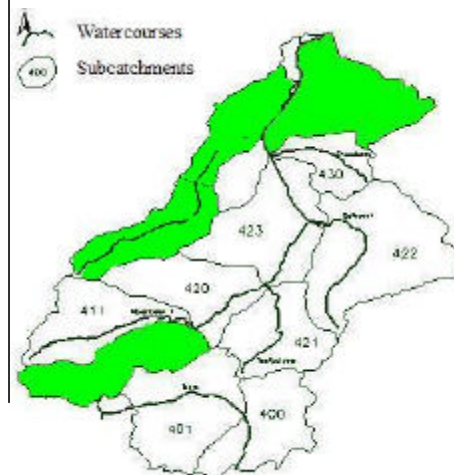


Model: DMI25

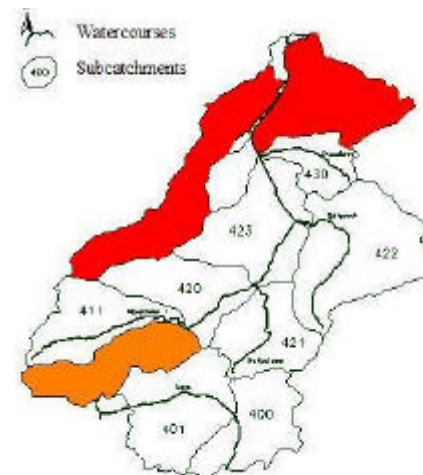
Evapotranspiratievolumes.



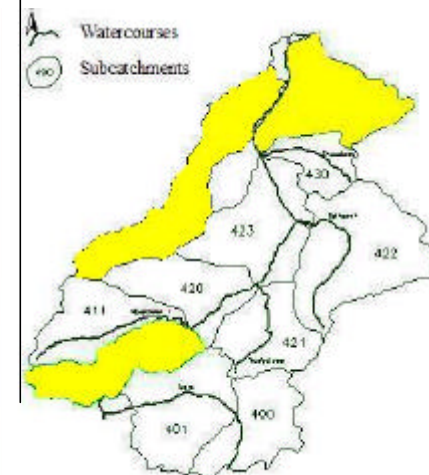
Infiltratievolumes



Oppervl.afstr. volumes

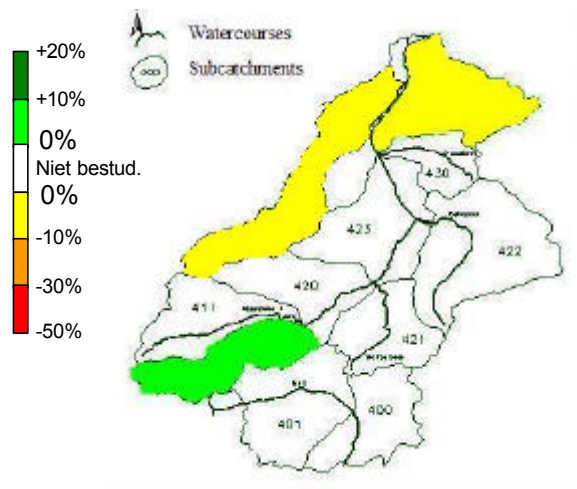


Debietpieken

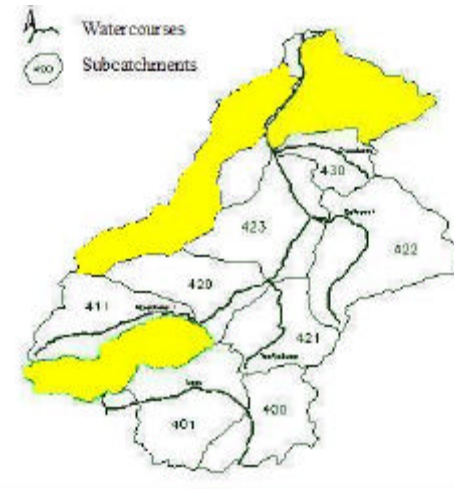


Model: DMI-ECS

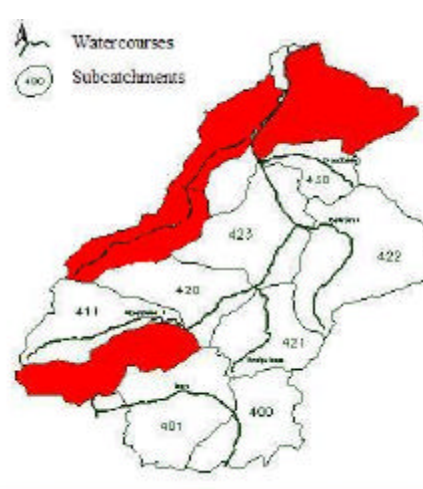
Evapotranspiratievolumes.



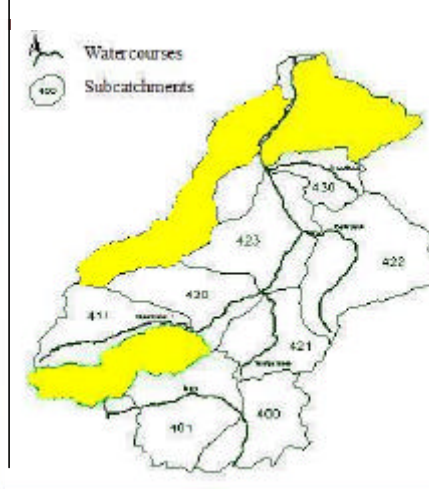
Infiltratievolumes



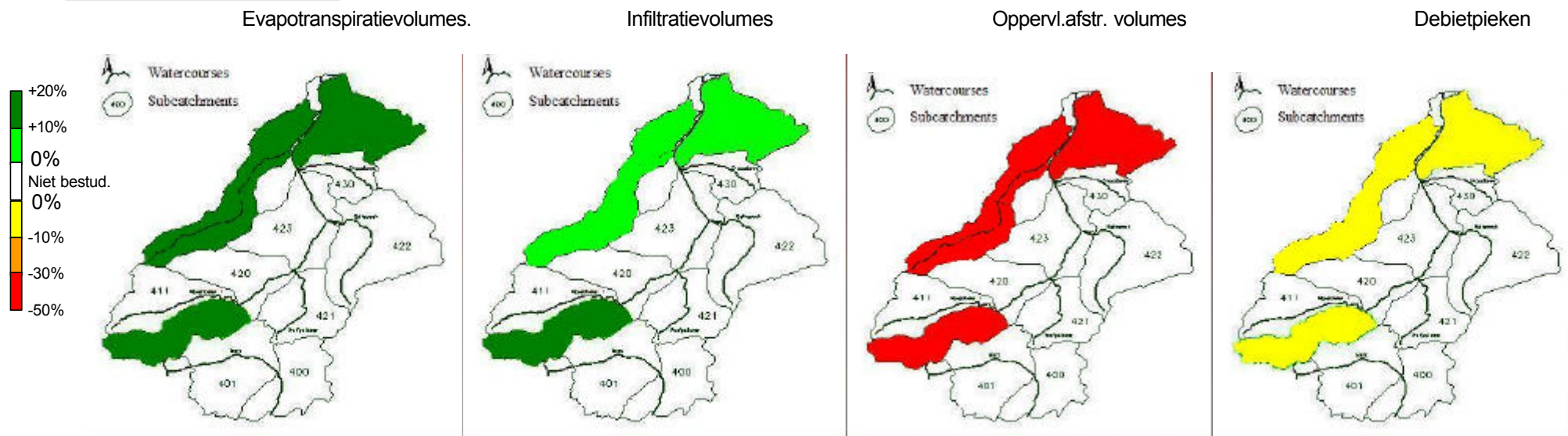
Oppervl.afstr. volumes



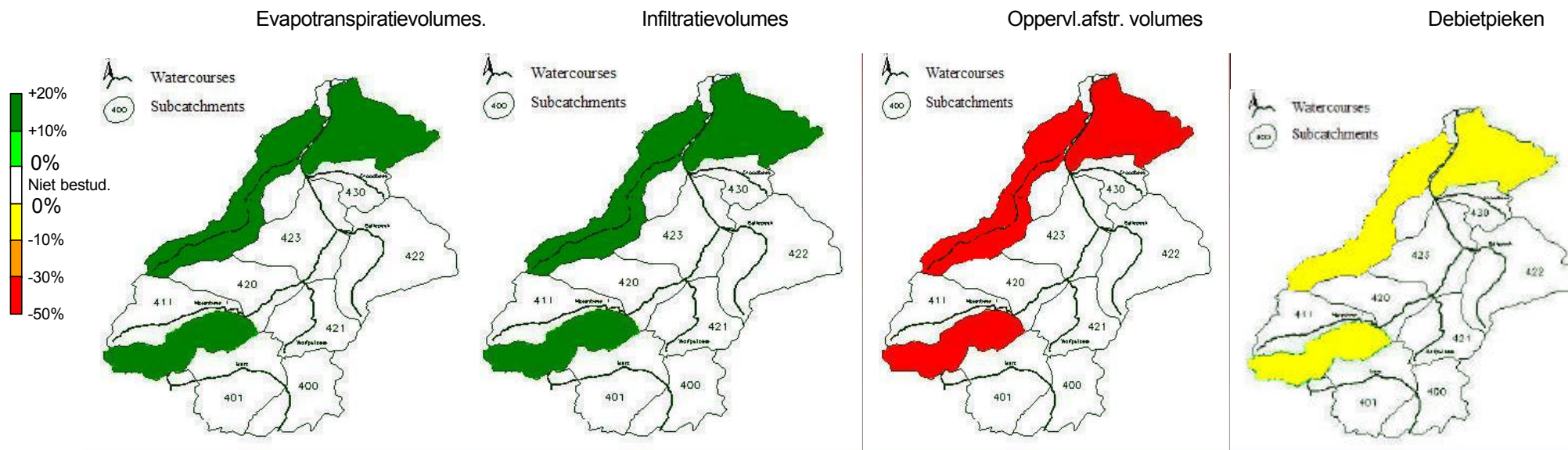
Debietpieken



Model: DMI-ECC-A2



Model: DMI-ECC-B2





Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115
B-2140 ANTWERPEN
tel. 32(0)3/224 60 35
fax 32(0)3/224 60 36
e-mail: flanders.hydraulics@mow.vlaanderen.be
watlab@mow.vlaanderen.be
<http://watlab.lin.vlaanderen.be>



Faculteit Ingenieurswetenschappen Dep. Burgerlijke Bouwkunde Afdeling Hydraulica

Kasteelpark Arenberg 40
B-3001 Heverlee
tel: +32.3.16.32.16.58
fax: +32.16.32.19.89
Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be
<http://www.kuleuven.be/hydr>

