

Impact van de klimaatverandering op watertekorten voor drinkwaterproductie in Vlaanderen

Bert Mulleman

Thesis voorgedragen tot het
behalen van de graad van Master
in de ingenieurswetenschappen:
bouwkunde

Promotor:

Prof. dr. ir. Patrick Willems

Assessoren:

Prof. dr. ir. Jean Berlamont
Ir. Dirk De Smet (VMW)

Begeleiders:

Ir. Thomas Vansteenkiste
Ir. Victor Ntegeka

© Copyright K.U.Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Met dit woord van dank wil ik graag een aantal mensen bedanken die me hebben begeleid en bijgestaan bij het realiseren van dit thesisonderzoek.

In de eerste plaats wil ik prof. dr. ir. Patrick Willems bedanken voor het aanreiken van dit onderwerp. Dat het onderzoek zich specifiek toespitst op een bestaand waterproductiecentrum maakt de studie concreet en boeiend.

De samenwerking met de Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening gaf mij de mogelijkheid een eerste contact te leggen met het bedrijfsleven. Graag bedank ik de mensen van de VMW en in het bijzonder ir. Dirk De Smet voor hun hulp en begeleiding. De vergadermomenten en presentatie in het hoofdkantoor gaven mij de mogelijkheid mijn communicatievaardigheden verder te ontwikkelen. De rondleiding op het productiecentrum en langs het kanaal was een aangenaam bezoek en verschaft mij inzicht in het studiegebied.

Bijzondere dank wil ik richten tot ir. Thomas Vansteenkiste. Bij hem kon ik wekelijks terecht voor het bespreken van mijn resultaten en vorderingen. Ook de hulp en de informatie die hij via het Waterbouwkundig Laboratorium kon aanreiken, betekende een grote meerwaarde voor het onderzoek. Ik wil hem speciaal bedanken voor het nalezen van mijn tekst in de laatste weken.

Mijn ouders bedank ik voor het mogelijk maken van mijn studies. Ook dank ik hen voor de steun die ze mij gaven op de moeilijkere momenten. Verder wens ik mijn familie en vrienden te bedanken voor hun interesse en steun tijdens mijn studie.

Met het schrijven hoop ik een bijdrage te leveren aan het onderzoek over een mogelijke impact van klimaatwijziging voor België.

Bert Mulleman

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	iv
Abstract	v
Lijst van figuren	vi
Lijst van tabellen	ix
Lijst van afkortingen	x
1 Inleiding	1
2 Klimaatverandering en -impact in Vlaanderen: een overzicht	3
2.1 Wat is klimaatverandering?	3
2.2 Klimaatsysteem en -modellering	4
2.3 Klimaatscenario's voor België	6
2.4 Hydrologische impact voor België	9
2.5 Besluit	10
3 Doel van het onderzoek	11
3.1 Situering problematiek/thesisonderzoek	11
3.2 Studiegebied	12
3.3 WPC <i>De Gavers</i>	15
3.4 Samenvatting thesisonderzoek 2009	16
3.5 Onderzoeksdoel	18
4 Werkwijze en methodes	21
4.1 Werkwijze	21
4.2 Gebruikte algoritmen	25
4.3 Besluit	32
5 Hydrologische modellering	33
5.1 Databeschikbaarheid	33
5.2 Opbouw hydrologisch model	48
5.3 Modelresultaten	61
5.4 Extreme waarde analyse	68
5.5 Besluit	72
6 Hydrodynamische modellering	73
6.1 Databeschikbaarheid	73

6.2	Analyse hydrodynamisch model	76
6.3	Besluit	77
7	Scenario-analyse	79
7.1	Impact verhoogde oppomping/productieverhoging	79
7.2	Impact klimaatverandering	82
7.3	Besluit	89
8	Conclusie en aanbevelingen	91
A	Hoogwaterafvoer Bossuit	97
A.1	Horizont 2030	98
A.2	Horizont 2060	99
A.3	Horizont 2100	100
	Bibliografie	101

Samenvatting

Onderzoek naar de impact van klimaatverandering voor België op het hydrologisch systeem geeft aan dat tijdens zomermaanden de laagwatertoestand op de Vlaamse rivieren sterk zou kunnen dalen tegen 2100. Watermaatschappijen die steeds meer oppervlaktewinning toepassen voor de productie van drinkwater, moeten steeds kunnen beschikken over een minimaal debiet op deze rivieren en kanalen.

In dit kader werd voor een Vlaams waterproductiecentrum (WPC) een studie opgestart in 2009 in samenwerking met de Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening. Het WPC *de Gavers*, dat gelegen is nabij Kortrijk in West-Vlaanderen, wint water uit het kanaal Bossuit-Kortrijk. Dit kanaal wordt gevoed met water uit de Bovenschelde. In 2009 bleek in een eerdere studie dat onnauwkeurige modellering van de neerslagafstroom in het bekken van de Bovenschelde in Noord-Frankrijk niet toeliet scherpe conclusies over laagwaterafvoer te maken.

In dit thesisonderzoek wordt een nieuw hydrologisch model voor dit bekken opgesteld. Aan de hand van dit model wordt de klimaatverandering voor België voor drie termijnen doorgerekend en de laagwaterimpact op de Bovenschelde bepaald. De termijnen zijn 2030, 2060 en 2100. Daarnaast wordt de impact van een geplande productieverhoging door het WPC in rekening genomen.

Uit de impactanalyse blijkt dat onder de huidige omstandigheden geen problemen optreden met de waterbevoorrading. Ook bij productieverhoging kan steeds voldoende water geleverd worden door de Bovenschelde. Klimaatverandering daarentegen laat een significante daling van de laagwaterdebieten zien. Door deze daling zal, op frequente basis, de productievraag het debiet op de Bovenschelde overschrijden en kunnen mogelijk watertekorten optreden voor de bevoorrading van het kanaal. In het onderzoek werd niet onderzocht of deze tekorten effectief zullen doorwerken doorheen het kanaal tot aan het WPC. Bovendien is er een grote onzekerheid over de modelresultaten. Toch kan besloten worden dat klimaatverandering een uitgesproken daling van de laagwaterafvoeren op de Bovenschelde veroorzaakt, zodat in de toekomst moet rekening gehouden worden met het frequenter voorkomen van laagwaterproblemen.

Abstract

Study on the impact of climate change on the hydrological system of Belgium shows a strong decrease in low flows on Flemish rivers. On the other hand, for the preservation of the groundwater levels, Flemish water companies are producing more and more drinking water out of these rivers. As a consequence, the question arises if the demand of water will be higher than the future low flows in dry summer months.

To investigate this matter, a project was set up in 2009 in cooperation with the Flemish Water Board (VMW), to investigate possible water shortage for the production facility centre *the Gavers* near Courtrai in West-Flanders. This production facility uses water out of the nearby canal Bossuit-Courtrai. The canal on its turn draws water from the Upper Scheldt. The results of this study show the need of a more accurate hydrological model to investigate low flows in dry periods.

The research goal of this masterthesis was to set up this new hydrological model of the rainfall runoff in the upstream basin of the Upper Scheldt in the North of France, and to investigate the change in low flows due to climate change in Belgium. This change was studied on the medium (2030 and 2060) and on the long terms (2100). The effect of climate change was combined with an increase of production volumes at *the Gavers*.

Although the increase in production volumes increases the demand of water, the impact was small compared to the strong decrease of low flows due to climate change. The uncertainty of the models was not neglectible, still they all show a significant decrease in low flows. The water demand will be frequently higher in the future than the low flows on the Upper Scheldt. Future study has to be done to investigate whether this shortage on the canal will cause water shortage for the drinking water production at the facility *the Gavers*.

Lijst van figuren

2.1	GCM	5
2.2	Neerschalen	5
2.3	Gemiddelde jaarlijkse temperatuurstijging	6
2.4	Perturbatiefactoren voor extreme neerslag in de winter	8
2.5	Opeenvolgende stappen in de <i>CCI-HYDR</i> Perturbation Tool	9
3.1	Waterwegen in Noord-Frankrijk en Vlaanderen	13
3.2	Ligging van de Bovenschelde, het kanaal en het WPC	14
3.3	Lengteprofiel Kanaal Bossuit-Kortrijk	15
4.1	Stappen in de waterloopmodellering en de klimaatimpactstudie	22
4.2	Overzicht opstellen hydrologisch model	23
4.3	Conceptuele voorstelling neerslagafstroming	27
4.4	Schematisch overzicht NAM modelstructuur	30
5.1	Oorspronkelijke meetreeksen	34
5.2	Vergelijking tussen de debietmeting van Bossuit en de verschoven en herschaalde Aspermeting op dagelijkse basis	35
5.3	Opgemeten debietreeks van Bossuit	37
5.4	Detailweergave van droge periodes in de debietreeks van Bossuit	39
5.5	Detailweergave van natte periodes in de debietreeks van Bossuit	40
5.6	Ligging pluviometers	43
5.7	Neerslagreeksen MeteoFrance	43
5.8	Thiessenverdelingen	44
5.9	Controle van de drie neerslagreeksen van MeteoFrance voor bekken Bossuit	45
5.10	Vergelijking tussen de oorspronkelijke en uitgebreide Thiessenneerslagreeks voor bekken Bossuit	45
5.11	Jaarlijkse ETo vergelijking tussen Vlissingen en Melle	47
5.12	Vergelijking ETo-reeksen op dagelijkse basis voor twee korte periodes	47
5.13	Beschikbare en aangevulde data	48
5.14	Deelstroom filtering - Grondwaterstroming	49
5.15	Deelstroom filtering - Hypodermische stroming	50
5.16	Deelstroom filtering - Resultaat	50
5.17	POT selectie	51
5.18	Invloed begincondities	52

5.19	Invloed geëxtrapoleerde (gemiddelde) ETo-waarden	53
5.20	Cumulatieve debiet beschikbare NAM-model	53
5.21	Grondwaterstroming	55
5.22	Hypodermische stroming	55
5.23	Oppervlakteaftstroming	55
5.24	Deelstromen	55
5.25	Minimale debieten	56
5.26	Maximale debieten	56
5.27	Vergelijking extreme waarden van de gesimuleerde met de geobserveerde hoogwaterafvoer	56
5.28	Fractie die bijdraagt tot berging aan het oppervlak	58
5.29	Relatieve grondvochtigheid	58
5.30	Fractie tot oppervlakteaftstroming - verzadiging bodem.	59
5.31	Fractie tot oppervlakteaftstroming - recente buien	60
5.32	Oppervlakteaftstroming - scatterplot	60
5.33	Debieten conceptuele modellen voor een periode van 2003 tot en met 2006	62
5.34	Cumulatieve debiet van de verschillende conceptuele modellen	63
5.35	Scatterplot laagwaterafvoer	64
5.36	Voorkomen laagwaterafvoer voor de kalibratieperiode	64
5.37	Scatterplot hoogwaterafvoer	65
5.38	Voorkomen hoogwaterafvoer voor de kalibratieperiode	65
5.39	Vershil geobserveerde extreme waarden van laagwaterafvoer volgens Bossuit- en verschoven Aspermeting	67
5.40	Vershil geobserveerde extreme waarden van hoogwaterafvoer volgens Bossuit- en verschoven Aspermeting	67
5.41	Extreme laagwaterverdeling (1976-2007)	69
5.42	Exponentiële Q-Q plot	71
5.43	Helling exp. Q-Q plot	71
5.44	Pareto Q-Q plot	71
5.45	Helling UH plot	71
6.1	Maandelijkse variatie op het netto debiet op het kanaal voor 2005 tot 2009.	75
6.2	Schematisch opstelling fysisch model	76
7.1	Invloed productieverhoging op laagwaterafvoeren Bovenschelde	81
7.2	Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2030	83
7.3	Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2030	83
7.4	Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2060 - VHM-model	85
7.5	Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2060 - VHM-model	85
7.6	Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2060 - NAM-model	86
7.7	Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2060 - NAM-model	86
7.8	Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2100	88
7.9	Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2100	88
A.1	Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2030	98

LIJST VAN FIGUREN

A.2	Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2030	98
A.3	Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2060	99
A.4	Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2060	99
A.5	Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2100	100
A.6	Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2100	100

Lijst van tabellen

2.1	Gemiddelde verandering van neerslag en verdamping per scenario	9
5.1	Lambert-coördinaten, naam station, procentuele en absolute Thiessenbijdrages van de stations van MeteoFrance (M) en Sathy (S) . .	42
5.2	Analyse Sathy neerslagreeksen	42
5.3	Thiessenfactoren voor 2 stations	44
5.4	Thiessenfactoren voor 3 stations	44
5.5	Parameters opdeling in deelstromen	49
5.6	POT selectie waarden	51
5.7	Modelparameters voor het oorspronkelijke NAM-model	52
5.8	Modelparameters voor NAM-model	54
5.9	VHM-modelparameter na kalibratie	57
5.10	Overzicht RMSE	66
5.11	Overzicht Nash-Sutcliffe efficiëntie	66
5.12	Periodes van laagwaterafvoer	70
7.1	Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2030	82
7.2	Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2060	84
7.3	Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2100	87
A.1	Gemiddeld percentage van variatie in hoogwaterafvoer	97

Lijst van afkortingen

<i>ARA</i>	Fourth Assessment Report
<i>ETo</i>	Potentiële evapotranspiratie
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>MIKE11</i>	Hydrodynamisch modelleringsysteem ontwikkeld door DHI
<i>NAM</i>	Hydrologisch modelleringsysteem ontwikkeld door DHI
<i>POT</i>	Peak-over-threshold
<i>RMSE</i>	Root Mean Square Error
<i>SRES</i>	Special Report for Emission Scenarios
<i>VHM</i>	Hydrologisch modelleringsysteem ontwikkeld door Katholieke Universiteit Leuven
<i>VMW</i>	Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening
<i>WetSpro</i>	Water Engineering Time Series PROcessing tool
<i>WL</i>	Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid

Hoofdstuk 1

Inleiding

Klimaatveranderingstudies voor België tonen een afname van de totale neerslaghoeveelheden en een stijging van de verdamping in de zomermaanden aan[1]. Andere studies, die de hydrologische afvoer van onze Vlaamse rivieren onderzoeken, laten voor deze zomermaanden een sterke daling van het rivierdebiet zien[2],[3]. Periodes van lage debieten op rivieren kunnen problemen veroorzaken voor industriële en andere maatschappelijke processen die afhankelijk zijn van een minimaal debiet. Denk hierbij aan scheepvaart of koelwater voor kritieke industriële processen zoals kerncentrales en zo ook aan de drinkwatersector.

De steeds stijgende behoefte aan zuiver drinkwater en de maatschappelijke druk tegen het uitputten van de grondwatertafel heeft drinkwaterproductiemaatschappijen ertoe aangezet op zoek te gaan naar alternatieven voor grondwaterwinning[4]. Het gebruik van oppervlaktewater is een mogelijk alternatief voor grondwaterwinning. Bij deze manier van waterwinning is men echter sterk afhankelijk van de hydrologische afvoer op rivieren. Onderzocht dient te worden of uit deze oppervlaktewingebieden tijdens periodes van langdurige droogte steeds voldoende water kan gewonnen worden en of de kwaliteit van dit water gewaarborgd blijft.

In het kader van deze drinkwaterproblematiek onderzoekt de thesis de waterkwantiteitsvraag voor een specifiek oppervlaktewaterwingebied in Vlaanderen. Het waterproductiecentrum *de Gavers* vormt het onderwerp van deze studie. Het productiecentrum is gelegen in Harelbeke, nabij Kortrijk in de provincie West-Vlaanderen. De productie van drinkwater wordt beheerd door de *Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening* (VMW). Water dat uit het nabijgelegen kanaal *Bossuit-Kortrijk* wordt gepompt, wordt er tot drinkbaar water gezuiverd. Een pompstation nabij Bossuit voedt het kanaal met water uit de Bovenschelde. Het afvoerregime op de Bovenschelde zal bepalend zijn voor de beschikbaarheid van voldoende water voor de productie van drinkwater. De studie onderzoekt in welke mate voldoende water beschikbaar blijft in het licht van klimaatverandering.

Voorliggende thesis bouwt verder op onderzoeksresultaten uit zijn voorloper in 2009[5]. Tijdens dat onderzoek werd door middel van een hydrologisch-hydrodynamisch model van de Bovenschelde[6], ontwikkeld door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) van de Vlaamse Overheid, de waterkwantiteitsimpact doorerekend. Daarnaast werd de aanzet gegeven tot een waterkwaliteitsmodellering. Resultaten en bevindingen uit dit onderzoek worden in hoofdstuk 3 besproken. In dit hoofdstuk wordt het studiegebied en het WPC *de Gavers* overlopen.

De laagwatertoestand werd door het oorspronkelijk hydrologisch model onnauwkeurig voorgesteld, zodat in 2009 geen uitspraak gedaan kon worden over het voorkomen van laagwaterproblemen onder klimaatverandering. Daarom zal in deze studie de hydrologische afvoer van het bekken van de Bovenschelde in Noord-Frankrijk bestudeerd worden. Een nieuw hydrologisch model wordt opgesteld in hoofdstuk 5.

Naast dit hydrologisch onderdeel beschrijft hoofdstuk 6 enkele aanpassingen aan het hydrodynamische model. Hierin wordt aandacht besteed aan het debiet op het kanaal Bossuit-Kortrijk.

De eigenlijke impactanalyse wordt aangevat in hoofdstuk 7. Drie scenario's, bepaald voor België, worden doorerekend. Dit gebeurt op middellange - tegen 2030 en 2060 - tot lange termijn - tegen 2100. Rekening wordt gehouden met een geplande productieverhoging door de watermaatschappij. Hieruit kunnen conclusies getrokken worden over het voorkomen van periodes van mogelijk watertekort op de Bovenschelde.

De drie klimaatscenario's zijn het resultaat van wetenschappelijk klimaatonderzoek toegepast op Vlaanderen. Om te verduidelijken wat de inhoud van deze scenario's is, geeft hoofdstuk 2 een overzicht van de scenario's en wat de impact van klimaatverandering op Vlaanderen is.

De werkwijze en de methodes gebruikt in dit onderzoek worden toegelicht in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 8 - het laatste hoofdstuk - worden de conclusies uit dit onderzoek weergegeven. Deze besluiten belichten zowel aspecten van de hydrologische modellering als de impact van klimaatverandering op het debiet op de Bovenschelde. Uit de studie zijn enkele punten naar voor gekomen die verder onderzoek verdienen. Deze suggesties worden in dit afsluitend hoofdstuk overlopen.

Hoofdstuk 2

Klimaatverandering en -impact in Vlaanderen: een overzicht

Voor België zijn de toekomstvisies omtrent het klimaat voorgesteld in drie mogelijke impactscenario's. De scenario's laten toe de huidige neerslag en evaporatie (verdamping) te wijzigen naar een tijdhorizont tot 2100. In dit hoofdstuk worden deze scenario's uitgelegd en wordt het onderzoek naar klimaatverandering voor België toegelicht.

2.1 Wat is klimaatverandering?

Het UNFCCC¹ geeft volgende definitie aan klimaatverandering:

Een verandering van het klimaat, dewelke direct of indirect door menselijke activiteit veroorzaakt wordt, en die de samenstelling van de globale atmosfeer verandert. De verandering komt bovenop de natuurlijke variabiliteit van het klimaat[7].

Het klimaat op aarde is geen statisch gegeven, maar wordt gekenmerkt door periodieke veranderingen. Deze veranderingen noemt men de *variabiliteit* van het klimaat en ze spelen zich af op een tijdschaal van enkele decenia. Klimaatverandering voltrekt zich op een veel langere tijdschaal, tot enkele eeuwen, en komt bovenop deze natuurlijke variabiliteit.

Klimaatverandering kan nu reeds opgemeten worden. Sinds het einde van de 19de eeuw is de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak met 0.6 °C gestegen. Deze stijging is groter dan de temperatuurstijging over de laatste 10 000 jaar en kan

¹UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change.

Het UNFCCC is een klimaatverdrag opgesteld tijdens de *Earth Summit* van Rio De Janeiro en trad in 1994 in werking. Binnen het verdrag werd ernaar gestreefd een kader op te stellen waarbinnen de broeikasgas-uitstoot teruggedrongen kan worden en zo de gevolgen van de klimaatverandering beperkt kunnen worden. Bovendien gaf het verdrag de aanzet tot het Kyoto-protocol dat in 1997 opgesteld werd.

bijgevolg niet verklaard worden door de variabiliteit van het klimaat[7].

Door de studie van boorkernen uit ijslagen kon een verband tussen de temperatuur en het gehalte aan CO_2 in de atmosfeer en het bijhorende klimaat afgeleid worden (e.g. Vostok ice core, Barnola et al. 2003). Het begin van de industriële revolutie zorgt bovendien voor een continue stijging van het CO_2 -gehalte in de atmosfeer[7]. Men kan dus stellen dat de stijgende emissie van CO_2 de klimaatverandering veroorzaakt.

Deze klimaatverandering zorgt voor een verandering van het neerslagpatroon in tijd en ruimte en heeft zo een invloed op het hydrologisch systeem. Om de grootte van deze impact te kunnen inschatten, is het eerst noodzakelijk inzicht te krijgen in de werking van het klimaat op aarde. Dit gebeurt door middel van klimaatmodellen.

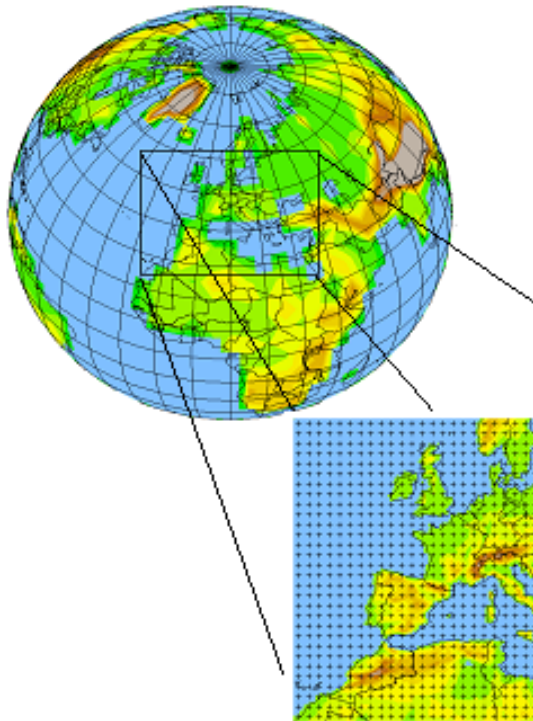
2.2 Klimaatsysteem en -modellering

Het *klimaat* is de gemiddelde toestand van de atmosfeer over een lange periode en wordt beschreven door variabelen als temperatuur, neerslag, relatieve vochtigheid, atmosferische druk, windsnelheid en -richting en duur van de zonneschijn. Deze variabelen zijn het resultaat van een groot aantal complexe interacties die inwendig plaatsvinden in het klimaatsysteem. Bovendien bestaat er een grote onzekerheid over externe processen die het systeem aansturen of kunnen beïnvloeden. Tot deze externe factoren behoort de activiteit van de zon en wordt ook de uitstoot van broeikasgassen door de mens gerekend.

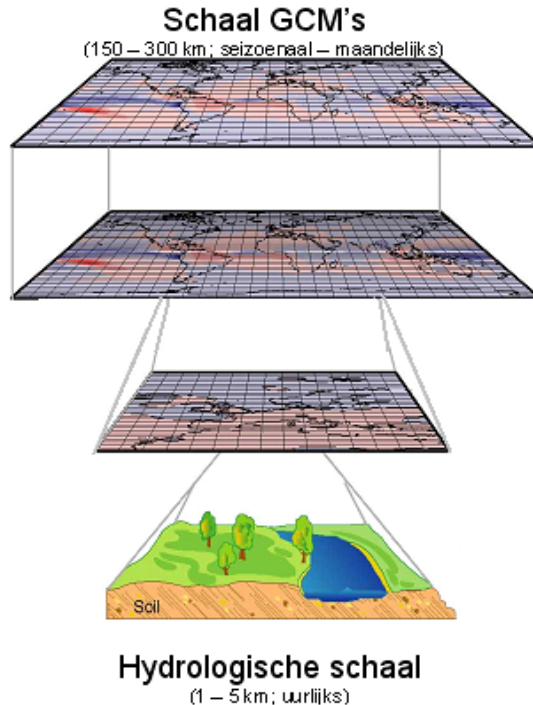
Het hydrologische systeem is voornamelijk afhankelijk van de klimatologische variabelen *neerslag* en *evaporatie*. Met klimaatmodellen probeert men deze variabelen te simuleren. Aangezien het klimaatsysteem complex is, gebeurt dit door een sterk vereenvoudigde voorstelling van de werkelijkheid. De huidige klimaatmodellen beperken zich tot enkele grote onderdelen van het systeem, waarbinnen ze slechts de belangrijkste processen in rekening brengen. Deze modellen noemt men *GCM* of *general/global circulation models*. Momenteel maakt men gebruik van de zogenaamde *AOGCM* ofwel *coupled atmospheric-ocean GCM*. AOGCM brengen de gasstromen in de atmosfeer en de energietransport door oceanen in rekening. Er bestaan een 20-tal verschillende modellen. Omdat deze modellen niet de volledige werkelijkheid weergeven, moet gecontroleerd worden of hun resultaten betrouwbaar zijn. Dit gebeurt door middel van een statistische verwerking waarbij modelresultaten die sterk afwijken weerhouden worden.

Deze globale klimaatmodellen simuleren het klimaat op zeer grove tijd- en ruimtelijke resolutie. In figuur 2.1 wordt een voorbeeld van de resolutie van een GCM gegeven. België neemt slechts één punt in dit raster in, waardoor er geen regionale verschillen in rekening gebracht worden. Bovendien spelen hydrologische processen zich af op een veel kleinere ruimte- en tijdschaal. Dit verschil in schaalgrootte tussen de resultaten van klimaatmodellen en de nodige invoer voor hydrologische

berekeningen noemt men het probleem van *neerscaling* (E: downscaling), zie figuur 2.2.



FIGUUR 2.1: GCM[8].



FIGUUR 2.2: Neerschalen[8].

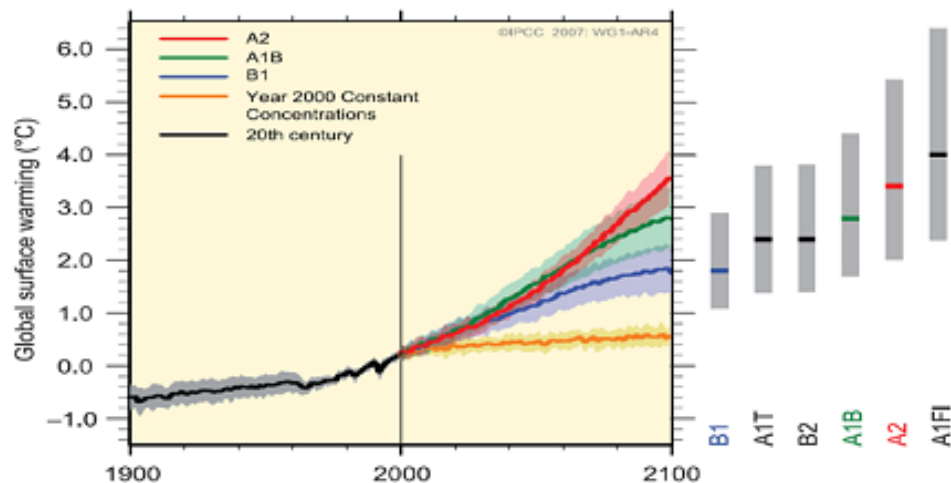
Om resultaten met een kleinere resolutie te bekomen, nest men binnen het globale model een model op regionale schaal. Dit noemt men *Regional Climate Models* (RCM). De resultaten van de globale modellen worden als initiële condities en randvoorwaarden aan dit RCM-model opgelegd. Door deze werkwijze kunnen zowel globale processen als regionale topografische invloeden in rekening gebracht worden. Er is echter geen terugkoppeling van het regionale naar het globale klimaatmodel.

Om van deze regionale schaal tot een hydrologische schaal te komen, gebruikt men *statistische methodes*. De simulatieresultaten van de regionale modellen worden vergeleken met historische metingen. Hieruit bepaalt men statistische verbanden (perturbatiefactoren). Deze methode is gebaseerd op de aanname dat de variabelen op kleinere schaal op dezelfde wijze veranderen als deze op een grovere schaal. Vervolgens wordt de historische tijdreeks aangepast via deze verbanden en verkrijgt men aldus een uitvoerreeks op hydrologische schaal.

Om de perturbatiefactoren te kennen en dus toekomstige projecties te kunnen doen, moeten klimaatmodellen gevoed worden met bepaalde broeikasemissiescenario's. In het SRES (Special Report for Emission Scenarios) van het IPCC zijn in totaal

40 verschillende emissiescenario's beschreven. De scenario's werden gegroepeerd in vier families, namelijk A1, A2, B1 en B2. Elk van deze scenario's beschrijft een mogelijk verloop van de toekomstige evolutie in demografie, economische ontwikkeling en technologische vooruitgang. Cijfers 1 en 2 staan voor een respectievelijk meer mondiaal dan wel regionaal georiënteerd wereldbeeld. Terwijl het B-wereldbeeld maximaal inspeelt op een grote technische vooruitgang op het vlak van propere en efficiënte technologie, houdt het A-beeld het verderzetten van de economie in met slechts een zeer beperkte aandacht voor duurzaamheid[9].

Hieruit volgt dat het A2-scenario het veiligste scenario is, daar dit het meest pessimistische wereldbeeld schetst[10]. In het verleden zijn de meeste klimaatveranderingimpactstudies uitgevoerd met dit A2 scenario . Het spreekt voor zich dat deze berekeningen dan ook een bovengrens voor de mogelijke impact geven. Figuur 2.3 geeft een overzicht van de gemiddelde temperatuurstijging op aarde voor de verschillende emissiescenario's.



FIGUUR 2.3: Gemiddelde jaarlijkse temperatuurstijging op aarde onder verschillende IPCC broeikasgasemissiescenario's(IPCC,2007)

2.3 Klimaatscenario's voor België

Om klimaatscenario's voor België af te leiden zijn vooreerst resultaten van klimaatmodellen ter hoogte van België nodig. De analyse van dergelijke resultaten laat toe klimaatperturbatiefactoren te bepalen die het huidige klimaat, de neerslag en evaporatie kunnen projecteren naar een toekomstige horizon. De klimaatmodelresultaten waarop de Belgische scenario's zijn gebouwd, zijn afkomstig uit het *PRUDENCE*-project. Het gamma aan modelresultaten uit dit project werd binnen het *CCI-HYDR*-project verwerkt tot perturbatiefactoren en samengevat in

klimaatscenario's en een klimaatperturbatietool voor België. Met deze tool kunnen toekomstprojecties van neerslag en evaporatie op uur- en dagschaal gemaakt worden. Deze gewijzigde reeksen zijn op hun beurt bruikbaar in impactstudies. Hieronder wordt de afleiding van de klimaatscenario's bondig toegelicht en geïllustreerd.

2.3.1 *PRUDENCE*-project

Het *PRUDENCE*-project is een onderzoeksproject gefinancierd door verschillende Europese instellingen en partners. Het doel van het project was het klimaatveranderingrisico voor Europa tegen het einde van de 22ste eeuw in kaart te brengen. Het project omvat de simulatiedata en de verwerking van een groot aantal klimaatmodellen. De modellen simuleren het hele Europese continent.

Het project omvat volgende stappen. Met behulp van een aantal AOGCM-modellen worden lange termijn simulaties uitgevoerd voor de referentieperiode (1961 - 1990) en een scenarioperiode (2071-2100). Binnen deze globale modellen worden regionale klimaatmodellen genest. Er wordt gebruik gemaakt van verscheidene GCM's, die aangestuurd worden door voornamelijk het A2 en B2-SRES scenario. Deze ruwe modellen leveren de randvoorwaarden en initiële condities voor tien regionale klimaatmodellen[7]. Afhankelijk van het te onderzoeken stroomgebied worden deze resultaten verder geschaald tot het niveau van het stroomgebied van de rivier. Zo zullen, om toekomstige klimaatscenario's voor België te definiëren, simulatieresultaten uit regionale klimaatmodellen voor België bekeken worden.

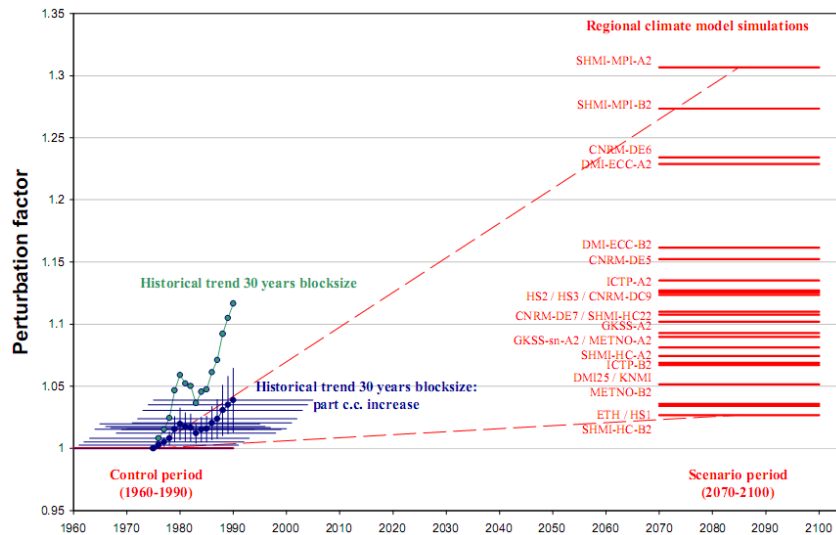
2.3.2 Klimaatscenario's uit het *CCI-HYDR*-project

Het afleiden van toekomstige klimaatscenario's uit de simulatieresultaten met klimaatmodellen voor België werd uitgevoerd binnen het *CCI-HYDR*-project. Het *CCI-HYDR*-project gaat uit van Federaal Wetenschapsbeleid en bestaat uit een samenwerking tussen verschillende Belgische onderzoeksinstanties, waaronder het KMI en de Katholieke Universiteit Leuven. Naast het afleiden van de scenario's voor België gaat het project ook de impact na op hydrologische extremen voor rivieren en rioleringsnetwerken.

Voor het afleiden van de scenario's wordt gebruik gemaakt van de *PRUDENCE*-database. Zoals hierboven beschreven, bevat het *PRUDENCE*-project resultaten van een groot aantal globale en regionale klimaatmodellen elk gebaseerd op de A2- en B2-broeikasemmissiescenario's. Om ook rekening te houden met andere IPCC-emissiescenario's, werden de *PRUDENCE*-runs aangevuld met simulaties uit het AR4project². Deze simulaties brengen het A1B- en het B1-scenario in rekening. Van al deze klimaatruns werden de resultaten geanalyseerd op het vlak van gedrag en consistentie. Voor de controleperiode werden de simulaties vergeleken met observaties en werden de toekomstige simulaties onderling vergeleken. Modellen die veelvuldig slechte resultaten opleverden voor het Belgische klimaat werden verwijderd.

²AR4 is het Fourth Assessment Report van het IPCC uit 2007

Uiteindelijk werden de resultaten statistisch geanalyseerd en werden voor de neerslag en ETo perturbatiefactoren afgeleid. Perturbatiefactoren drukken de verhouding uit tussen de controleperiode en een toekomstige simulatieperiode tot 2100. In figuur 2.4 worden de afgeleide perturbatiefactoren uit het *CCI-HYDR*-project weergegeven voor extreme neerslag in de winter volgens de verschillende klimaatmodellen uit *PRUDENCE*.

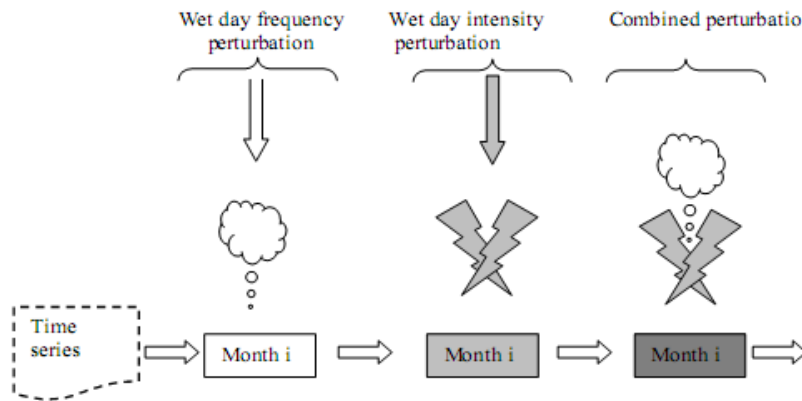


FIGUUR 2.4: Perturbatiefactoren voor extreme neerslag in de winter volgens verschillende klimaatmodellen[9]

Zoals opgemerkt kan worden in figuur 2.4 zit op deze perturbaties een grote onzekerheid. De onzekerheid is de som van enerzijds onzekerheden op de uitstoot van broeikasgassen volgens de emissiescenario's, anderzijds wordt er onzekerheid geïntroduceerd door het neerschalen van de modelresultaten tot op hydrologische schaal. Deze onzekerheid wordt opgevangen door het samennemen van de resultaten en deze te combineren tot drie impactscenario's voor België; een hoog, een midden, en een laag scenario. Hierbij kan het middenscenario gezien worden als de beste schatting van de impact in de toekomst en drukken het hoog- en laagscenario de spreiding of onzekerheid uit.

Naast de perturbatiefactoren die de intensiteit (grootte van de extremen) aanpassen, wordt ook de verandering in de frequentie (het aantal natte dagen wordt aangepast) in rekening gebracht. Een klimaatperturbatietool ontwikkeld binnen ditzelfde project laat toe deze veranderingen ten gevolge van het klimaat door te voeren. Figuur 2.5 toont de processen aan die deze tool uitvoert. Het geeft ook aan dat de klimaatveranderingscenario's vastgelegd worden op maandbasis[7].

Naast deze processen omvat de tool ook verbanden tussen de neerslag en evapo-

FIGUUR 2.5: Opeenvolgende stappen in de *CCI-HYDR* Perturbation Tool[7]

ratie. Onderlinge correlaties tussen de neerslag en evaporatie en de seizoenen werden via regressie-analyse blootgelegd en verwerkt in de tool. Bij voorkeur worden dus de neerslag en evaporatie samen geperturbeerd. Samengevat kan gesteld worden dat via de tool voor zowel de evaporatie als neerslagreeksen telkens drie mogelijke toekomstige reeksen worden gegenereerd. De veranderingen zijn weergegeven in tabel 2.1.

Variabele	Seizoen	Laag	Midden	Hoog
Neerslagverandering	Winter	0% toename	8% toename	16%toename
	Zomer	20% toename	13% toename	6% toename
ETo-verandering	Winter	27% toename	17% toename	6% toename
	Zomer	25% toename	15% toename	4% toename

TABEL 2.1: Gemiddelde verandering van neerslag en verdamping per scenario[11]

Een analyse leert dat toekomstige wintermaanden zich zullen kenmerken door een duidelijke vernatting, de zomers door minder neerslag. Maar het gedrag tijdens de zomer is complexer. Het aantal natte dagen zal afnemen in de zomer, maar er zal een toename zijn van de intensiteit van onweersbuien. Samen genomen treedt echter nog steeds een daling van de totale hoeveelheid neerslag op door het grote aantal minder natte dagen.

2.4 Hydrologische impact voor België

De klimaatscenario's zijn genoemd naar hun impact. Het hoog- of natscenario zal voornamelijk leiden tot nattere wintermaanden waardoor het het meest pessimistisch is naar hoogwater en overstromingen. Het laag- of droogscenario combineert een lage neerslag in de zomer met verhoogde ETo en zal zo het meest pessimistische scenario

naar laagwater vormen.

De hydrologische impact van de klimaatscenario's werd onderzocht voor de verschillende bekkens in Vlaanderen door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid [8], [9], [10], [7]. Uit de studie volgde dat klimaatverandering een gelijkaardige impact op de verschillende bekkens heeft. De grootste problemen zullen zich voornamelijk situeren op de laagwaterafvoeren. Laagwaterdebieten zullen onder de drie scenario's verder afnemen; dit gemiddeld tot -50%, met uitersten tot -70%. Dit ten gevolge van een algemene daling in de neerslag en een toegenomen activiteit van verdamping onder de drie scenario's tijdens de zomermaanden. Maar extreme zomeronweders kunnen het overstromingsrisico van rioleringen versterken.[3] Dit zal frequenter voorkomen door de stijging in intensiteit van zomerneerslagbuien [1]. Tijdens wintermaanden is de impact niet duidelijk. Enerzijds is een verhoging aan piekafvoeren merkbaar onder het hoogscenario; anderzijds is er een daling van de piekafvoeren onder het laagscenario. Hiermee gepaard is het effect op overstromingen onzeker[2]. Voornaamste conclusie blijft wel een daling van de laagwaterdebieten. Dit kan belangrijke gevolgen hebben voor de drinkwatervoorziening, scheepvaart en waterkwaliteit.

De klimaatscenario's werden ook gebruikt in impactstudies zoals ecologische impactstudies van het Instituut voor Natuur en Bosonderzoek (INBO)[1] en de Vlaamse milieumaatschappij (VMM)[12].

2.5 Besluit

In dit hoofdstuk werd getracht inzicht te brengen in wat er schuil gaat achter de drie klimaatveranderingsscenario's voor België. De klimaatscenario's voor Vlaanderen werden afgeleid uit regionale klimaatmodelresultaten voor België. Na statistische verwerking werden de resultaten van de verschillende modellen en emissiescenario's tot 3 scenario's voor België samengevat: een hoog of nat scenario, een mild of midden scenario en een laag of droog scenario. Die scenario's bevatten de perturbatiefactoren die de eindgebruiker toelaten voor een Belgisch rivierbekken de toekomstige hydrologische invoervariabelen te simuleren voor een bepaalde tijdshorizont tot 2100. Voor het simuleren van deze variabelen kan gebruik worden gemaakt van een tool die binnen het *CCI-HYDR*-project ontwikkeld werd. De werking van de tool wordt in hoofdstuk 4 kort besproken.

Hoofdstuk 3

Doel van het onderzoek

Dit hoofdstuk kadert vooreerst de problematiek van laagwaterdebieten op Vlaamse rivieren voor de drinkwaterproductie. Daarnaast wordt een omschrijving van het studiegebied gegeven. In het onderzoek van 2009 werden suggesties meegegeven die in de richting wezen van een onvoldoende nauwkeurig waterkwantiteitsmodel voor klimaatimpactanalyse. Hierop wordt kort in gegaan, zodat in de laatste paragraaf van het hoofdstuk het onderzoeksdoel van dit thesisonderzoek gedefinieerd kan worden.

3.1 Situering problematiek/thesisonderzoek

De klimaatstudies voor België besproken in hoofdstuk 2 tonen aan dat het debiet tijdens droge periodes in de toekomst sterk kan dalen[13],[3]. Zo kunnen laagwaterdebieten 30 tot 70 procent afnemen, afhankelijk van het beschouwde klimaatscenario voor België.

Deze evolutie en het feit dat bepaalde industrieën en processen afhankelijk zijn van een verzekerd minimaal debiet op rivieren, wijst op de noodzaak van onderzoek omtrent het voorkomen van minimale debieten tijdens droge periodes onder huidige en toekomstige klimaatcondities.

De steeds stijgende behoefte aan drink- en proceswater leidde tot een uitputting van de grondwatertafel in Vlaanderen[4]. Watermaatschappijen gaan op zoek naar alternatieven voor grondwater om zo de stijgende vraag naar water te kunnen opvangen. Het gebruik van oppervlaktewater is mogelijks een goed alternatief.

Maar er moet nagegaan worden of oppervlaktewaterwingebieden ook tijdens periodes van droogte en onder klimaatverandering wel voldoende water kunnen leveren. Wanneer voor bepaalde periodes het debiet op rivieren en waterlichamen kleiner wordt dan de watervraag van maatschappelijke sectoren en industrieën, spreekt men van watertekorten. Naast het waterkwantiteitsaspect moet ook de basiskwaliteit gegarandeerd blijven. Industriële en huishoudelijke lozingen kunnen sterke stijgingen aan pollutieconcentraties veroorzaken, wanneer geloosd wordt in een beperkt volume

of debiet van een rivier.

In dit kader werd in 2009 gestart met het thesisonderzoek naar de waterkwaliteit en waterkwantiteit ter hoogte van het waterproductiecentrum *de Gavers* onder huidige en toekomstige klimaatcondities.

3.2 Studieggebied

Het studieggebied strekt zich uit van de Bovenschelde in Noord-Frankrijk over het kanaal Bossuit-Kortrijk tot aan het WPC *de Gavers*. Dit onderdeel licht de situering van deze drie entiteiten (Bovenschelde, kanaal Bossuit-Kortrijk en het WPC) toe.

3.2.1 Bovenschelde

De Bovenschelde ontspringt in het Noorden van Frankrijk, nabij *Saint-Quentin*. Figuur 3.1 geeft een overzicht van de bevaarbare waterlopen en kanalen in Noord-Frankrijk en Vlaanderen.

Vanaf *Cambrai* is de loop van de Bovenschelde gekanaliseerd en bevaarbaar gemaakt door middel van stuwen en sluizen. Het gebied is gekenmerkt door enkele grote kanalen. Het kanaal *Denain-Duinkerke*¹ voedt zich nabij Denain met water uit de Bovenschelde. Dit kanaal vormt een belangrijk element in het verdere verloop van de studie. Ook de volledige bovenloop van de Scarpe - deze rivier dwarsst dit kanaal nabij Douai - voedt het kanaal. Het kanaal Denain-Duinkerke voedt verder stroomafwaarts het kanaal van de Deule, dat verbinding maakt met de Leie. Ook is er een verbinding met het Spiere-kanaal dat nabij Spiere-Helkijn terug in de Schelde komt. Deze kanalen worden deels met water uit de Bovenschelde, direct of indirect, gevoed.

In het kader van het Europese TEN² binnenvaartproject zal een nieuwe verbinding via het kanaal *Denain-Duinkerke* en het *Canal du Nord* totstandkomen met het Seinebekken. Zo wordt één van de laatste ontbrekende schakels tussen het Seinebekken en het noordelijker gelegen Europees Schelde-netwerk gelegd. Dit kan evenwel betekenen dat ook dit kanaal door Scheldewater gevoed moet worden[15] en dat er in de toekomst meer water uit de Bovenschelde zal gepompt worden.

Op het Waalse grondgebied maakt de Schelde nabij Doornik verbinding via een kanaal naar Bergen. Voorbij de Vlaamse grens krijgt men eerst de Spiere en vervolgens het Spiere-kanaal. Verder stroomafwaarts ligt het kanaal Bossuit-Kortrijk. Afwaarts van Bossuit monden verscheidene rivieren in de Schelde uit. Dit zijn de rivieren La Rhosnes, de Maarkeek en de Zwalm. Ze worden niet meer binnen het studieggebied beschouwd. Op de Bovenschelde zijn te Kerkhove, Oudenaarde en

¹Het kanaal Denain-Duinkerke noemt men ook het *canal à grand gabarit* of *canal Dunkerque Valenciennes*.

²TEN: Trans European Network



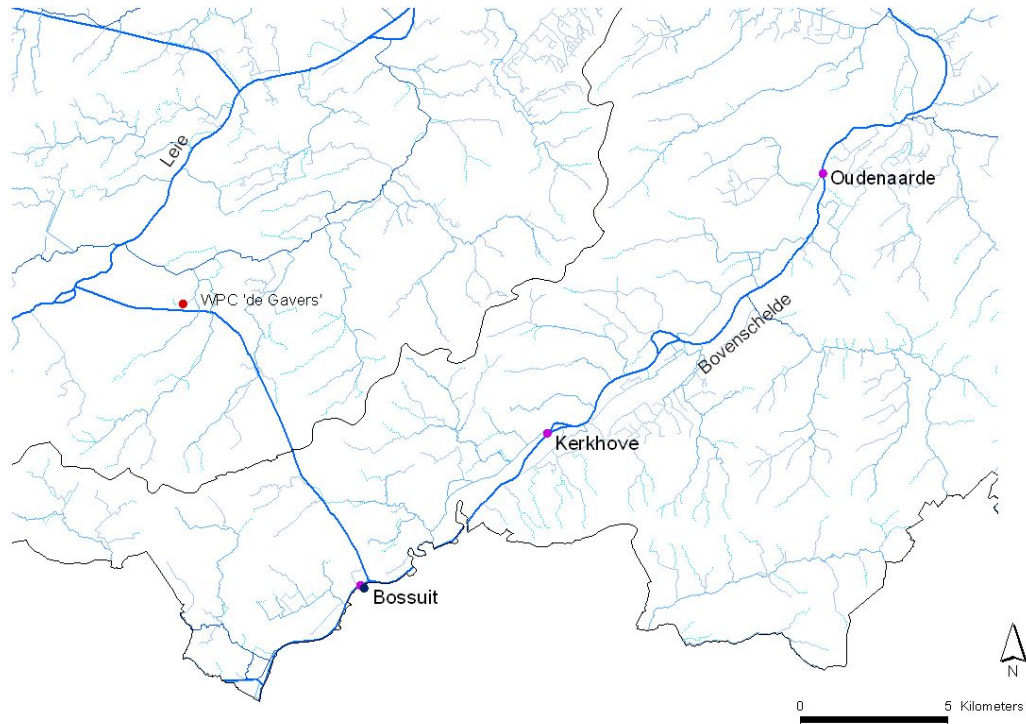
FIGUUR 3.1: Overzicht van de bevaarbare waterwegen (kanalen en rivieren) in Noord-Frankrijk en Vlaanderen[14]

Asper stuwen gelegen. Vanaf de Frans-Belgische grens tot Gent spreekt men van het Bovenschedelbekken. Figuur 3.2 toont het kanaal Bossuit-Kortrijk en het WPC op de Bovenschedel[6].

3.2.2 Kanaal Bossuit-Kortrijk

Het kanaal Bossuit-Kortrijk werd in 1860 in gebruik genomen en verbindt het Scheldt met het Leiebekken. Het kanaal werd gegraven als transportas voor steenkool, die ontgonnen werd in de streek rond Henegouwen. Via het kanaal werd de steenkool naar Kortrijk getransporteerd. Een eeuw later, rond 1958, werd het kanaal verbreed tot schepen van 1350 ton. De elf bestaande sluizen werden vervangen door vier grote sluizen. De eerste drie sluizen, die van Bossuit, Moen en Zwevegem, werden aangepast aan de nieuwe afmetingen. De sluizen nabij Kortrijk werden echter nooit vernieuwd. Hier vindt men nog de oorspronkelijke drie kleine sluizen. Bijgevolg is

3. DOEL VAN HET ONDERZOEK

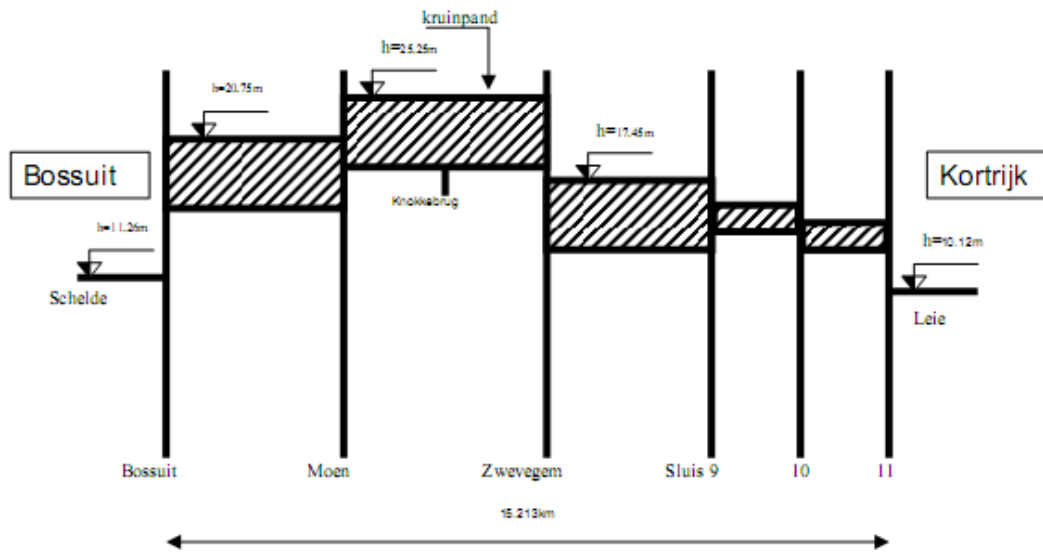


FIGUUR 3.2: Ligging van de Bovenschelde, het kanaal en het WPC[5]

heden de transportfunctie als doorvaarroute van het kanaal marginaal geworden.

Op figuur 3.3 is het lengteprofiel van het kanaal te zien. Het kanaal is 15,3km lang en wordt nabij Bossuit gevoed via een pompgemaal. Een gelijkaardig pompgemaal pompt vervolgens te Moen het water tot in het kruinpan. Er is geen natuurlijke voeding via dit kruinpan. De sluis van Zwevegem werd voorzien van een bypass zodat er steeds voldoende water naar het lager gelegen kruinpan stroomt en zo de bevoorrading van het drinkwaterproductiecentrum steeds verzekerd is. Op figuur 3.3 zijn tevens de peilen in elk pand weergegeven. Het kanaal werd in het thesisonderzoek van 2009 aan het hydrodynamisch model toegevoegd. Nabij Kortrijk komt het kanaal in de Leie, de wisselwerking verloopt in de richting van het kanaal naar het Liebekken.[6]

Langs het kanaal liggen, naast het WPC, nog enkele bedrijven die water uit het kanaal capteren. Hun aandeel is echter beperkt. Onderstaande foto's geven een zicht op het kruinpan nabij Moen en een zicht van de monding van het kanaal in de Bovenschelde.



FIGUUR 3.3: Lengteprofiel Kanaal Bossuit-Kortrijk[5]



3.3 WPC *De Gavers*

Het waterproductiecentrum *de Gavers* wordt beheerd door de *Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening* (VMW). De maatschappij staat in voor de drinkwatervoorziening van 170 gemeenten verspreid over Vlaanderen. Verder levert de maatschappij proceswater voor de industrie en beheert ze het afvalwater in samenwerking met verscheidene gemeenten en steden.

De VMW heeft verscheidene grond- en oppervlaktewaterwingebieden die verspreid liggen over het Vlaamse grondgebied en zij wint drie kwart van haar water uit oppervlaktewater. De drie grote oppervlaktewinningsgebieden zijn de *Kluizen*, dat water uit het Gentse kanalenstelsel zuivert, de *Blankaart* in Diksmuide, dat water uit het IJzerbekken neemt, en het waterproductiecentrum *de Gavers* nabij Kortrijk.

De eerste twee productiecentra beschikken over een spaarbekken van respectievelijk 12 miljoen en 3 miljoen kubieke meter. Dit laat tijdens droogte toe perioden tot drie maanden te overbruggen. De Gavers beschikt over de Gavervijver waarop slechts minimale schommelingen van het peil mogen plaatsvinden. Door het ontbreken van een echt spaarbekken kan het productiecentrum gevoeliger zijn voor mogelijke aanvoerschommelingen dan andere centra.

Het WPC *de Gavers* is gelegen te Stasegem-Harelbeke en werd in het voorjaar van 1995 in gebruik genomen. De nieuwe oppervlaktewaterwinning moest de stijgende behoefte aan drinkwater van de regio rond Kortrijk opvangen en zo de grondwaterwinning uit de carboonkalklagen in het zuiden van West-Vlaanderen mee ontlasten. In de beginjaren werd $15000m^3/dag$ aan drinkwater geproduceerd. In juni 2005 werd de productie opgedreven tot $25000m^3/dag$ en in 2009 na installatie van een ultrafiltratiemodule werd een maximale productie van $32000m^3/dag$ mogelijk³. Binnen 20 jaar streeft de VMW naar een productiecapaciteit van $50000m^3/dag$. Deze verhoogde productie wordt meegenomen in de impactanalyse van de klimaatverandering.

De Gavervijver werd als een grondwinningsput gegraven voor de aanleg van de nabijgelegen E17. De vijver heeft een natuur- en recreatieve eindbestemming gekregen. Dit houdt in dat noch het peil, noch de kwaliteit van het water sterk mag schommelen. Een marge van 30 cm laat toe onder het huidige verbruik maximaal een week zonder instroom in de vijver te overbruggen. De toegelaten marge wordt enkel gebruikt om een technisch onderhoud van de installaties mogelijk te maken.

Om geen kwaliteitschommelingen op het vijverwater te krijgen, verloopt de zuivering in twee fasen. Deze fasen zijn een voorbehandeling tot vis- en zwemkwaliteit en een nabehandeling tot drinkwaterkwaliteit. De eigenlijke zuivering is voor dit onderzoek van geen belang. Wel kan meegegeven worden dat de waterkwaliteit op het kanaal zeer hoog is, dit door zijn sterk zelfzuiverende functie alsook door de verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit op het Europese waterstelsel⁴. Het WPC *de Gavers* voorziet in de waterbevoorrading voor Waregem en de regio rond Kortrijk[17, 18, 19, 20, 21, 22].

3.4 Samenvatting thesisonderzoek 2009

In 2009 werd gestart met het onderzoek[5] naar de impact van klimaatverandering op het WPC *de Gavers*. Deze paragraaf geeft een kort overzicht van het onderzoek en van de besluiten en suggesties die nadien geformuleerd konden worden. Het thesisonderzoek in 2009 omsloot zowel een waterkwantiteits- als een waterkwaliteitsmodellering.

³Het opdrijven van de productiecapaciteit liet toe proceswater te leveren aan de industrie en zo de grondwaterwinning uit de sterk schaars wordende Sokkel te verminderen[4].

⁴Dit in het kader van de Europese Kaderrichtlijn: Water[16]

Voor deze waterkwantiteitsmodellering vertrok men van een hydrodynamisch model dat opgesteld werd door het Waterbouwkundig Laboratorium van België[6]. Het model omvatte naast het volledige Bovenschelde- en Leiebekken ook delen van de Gentse kanalen en de Brugse polders. Uit praktische overwegingen (het beperken van de rekentijd) en dankzij een betrouwbare randvoorwaarde op de Bovenschelde (de waterhoogte te Oudenaarde) kon het model in het thesisonderzoek tot een deel van het beschikbare model beperkt worden. De Leie, de Brugse Polders en de Gentse kanalen werden uit het model verwijderd.

Het kanaal was in dit beschikbare model niet in rekening gebracht. Daarom werd het kanaal, met zijn structuren en panden, in 2009 ingevoegd. Het waterproductiecentrum *de Gavers* is langs het laatste pand van dit kanaal gelegen. De structuren op het kanaal zijn pompstructuren en sluizen. Het waterpeil op het kanaal wordt onderhouden door pompen. Aan de hand van productiegegevens van deze pompen werd het debiet op het kanaal bepaald. Dit is mogelijk omdat het kanaal geen natuurlijke voeding kent. De neerslagafstroming uit de deelbekkens naar de Bovenschelde werd gemodelleerd, gebruik makend van modellen van het WL[6].

Eenmaal het hydrodynamisch model aangepast was aan het onderzoeksdoel, kon aangevat worden met de studie van de waterkwaliteit. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de advectie-dispersie vergelijkingen die in het hydrodynamisch-modelleringspakket *MIKE11* geïmplementeerd zijn. De uitwisseling tussen de verschillende pollutanten gebeurt door middel van de ECOlab-module. Er werd gekeken naar nitraten, die samen met de orthofosfaten de twee belangrijkste parameters van de waterkwaliteit zijn. De orthofosfaten konden niet in de standaardmodule in rekening gebracht worden en werden voor dit onderzoek niet bekeken. Een belangrijk aandeel in de thesis was het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse voor verschillende pollutantmetingen. Telkens werd gekeken naar hun invloed op de opgeloste zuurstof, de ammonium-, BOD- en nitraatconcentraties. Toch waren de resultaten die met deze kwaliteitsmodellering werden gevonden vrij ruw en werden sommige componenten onderschat, dan weer overschat.

Voor de scenario-analyse werd zowel een productieverhoging door het WPC bekeken als de invloed van klimaatwijziging. Vervolgens werd het effect van beide scenario's gecombineerd.

De productieverhoging bleek een kleine invloed te hebben op de kwaliteit van het water op het kanaal. Er werd echter geen rekening gehouden met het feit dat een verhoogde productie ook een verhoging van het opgepompt debiet aan het pompgemaal inhoudt. Dit zou tot gevolg hebben dat er meer vuil Scheldewater in het kanaal gepompt moet worden. Door de gebruikte modelopstelling bleek het deel van het kanaal na de debietafname door het WPC als een buffer te werken. De kleine verschillen gaven bovendien een afname van de concentraties van pollutanten aan en een stijging van de hoeveelheid zuurstof. Deze bevindingen zijn tegengesteld aan wat men intuïtief zou verwachten. Een grotere stroomsnelheid doet de doorstroomtijd in

het kanaal sterk dalen. Hierdoor is er minder tijd voor zelfzuiverende reacties in het kanaal die de kwaliteit van het water verbeteren.

Omtrent de klimaatverandering gaven de drie scenario's (laag, midden, hoog) zeer sterke dalingen van het debiet aan. De debieten werden soms gedurende een maand nul. Dit werd echter ervaren als vrij onrealistisch, waardoor geen conclusies betreffende de waterkwantiteit konden geformuleerd worden. Als suggestie werd meegegeven dat het hydrologisch model dat de afstroom uit het bekken Bossuit beschrijft, bekeken en eventueel verfijnd moet worden.

Doordat de resultaten uit het onderzoek tegengesteld waren aan wat men intuïtief zou verwachten, en door de zeer lage debieten tijdens de scenario-analyse, bracht het onderzoek van 2009 meer vragen dan antwoorden met zich mee. Langs dit werk zullen een aantal van die vragen worden aangepakt. Deze punten worden in de volgende paragraaf beschreven.

3.5 Onderzoeksdoel

In voorliggend onderzoek zal verder worden ingegaan op de problemen betreffende de waterkwantiteit. Het waterkwaliteitsaspect wordt niet in dit onderzoek behandeld. Het thesisonderzoek zal de neerslagafstroming in het bekken Bossuit verder verfijnen. Uit de beschrijving van het kanalenstelsel blijkt dat de natuurlijke neerslagafstroom en dus het hiermee verbonden debiet op de Bovenschelde nabij Bossuit sterk beïnvloed wordt door menselijke factoren.

In het onderzoek wordt daarom deze menselijke invloed bestudeerd, en deels weggewerkt, zodat een nieuw neerslagafstromingsmodel kan opgesteld worden. Dit model moet het voorkomen van laagwater onder huidige en toekomstige klimaatcondities op een correcte manier weergeven. Voor het kalibreren van het hydrologisch model waren extra meteorologische gegevens nodig overeenkomstig de periode van de debietreeks te Bossuit. Een deel van het onderzoek betreft het verzamelen en het opstellen van deze reeksen.

Met het opgestelde hydrologisch model zal de klimaatimpact op de laagwater-toestand te Bossuit bestudeerd worden. De voor België bepaalde klimaatscenario's worden voor drie tijdhorizonten doorgerekend en geanalyseerd. De tijdhorizonten werden voor dit onderzoek op 20 jaar (2030), 50 jaar (2060) en tegen 2100 gelegd. Ze zijn gekozen op vraag van de VMW in het zicht van de geplande productieverhoging. Met deze productieverhoging wordt in de impactanalyse rekening gehouden.

Overige suggesties uit het onderzoek van 2009 omtrent het verfijnen van het hydrodynamisch model van het kanaal worden onderzocht. Stroomafwaarts van het WPC moet een zeker debiet behouden blijven. Een drinkwaterproductieverhoging houdt dus een verhoging in van het debiet dat in het kanaal gepompt moet worden.

Ten slotte dient er verder onderzoek te gebeuren naar het werkelijke debiet op het kanaal. Het debiet werd in 2009 uit een beperkte datareeks bepaald en werd door VMW in vergelijking met vroeger gedane schattingen als zeer laag ervaren. Omdat de waterkwaliteit niet wordt behandeld zal een verfijning van de structuren van het kanaal niet nodig zijn. Belangrijk is een juiste inschatting te maken van het debiet op het kanaal en het percentage van dit debiet dat de watermaatschappij opneemt.

Hoofdstuk 4

Werkwijze en methodes

In het vorige hoofdstuk werd het onderzoeksdoel voor deze thesisstudie gedefinieerd. In dit hoofdstuk wordt de werkwijze verduidelijkt die toelaat een impactanalyse van de klimaatverandering op het debiet op de Bovenschelde uit te voeren. In de werkwijze worden een aantal algoritmen toegepast die specifiek voor het klimaat en hydrologische-hydrodynamische modellering ontwikkeld werden. Ze worden in dit deel overlopen.

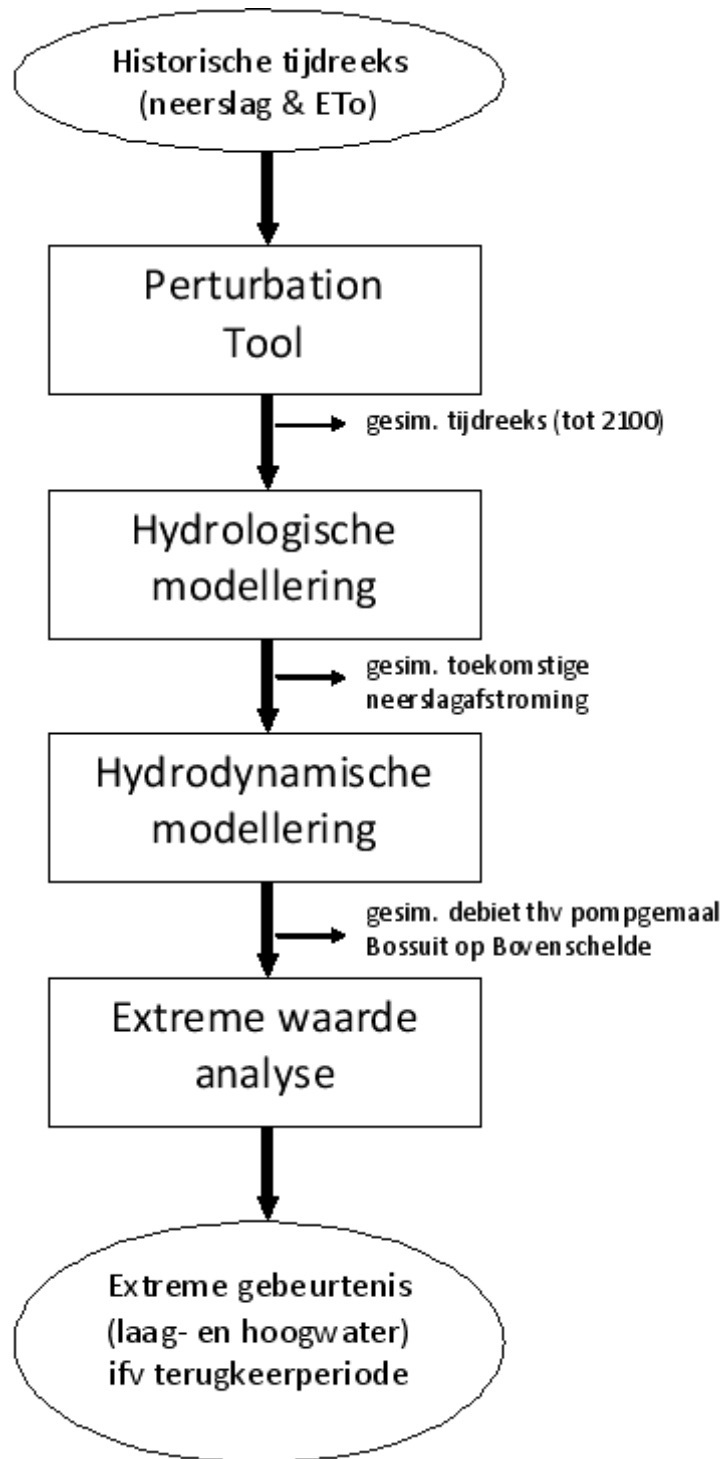
4.1 Werkwijze

De opeenvolgende stappen van de werkwijze zijn schematisch weergegeven in figuur 4.1.

Historisch opgemeten tijdreeksen van zowel neerslag als evaporatie worden via de *CCI-HYDR Perturbation tool* omgezet naar invoerreeksen die de toekomstige meteorologische condities voorstellen. Deze condities worden bepaald voor de verschillende tijdhorizonten tot 2100.

De gepertubeerde reeksen zijn de invoerreeksen van het hydrologisch model. Een hydrologisch model simuleert de natuurlijke afstroom van neerslag in een gebied. Door aan het hydrologisch model toekomstige neerslagreeksen op te leggen, simuleert men dus de toekomstige afstroming. De evaporatie brengt het deel van de neerslag dat niet afstroomt maar verdampt in rekening. De afvoerdebieten worden in een volgende stap als randvoorwaarden opgelegd aan een hydrodynamisch model. Een hydrodynamisch model simuleert vervolgens langs punten in het studiegebied de waterhoogte en de debieten[23].

Toegepast op het studiegebied, wordt tijdens de hydrologische modellering de neerslagafstroming van het bekken stroomopwaarts van de debietmeter van Bossuit, hierna *bekken Bossuit* genoemd, gemodelleerd. Voor de hydrologische modellering wordt in de studie gebruik gemaakt van het NAM- en het VHM-modelleringsysteem. De modelleringsystemen zijn twee verschillende technieken en de resultaten van beide

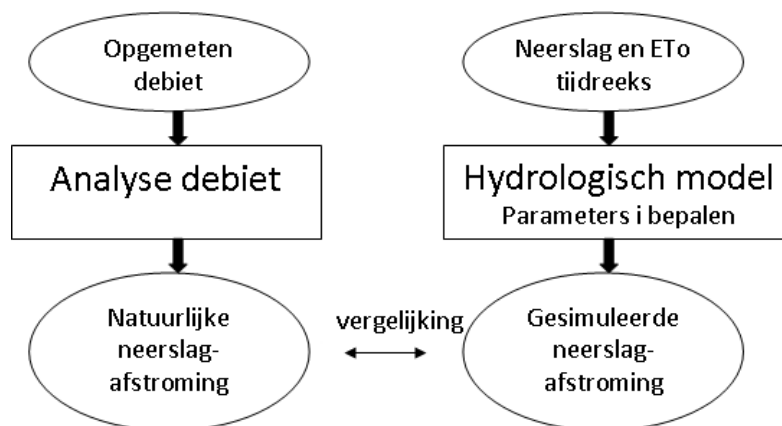


FIGUUR 4.1: Stappen in de waterloopmodellering en de klimaatimpactstudie

systemen worden onderling vergeleken. Het debiet afkomstig van deze neerslagafstroming levert de opwaartse randvoorwaarde voor het hydrodynamische model. Het hydrodynamisch model is opgesteld in het MIKE11-modelleringspakket. Als resultaat van het hydrodynamisch model krijgt men een continue tijdreeks van gesimuleerde debieten.

Uit deze reeks kunnen onafhankelijke extreme gebeurtenissen worden geselecteerd. Deze selectie gebeurt via een POT-criterium, geïmplementeerd in WetSpro. De onafhankelijke gebeurtenissen kunnen via de de extreme waarde theorie in functie van hun terugkeerperiode worden uitgezet. De terugkeerperiode bepaalt hoe vaak een debiet wordt onder- of overschreden. Lagere laagwaterdebieten hebben een grotere terugkeerperiode en komen dus minder frequent voor. Hierdoor kan op eenvoudige grafische wijze de watervraag met de watertoevoer vergeleken worden tijdens de scenario-analyse. Door deze modellen voor verschillende tijdhorizonten door te rekenen, kan de evolutie van de laagwatertoestand op de Bovenschelde in rekening worden gebracht en kan de invloed op het WPC bepaald worden.

Vooraleer er met deze klimaatsimulaties kan begonnen worden, is het noodzakelijk de verschillende modellen op te stellen. Figuur 4.2 geeft de werkwijze weer hoe een hydrologisch model wordt afgeijkt. Het afijken of kalibreren van een model betekent dat modelparameters zodanig bepaald moeten worden dat de gesimuleerde debieten de werkelijk opgemeten debieten zo goed mogelijk benaderen. Aanvankelijk gebeurt dit voor een korte periode waarvoor zowel debietmeetgegevens als meteorologische invoerreeksen beschikbaar zijn. Later worden de resultaten afgetoetst aan een langere validatieperiode. Voor de modellering aangevat kan worden, dienen voldoende betrouwbare data (ETo, neerslag en debietmetingen) verzameld te worden.



FIGUUR 4.2: Overzicht opstellen hydrologisch model.

Samenvattend kan gesteld worden dat volgende stappen in de studie moeten doorlopen worden:

1. Analyseren van de debietreeks van Bossuit op zijn natuurlijke neerslagafstroom en dus de geschiktheid voor conceptuele modellering.
 - Studie van het Noord-Franse bekken van de Bovenschelde opwaarts van Bossuit.
 - Detailanalyse van de opgemeten debietreeks te Bossuit.
2. Overeenkomstig deze periode van de debietmeting, moeten neerslag- en evaporatiereeksen gemaakt worden.
 - Voor de neerslagreeksen: het opstellen van een neerslagreeks voor het bekken via de Thiessenpolygoon methode.
 - Voor de EToreeksen: de reeks van Melle bijwerken tot de meest recente waarden. Voor latere periode wordt gebruik gemaakt van de reeks van Vlissingen.
3. Het afijken van het hydrologisch model aan de gewijzigde debietreeks van Bossuit.
 - Opstellen van het VHM-model.
 - Opstellen van het NAM-model.
4. Beide modellen maken gebruik van een opdelen van het debiet in deelstromen en een opdeling in periodes van snelle en trage afstroming. De opdeling gebeurt met behulp van WetSpro.
5. Het bijwerken van het hydrodynamisch model.
 - Bestaande MIKE11-model aanpassen voor dit onderzoek.
 - Bepalen van het huidige debiet op het kanaal.
6. Klimaatimpactanalyse.
 - Bespreking klimaatscenario's voor België.
 - Perturberen van de historische meteorologische tijdreeksen naar drie toekomsthorizonten.
 - Doorrekenen van het hydrologisch model met de geperturbeerde invoer (drie scenario's per horizont).
 - Extreme-waarde-verdeling van de laagwaterdebieten te Bossuit.
 - Invloed van deze laagwaterdebieten op debietafname door het WPC.

Na het uitvoeren van deze werkwijze kunnen besluiten getrokken worden over het al dan niet voorkomen van watertekorten voor het WPC *de Gavers* van de VMW bij de huidige of verhoogde productie onder toekomstige klimaatwijzigingen.

4.2 Gebruikte algoritmen

In bovenstaand deel werden enkele hydrologische en hydrodynamische algoritmen vermeld waarmee in dit onderzoek gewerkt wordt. Deze zijn het *NAM*- en *VHM*-modelleringsstelsel. *NAM*- en *VHM*-modellen worden afgeijkt aan de hand van deelstromen en periodes, die bepaald kunnen worden met behulp van *WetSpro*. Voor het hydrodynamisch model maakt men gebruik van de *MIKE11*-software. Toekomstige neerslag en verdampingsdata worden geperturbeerd met behulp van de *CCI-HYDR Perturbation tool*. Al deze algoritmen worden in dit deel bondig toegelicht.

4.2.1 Klimaatverandering (*Perturbation tool*)

In het *CCI-HYDR*-project, besproken in hoofdstuk 2 (het klimaatverandering en -impact in Vlaanderen: een overzicht) werden de resultaten van het onderzoek gebundeld in een algoritme. Dit algoritme laat eindgebruikers op eenvoudige wijze historische meteorologische data te perturberen naar een toekomstige tijdshorizont en brengt zo de resultaten van de verschillende klimaatmodellen en emissiescenario's in rekening. De *CCI-HYDR Perturbation Tool* kan volgende meteorologische data bewerken: neerslag-, wind-, temperatuur- en evaporatiereeksen. Afhankelijk van de tijdschaal van de invoerreeksen, kunnen gegevens op dagelijkse schaal tot 10-minuten-schaal geperturbeerd worden. Zo verkrijgt men toekomstige reeksen op een tijd- en ruimteschaal waarop hydrologische processen zich afspelen. De tool maakt onderscheid tussen de kuststreek en het binnenland.

Als uitvoer wordt voor elk van de drie scenario's (hoog, midden en laag) een continue reeks gecreëerd. De scenario's zijn het statistisch samennemen van de resultaten afkomstig van verschillende klimaatmodellen en emissiescenario's die aan klimaatmodellen worden opgelegd. Het middenscenario stelt dan het meest waarschijnlijke scenario voor. Door het inrekenen van het laag- en hoogscenario kan de spreiding op dit middenscenario weergegeven worden. Naarmate men de tijdshorizont verder naar het einde van de 22ste eeuw legt, worden de afwijkingen ten opzichte van ons huidig klimaat groter en neemt de onzekerheid toe.

4.2.2 Hydrologische modellen

Een hydrologisch model simuleert de neerslagafstroom naar een rivier voor een bepaald gebied. In het thesisonderzoek gebeurt deze simulatie via een gebiedsgemiddelde conceptueel model. In een conceptueel model wordt slechts getracht de essentie van de hydrologische cyclus, figuur 4.3 weer te geven, zonder de fysische processen gedetailleerd te beschrijven. Door gebiedsgemiddeld te werken verliest men een deel van de ruimtelijke variëteit van de neerslag. Uit voorgaand onderzoek [23] is gebleken dat gedetailleerde fysische modellen de neerslagafstroming niet noodzakelijk nauwkeuriger simuleren, hoewel ze meer invoergegevens, waarvan enkele slechts via

dure proefnames bepaald kunnen worden, en rekencapaciteit vragen. Uit onderzoek bleek dat een conceptuele modellering per stroombekken voldoende nauwkeurige resultaten oplevert. Het gebied mag echter niet te groot zijn.

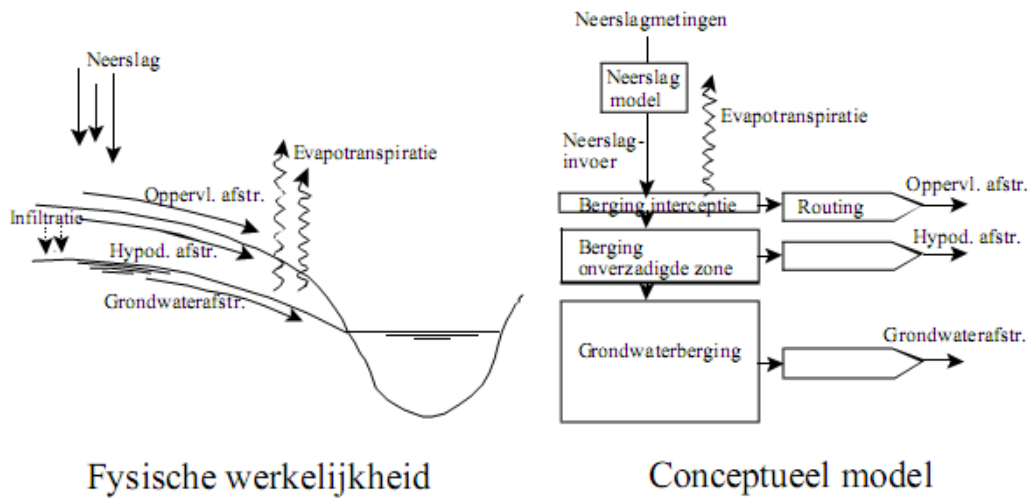
De modelstructuur van een conceptueel model is gebaseerd op de enkele basisprincipes van de neerslagafvloeiing. Deze neerslagafstroom naar rivieren kan op drie duidelijk onderscheiden manieren gebeuren. Het deel van de neerslag dat langs het oppervlak afstroomt, noemt men de *overland flow* (OF). Twee principes kunnen aan de basis liggen van oppervlakteafstroming.

De duur van de bui kan zo groot zijn dat de ondergrond volledig verzadigd raakt. Nieuw gevallen neerslag kan niet meer in de bodem dringen en stroomt via het oppervlak af. Anderzijds kan de intensiteit van de bui zo groot zijn dat, hoewel de bodem nog niet verzadigd is, het water niet in de structuur van de bodem kan dringen.

Wanneer de bodem niet verzadigd is, dringt een deel van de neerslag in de ondiepe ondergrond. Dit deel van de afstroming is de hypodermische afstroming of *interflow* (IF). De restfractie dringt tot diep in de bodem door en vult daar de grondwatertafel aan en zorgt zo via de grondwaterlagen voor een constante trage toevoer van neerslag naar de rivier. Dit deel noemt men de *baseflow* (BF) of grondwaterstroming.[23] Een laatste fractie van de neerslag stroomt niet terug af naar de rivier, maar verdampt. Dit deel is de actuele evaporatie. Opdat verdamping werkelijk zou plaatsvinden, moet aan twee voorwaarden voldaan zijn. De grond moet voldoende vochtig zijn en de potentiële evaporatie moet voldoende hoog zijn. Uit een volledig verzadigde grond kan niet meer vocht verdampen dan de potentiële evaporatie toelaat, en uit een droge grond kan geen water verdampen hoewel de potentiële evaporatie dit zou toelaten. Het is deze potentiële evaporatie die men als invoerreeks gebruikt en afkort als ETo.

Uit de beschrijving van de verschillende deelstromen merkt men dat deze processen zich op een verschillend tijdsverloop afspelen. Oppervlakteafstroming zal snel na een bui optreden en een hoge piek bereiken, maar zal even snel weer afgenomen zijn. Enkele uren na de bui is het debiet terug tot zijn oorspronkelijke niveau gedaald. Veranderingen in de grondwaterstroming gebeuren daarentegen slechts zeer traag. Tijdens droge periodes wordt het debiet op rivieren dus voornamelijk bepaald door dit deel van de neerslagafstroom. Voor elk van deze deelstromen kan een recessieconstante bepaald worden. Deze constante bepaalt hoe snel een deelstroom terugvalt op een fractie van zijn piekdebet. Voor neerslagafstroming langs het oppervlak ligt dit op enkele uren, voor grondwaterstroming op verscheidene maanden. De vorm waarmee piekafvoeren terugvallen naar hun oorspronkelijk debiet, heeft een exponentieel verloop. De fractie is daarom $\exp(-1) = 0.37$, dit volgt uit de vergelijking van de massabalans van een lineair reservoir model. Deze recessieconstante kan bepaald worden door middel van een numerieke filtermethode. Deze filtering is geïmplementeerd in het WetSpro-algoritme.

In dit thesisonderzoek wordt gebruikt gemaakt van twee conceptuele modellen.



FIGUUR 4.3: Schematisch overzicht van de neerslagafstroming en zijn conceptuele voorstelling[23].

Dit is het VHM-model van het departement Hydraulica van de Katholieke Universiteit Leuven en het NAM-model van de DHI-groep. Beide modellen hebben een gelijkaardige opbouw en hun parameters worden in volgende onderdelen overlopen. Het VHM-model heeft als voordeel dat tijdens het kalibreren een meer stapgewijze methode wordt doorlopen. Conceptuele modellen hebben als nadeel dat de *uniciteit* van de modelparameters niet altijd bereikt kan worden. Een modelleerder moet tijdens het kalibreren soms een keuze maken uit verschillende sets van parameterwaarden die alle de debieten goed simuleren. Bij deze keuze kan de modelleerder zich beroepen op ervaring. Om zo uniek mogelijke modelparameters te kunnen bepalen, worden de verschillende parameters best afzonderlijk bepaald aan deelreeksen die uit de totale debietreeks kunnen afgeleid worden. Om deze deelreeksen en periodes van lage en piekdebieten uit de totale debietreeks af te leiden, wordt gebruik gemaakt van WetSpro.

WetSpro

De WetSpro-tool¹[24] laat toe drie deelstromen uit de debietreeks te filteren. Het programma maakt hiervoor gebruik van een numerieke filter gebaseerd op de Chapmanfilter. De filter deelt de debietmeting op in de deelstromen op basis van het verschil in recessieconstante k van elke deelstroom. De parameter w stelt het gemiddeld percentage van het totaal debiet tot de hoogfrequente deelstroom voor (dit is de stroom met een kleine recessieconstante).

¹WetSpro: **W**ater **E**ngineering **T**ime Series **P**ROcessing tool.

Naast deze opdeling van het debiet in deelstromen, is in de WetSpro-tool een algoritme geïmplementeerd om onafhankelijke extreme gebeurtenissen in de debietreeks te onderscheiden. Deze onafhankelijke gebeurtenissen moeten minstens groter dan een minimale drempel zijn en noemt men *Peak-Over-Threshold* (POT) waarden. Het onafhankelijkheids criterium is een belangrijk gegeven bij de statistische verwerking van extreme gebeurtenissen in een tijdreeks. Het lijkt logisch te veronderstellen dat twee kort op elkaar volgende extreme gebeurtenissen een zekere afhankelijkheid tot elkaar hebben. Voor het bepalen van het voorkomen van een extreme gebeurtenis, is het noodzakelijk dat enkel onafhankelijke gebeurtenissen in beschouwing worden genomen.

In WetSpro zijn drie criteria geïmplementeerd opdat twee opeenvolgende pieken onafhankelijk van elkaar zijn. Hiervoor moet de tijd p tussen de twee pieken minstens langer zijn dan de recessieconstante k . Bovendien moet het minimale debiet tussen de twee pieken kleiner zijn dan een fractie f (bijvoorbeeld 37% genomen) van het piekdebiet. Omdat geen kleine pieken ten gevolge van meetfouten en andere invloeden geselecteerd zouden worden, moeten de pieken tevens een minimale hoogte bereiken[25], [24]. Deze criteria zijn:

$$p > k, \frac{q_{min}}{q_{max}} < f, q_{max} > q_{lim} \quad (4.1)$$

VHM

De structuur van het VHM-modelleringsysteem is zo opgebouwd dat het een meer stapsgewijze bepaling van de modelparameters toelaat. Door de volledige neerslagafstroming op te delen in verschillende deelsystemen, kan elk deelsysteem afzonderlijk geoptimaliseerd worden. Het probleem van de uniciteit van de modelparameters wordt hiermee verkleind.

Het VHM-systeem drukt de bijdrage van de neerslag tot elke deelstroom uit door middel van fracties. Op elk tijdstip t is de neerslag die bijdraagt tot bijvoorbeeld de grondwaterstroming een fractie van de totale neerslag. Het verband of functie dat de fractie bepaalt van de totale neerslagstroming, moet tijdens het kalibreren van het model bepaald worden.

De fracties van de neerslag die bijdragen tot een bepaalde deelstroom, worden vervolgens door lineaire reservoir modellen gerout. Voor het routen van de deelstromen wordt gebruik gemaakt van de recessieconstanten van de filtering in deelstromen. Dit zijn de parameters k_b voor de grondwaterstroming, k_i voor de hypodermische en k_o voor de oppervlakteafstroming.

De componentenstructuur van het VHM-model is gelijkaardig aan de verschillende basissystemen waarlangs neerslag afstroomt. Het VHM-systeem bestaat uit een oppervlaktereservoir (soil moisture storage). Dit reservoir drukt de neerslagberging

aan het oppervlak uit. De berging wordt sterk bepaald door het relatieve vochtgehalte van het oppervlak. Deze ogenblikkelijke verhouding wordt uitgedrukt als $\frac{u}{u_{max}}$. De maximale u_{max} - en de initiële u_{init} -waarde moeten worden bepaald. De fractie van de neerslag die aan het oppervlak kan geborgen worden, daalt naarmate de relatieve grondvochtigheid toeneemt. Het verband tussen de fractie van de neerslag die bijdraagt tot oppervlakteberging en de relatieve vochtigheid wordt lineair gekozen. Voor dit lineair verband moeten slechts twee parameters bepaald worden, namelijk a en b . Daarnaast kan uit deze zone ook neerslag verdampen. De actuele ETo kan afgeleid worden als een fractie van de potentiële ETo. Hiervoor dient parameter u_{evap} bepaald te worden.

Het modelsysteem bepaalt in een daaropvolgende stap de fractie van de neerslag die bijdraagt tot de afstroom langs de oppervlakte. Deze fractie stijgt naarmate de grondvochtigheid groter is en de tijd tot de vorige bui klein is. De parameters c_1 tot c_4 moeten bepaald worden samen met de parameter die aangeeft in welke mate recente neerslagbuien nog een invloed hebben. Op gelijkaardige wijze kan de fractie bepaald worden die bijdraagt tot de hypodermische afstroom. De restfractie voegt zich bij het grondwater.

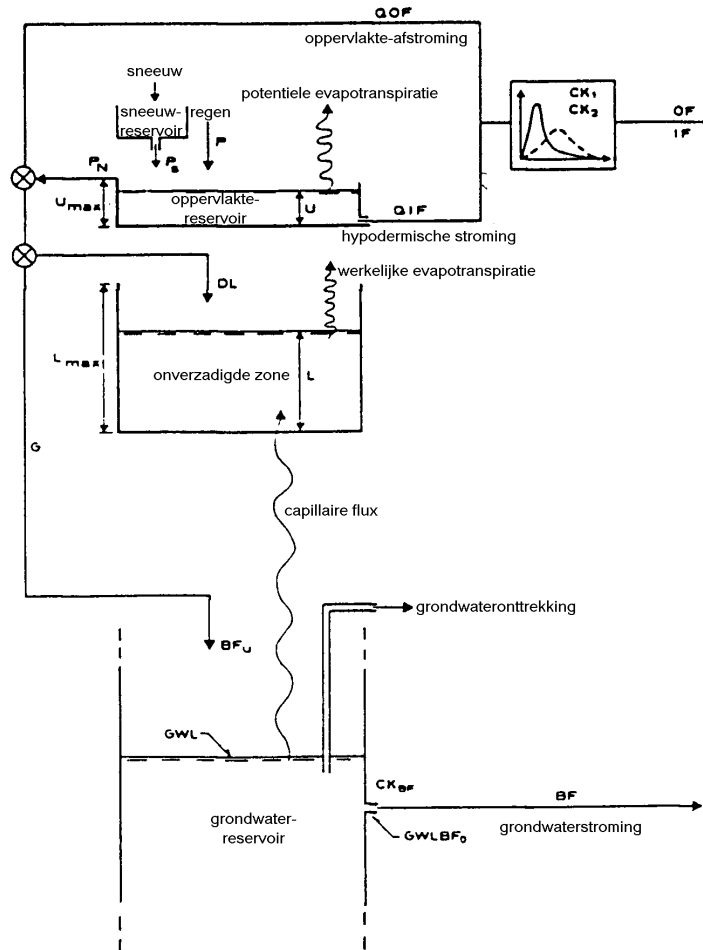
Uit de filtering in deelstromen van het opgemeten debiet kunnen ook fracties afgeleid worden. Elk van deze fracties kan vergeleken worden met de gemodelleerde (gecalibreerde) deelfracties. Ten gevolge van onzekerheden op de neerslag- en ETo-invoer kan een grote spreiding ontstaan wanneer elke individuele tijdstap wordt geanalyseerd. Daarom wordt met gemiddelde waarden gewerkt voor periodes van hoge en lage afvoer[26].

Uit de beschrijving van de modelstructuur en parameters kan men besluiten dat het VHM-modelstructuur zo eenvoudig mogelijk dient gehouden te worden. Het globale model wordt opgedeeld in deelmodelstructuren. Binnen deze structuren worden de parameters afzonderlijk gecalculeerd aan deelverzamelingen, afgeleid via filteringstechnieken uit de debietmeting (opdeling met WetSpro in deelstromen en periodes). De fracties voor elk van deze deelmodellen drukken uit hoe de totale neerslag bijdraagt tot een deelstroom. Om de onzekerheid op de invoergegevens te verkleinen, worden de fracties niet voor elk tijdstip berekend maar gemiddeld voor elke deelperiode. Om de neerslagbijdrages van de verschillende fracties om te zetten naar een debiet, worden ze door lineaire reservoir modellen gerout[26].

NAM

De structuur van het NAM-model wordt schematisch in figuur 4.4 weergegeven. De modelstructuur bestaat uit drie reservoirs. Deze reservoirs komen overeen met de hoger beschreven basisonderdelen van neerslagafstroming, namelijk een berging aan de oppervlakte, in de onverzadigde zone en een grondwaterreservoir. De routing van de stromen gebeurt voor de oppervlakkige afstroming en de hypodermische stroming door twee lineaire reservoirmodellen in serie te beschouwen. De grondwaterstroming

wordt gerout door één lineair reservoir. In het NAM-model kunnen extra bergingsvolumes en een grondwaterontrekking ingevoerd worden, maar hiervan wordt geen gebruik gemaakt.



FIGUUR 4.4: Schematisch overzicht NAM modelstructuur[6]

Op het schema zijn de verschillende modelparameters te zien die bij het opstellen van het NAM-model gecalibreerd dienen te worden.

- U_{max} (mm) drukt de maximale vochtinhoud van het oppervlaktereservoir uit. Het is een maat voor de hoeveelheid neerslag die de oppervlakte en de vegetatie kunnen ophouden. Pas indien $\frac{U}{U_{max}} \geq 1$ kan infiltratie naar de bodem en afstroming over het oppervlak plaatsvinden.
- L_{max} (mm) is de maximale vochtinhoud in de onverzadigde zone beschikbaar voor evaporatie door planten. Een actuele evapotranspiratie uit de onverzadigde

zone is evenredig met de verhouding $\frac{L}{L_{max}}$. De verhouding stelt de ogenblikkelijke vochtigheid voor. Een lage verhouding zorgt voor veel infiltratie naar de onverzadigde zone. Een hoge waarde laat een grote oppervlakteafstroming of een grote afstroom naar de grondwatertafel toe.

- *CQOF* (-) is een afvloeiingcoëfficiënt die de verhouding van de neerslag aangeeft die oppervlakkig afstroomt indien de bodem volledig verzadigd zou zijn. De invloed van voorgaande buien en de hiermee samenhangende vochtigheid van de bodem wordt in rekening gebracht door $\frac{U}{U_{max}}$ en $\frac{L}{L_{max}}$.
- TIF, TOF en TG (-) zijn drempelwaarden die uitdrukken dat respectievelijk de hypodermische, oppervlakkige of grondwaterstroming pas kunnen optreden nadat de relatieve vochtigheid deze drempel overschreden heeft.
- CKIF (uur) is de recessieconstante van de interflow of hypodermische stroming. Deze parameter wordt bepaald uit de WetSpro-filtering en wordt nadien slechts beperkt aangepast.
- CKBF (uur) is de recessieconstante van de grondwaterstroming. De parameter wordt op eenzelfde manier als CKIF bepaald.
- CK12(uur) is analoog aan CKIF en CKBF, maar voor de afstroom over de oppervlakte. De parameter is de helft van de tijdconstante van de oppervlakteafstroming.

Uit de opsomming kan men besluiten dat er zes parameters gecalibreerd dienen te worden. De recessieconstanten van de deelstromen worden uit de WetSpro-filtering overgenomen. Voor het afijken van het NAM-model wordt gebruik gemaakt van een algoritme geïmplementeerd door het WL, dat toelaat snel de verschillende parameters tijdens het kalibreren te vergelijken met een bepaalde deelset van de debietreeks. Deze deelreeksen zijn de laag- en hoogwaterdebieten en de verschillende cumulatieve debieten van de deelstromen. De gecalibreerde modelparameters worden nadien ingegeven in de NAM-implementatie in het MIKE11-pakket van DHI voor de eigenlijke simulatie van de neerslagafstroming. Binnen dit MIKE11-pakket zit een hydrologische module verwerkt. De hydrodynamische module wordt hieronder verder verduidelijkt[27],[6].

4.2.3 Hydrodynamische modellering

Voor de hydrodynamische modellering wordt gebruik gemaakt van *MIKE11*. De modelleringsoftware werd ontwikkeld door het Deense DHI Water & Environment. Het model berekent in een discreet aantal punten de waterstand en het debiet. Hiervoor lost het programma via een eindige differentiemethode de St.-Venant vergelijkingen op. De St.-Venant vergelijkingen zijn de continuïteitsvergelijkingen (behoud van massa) en vergelijking van momentum (behoud van beweging).

Hierbij worden zowel externe als interne randvoorwaarden in rekening gebracht. Externe randvoorwaarden zijn aan de randen van het netwerk opgelegde waterhoogten of debieten al dan niet in functie van de tijd. Interne randvoorwaarden leggen bepaalde voorwaarden aan knopen in het netwerk op. Dit kan bijvoorbeeld een stuw, pomp, of een ander kunstwerk zijn op de waterloop.

Belangrijk bij de opbouw van het model zijn het ingeven van de dwarssecties. Deze volgen uit topografische opmetingen van de rivierbeddingen. De natte doorsnede en de ruwheidsfactor zijn de twee belangrijke factoren die bepaald dienen te worden.[\[27\]](#)

4.3 Besluit

In dit hoofdstuk werd een overzicht gegeven van de werkwijze om tot de klimaatimpactanalyse voor debietreeksen te komen. De verschillende stappen werden systematisch overlopen zoals ze in volgende hoofdstukken uitgevoerd worden. In het tweede deel van dit hoofdstuk werd uitleg gegeven over de gebruikte algoritmes en software die het uitvoeren van de impactanalyse mogelijk maken. Er werd aandacht besteed aan de twee conceptuele modellen NAM en VHM.

Hoofdstuk 5

Hydrologische modellering

In dit hoofdstuk wordt een nieuw hydrologisch model voor het bekken Bossuit opgesteld. De data die hiervoor beschikbaar waren, waren te beperkt om dit correct te kunnen doen. Extra data werden opgevraagd en verwerkt. De debietreeks van Bossuit werd aangepast zodat deze een meer natuurlijke neerslagafstroom voorstelt. Twee conceptuele modellen worden aan deze meetreeks afgeijkt. In het laatste onderdeel worden de resultaten van beide modellen vergeleken met de (gewijzigde) debietreeks van Bossuit.

5.1 Databeschikbaarheid

Voor het opstellen van de conceptuele modellen zijn verschillende soorten meetdata nodig. Deze data laten toe het model af te ijken aan de huidige meteorologische condities. Voor de hydrologische modellering zijn gegevens van neerslag en evaporatie nodig. Deze vormen de invoervariabelen van het model. Als uitvoer wordt een debietreeks gegenereerd. Deze debieten worden dan vergeleken met de debietreeks voor eenzelfde periode als de periode van de invoerreeksen.

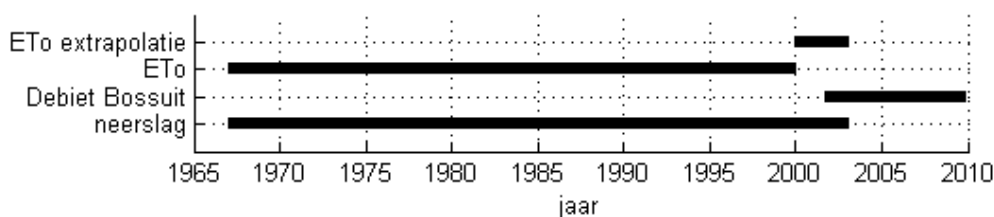
5.1.1 Oorspronkelijke situatie

Het beschikbare NAM-model werd opgesteld in 2005 door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid. Dit gebeurde in het kader van de opmaak van het hydrologische en hydraulische model voor Bovenschelde, kanaal Gent-Terneuzen en kanaal Gent-Oostende[6].

Het model werd afgeijkt aan de debietmeting van Bossuit, zie paragraaf 5.1.2. Deze meting werd opgestart in het najaar van 2001 en gebeurt via een ADM (Acoustic Doppler Meter). Een neerslagreeks voor het bekken Bossuit was beschikbaar tot eind 2002, evaporatiegegevens tot 1999. Om modellering mogelijk te maken, was deze ETo-reeks geëxtrapoleerd tot 2002 aan de hand van gemiddelde waarden tussen 1967 en 1999. Dit gaf een overlap van slechts anderhalf jaar waarop het model werd afgeijkt.[6] Anderhalf jaar is zeer kort voor het kalibreren van modellen voor

laagwaterdebieten, omdat er per jaar maar enkele droge periodes voorkomen.

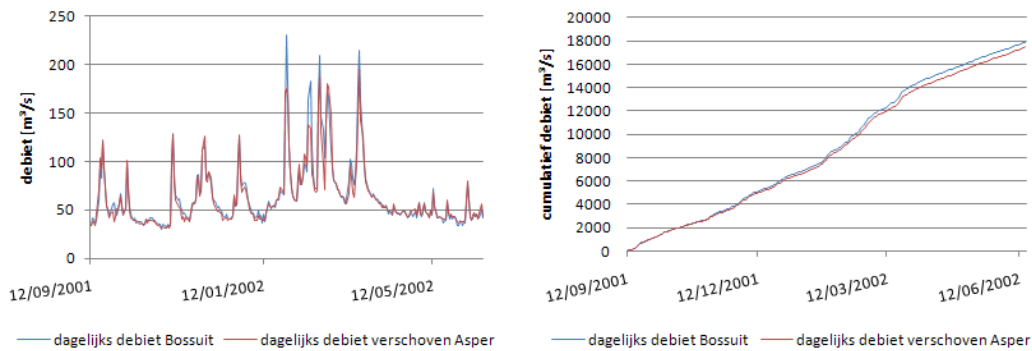
De oorspronkelijke neerslagreeks voor het bekken Bossuit werd opgesteld aan de hand van verscheidene pluviografen van MétéoFrance en SETHY. Dit zijn respectievelijk de Franse meteorologische en Waalse hydrologische studiedienst. De gebruikte ETo-reeks was deze van Melle. Na de studie is gebleken dat de geëxtrapoleerde waarden de werkelijke evaporatie vanaf 2001 onderschatten en zo een vertekening gaven in de waterbalans van de neerslagafstroming[6]. Op figuur 5.1 is de oorspronkelijke overlapping tussen de verschillende beschikbare gegevens bij het begin van deze studie voorgesteld.



FIGUUR 5.1: Oorspronkelijke meetreeksen

Bij de aanvang van dit thesisonderzoek werd getracht de overlap tussen de reeksen te vergroten door gebruik te maken van de debietmeting van Asper. Voor dit debietmeetstation waren data beschikbaar tussen januari 1988 tot juni 2002. Dit geeft anderhalf jaar overlap met de reeks van Bossuit. Het meetstation van Asper ligt 35 km stroomafwaarts op de Bovenschelde van het debietstation van Bossuit. Dit geeft een zekere verschuiving in de tijd tussen beide meetstations. Enkele zijrivieren monden op dit stuk uit in de Bovenschelde, zodat het debiet ook wat verhoogd werd. Dit kon opgevangen worden door de debietreeks van Asper enkele uren te verschuiven en te herschalen. Voor de negen maanden overlap (tussen september 2001 en juni 2002) werd hiervoor bij een verschuiving van 3 uur en een herschalingsfactor van 0.77 een goede overeenkomst met de debietmeting van Bossuit bekomen. Deze periode is in figuur 5.2 weergegeven. Een hydrologisch model, dat in het eerste deel van dit thesisonderzoek werd opgesteld voor het bekken Bossuit, werd afgeijkt aan deze verschoven gemiddelde Asperreeks.

Halverwege het onderzoek kwamen recente meteorologische gegevens beschikbaar, zodat de invoerreeksen van het hydrologisch model bijgewerkt konden worden en op deze manier een lange overlap met de debietmeting van Bossuit bereikt werd. Nieuwe hydrologische modellen werden opgesteld aan de hand van de nieuwe data en vergeleken met de echte debietmeting van Bossuit. Uit de resultaten van de simulaties met deze modellen bleek dat de laagwaterextremen van Bossuit sterk kunnen afwijken van de opgemeten extremen in de debietreeks van Asper (zie paragraaf 5.3.2).



FIGUUR 5.2: Vergelijking tussen de debietmeting van Bossuit en de verschoven en herschaalde Aspermeting op dagelijkse basis

Van de werkwijze waarbij gebruik werd gemaakt van de debietreeks van Asper, werd afgestapt in het verdere verloop van de studie. De debietreeks van Bossuit, stroomafwaarts van het bekken Bossuit, is het meest geschikt voor het opstellen van de hydrologische modellen en wordt hieronder besproken. De uitbreiding van de neerslag en ETo-reeks wordt in de daarop volgende onderdelen besproken.

5.1.2 Debietreeks Bossuit

Eind 2001 werd het meetstation te Bossuit in gebruik genomen. Dit station meet het debiet op uurlijkse basis via een *ADM* (Acoustic Doppler Measurement). Gevalideerde debietmetingen zijn beschikbaar van 2001 tot eind 2009. Dit levert voor een periode van acht jaar uurlijkse debieten op die in het onderzoek zullen gebruikt worden. De neerslag en evaporatiereeksen werden verder uitgebreid voor eenzelfde periode. Dit wordt in onderdeel 5.1.3 en 5.1.4 beschreven.

Het debiet op de Bovenschelde wordt, net als op vele Europese rivieren, op zijn loop sterk beïnvloed door allerlei menselijke factoren. Zo veroorzaken stuwen en sluizen sterke schommelingen van de debieten, en laten pieken ontstaan die geen hydrologische oorsprong hebben. Lage debieten op de rivier kunnen sterk verlaagd worden door de waterbevoorrading van kanalen. Piekdebieten kunnen verhoogd worden doordat via een kanaal water uit andere rivieren wordt aangebracht. Ook tijdens periodes van normaal debiet transporteren kanalen water tussen verschillende stroomgebieden. In vele gevallen streeft men ernaar het waterpeil op rivieren zo constant mogelijk te houden door water op te houden of door te laten aan de stuwen. Deze maatregelen zijn belangrijk voor de scheepvaart. Dit zorgt ervoor dat er weinig wel omschreven richtlijnen voor deze debietingrepen zijn en dat ze moeilijk in rekening te brengen zijn.

Bij het modelleren van hydrologische afvoer voor piekdebieten, met als doel

overstromingsrisico in te schatten, zijn deze stuwen opgetrokken en beïnvloeden ze de natuurlijke afstroming niet. Bovendien maken de artificiële invloeden slechts fracties uit van het totale piekdebiet. Hierdoor is hun verstoring minimaal en kan de hydrologische modellering aan deze reeks geijkt worden en in tweede instantie de klimaatimpact doorgerekend worden. Bij laagwaterimpact daarentegen hebben deze artificiële verstoringen een zeer grote invloed op het debiet. Het debiet schommelt zeer sterk gedurende de dag en bovendien verlaagt men deze laagwaterdebieten om kanalen te voorzien van water.

Voor een waarheidsgetrouwe impactberekening van de klimaatverandering is het belangrijk dat het hydrologisch model afgeijkt wordt aan de natuurlijke afstroom uit het stroomgebied. De klimaatverandering vertaalt zich in een gewijzigd neerslag- en evaporatiepatroon, en middels een hydrologisch model kan de invloed op de neerslagafstroming in rekening gebracht worden. Het afijken van het model moet dus gebeuren aan een debietreeks die zo min mogelijk verstoord wordt door menselijke invloed¹ op de debietmeting. In het andere geval zouden bepaalde gebeurtenissen in de debietmeetreeks gelinkt worden aan hydrologische omstandigheden die zich niet hebben voorgedaan.

Om dit aspect te minimaliseren, wordt de debietreeks van Bossuit eerst geanalyseerd. Hierbij zal de focus op de laagwatertoestand liggen. Het analyseren gebeurt op twee manieren. Van de debietafname voor de bevoorrading van enkele kanalen in Noord-Frankrijk is informatie beschikbaar bij het Waterbouwkundig Laboratorium. Uit deze informatie kan een schatting gemaakt worden van deze debieten. Daarnaast kan de meetreeks ook empirisch bestudeerd worden en bepaalde patronen kunnen zo blootgelegd worden.

Bevoorrading kanalen Noord-Frankrijk

Het kanaal Denain-Duinkerke wordt nabij Denain gevoed met water uit de Bovenschelde. De Scarpe dwarst dit kanaal, en het debiet uit dit opwaartse deel komt in dit kanaal terecht. Bij laagwater wordt er $4.2m^3/s$ uit de Schelde in het kanaal gepompt; bij normale debieten wordt er slechts $2m^3/s$ aan het Scheldebekken onttrokken. Bij hoogwater wordt de Leie ontlast door $5m^3/s$ à $10m^3/s$ via het kanaal naar de Schelde te voeren, dit afhankelijk van de situatie op de Bovenschelde en Scarpe[6]. De vermelde rivieren en kanalen zijn weergegeven in figuur 3.1 van hoofdstuk 3.

Als conclusie kan dan gegeven worden dat te Bossuit de hydrologische afvoer volgende debieten zou geven:

$$LW: Q_{Bossuit} + 4.2m^3/s$$

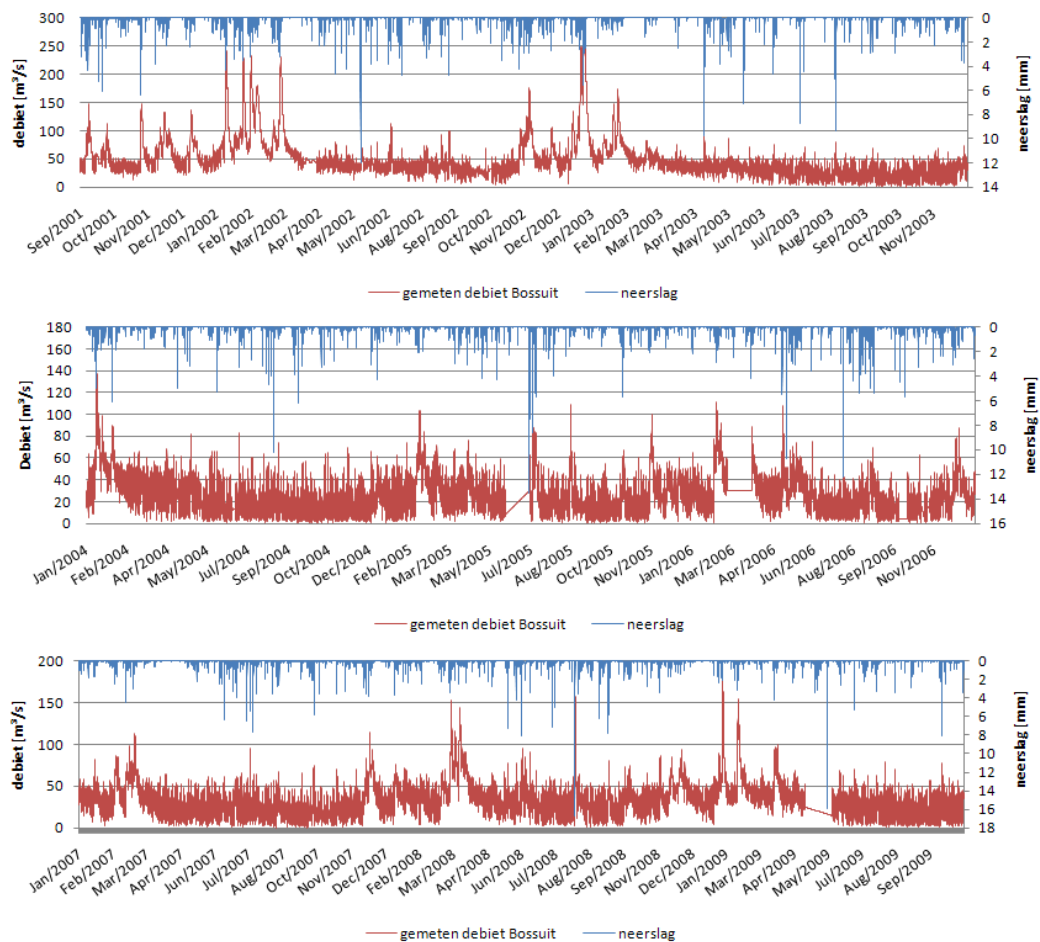
¹Met deze menselijke invloeden worden specifiek wijzigingen op het debiet bedoeld zoals deze door kanalen, stuwen en sluizen. De neerslagafstroming wordt ook beïnvloed door het landgebruik, verhardingen, bewoning en grondwaterverbruik in het bekken. Deze invloeden zijn meer indirect en zitten inherent vervat in de debietmeetreeks waaraan het model afgeijkt wordt. Deze factoren kunnen niet anders dan constant verondersteld worden wanneer men klimaatverandering wilt doorrekenen via deze modellen.

NW: $Q_{Bossuit} + 2m^3/s$

HW: $Q_{Bossuit} - 5m^3/s$ tot $10m^3/s$

Gedetailleerde analyse van de debietreeks

De debietreeks van Bossuit wordt weergegeven in figuur 5.3. Op deze figuur is de spreiding van de debietmeting voor laag debiet te zien. Dit is echter geen ruis op de meting, maar het wordt veroorzaakt door stuwwerking. In deze reeks worden vijf periodes van lage afvoer onderscheiden, figuur 5.4, en vijf periodes van hoge tot zeer hoge afvoer, figuur 5.5. Elke periode is een tiental dagen lang.



FIGUUR 5.3: Opgemeten debietreeks van Bossuit

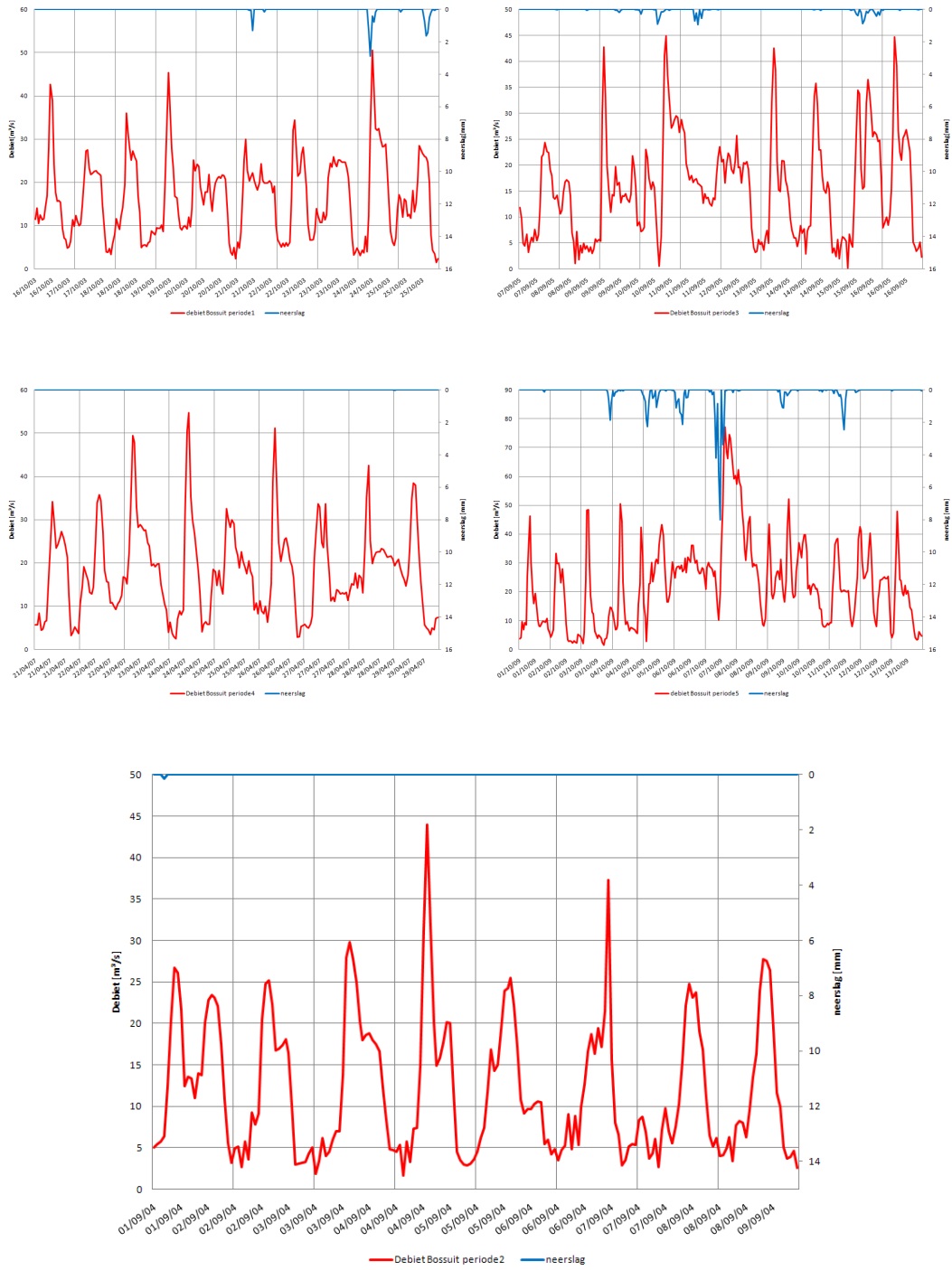
Voor de **periode met lage afvoer** zijn volgende conclusies te trekken:

- Het minimale debiet schommelt rond $5m^3/s$ op uurlijkse basis.
- Elke 24 uur vindt er een piek plaats, meestal in de namiddag.
- De piek is gemiddeld gezien $30m^3/s$ hoger dan dit minimale debiet.
- Het gemiddelde debiet in een droge periode is daarom groter dan dit zeer lage dal in het debiet van $5m^3/s$. Het schommelt tussen $10m^3/s$ en $15m^3/s$.
- Door de neerslag kan een tweede piek per dag ontstaan, die de bestaande piek vergroot, of de basis van de piek verbreedt. Hierdoor wordt het moeilijk het natuurlijke van het artificiële deel van de piek te onderscheiden.

Hierbij dienen enkele opmerkingen gemaakt te worden. Soms krijgt men een verstoring van de schommelingen zonder dat er neerslag is opgemeten. Dit kan te wijten zijn aan neerslag die niet registreerd werd door het (beperkte) aantal pluviografen of door een wijziging aan de sluizen of stuwen.

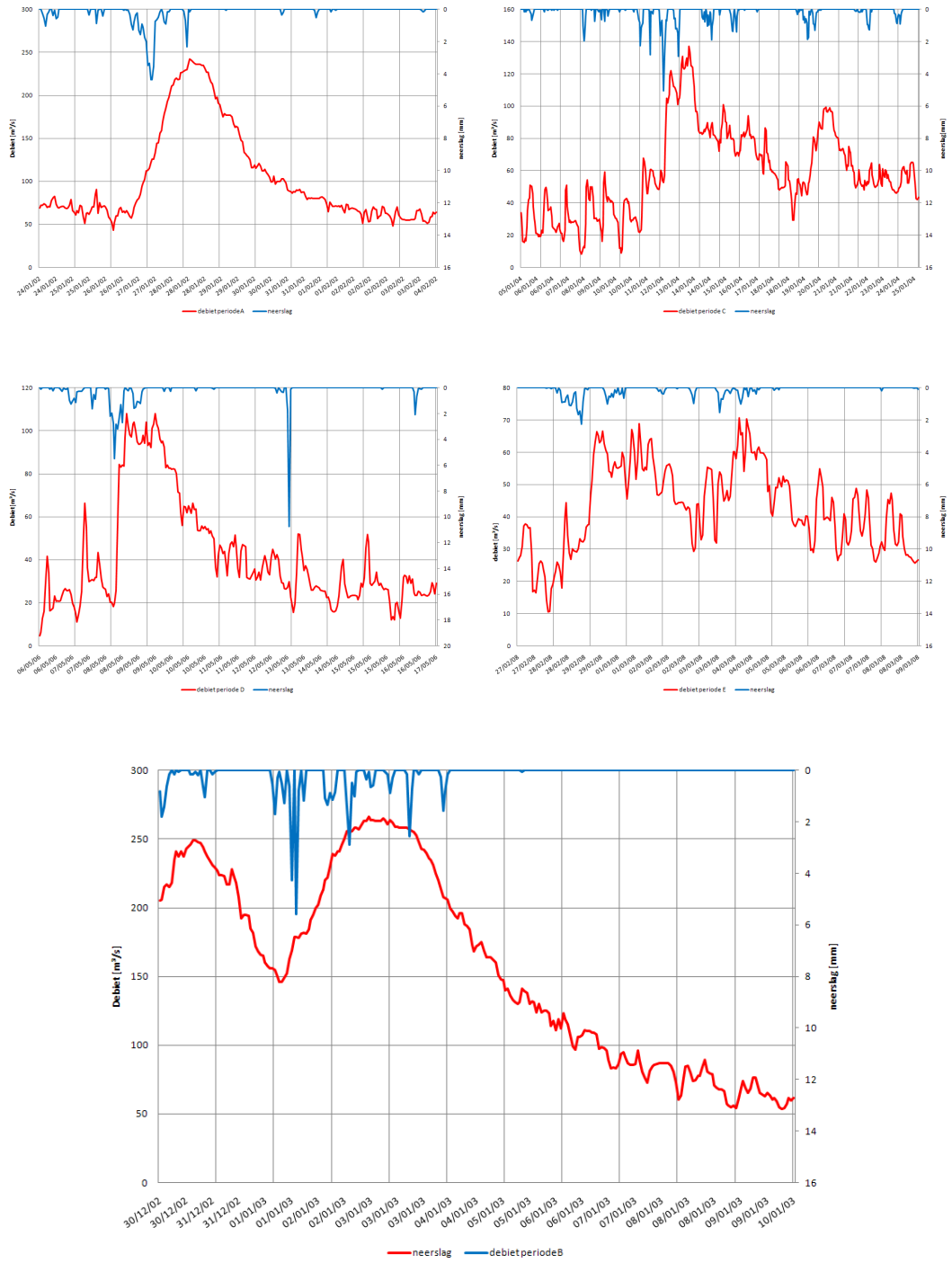
Als conclusie kan gesteld worden dat debiet wordt opgehouden door een stuw of sluis, waarna het gedurende de namiddag wordt geloosd en zo een dagelijkse schommeling genereert. Het opgemeten minimale debiet in droge periodes is $5m^3/s$. Het minimale debiet wordt altijd gevolgd door een periodieke piek, zodat het gemiddelde dagelijkse debiet zich tussen $10m^3/s$ en $15m^3/s$ situeert tijdens droge periodes. Neerslag kan deze periodieke schommeling echter verstoren, en het is moeilijk de artificiële van de hydrologische piek te onderscheiden.

5.1. Databeschikbaarheid



FIGUUR 5.4: Detailweergave van droge periodes in de debietreeks van Bossuit

5. HYDROLOGISCHE MODELLERING



FIGUUR 5.5: Detailweergave van natte periodes in de debietreeks van Bossuit

Werkwijze debiet

Teneinde een waarheidsgetrouwe impactberekening van de klimaatverandering langs hydrologische modellen uit te voeren, moet het opgemeten debiet omgevormd worden tot een meer natuurlijke reeks. Zoniet kan geen betrouwbaar hydrologisch model worden opgesteld. Het opgemeten laagwater gedurende enkele uren per dag is immers slechts ontstaan door een stuwwerking en heeft geen hydrologische oorzaak.

Er wordt een natuurlijke debietreeks voor modellering opgesteld. Het debiet dat door de kanalen ontnomen wordt, wordt terug toegevoegd. Laagwatertoestand werd gekozen als de toestand waarbij het gemiddelde dagelijkse debiet kleiner wordt dan $15m^3/s$. Op uurlijkse basis schommelt het debiet immers zo sterk dat zelfs tijdens droge periodes, gedurende enkele uren per dag, de meting pieken vertoont tot meer dan $40m^3/s$. Bij dit laagwaterdebiet wordt $4.2m^3/s$ bijgeteld. Het normaal debiet wordt daggemiddeld bepaald tussen $15m^3/s$ en $65m^3/s$ en verhoogd met $2m^3/s$. Dat bij hoge debieten water uit het stroomgebied van de Leie naar de Schelde wordt gevoerd, wordt niet in rekening gebracht. Men voert deze maatregel immers niet altijd uit, en bovendien is de relatieve invloed op het piekdebiet kleiner (slechts enkele procenten), $5m^3/s$ à $10m^3/s$ op piekdebieten boven gemiddelde debieten van $150m^3/s$. Bij laagwater daarentegen zorgt de aanpassing voor een verhoging van het laagwaterdebiet met minimaal een kwart van het totale debiet.

Om de uurlijkse fluctuaties ten gevolge van menselijke ingrepen op het debiet weg te werken, werd beslist het hydrologisch model af te ijken aan de daggemiddelde debietreeks, die bovendien verhoogd is met het debiet ontnomen door de kanalen. Dit zorgt ervoor dat de lage debieten, die bepaald worden door de grondwaterafstroom, en dus op uurlijks vlak slechts zeer beperkt variëren, correcter gemodelleerd kunnen worden. Deze aanpak heeft als nadeel dat de piekafvoeren, die zich op enkele uren afspelen, op deze manier mee uitgevlakt worden. Maar men kan bedenken dat de hoogte van de piekafvoer die juist samenvalt met het piekdebiet ten gevolge van de menselijke invloed sterk vergroot kan worden. Men is hierdoor niet zeker van de werkelijke natuurlijke hoogte van een neerslagpiek in de debietreeks. Bovendien worden zeer sterke pieken in de debietreeks zoals beschreven mogelijk vergroot door aangevoerd debiet uit het stroombekken van de Leie.

5.1.3 Neerslag

Neerslagreeksen vormen samen met de evaporatiereeksen de twee meteorologische invoervariabelen voor de hydrologische modellering. De beschikbare thiessenneerslagreeks liep tot 2002. Voor uitbreiding van de reeks waren de neerslagreeksen van verschillende Franse en Waalse stations in het stroomgebied van de Bovenschelde in het bekken Bossuit beschikbaar bij het WL. Voor Frankrijk waren deze data afkomstig van Meteofrance. De neerslagdata in Wallonië zijn opgemeten door Sethy². De stations die beschikbaar waren en een bijdrage leveren aan het bekken Bossuit

²Sethy - Service d'Etudes Hydrologiques. Dit is de hydrologische studiedienst van Wallonië.

zijn opgelijst in tabel 5.1.

LambertX72	LambertY72	station naam	%	km ²	bron
117741	91664	St-Hilaire-Sur-Helpe	5	270	M
84630	112299	Valenciennes	38	1992	M
42918	107292	Arras	28	1471	M
52821	162069	Comines Barrage-Ecluse	1	37	S
94190	156345	Dergneau	1	69	S
124958	153851	Enghien	2	98	S
79541	146851	Kain	13	703	S
144130	133202	Seneffe	3	163	S
134411	110966	Solre S/S Bar-Ecluse	8	423	S

TABEL 5.1: Lambert-coördinaten, naam station, procentuele en absolute Thiessen-bijdrages van de stations van MeteoFrance (M) en Sethy (S)

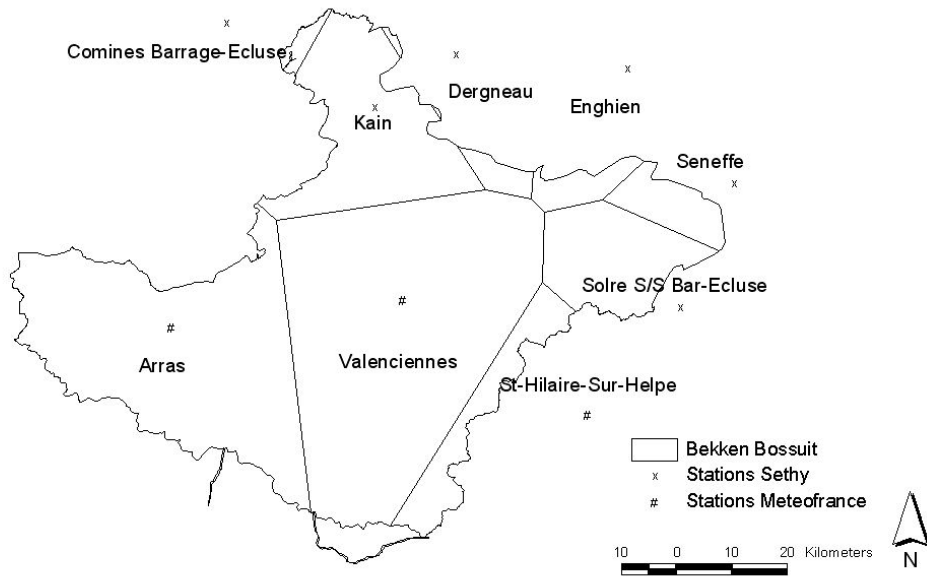
station	start	eind	vacante posities
Comines Barrage-Ecluse	18 – 08 – 2003	11 – 01 – 2010	60.40%
Dergneau	18 – 08 – 2003	11 – 01 – 2010	59.80%
Enghien	18 – 08 – 2003	11 – 01 – 2010	59.61%
Kain	18 – 08 – 2003	11 – 01 – 2010	59.97%
Seneffe	21 – 12 – 2005	11 – 01 – 2010	63.61%
Solre S/S Bar-Ecluse	21 – 12 – 2005	11 – 01 – 2010	64.12%

TABEL 5.2: Analyse Sethy neerslagreeksen

De meetdata van pluviografen van Sethy bleken zeer recente meetdata, later dan 2005, te bevatten. Bijkomend bleken in de neerslagreeksen van Sethy zeer veel meetwaarden te ontbreken, tot 60% van de tijdstippen had geen overeenkomstige neerslagwaarde, zie tabel 5.2. Ook hun bijdrage via de Thiessencoëfficiënten aan de totale neerslagreeks bedroeg slechts enkele procenten, zie tabel 5.1 en figuur 5.6. Enkel de reeks van *Kain* en deze van *Solre S/S Bar-Ecluse*, die respectievelijk in het noordelijke deel en het oostelijke deel van het bekken gelegen is, kan een interessante meerwaarde betekenen. De verschillende reeksen konden elkaar echter niet aanvullen, daar zij op dezelfde tijdstippen geen waarden vertoonden. Er werd beslist niet met deze reeksen te werken. Voor de Thiessenanalyse wordt er slechts met de drie Franse stations gewerkt. Deze Thiessenanalyse is in de tekst hieronder weergegeven.

Thiessencoëfficiënten

Elk van deze drie Franse pluviografen leveren hun bijdrage aan de globale neerslagreeks volgens hun Thiessencoëfficiënten. De Thiessenmethode laat toe de gewichtsfactoren van elke neerslagreeks te bepalen, zodat elk positie in het bekken zo dicht mogelijk bij één van de drie stations ligt.



FIGUUR 5.6: Grafische voorstelling van de Thiessenverdeling in Noord-Franse stroombekken van de Bovenschelde voor alle pluviografen



FIGUUR 5.7: Neerslagreeksen Meteofrance

De Thiessenfactoren voor de twee stations Arras en Valenciennes zijn gegeven in tabel 5.3. In tabel 5.4 zijn de drie stations meegenomen. De Thiessenverdeling is grafisch weergegeven in 5.8.

Station	Procentueel	Oppervlakte
Valenciennes	72	3748
Arras	28	1479
totaal	100	5227

TABEL 5.3: Thiessenfactoren voor 2 stations

Station	Procentueel	Oppervlakte
St-Hilaire-Sur-Helpe	16	826
Valenciennes	56	2921
Arras	28	1478
totaal	100	5225

TABEL 5.4: Thiessenfactoren voor 3 stations



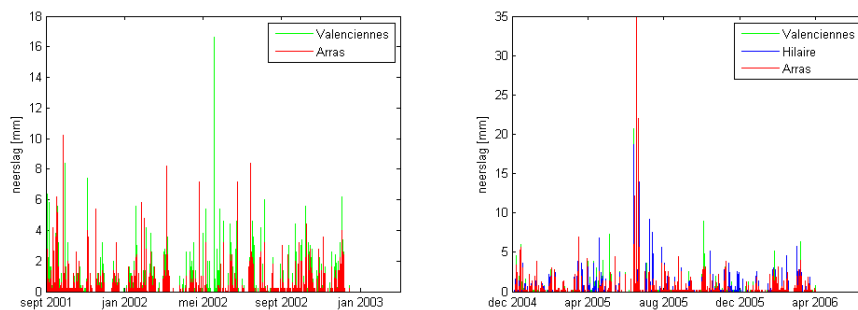
FIGUUR 5.8: Thiessenverdelingen

Voor elk tijdstip wordt de neerslag in het stroombekken opgebouwd uit de procentuele bijdrages volgens de overeenkomstige Thiessenfactoren van elke neerslagreeks of in formulevorm:

$$r(t)_{bekken} = r(t)_{Val} * f_{THval} + r(t)_{St-Hil} * f_{THhil} + r(t)_{Arr} * f_{THarr}$$

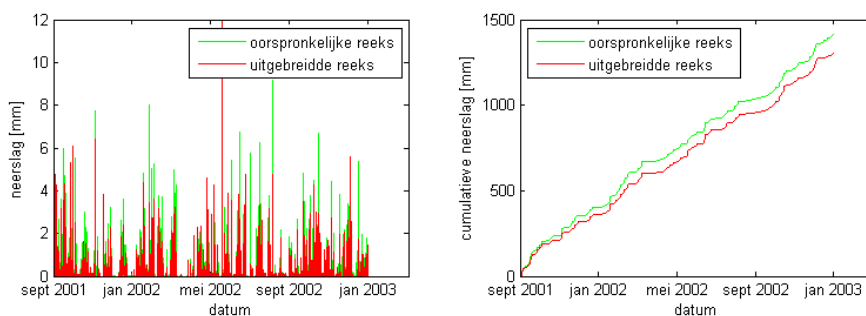
Controle

De individuele neerslagreeksen kunnen gecontroleerd worden op hun consistentie. Dit houdt in dat de reeksen op ongeveer dezelfde tijdstippen regenval moeten aangeven. Natuurlijk is een zekere geografische spreiding mogelijk en kunnen de neerslaghoeveelheid en het tijdstip licht verschillen. De controle gebeurt grafisch en is te zien op volgende figuur 5.9.



FIGUUR 5.9: Controle van de drie neerslagreeksen van Météofrance voor bekken Bossuit

Daarnaast kan de nieuwe totale neerslagreeks voor het bekken vergeleken worden met de beschikbare neerslagreeks. Deze reeksen overlappen van september 2001 tot en met januari 2003. Op figuur 5.10 is deze overlappende periode zowel grafisch in de tijd als cumulatief uitgebeeld.



FIGUUR 5.10: Vergelijking tussen de oorspronkelijke en uitgebreide Thiessenneerslagreeks voor bekken Bossuit

Uit beide grafische plots kan besloten worden dat de nieuw aangemaakte en bestaande neerslagreeks elkaar volgen. Het valt op dat de beschikbare reeks iets hogere neerslagintensiteiten vertoont. Dit verklaart de afwijking op de cumulatieve plot. Individuele stations krijgen soms een correctiefactor, dit zou de afwijking tussen beide reeksen kunnen verklaren. Zodoende kan besloten worden dat men nu beschikt over een voldoende betrouwbare neerslagreeks van 2001 tot en met 2010.

5.1.4 Evaporatiereeks

Voor de evapotranspiratiegegevens is de ruimtelijke variatie beperkter in vergelijking met deze van de neerslag. Zowel de meetreeks van Melle (nabij Gent) als deze van Ukkel kan gebruikt worden. De meetreeks van Melle is tot eind 2005 beschikbaar.

Deze meetreeks tot 2005 bevestigt de onderschatting van de in het beschikbare NAM-model gebruikte reeks waarbij de evaporatie vanaf 2001 aangevuld werd met gemiddelde waarden van de voorbije 30 jaar. Analyse van de reeks toont de laatste jaren een gemiddelde stijging, zie figuur 5.11.

Voor de periode na 2005 wordt gebruik gemaakt van de meetreeks van het KNMI van Vlissingen. Deze opgemeten ETo-data worden echter niet rechtstreeks toegepast zoals deze opgemeten door het KMI. De data van Vlissingen overlappen gedurende 40 jaar met de reeks van Melle. Uit de vergelijking van beide reeksen blijkt dat ze elkaars trend goed volgen, zodat voor de periode na 2005, waarvoor de reeks van Melle nog niet beschikbaar is, gebruik kan gemaakt worden van de reeks van Vlissingen.

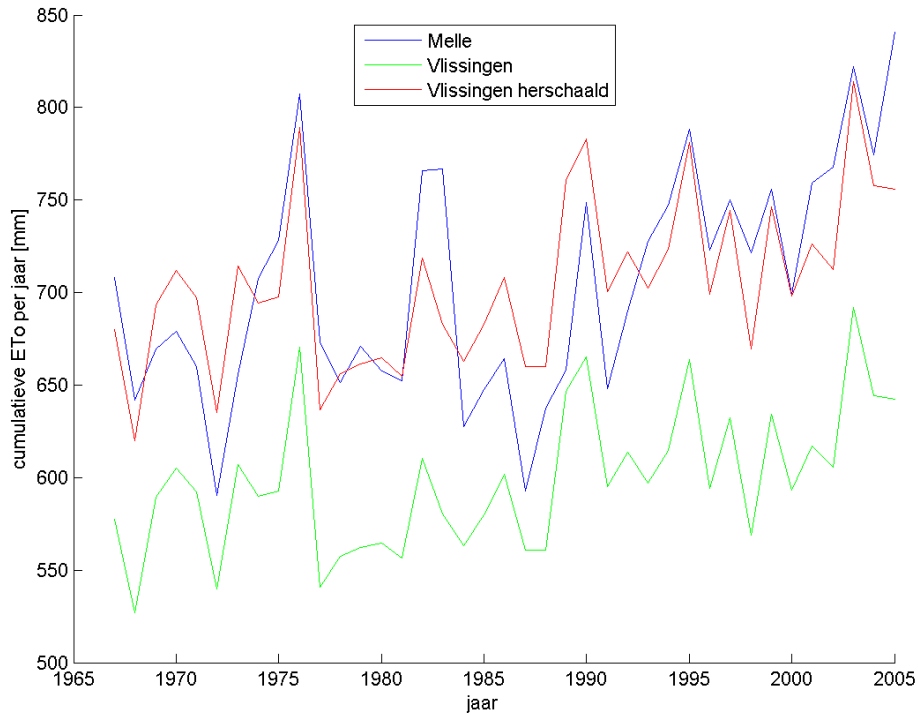
ETo Vlissingen

De evapotranspiratiereeks van Vlissingen werd op dagelijkse basis opgemeten door het KNMI. Deze data zijn vrij beschikbaar³. Het KNMI geeft de evapotranspiratiewaarden voor Vlissingen mee als potentiële Makkink evapotranspiratie en weergegeven op 0.1mm. Dit houdt in dat de evaporatie opgemeten wordt volgens de Makkink methode[28]. De waarden kunnen vergeleken worden met de reeks van Melle voor een overlappende periode van 40 jaar. Figuur 5.11 geeft deze vergelijking voor jaarlijkse cumulatieven, figuur 5.12 toont twee kortere periodes op dagelijkse basis. Zowel op dagelijkse als jaarbasis blijken de evapotranspiratiemetingen elkaar te volgen. Om de reeks van Melle uit te breiden met de metingen van Vlissingen, zal een schalingsfactor afgeleid worden voor de reeks van Vlissingen. Op die manier zullen de reeksen elkaar maximaal benaderen.

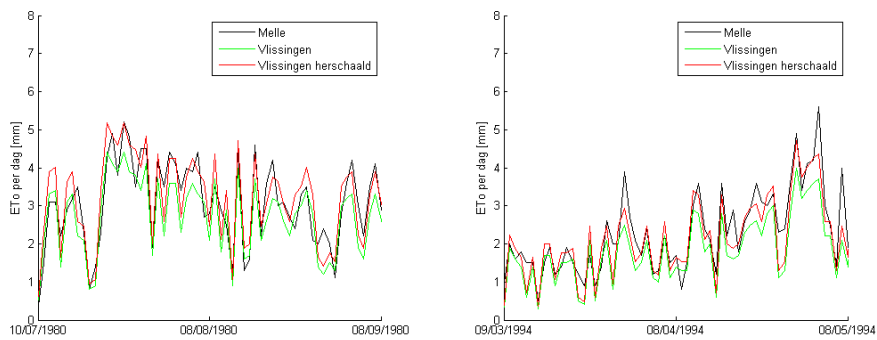
De schalingsfactor kan berekend worden als:

$$f = \frac{\sum_{1965}^{2005} ET_{O_{Melle}}}{\sum_{1965}^{2005} ET_{O_{Vlissingen}}}$$

³Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)



FIGUUR 5.11: Jaarlijkse vergelijking van de ET0-reeks Melle, Vlissingen en de herschaalde reeks van Vlissingen



FIGUUR 5.12: Vergelijking ET0-reeksen op dagelijkse basis voor twee korte periodes

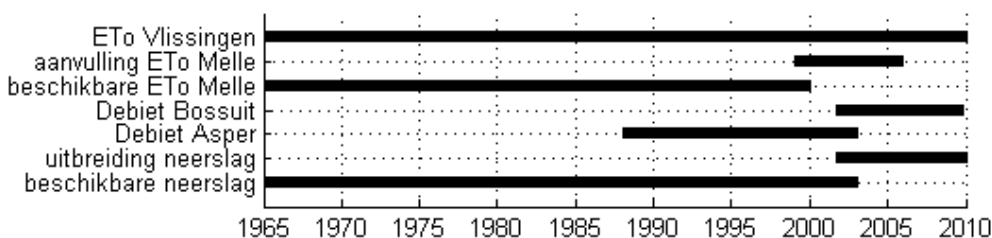
Dit geeft als factor: 1.1768. De reeks van Melle kan dan na 2005 uitgebreid worden als:

$$ETo_{Melle}(dag) = f \cdot ETo_{Vlissingen}$$

Een continue ETo-reeks tot 2009 kan op deze manier bekomen worden.

5.1.5 Besluit databeschikbaarheid

In deze paragraaf werden data besproken die beschikbaar waren bij aanvang van dit thesisonderzoek. Duidelijk was dat de oorspronkelijke overlap tussen de verschillende beschikbare gegevensreeksen (neerslag, ETo en debietreeks) te beperkt was voor het opstellen van een hydrologisch model dat in staat is de laagwatertoestand correct weer te geven. Nieuwe reeksen werden opgesteld, zodat samenvattend volgende figuur 5.13 bekomen wordt. Met de uitgebreide reeksen wordt een overlap van 8 jaar bekomen waaraan het hydrologische model kan opgesteld worden.



FIGUUR 5.13: Beschikbare en aangevulde data

5.2 Opbouw hydrologisch model

In dit onderdeel worden de twee conceptuele modellen besproken die de neerslag-afstroming in het bekken Bossuit zullen voorstellen. Aandacht zal besteed worden aan de laagwatertoestand tijdens zeer droge periodes. De kalibratie gebeurt op basis van de gewijzigde dagelijks gemiddelde debietmeting van Bossuit over de periode van 2001 tot en met 2009.

5.2.1 Deelstromen en selectie POT

De debietmeting van Bossuit wordt met behulp van WetSpro-tool opgedeeld in deelstromen. Deze deelstromen zijn de *baseflow* (BF), de *interflow* (IF) en de *overlandflow* (OF). Voor elk van deze stromen worden de recessieconstante en parameter w bepaald.

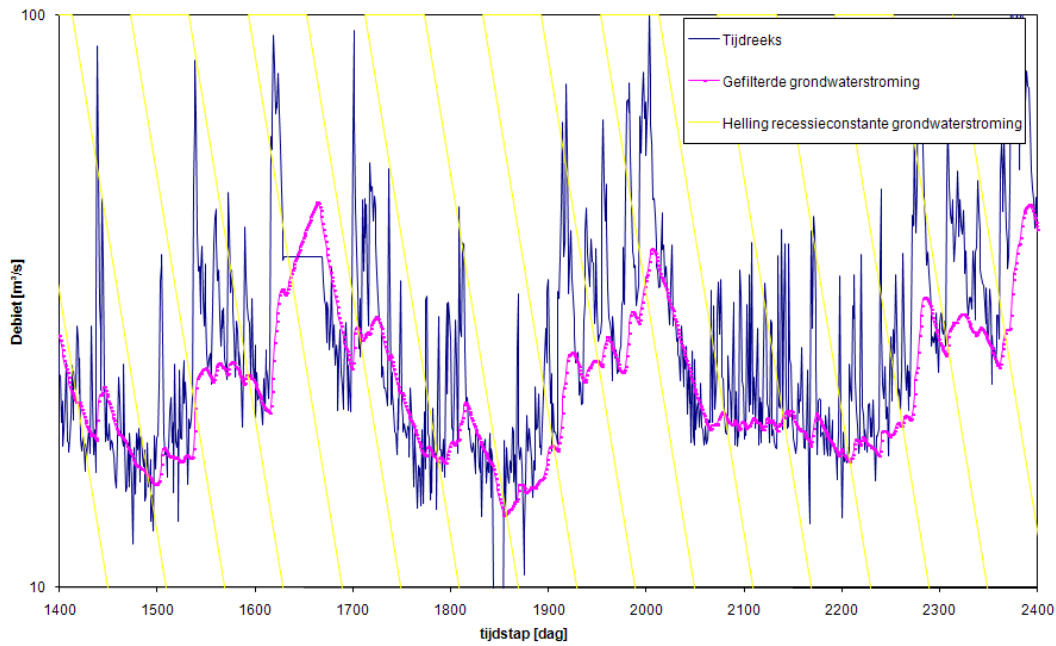
Tijdens de analyse bleek dat gedurende periodes van droogte het debiet op de Bovenschelde niet exponentieel naar nul daalt, maar na een zekere tijd tot een constant debiet afvlakt. Dit constante debiet werd tijdens de analyse op $5m^3/s$

bepaald. Dit constante debiet wordt bij de baseflow filtering opgeteld. Er wordt geen gebruik gemaakt van de constante in WetSpro, omdat dit mogelijk in bepaalde gevallen slechte resultaten zou geven.

De gekalibreerde filterparameters zijn weergegeven in tabel 5.5. Op figuur 5.16 is het resultaat van de filtering weergegeven. De verschillende deelstromen zijn voor de baseflow op figuur 5.14 en voor de interflow op figuur 5.15 weergegeven.

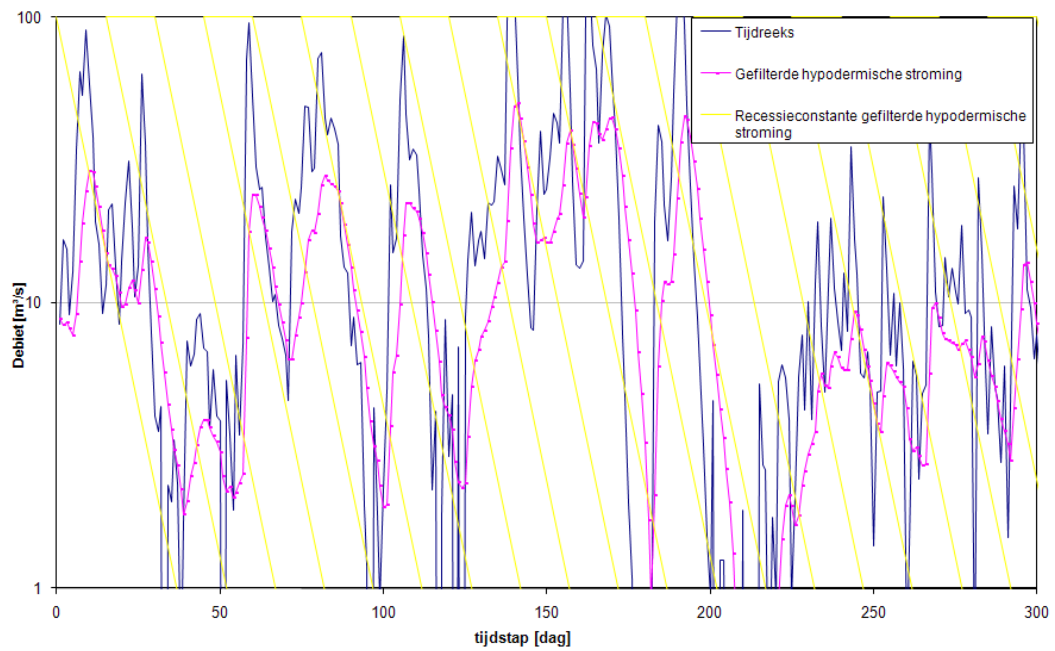
	k_{dagen}	w_{-}
BF	41.7	0.4
IF	8	0.43
OF	0.5	—

TABEL 5.5: Parameters opdeling in deelstromen

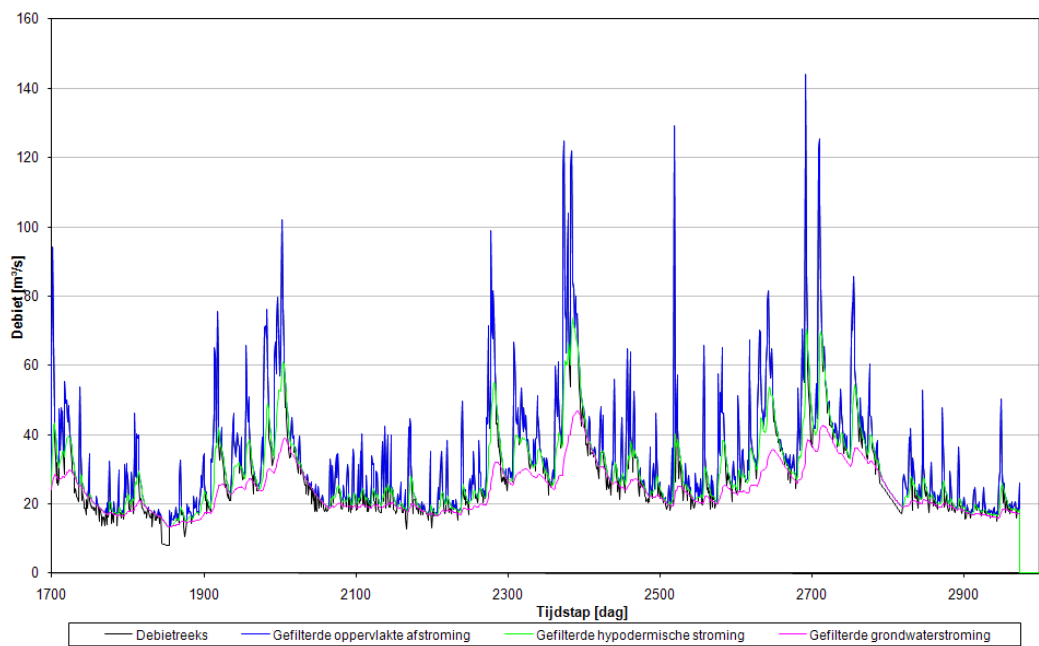


FIGUUR 5.14: Grondwaterstroming van de filtering in deelstromen.

5. HYDROLOGISCHE MODELLERING



FIGUUR 5.15: Hypodermische stroming van de filtering in deelstromen.

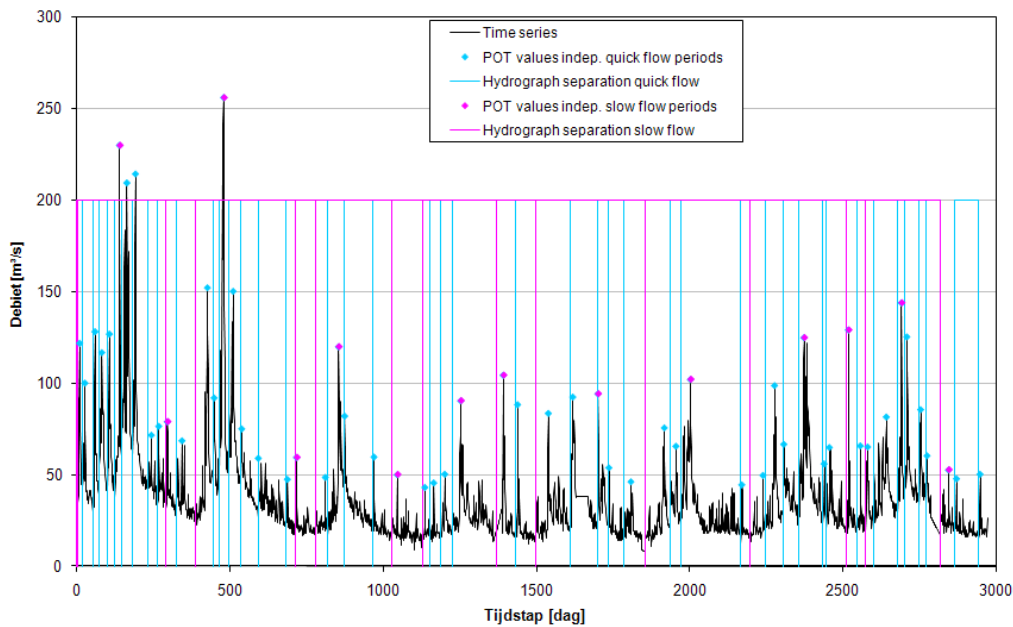


FIGUUR 5.16: Resultaat van de filtering in deelstromen voor de periode mei 2006 tot november 2009.

In tabel 5.6 zijn de waarden voor de onafhankelijkheidscriteria van de extreme gebeurtenissen weergegeven. Hierdoor kan de tijdreeks opgedeeld worden in onafhankelijke periodes van snelle en trage afstroming. Figuur 5.17 geeft het resultaat voor de periode van 2001 tot 2009. Deze lange periode heeft het voordeel dat er verscheidene droge periodes bepaald kunnen worden. Dit vergroot de statistische betrouwbaarheid van de bekomen resultaten.

	Quick Flow	Slow Flow
f	0.5	0.5
p	16d	120d
q_{lim}	25	25

TABEL 5.6: POT selectie waarden



FIGUUR 5.17: Resultaat POT selectie

5.2.2 NAM-modellering

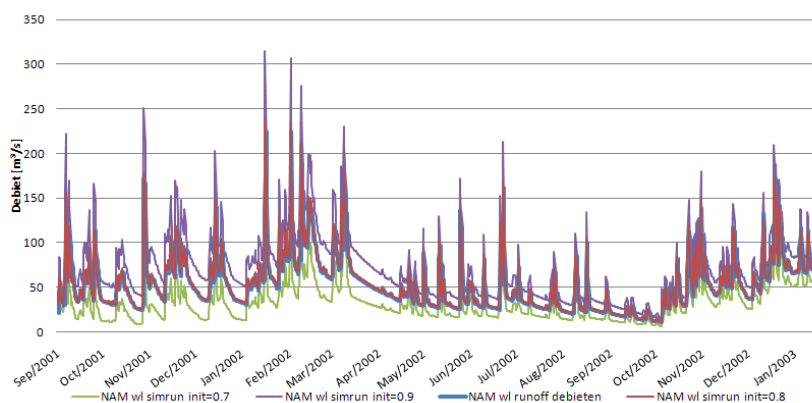
Beschikbaar NAM-model

Het beschikbare NAM-model[6] werd afgeijkt voor een periode van 2001 tot 2003. Voor deze periode werden modelparameters gevonden die zijn weergegeven in tabel 5.7.

Parameter	Waarde
U_{max}	4mm
L_{max}	3000mm
$CQIF$	0.15(-)
$CKIF$	180u
$CK12$	8u
TOF	0.6(-)
TIF	0.5(-)
$CKBF$	1200u
TG	0.7(-)

TABEL 5.7: Modelparameters voor het oorspronkelijke NAM-model

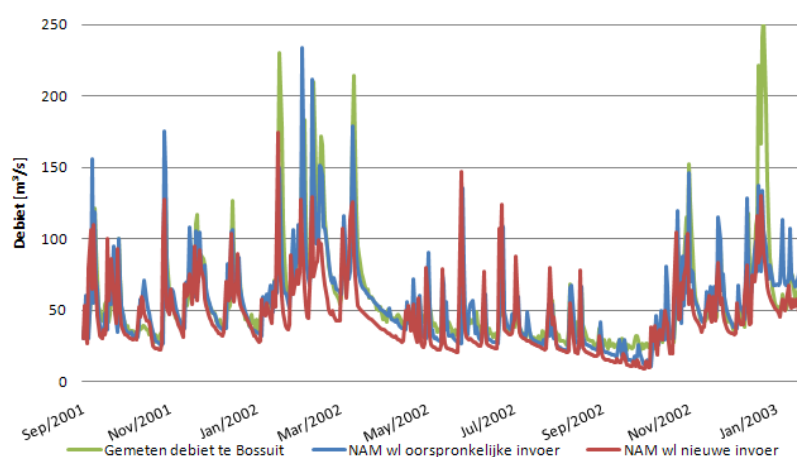
Modelresultaten voor deze periode zijn weergegeven in figuur 5.18. Op deze figuur is te merken dat verschillende beginvoorwaarden voor $\frac{u}{u_{max}}$ en $\frac{L}{L_{max}}$ sterk verschillende resultaten voor de kalibratieperiode geven, maar dat voor goed gekozen beginvoorwaarden wel een sterke overeenkomst bereikt wordt.



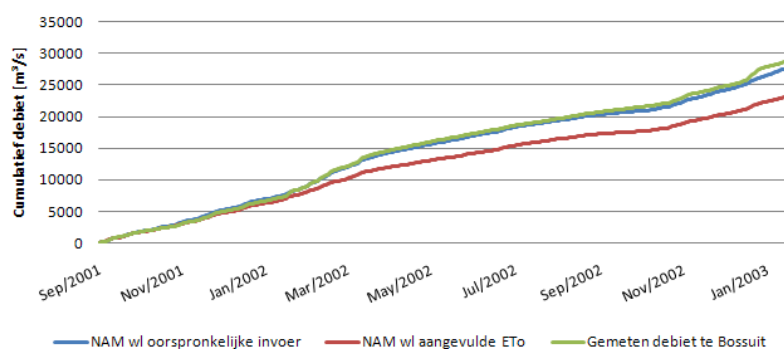
FIGUUR 5.18: Simulatieresultaten voor drie verschillende begincondities. De resultaten worden vergeleken met de beschikbare simulatieresultaten.

Het model werd opgebouwd met gemiddelde evaporatiedata, waarbij op het moment van opbouw nog geen evaporatiedata beschikbaar waren voor de periode

2001-2003. Deze evaporatiedata onderschatten echter de werkelijke waarden[6]. Nu de ETo-reeks van Melle wel beschikbaar is, kan de invloed van dit verschil in ETo-waarden bekeken worden. Dit is gebeurd op figuur 5.19 en de debieten zijn cumulatief uitgezet op figuur 5.20. Het model met geëxtrapoleerde ETo-waarden zorgde voor een onderschatting van de debieten. Het geeft een afwijking op de waterbalans van 16 procent. Deze afwijking verklaart echter niet de sterke afwijking die tijdens de simulaties met dit model werd vastgesteld. In paragraaf 5.3.1 van dit hoofdstuk wordt het NAM-model voor een langere periode doorgerekend (aan de hand van de uitgebreide data). Uit de resultaten van deze analyse blijkt dat het beschikbare NAM-model[6] onvoldoende de werkelijke toestand benadert. Dit is tevens wat vermeld werd in 2009[5].



FIGUUR 5.19: Invloed geëxtrapoleerde (gemiddelde) ETo-waarden



FIGUUR 5.20: Vergelijking van het cumulatieve debiet van de meetreeks, NAMresultaat met gemiddelde ETo en NAM-resultaat met gemeten ETo-data.

NAM-model

Een NAM-model werd opnieuw gekalibreerd. De kalibratie gebeurde voor de volledige periode waarvoor de debietmeting van Bossuit beschikbaar was. Dit was van september 2001 tot en met december 2009. Er werd gebruik gemaakt van een kalibratie-tool van het WL, waardoor het mogelijk werd snel de verschillende parameters te kalibreren aan de verschillende deelreeksen en gebeurtenissen uit de debietreeks. De kalibratie gebeurde op basis van de uurlijkse gewijzigde debietreeks van Bossuit, omdat het niet mogelijk bleek met een dagelijkse invoer te werken. Dit heeft als nadeel dat laagwaterextremen overschat moesten worden. De uurlijkse tijdschaal onderschat het werkelijke laagwater immers door de menselijke invloed. In de uurlijkse tijdreeks werd het debiet dat in het Noord-Franse kanalenstelsel wordt gepompt, wel in rekening gebracht.

Model parameter	Waarde
Opslag	
U_{max}	0.5mm
L_{max}	1000mm
Runoff parameters	
CQOF	0.25
CKIF	200h
CK1,2	10h
TOF	0.3
TIF	0.01
Grondwater(GW)	
TG	0.01
CKBF	1200h

TABEL 5.8: Modelparameters voor NAM-model

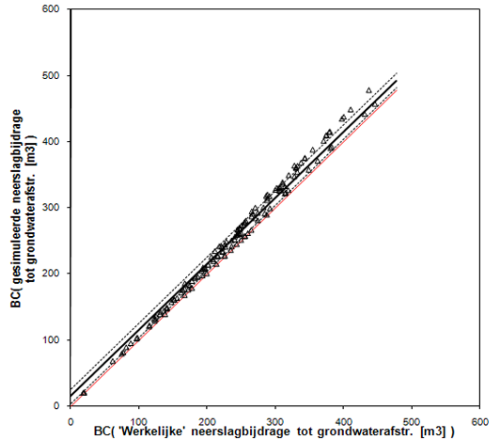
Nadat deze uurlijkse kalibratie voltooid was, werden de parameters doorgerekend op basis van de dagelijkse invoer, waarna de modelresultaten - laagwater in het bijzonder - gevalideerd werden en de parameters manueel verder verfijnd werden. De finale parameters zijn weergegeven in tabel 5.8.

Op figuren 5.21 tot en met 5.27 zijn de figuren van kalibratie weergegeven. Tijdens het opstellen van het model bleek het moeilijk zowel voldoende aandacht te besteden aan de hypodermische afstroming alsook aan het niet onderschatten van de laagwaterdebieten. De parameter U_{max} moest zeer laag genomen worden. Dit omwille van het correct modelleren van laagwaterafvoer. Normale waarden voor deze parameter liggen tussen 4 en 10mm. Bij deze normale waarden bleek het niet te lukken voldoende water voor de grondwaterstroom over te houden.

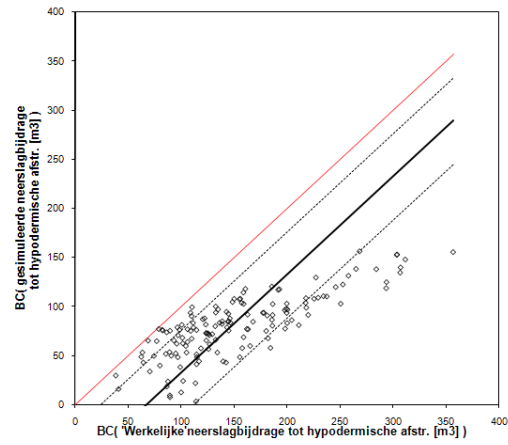
Op de figuren blijkt tevens dat voor deze periode basisafvoeren en oppervlakteafstroming goed benaderd worden, terwijl de hypodermische afvoer sterk onderschat

5.2. Opbouw hydrologisch model

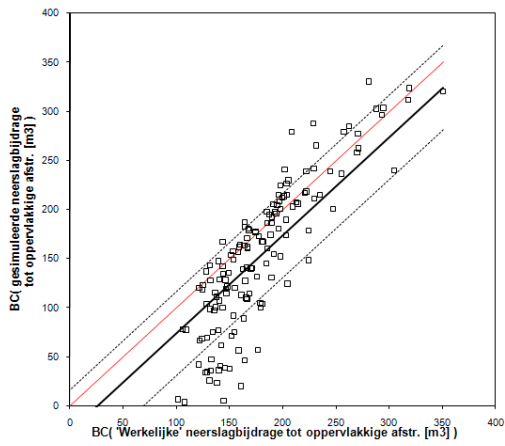
wordt. Extreme debieten worden ook correct benaderd. De resultaten van dit model worden verder besproken en gevalideerd in onderdeel 5.3.



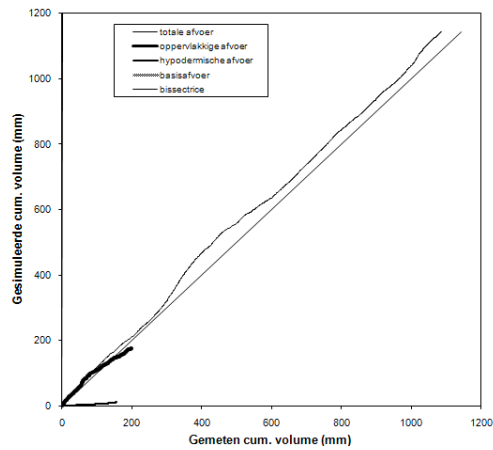
FIGUUR 5.21: Grondwaterstroming



FIGUUR 5.22: Hypodermische stroming

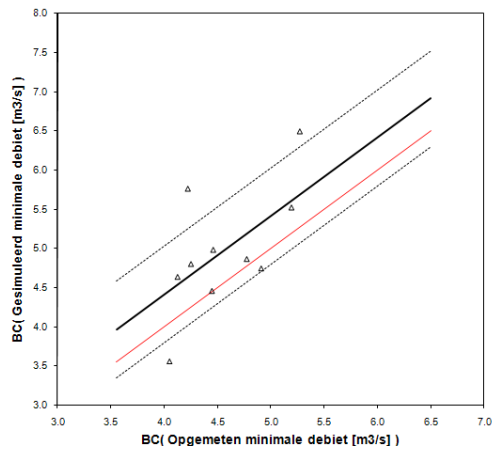


FIGUUR 5.23: Oppervlakteafstroming

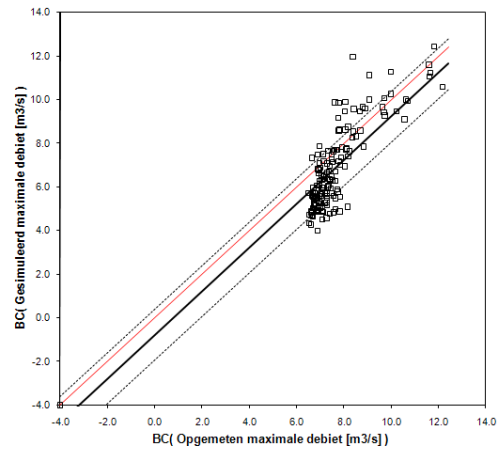


FIGUUR 5.24: Deelstromen

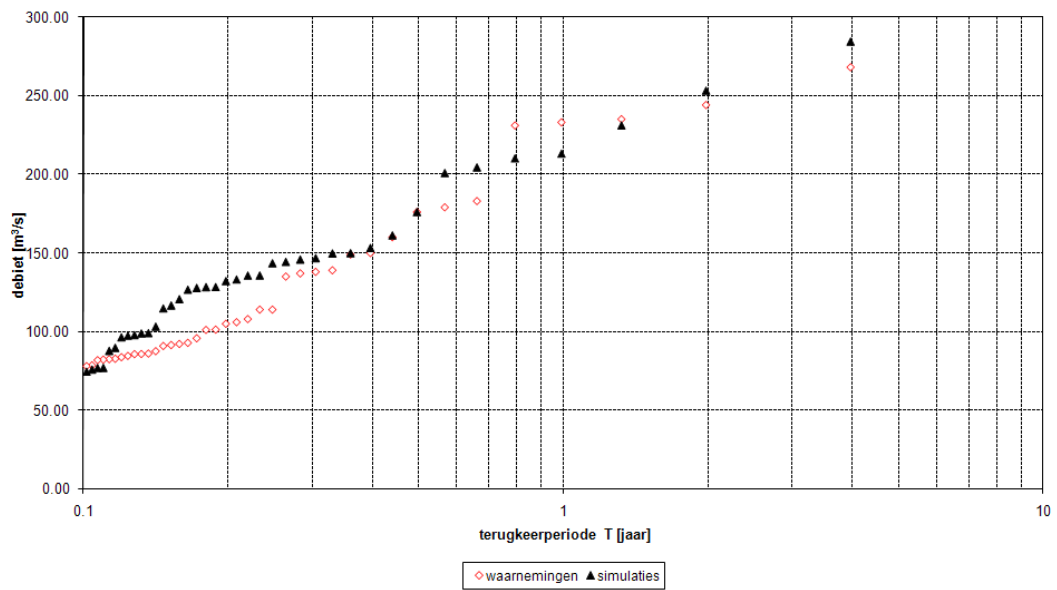
5. HYDROLOGISCHE MODELLELING



FIGUUR 5.25: Minimale debieten



FIGUUR 5.26: Maximale debieten



FIGUUR 5.27: Vergelijking extreme waarden van de gesimuleerde met de geobserveerde hoogwaterafvoer

5.2.3 VHM-modellering

De waarden na kalibratie van de modelparameters zijn weergegeven in tabel 5.9.

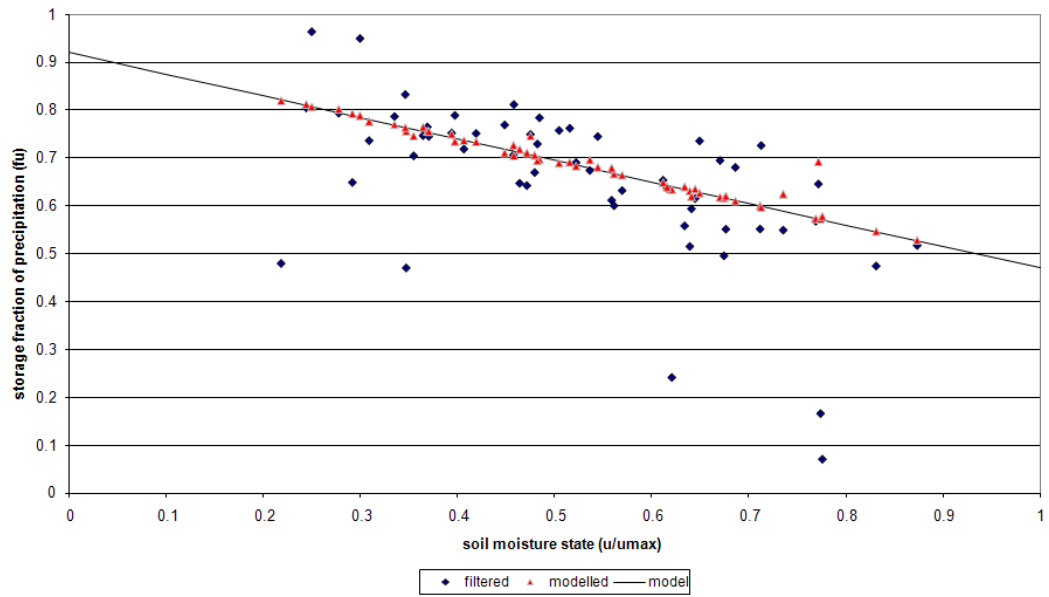
Model parameter	Waarde
Flow routing	
k_{OF}	$0.5d$
k_{IF}	$8d$
k_{SF}	$45d$
Storage model	
u_{max}	$350mm$
u_{evap}	$220mm$
u_{init}	$150mm$
c_1	0.92
c_2	0.45
OF model	
c_1	-4.7
c_2	2.8
antecedent day	$1d$
c_3	-1
c_4	0.5
IF model	
c_1	-5.8
c_2	5
c_3	0
c_4	0

TABEL 5.9: VHM-modelparameter na kalibratie

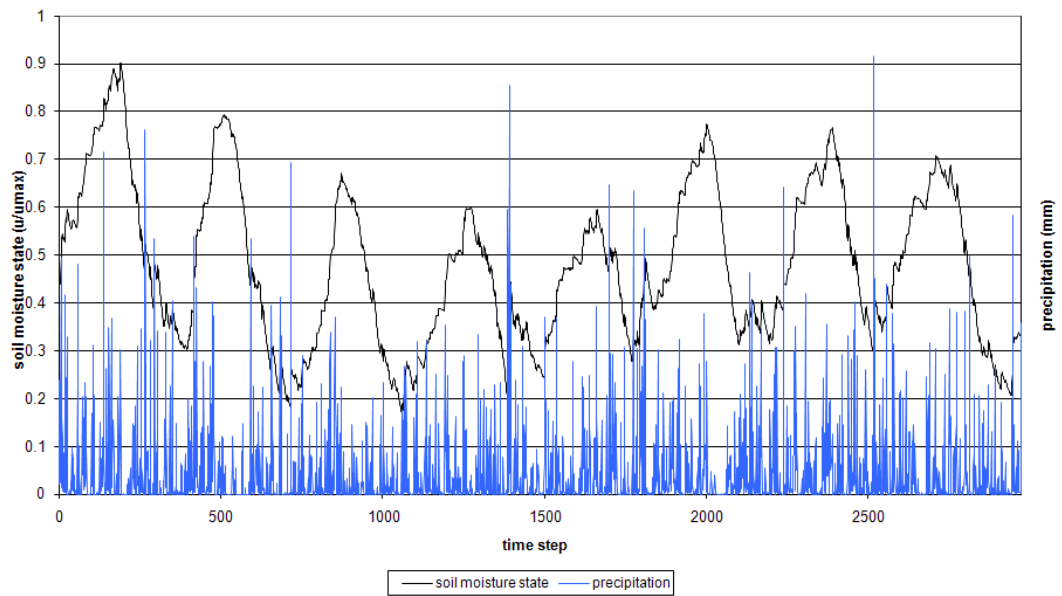
In de eerste stap wordt de berging aan het oppervlak (soil-moisture model) gekalibreerd. Een lineair verband tussen de grondvochtigheid en de bijdrage tot berging aan de oppervlakte (storage fraction) blijkt goed de gefilterde fracties te volgen, zie figuur 5.28. Er zijn wel enkele uitschieters. Uit deze figuur kunnen de parameters u_{max} , c_1 en c_2 bepaald worden. De initiële conditie u_{init} wordt op figuur 5.29 bepaald. De grondvochtigheid mag geen stijgende of dalende trend vertonen over de verschillende jaren. Op de figuur ziet men dat voor de gekozen beginwaarden er wel enkele natte en droge jaren zijn, maar dat deze geen trend vertonen.

Uit de berging aan de oppervlakte kan ook neerslag verdampen indien er voldoende evaporatie mogelijk is. Op dezelfde figuur 5.29 wordt de waarde van u_{evap} bepaald, zodat de oppervlakteberging (soil moisture state) nooit groter wordt dan 1.

5. HYDROLOGISCHE MODELLELING



FIGUUR 5.28: Fractie die bijdraagt tot berging aan het oppervlak

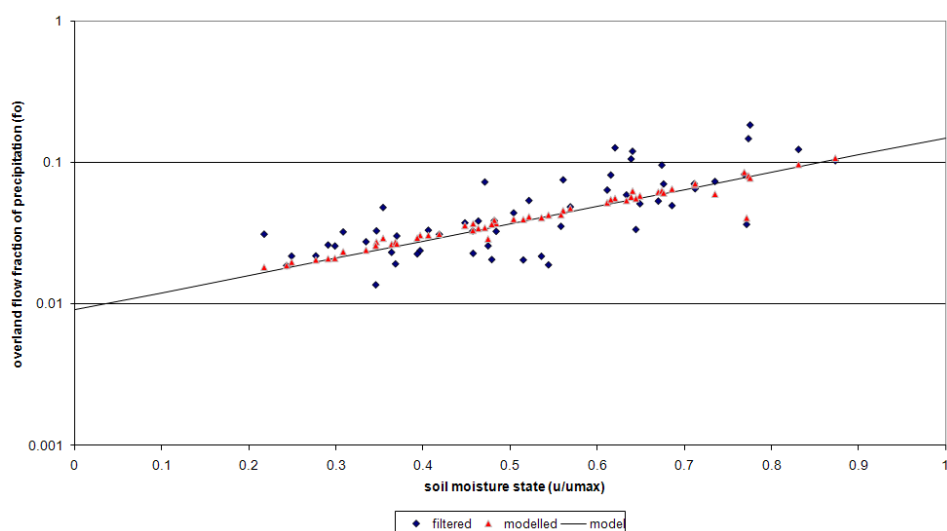


FIGUUR 5.29: Relatieve grondvochtigheid

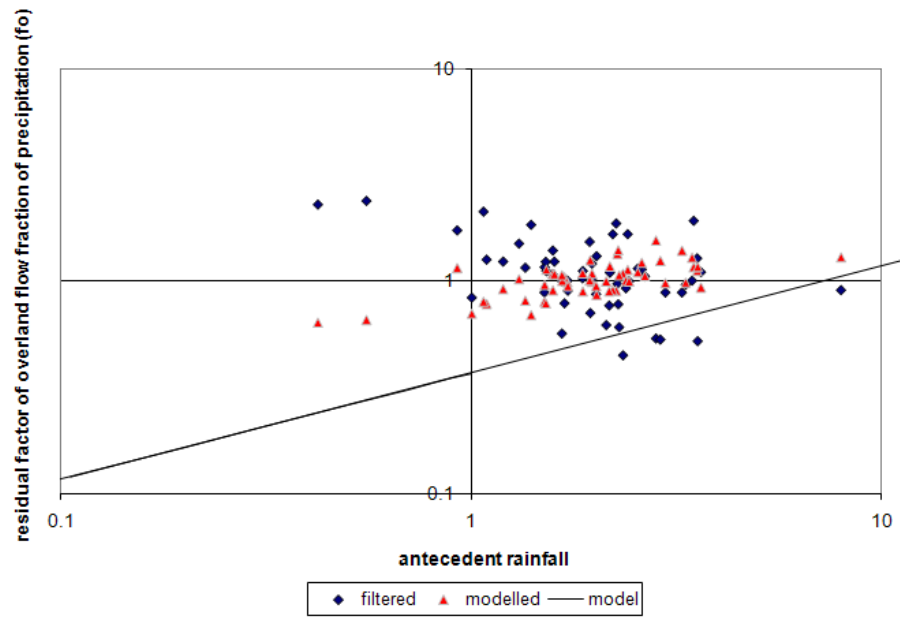
In de tweede stap van de modelkalibratie wordt de fractie van de neerslag die aanleiding geeft tot afstroming langs de oppervlakte bepaald. In de vergelijking die deze fractie berekent, zitten de twee processen die aanleiding geven tot oppervlakteafstroming. Enerzijds kan het oppervlak volledig verzadigd zijn met water, de fractie voor afstroming stijgt dus met een toenemende verhouding van $\frac{u}{u_{max}}$. Dit stijgend verband drukt figuur 5.30 uit. Hierin worden parameters c_1 en c_2 bepaald.

Anderzijds kan de intensiteit van de bui zo groot zijn of kunnen recentere buien ertoe leiden dat, hoewel het bodemoppervlak nog niet volledig verzadigd is, neerslag toch niet in de bodem kan dringen en langs het oppervlak afstroomt. De factor die de bijdrage van dit proces tot de oppervlakteafvoer uitdrukt, is grafisch weergegeven in figuur 5.31. De parameters in deze fractievergelijking zijn het aantal voorgaande dagen waarvan de buien nog in rekening worden gebracht: *antecedent day*, c_3 en c_4 . Op deze figuur stelt de rechte het model voor dat de fracties per tijdstap berekent. De gemodelleerde punten zijn gemiddelde waarden over de verschillende periodes van snelle stroming, zodat de waarden de modellijn niet volgen, hoewel ze via deze modelrechte worden berekend.

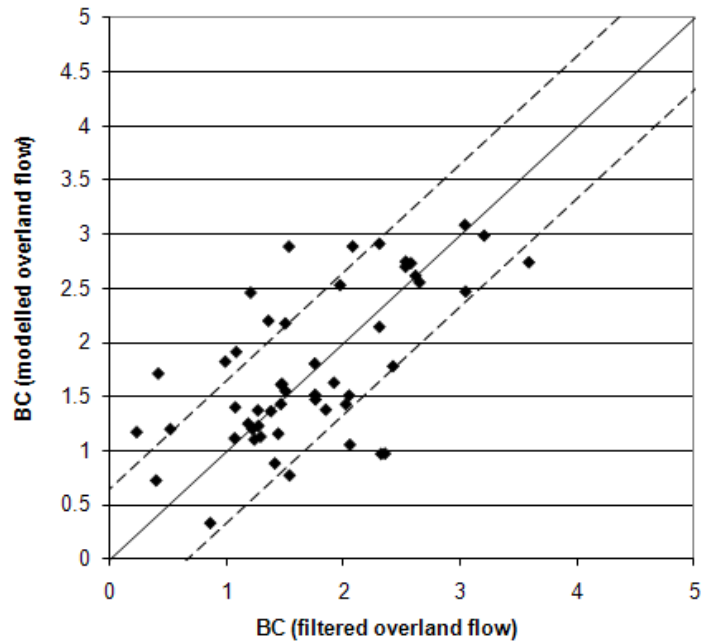
De resultaten van de gemodelleerde fracties kunnen voor dit deelmodel vergeleken worden met de berekende fracties uit de oppervlakteafstroming uit de debietmeting. De fracties worden voor elke periode van snelle stroming berekend. Op figuur 5.32 is dit resultaat weergegeven. De waarden liggen verspreid rond de bissectrice, dit betekent dat de gemodelleerde fracties overeenkomen met de gefilterde fracties.



FIGUUR 5.30: Fractie tot oppervlakteafstroming - verzadiging bodem.



FIGUUR 5.31: Fractie tot oppervlakteafstroming - recente buien



FIGUUR 5.32: Oppervlakteafstroming - scatterplot

Een zelfde deelmodel kan opgesteld worden voor de hypodermische afstroming of interflow. De figuren waarop deze parameters bepaald worden zijn volledig analoog aan deze van de oppervlakteaftroming, alleen worden de gemodelleerde fracties vergeleken met de fracties berekend uit de gefilterde hypodermische afstroming voor periodes van snelle afstroming.

Nu de fracties van de totale neerslag tot elke deelstroming bepaald zijn, kan de hoeveelheid neerslag omgezet worden naar de overeenkomstige neerslagafstroming. De recessieconstanten zijn deze bekomen uit de WetSpro filtering. De recessieconstante van de grondwaterstroming K_b werd tot 45 dagen verhoogd. Dit bleek een betere overeenkomst te geven.

In onderdeel 5.3 worden de gesimuleerde extremen (lage en piekdebieten) en het cumulatieve debiet met de (gewijzigde) opgemeten debieten vergeleken voor de validatieperiode.

5.3 Modelresultaten

In dit onderdeel worden de drie modellen onderling vergeleken ten opzichte van de (gewijzigde) debietmeting van Bossuit.

Er wordt aandacht besteed aan de maxima, minima en de cumulatieve debieten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de POT-waarden uit WetSpro. WetSpro werkt echter met de gefilterde waarden uit de observatieperiode. Daarom worden slechts de tijdstippen en periodes van trage stroming (slow flow periods) uit WetSpro gebruikt en werden de maximale en minimale extremen zelf bepaald uit de meetreeks en niet uit de gefilterde reeks. Deze werkwijze heeft het voordeel dat de werkelijke meetwaarde wordt gebruikt en afrondingen door de filter geen invloed hebben. Als nadeel kan men aangeven dat de ruis op de meting de resultaten kan beïnvloeden. Dit bleek echter niet het geval te zijn.

Tijdens de analyse bleken bovendien moeilijkheden op te treden met de selectie van de minimale extreme waarden met behulp van WetSpro. Daarom werd geopteerd om enkel gebruik te maken van de slow flow periodes en de minimale waarde binnen deze periode buiten het programma te bepalen.

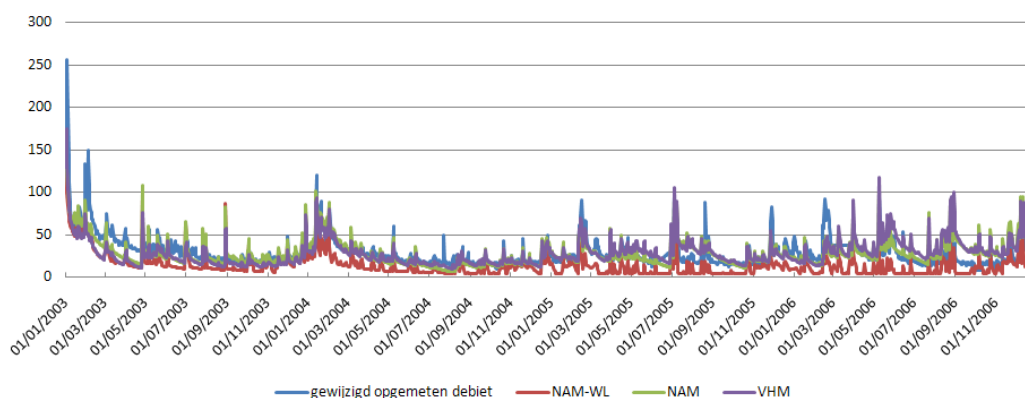
De extreme waarden werden met de Box-Cox (BC) methode getransformeerd. Hierbij werd voor $\lambda = 0.25$ genomen wat een goede richtwaarde is voor debietwaarden op rivieren. Deze transformatie is nodig, omdat de absolute afwijking bij grote debieten zwaarder zou doorwegen dan bij lagere debieten. Dankzij de BC transformatie wordt het gewicht van elke extreme waarde gelijk. Vergelijking 5.1 geeft de transformatie weer[26].

$$BC(Q) = \frac{Q^\lambda - 1}{\lambda} \quad (5.1)$$

5.3.1 Kalibratieperiode

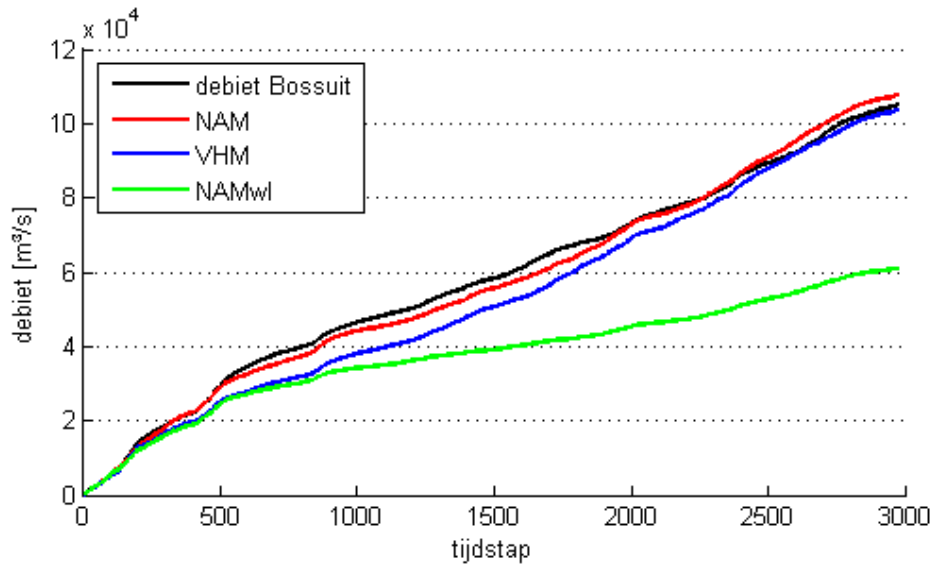
Het VHM- en het NAM-model werden afgeijkt voor een periode van 8 jaar. De periode loopt van september 2001 tot en met november 2009. Ter vergelijking wordt een simulatie met het beschikbare NAM-model meegegeven[6]. De simulaties worden uitgevoerd met invoerdata op dagelijkse basis. De resultaten worden vergeleken met de gewijzigde daggemiddelde debietreeks van Bossuit. Om een vergelijking met het beschikbare NAM-model[6] mogelijk te maken, werden aan simulatieresultaten van dit model de debietafname door het kanalenstelsel in Noord-Frankrijk toegevoegd.

Figuur 5.33 geeft de gesimuleerde debieten in functie van de tijd weer voor een periode van januari 2003 tot en met december 2006. Er dient wel opgemerkt te worden dat dit beschikbare NAM-model[6] werd afgeijkt op een kortere periode, namelijk van 2001 tot 2003. Op de figuur wordt dit meteen duidelijk. Na 2003 onderschat het beschikbare model[6] de debieten tijdens laagwater sterk, waardoor de cumulatieve debieten sterk afwijken van de observaties na 2003, zie figuur 5.34. Verschillende oorzaken kunnen aangehaald worden. De ijking gebeurde aan de hand van een beperkte meetreeks en onderschatte ETo-waarden. De initiële condities bleken daarenboven een sterke invloed te hebben. Het model simuleert de debieten wel goed (ook cumulatief) tussen 2001 en 2003, maar men krijgt dus slechte resultaten buiten deze periode. Dit is tevens de reden waarom de debieten tijdens de impactanalyse zeer laag worden gesimuleerd en er in het thesisonderzoek van 2009 geen besluiten konden getrokken omtrent het voorkomen van watertekorten.



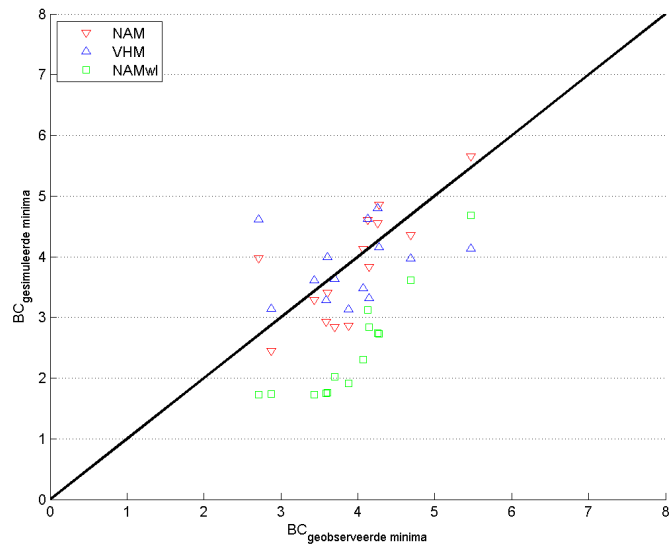
FIGUUR 5.33: Debieten conceptuele modellen voor een periode van 2003 tot en met 2006

Het nieuw opgestelde NAM-model werd afgeijkt voor een langere periode. Door de lange kalibratieperiode brengt men verschillende regimes in rekening en treden de problemen die het beschikbare NAM-model[6] kende, niet op. Zowel het VHM- als het NAM-model simuleren de cumulatieve debieten goed. Dit is te zien op figuur 5.34.

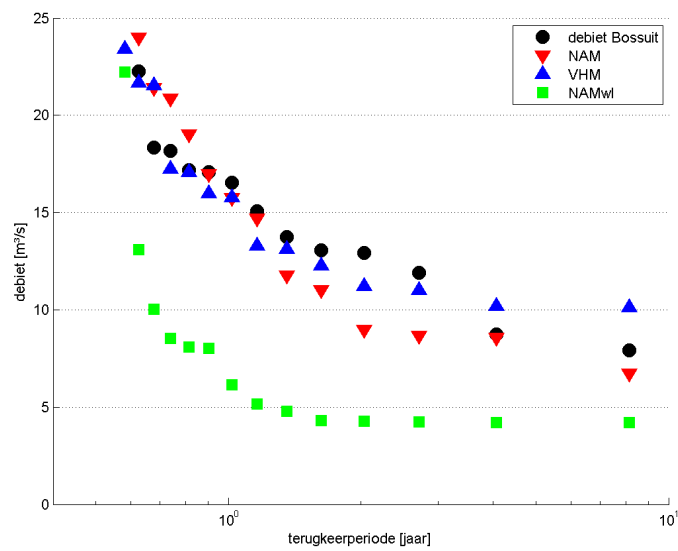


FIGUUR 5.34: Cumulatieve debiet van de verschillende conceptuele modellen

Gesimuleerde maxima en minima kunnen vergeleken worden op figuren 5.35 tot en met figuur 5.38. Wanneer de minimale debieten bekeken worden, valt op dat beide nieuw opgestelde conceptuele modellen de laagwatertoestand correcter simuleren. Op de scatterplot liggen de waarden rond de bissectrice. Dit houdt in dat een gesimuleerde waarde overeenkomt met haar geobserveerd debiet. Bij het beschikbare model liggen de scatterpunten onder de bissectrice, wat inhoudt dat de geobserveerde waarden benaderd worden door een lagere simulatiewaarde. Dit is tevens te zien op de figuur waar laagwaterextremen uitgezet worden ten op zichte van hun terugkeerperiode. De terugkeerperiode van een extreem debiet betekent dat in een periode gelijk aan de terugkeerperiode het debiet gemiddeld een keer voorkomt. Zo heeft laagwaterafvoer van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ volgens grafiek 5.36 een terugkeerperiode van 3 jaar.

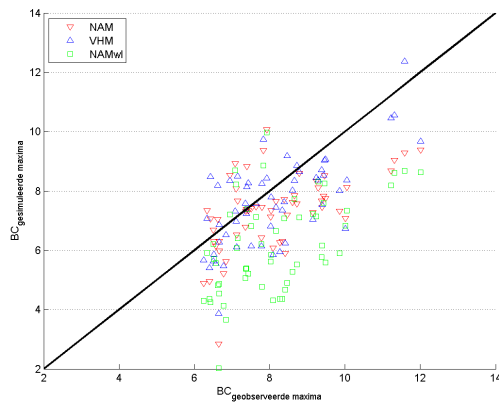


FIGUUR 5.35: Scatterplot laagwaterafvoer

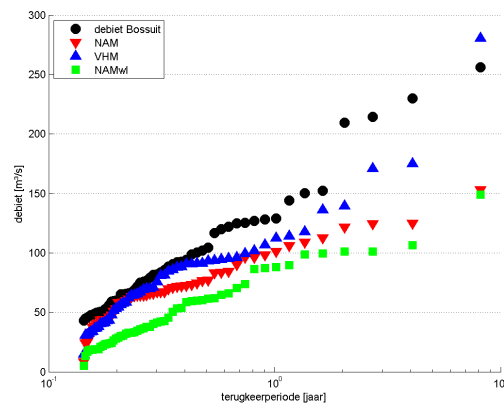


FIGUUR 5.36: Voorkomen laagwaterafvoer voor de kalibratieperiode

Voor de hoogwaterextremen kunnen gelijkaardige conclusies getrokken worden. De resultaten zijn hier echter minder goed, daar de piekdebieten voor grote terugkeerperiodes onderschat worden, iets meer door NAM dan door VHM. Daar de simulaties uitgevoerd werden op dagelijkse basis, en piekdebieten zich voordoen op uurlijkse schaal, zijn deze resultaten vertekend. Voor het onderzoek lag de nadruk op de laagwatertoestand, waardoor minder aandacht aan deze pieken werd besteed. Het bleek bovendien ook moeilijk zowel de laag- als hoogwatertoestand en het cumulatieve debietverloop simultaan goed te modelleren, waardoor de focus op het laagwater en het cumulatieve verloop werd gelegd.



FIGUUR 5.37: Scatterplot hoogwaterafvoer



FIGUUR 5.38: Voorkomen hoogwaterafvoer voor de kalibratieperiode

De RMSE (root-mean-square-error) kan voor de drie verschillende modellen berekend en vergeleken worden. In tabel 5.10 zijn de resultaten weergegeven. De Nash-Sutcliffe efficiëntie is weergegeven in 5.11. De Nash-Sutcliffe parameter drukt de efficiëntie van het model uit. Hoe dichter deze waarde bij 1 ligt, hoe hoger de efficiëntie. Wanneer de parameter gelijk is aan of kleiner dan 0 betekent dit dat het gemiddelde debiet de werkelijke waarde beter benadert dan het model.

	VHM	NAM	NAMwl
RMSE piekafvoeren	1.25	1.51	2.44
RMSE laagwater afvoeren	0.78	0.59	1.49

TABEL 5.10: Overzicht RMSE

model	Nash-Sutcliffe
VHM	0.601
NAM	0.540
NAMwl	0.162

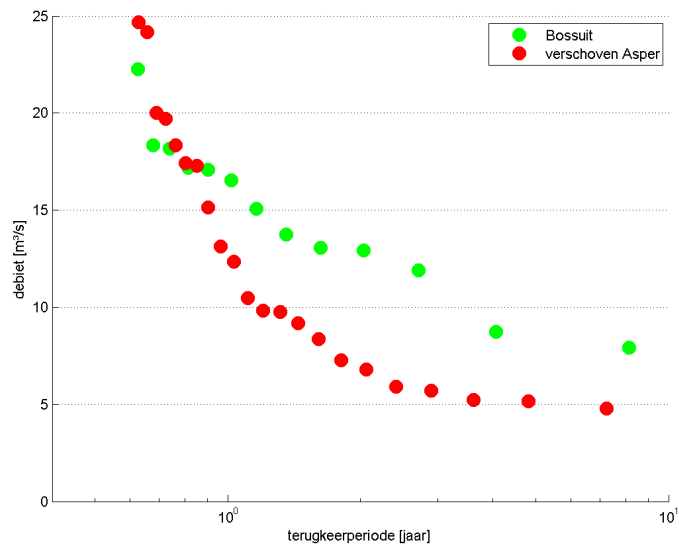
TABEL 5.11: Overzicht Nash-Sutcliffe efficiëntie

5.3.2 Validatieperiode

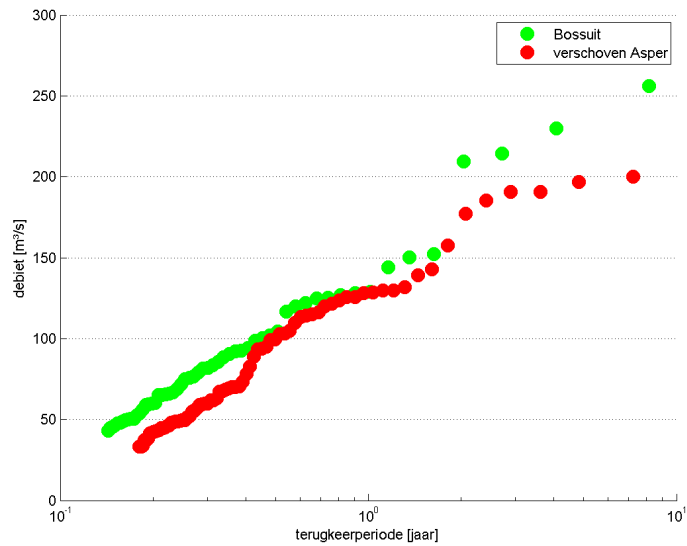
Voor de validatie werd eerst getracht de gesimuleerde neerslagafstroming te vergelijken met de verschoven Asperreeks, zie onderdeel 5.1.1. Dit bleek echter zeer slechte resultaten te geven, daar de extreme waarde verdeling van de minimale debieten van Bossuit anders verloopt dan deze van Asper. De reeks van Asper wordt opgemeten aan een stuw (1988 tot 2002).

Hoewel voor de overlappende periode (tussen september 2001 en juni 2002) bleek dat de reeks van Asper een zeker gelijkaardig verloop met Bossuit had, gedragen de minimale debieten zich anders, zie figuur 5.39. De hoogwaterextremen volgen elkaar wel beter, figuur 5.40.

In deze figuur zijn de (gewijzigde) minimale debieten van Bossuit en die van de (gewijzigde) verschoven Asperreeks uitgezet ten op zichte van hun terugkeerperiode. Deze terugkeerperiodes zijn voor twee verschillende periodes opgesteld: de Asperreeks uit gegevens van 1988 tot 2002 en de debietmeting van Bossuit van 2001 tot 2009. De oorzaak waarom de geobserveerde extreme waarden van Asper anders liggen dan deze van Bossuit, is niet duidelijk. Daar de geobserveerde debieten zeer laag zijn en bijna nul worden (op de figuren is immers het debiet dat kanalen in Noord-Frankrijk uit de Bovenschelde halen terug toegevoegd), heeft dit mogelijk te maken met een zeer sterk spelende stuwwerking tijdens droge periodes op de meting van Asper.



FIGUUR 5.39: Verschil geobserveerde extreme waarden van laagwaterafvoer volgens Bossuit- en verschoven Aspermeting



FIGUUR 5.40: Verschil geobserveerde extreme waarden van hoogwaterafvoer volgens Bossuit- en verschoven Aspermeting

Uit figuur 5.39 is af te leiden dat voor de verschoven en gewijzigde Asperreeks de geobserveerde minima laag zijn. Hierdoor komen zij beter overeen met de gesimuleerde waarden door het beschikbare NAM-model. Worden echter de (gewijzigde) simulatieresultaten van het beschikbare model vergeleken met de gewijzigde meting van Bossuit dan kan men duidelijk besluiten dat deze gesimuleerde metingen de werkelijke laagwatertoestand sterk onderschatten.

Men kan ook besluiten dat men de (verschoven) Asperreeks niet kan gebruiken als validatie voor de nieuw opgestelde modellen. Het verloop van extreme waarden van laagwaterafvoer van Bossuit en Asper is duidelijk te verschillend.

Als opmerking kan meegegeven worden dat tijdens het opstellen van de modellen gebleken is dat goede overeenkomsten konden bereikt worden voor korte kalibratieperiodes (4 jaar). Deze modellen gaven over de volledige 8 jaar meetdata van Bossuit echter minder nauwkeurigere resultaten. Er werd beslist de kalibratie voor de volledig 8 jaar meetdata van Bossuit uit te voeren. Hierdoor waren er geen betrouwbare meetdata beschikbaar om het model te valideren.

5.4 Extreme waarde analyse

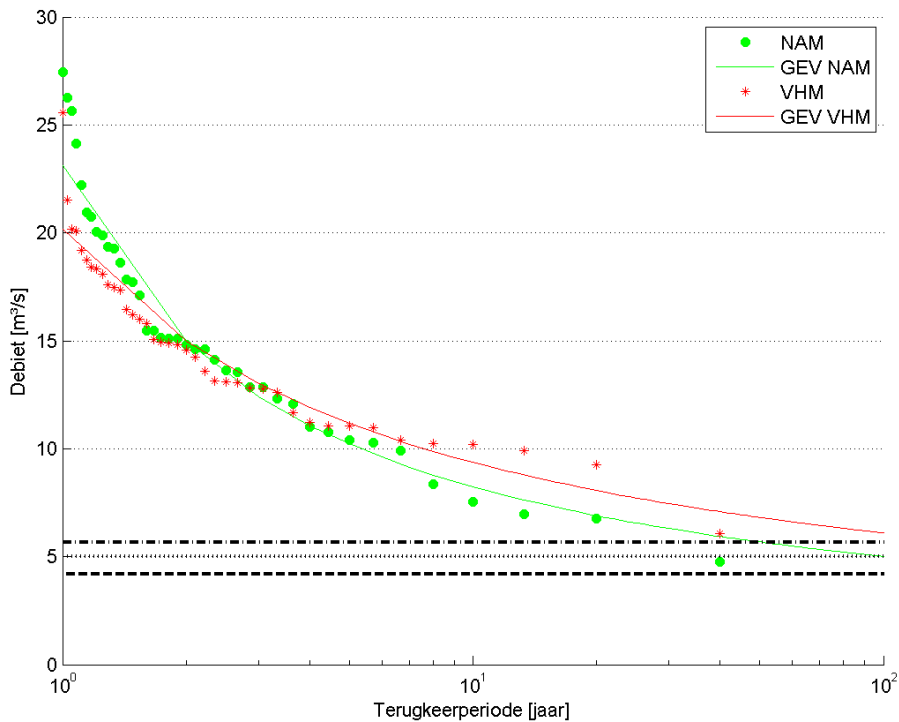
Nu het VHM- en NAM-model gekalibreerd zijn, wordt het mogelijk simulaties te doen met historische meteorologische invoerreeksen. Een neerslagreeks is beschikbaar bij het WL vanaf 1967 tot 2001 en werd in dit onderzoek verder bijgewerkt tot 2007. De ETo-reeks van Melle wordt overeenkomstig deze periode gebruikt. Dit laat toe simulaties te doen voor een periode van 40 jaar.

Extreme laagwatergebeurtenissen die uit deze lange tijdreeksimulaties van beide modellen volgen, kunnen tegen hun terugkeerperiode worden uitgezet. Zo kan men een beeld krijgen van de overeenkomst of verschillen tussen de resultaten van beide modellen. Dit biedt een interessant zicht op de spreiding tussen beide modelresultaten. Figuur 5.41 geeft dit overzicht⁴.

Op basis van de gesimuleerde extreme waarden werd via een lineair regressieverband de extreme waarde verdeling (GEV) bepaald. Dit gebeurt door gebruik te maken van het ECQ-algoritme. Het bepalen van de parameters van de verdeling is weergegeven in paragraaf 5.4.1.

Analyseert men de trend van de extremen bij het NAM-model, dan merkt men dat de extremen een meer constante daling volgen. Ook hier ligt het extremum met de grootste terugkeerperiode lager dan trend die men zou verwachten op basis van een extrapolatie van de voorgaande punten.

⁴Op deze figuur zijn tevens de minimaal benodigde debietdrempels aangegeven voor de voeding van de Noord-Franse kanalen en het kanaal bij huidige en verhoogde productie. Hierop wordt nog uitgebreid ingegaan in hoofdstuk 7



FIGUUR 5.41: Extreme laagwaterverdeling (1976-2007)

Hoewel het niet met zekerheid kan gesteld worden, kan men toch vermoeden dat de laagwaterextremen voor grote terugkeerperiodes door het VHM-model waarschijnlijk licht overschat worden. Het zou echter ook kunnen dat het NAM-model de extremen onderschat. Door een extreme waarde verdeling op te stellen wordt de spreiding op de empirische terugkeerperiodes bepaald.

Naast deze conclusies kunnen de periodes van extreme debieten bepaald worden. Deze zijn voor beide modellen opgesomd in tabel 5.12. Uit het archief van het KMI[29] van België kunnen deze gesimuleerde periodes opgezocht worden. De zomer van 1976 is de droogste zomer ooit in België sinds het begin van de metingen.

Beide modellen simuleren deze extreme gebeurtenis dan ook met de grootste terugkeerperiode. Bovendien merkt men dat deze gebeurtenis niet helemaal de extreme trend die men in de gegevens kan opmerken volgt, maar lager ligt. Dit betekent dat de werkelijke terugkeerperiode waarschijnlijk groter is dan de 40 jaar die nu empirisch werd bepaald.

Vergelijkt men de periodes van beide modellen dan kan men besluiten dat

gebeurtenissen die door de modellen als extreme laagwaterperiode worden gemodelleerd, ook altijd zo bekend staan. De terugkeerperiode van de gebeurtenissen in beide modellen is wel soms verschillend.

volgorde	NAM	VHM
1	28 – Aug – 76	28 – Aug – 76
2	06 – Aug – 04	25 – Nov – 78
3	16 – Aug – 90	16 – Aug – 90
4	16 – Sep – 73	06 – Aug – 04
5	25 – Nov – 78	22 – Nov – 83
6	11 – Aug – 96	06 – Nov – 71
7	22 – Nov – 83	16 – Sep – 73
8	06 – Nov – 71	20 – Dec – 95
9	05 – Okt – 79	03 – Mei – 96
10	21 – Okt – 05	26 – Apr – 03

TABEL 5.12: Periodes van laagwaterafvoer

Recentelijk was de zomer van 2004 zeer droog. Verschillende krantenkoppen[30] berichtten over problemen voor de warmteafvoer van koelwater van de kerncentrales. Ook augustus 1990 komt in de statistieken van het KMI voor droogte voor. Begin september '73 werd dan weer gekenmerkt door zeer zachte temperaturen boven de 30 graden; de maand staat geregistreerd als hittegolf. De periode tussen augustus 1995 en 1996 staat bekend als een jaar met zeer weinig neerslag voor België. De droogste maand augustus sinds begin van de 20ste eeuw is deze van het jaar 1983.

5.4.1 Extreme waarde verdeling

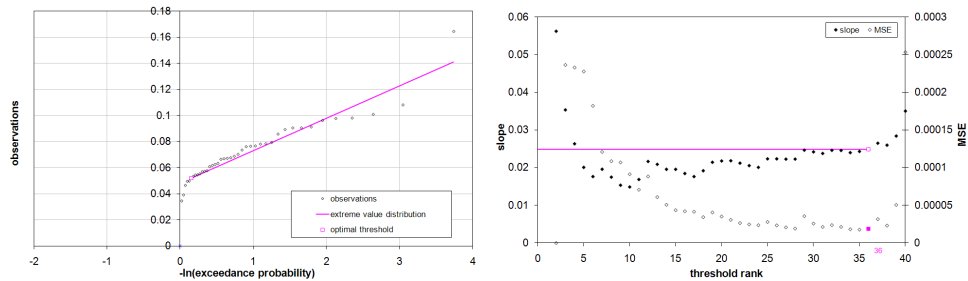
ECQ[31] is een algoritme dat toelaat het extreme waarde gedrag van de staart te bepalen. Binnen een periode kunnen de geobserveerde extreme waarden uitgedrukt worden ten opzichte van hun terugkeerperiode. Via een lineair regressieverband kan de vergelijking van deze geobserveerde waarde bepaald worden. Dit noemt men een extreme waarde verdeling. Belangrijk bij deze verdelingen is het gedrag in de staart juist weer te geven. Een foute of onnauwkeurige keuze kan het extreme debiet sterk onder- of overschatten wanneer een fout gedrag werd verondersteld. De staart van de verdeling kan normaal, zwaar of licht zijn. Hydrologische gebeurtenissen hebben meestal een normale of zware staart. De GEV (generalised extreme value distribution) omvat de verschillende types van de staartgedrag afhankelijk van de waarde van de extreme waarde parameter γ .

De ECQ tool laat toe deze parameter te bepalen, een keuze te maken van het type verdeling en vervolgens de overige parameters van deze verdeling te bepalen. Dit gebeurt op basis van visuele interpretatie van Q-Q plots. Door middel van een lineair regressieverband wordt de vergelijking van de verdeling opgesteld[23].

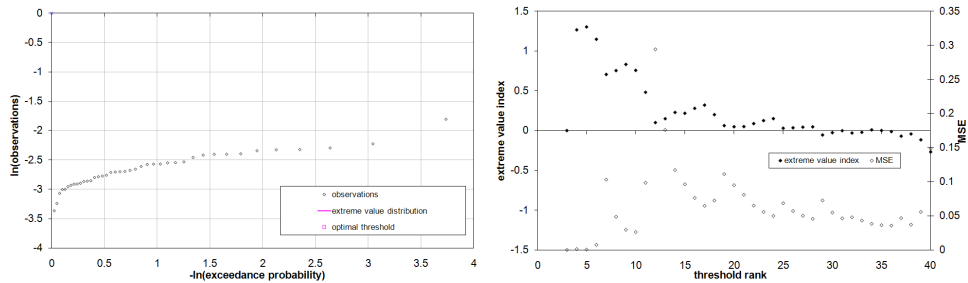
Figuren 5.42 tot en met 5.45 werden opgesteld. Een duidelijk lineair staartverloop op de exponentiële plot (figuur 5.42) kan opgemerkt worden. De staart van de Pareto plot (figuur 5.44) vertoont een blijvend afbuigend verloop. Bovendien schommelt de helling in de UH-plot rond de waarde nul in de staart van de verdeling. Dit zijn de kenmerken van een normale staart. De helling van de extreme waarde verdeling wordt bepaald op figuur 5.43 van de exponentiële verdeling. Bij een drempel van 36 is de afwijking minimaal. De hierbij horende drempelwaarde is $x_t = 0.05214$ en de helling $\beta = 0.02485$. De empirische terugkeerperiode $\frac{n}{t}$ is $\frac{40}{35}$.

Het regressieverband voor de exponentiële verdeling is $x = xt + \beta \cdot (\ln(T) - \ln(\frac{n}{t}))$.

Het NAM model geeft analoge figuren en tevens een normale staart. De parameters van de exponentiële verdeling zijn $x_t = 0.04776$, $\beta = 0.03394$, $n = 40$ en $t = 36$.



FIGUUR 5.42: Exponentiële Q-Q plot FIGUUR 5.43: Helling exp. Q-Q plot



FIGUUR 5.44: Pareto Q-Q plot

FIGUUR 5.45: Helling UH plot

5.5 Besluit

In dit hoofdstuk werd de opbouw van de hydrologische neerslagafstromingsmodellen beschreven. Er werden twee conceptuele modellen opgesteld, het NAM- en VHM-model. Deze modellen vervangen het beschikbare NAM-model[6] dat aan een zeer beperkte datareeks werd afgeijkt. Tijdens het opstellen van dit model waren er toen niet meer data beschikbaar. Voor dit thesisonderzoek werden extra data opgevraagd en verwerkt. Dit hield in dat de evaporatiereeks te Melle aangevuld werd met recente meetdata en de bestaande Thiessenneerslagreeks van het Noord-Franse bekken na 2001 aangevuld werd met neerslagdata van drie stations van Météofrance.

Na analyse van de debietmeetreeks van Bossuit, bleek dat de reeks sterk gestoord werd door stuwwerking. Dit gaf, tijdens zeer droge periodes, gedurende enkele uren per dag onnatuurlijk lage debieten. Daar voor dit onderzoek de laagwatertoestand het te bestuderen aspect was, werd beslist om op dagelijkse basis te werken. Hierdoor kon de laagwatertoestand op een meer natuurlijke wijze gesimuleerd worden. Bovendien werd rekening gehouden met de kanaalinvloed in Noord-Frankrijk. Hiervoor werd de geobserveerde debietmeting van Bossuit gewijzigd.

De kalibratie van beide modellen gebeurde voor een periode van 8 jaar, van 2001 tot 2009. Voor deze periode kwamen de modellen goed overeen met de geobserveerde (gewijzigde) laagwatertoestand. Bovendien werd aangetoond dat het beschikbare model[6], hoewel het goede resultaten gaf voor de periode waarin het gekalibreerd werd (2001 tot 2003), de debieten sterk onderschatte buiten deze periode (na 2004).

De spreiding op het resultaat werd onderkend door het uitvoeren van een historische simulatie over 40 jaar neerslagdata. Hierin werd opgemerkt dat het VHM-model de laagwaterdebet systematisch hoger simuleert dan het NAM model. Via een lineaire regressie-analyse werd een extreme waarde vergelijking opgesteld. Deze gaf aan dat de extreme zomer van 1976 minder vaak voorkomt dan de empirische terugkeerperiode laat uitschijnen.

De voorkeur voor verdere simulaties wordt aan het VHM-model gegeven, omdat het de hoogwaterextremen beter benadert dan het NAM-model. Bovendien bleken de parameters van het NAM-model sterk af te wijken van normale (richt)waarden, waardoor het vermoeden bestaat dat de parameters van het NAM-model overgeparametriseerd zijn aan de reeks. Dit was echter noodzakelijk om de laagwatertoestand goed te kunnen voorstellen. De resultaten dienen echter steeds met voorzichtigheid behandeld worden.

Hoofdstuk 6

Hydrodynamische modellering

In dit hoofdstuk wordt de hydrodynamische modellering besproken. Het model heeft als doel het debiet op de Bovenschelde ter hoogte van het pompemaal van Bossuit te bepalen. Net als in het onderzoek van 2009 wordt gebruik gemaakt van het fysisch MIKE11-model dat door het Waterbouwkundig Laboratorium opgesteld werd. Het debiet op dit kanaal wordt opnieuw bepaald aan de hand van extra data. In dit hoofdstuk wordt het model toegelicht en worden de gebruikte data geverifieerd.

6.1 Databeschikbaarheid

6.1.1 MIKE11-model

Een hydrodynamisch model bepaalt langs punten van het netwerk de waterhoogte en debieten. In dit werk zal gebruik worden gemaakt van het fysische model opgemaakt voor de Bovenschelde door het Waterbouwkundig Laboratorium[6].

Het beschikbare model van het WL omvatte het Leie-, Bovenscheldebekken, de Gentse kanaalzone en de Brugse Polders. In de studie van 2009 werd het model beperkt tot het Bovenscheldebekken. De waterlopen in de overige bekkens werden verwijderd. Bovendien werd het model op de Bovenschelde ingekort tot de meetpost en stuw in Oudernaarde. Deze stuw legt een constante waterhoogte op en vormt de afwaartse randvoorwaarde van het model.

Het kanaal, dat in het beschikbare model niet aanwezig was, werd in het thesisonderzoek van 2009 aan het model toegevoegd. De wisselwerking met de Leie werd verwaarloosbaar geacht. Dit door de sterk verouderde sluizen bij Kortrijk. Verbinding met de Leie moest hierdoor niet voorzien worden en zo kon de Leie ook uit het beschikbare model verwijderd kon worden. Door gebruik te maken van deze sterk vereenvoudigde versie kon het model sneller doorgerekend worden.

Het debietmeetstation van Bossuit vormt de opwaartse randvoorwaarde van dit model. Aan deze rand wordt het debiet opgelegd dat afkomstig is van neerslagafstroming uit het bekken Bossuit. De neerslagafstroming werd gemodelleerd in

hoofdstuk 5.

Op het kanaal komen verschillende structuren voor die de sluisen en pompstructuren voorstellen. De pompstructuren van Bossuit en Moen werden ingevoerd als *regulerende structuren*. De sluisen werden geïmplementeerd in het model als stuwen met een constante opening waarlangs lekverliezen kunnen optreden. De breedte van deze opening werd zo bepaald dat het debiet doorheen deze opening het toen bepaalde debiet op het kanaal benadert. Het sluisencomplex te Kortrijk werd gemodelleerd als een stuw. De stuw legt een constant peil op in het laatste pand, en laat toe overtollig debiet af te voeren.

6.1.2 Pompgegevens

Om het debiet op het kanaal nauwkeuriger te bepalen werden extra data opgevraagd bij de dienst Waterwegen en Zeekanelen (WenZ). Het is mogelijk het debiet uit gegevens betreffende de draaiuren van de pompen en het aantal versassing doorheen de sluis te bepalen. Dit kan omdat het debiet op het kanaal geen natuurlijke voeding kent. Gegevens van vier jaar, voor een periode tussen 2005 tot en met 2009 (gegevens van het jaar 2008 ontbraken), werden opgevraagd en geanalyseerd.

De pompen leveren gemiddeld een debiet van $3m^3/s$. Het volume water¹ in de schutkolk van de sluis van Bossuit is $13646m^3$. Het gemiddelde debiet per maand kan via vergelijking 6.1 berekend worden als het verschil tussen het opgepompte debiet, dit is het aantal operationele pompuren per maand vermenigvuldigd met het debiet per uur dat een pomp kan leveren, en het aantal versassing per maand vermenigvuldigd met het schutvolume dat per versassing terug naar de Bovenschelde vloeit.

$$q_{kanaal} = q_{pomp} \cdot n_{uren/maand} - V_{schut} \cdot n_{schutting/maand} \quad (6.1)$$

Volgende opmerkingen kunnen meegegeven worden. De schutverliezen zijn kleiner, afhankelijk van de diepgang en de grootte van te verschutten schepen in de sluis. In de berekening wordt ook geen rekening gehouden met lekverliezen langs de sluisdeuren. Het kanaal krijgt bovendien een minimale voeding door neerslag op zijn oppervlak, anderzijds is er een zeker verlies doordat een deel van het water verdampt. Deze aspecten zijn niet in rekening gebracht bij het bepalen van het debiet.

Voor de vier jaar kon het debiet berekend worden en een gemiddeld debiet werd bepaald als $0.81m^3/s$. Dit debiet ligt 20% hoger dan het debiet dat in het onderzoek van 2009 was bepaald. Het debiet werd toen bepaald als $0.67m^3/s$. De openingen

¹De berekening volgt uit volgende gegevens:

De schutkolk heeft een breedte van 12.5 m, een waterval van 9.30 m en een bruikbare lengte van 115m. Hierbij komen tweemaal een sluisdorpel van 4 m en een veiligheidszone van 1 m. Dit geeft een bruto lengte van 130 m. Het volume water per schutbeurt kan dan berekend worden als

$$(115m \cdot 12,5m \cdot 9,29m) + (1m \cdot 12,5m \cdot 9,29m) + (ca.4m \cdot 12,5m \cdot 3,50m)$$

in de stuwstructuren zijn gerelateerd aan dit oude debiet. Nu het nieuwe debiet gekend is, zouden deze openingen aan het nieuwe debiet aangepast moeten worden. In onderdeel 6.2 wordt op dit aspect ingegaan.

Bovendien kan ook gekeken worden in welke mate het debiet op maandelijkse basis variaties vertoont. Voor de 4 jaar data is dit maandelijks debiet weergegeven in figuur 6.1. In de wintermaanden ligt het netto debiet, dat door het pompgemaal in het kanaal gepompt wordt, lager dan tijdens zomermaanden. Dit verschil tussen winter en zomer is sterk uitgesproken. De oorzaak ervan kon in dit onderzoek niet bepaald worden. Een mogelijke reden zou kunnen zijn dat in zomermaanden aan de sluis van Kortrijk meer pleziervaartuigen worden geschut, zodat ook meer water uit het kruinpand naar het laatste pand moet stromen. De industrie gelegen langs het kanaal zou in de zomermaanden meer water kunnen verbruiken. Ook hier zijn geen gedetailleerde gegevens beschikbaar. Bovendien blijkt de watermaatschappij veruit de grootste gebruiker van water².



FIGUUR 6.1: Maandelijks variatie op het netto debiet op het kanaal voor 2005 tot 2009.

Omdat over dit winter-zomer verschil geen uitspraak kan gedaan worden en omdat de pompstructuren de debietvraag van het kanaal steeds kunnen beantwoorden (indien voldoende water op de Bovenschelde beschikbaar is), wordt het debiet doorheen het jaar constant verondersteld.

²Het dagelijks waterverbruik van andere industrieën, hier zijn de twee grootverbruikers Bekaert met $500000m^3/jaar$ en Maes met $50000m^3/jaar$, langsheen het kanaal is slechts 5% van het dagelijkse verbruik van de watermaatschappij.

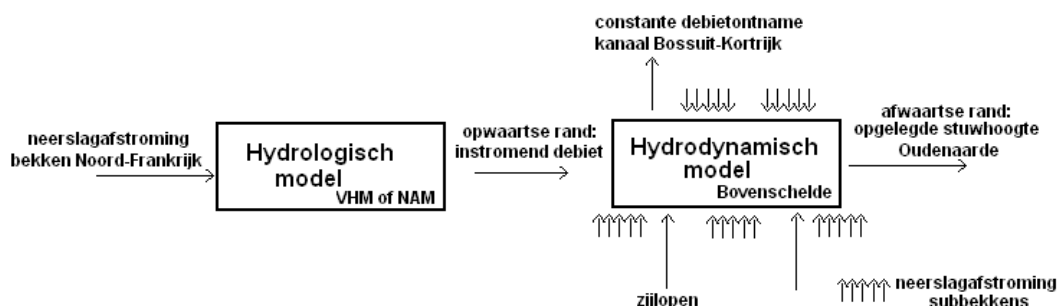
Bij de dienst WenZ, die instaat voor de watervoorziening van het kanaal, werd navraag gedaan hoe het kanaal tijdens zeer droge periodes van mogelijke laagwaterproblemen van water voorzien werd. Hier werd gemeld dat het peil (en dus het debiet) op het kanaal steeds behouden blijft, ongeacht de toevoer van water uit het Noord-Franse bekken.

6.2 Analyse hydrodynamisch model

6.2.1 Kanaal Bossuit-Kortrijk

Aangezien het waterpeil op het kanaal ongeacht de situatie op de Bovenschelde op peil wordt gehouden, betekent dit dat het debiet op het kanaal als een constante kan beschouwd worden. Hoewel dit voor de waterkwaliteitsanalyse anders is, is de implementatie van het kanaal in het fysisch model niet noodzakelijk voor een waterkwantiteitsmodellering. Voor een kwaliteitsanalyse gebeuren er tijdens het doorstromen van het kanaal vele fysische processen die de kwaliteit beïnvloeden en dus in rekening moeten worden gebracht. Voor de waterkwantiteit kan het kanaal vervangen worden door een constante onttrekking uit de Bovenschelde ter plaatse van het kanaal. Deze constante bron is gelijk aan het gemiddeld netto pompdebiet dat in voorgaand onderdeel bepaald werd.

Het kanaal werd uit het model van 2009 verwijderd. De structuur van het model wordt in figuur 6.2 schematisch weergegeven.



FIGUUR 6.2: Schematische opstelling van de hydrodynamische berekening d.m.v. het Mike11-fysisch model.

6.2.2 Bovenschelde

Het effect van routing op de Bovenschelde kan nagegaan worden. Er wordt gekeken in welke mate het debiet ter hoogte van het pompemaal van Bossuit verschillend is van het debiet dat aan de debietmeter van Bossuit de opwaartse rand van het model vormt. Beide locaties liggen slechts op 2 km van elkaar en op dit deel van de Bovenschelde monden geen zijrivieren uit. De invloed van de routing kan hierdoor

klein worden geacht.

Na het doorrekenen van het hydrodynamisch model voor een periode van 2 jaar (januari 2000 tot januari 2002) wordt een vergelijking gemaakt tussen de gesimuleerde debieten op beide locaties. Hieruit blijkt dat er slechts een verwaarloosbaar verschil optreedt tussen de debieten afkomstig van de hydrologische neerslagafstroming uit het bekken Bossuit en het debiet ter hoogte van het pomphuis van Bossuit. Men kan dus aannemen dat het debiet dat als opwaartse randvoorwaarde aan het netwerk wordt aangelegd, ook het debiet is dat ter hoogte van het pomphuis van Bossuit beschikbaar is voor de de bevoorrading van het kanaal Bossuit-Kortrijk. Voor de impactanalyse van de klimaatverandering hoeft men de gesimuleerde neerslagafstroming aan de debietmeter van Bossuit niet in het hydrodynamisch model door te rekenen. De debieten kunnen rechtstreeks in de impactanalyse gebruikt worden. Aangezien het hydrologische model de natuurlijke neerslagafstroming beschrijft, moet rekening gehouden worden met het debiet dat voor de bevoorrading van Noord-Franse kanalen wordt gebruikt en dus niet meer beschikbaar is ter hoogte van Bossuit.

6.3 Besluit

Dit hoofdstuk beschrijft de hydrodynamische modellering van het studiegebied. Het debiet doorheen het kanaal werd aan de hand van nieuwe data nauwkeuriger bepaald. Uit deze data werd het gemiddelde debiet op het kanaal van $0.81m^3/s$ afgeleid. Wel werd opgemerkt dat dit debiet tijdens de winter- en zomermaanden sterk verschilt. De oorzaak van deze schommeling kon niet afgeleid worden.

Het beschikbare hydrodynamische model van het kanaal dient aangepast te worden aan dit nieuwe debiet. Maar gezien de focus van dit thesisonderzoek op waterkwantiteit ligt, blijkt na analyse het hydrodynamische model van het kanaal niet langer nodig te zijn. Het kanaal kan vervangen worden door een constante debietsontrekking uit de Bovenschelde. Dit is mogelijk omdat het kanaal steeds op peil gehouden wordt, ongeacht de watertoestand op de Bovenschelde.

Het effect van routing tussen de opwaartse rand van het model en het debiet ter hoogte van het pompgemaal van Bossuit blijkt verwaarloosbaar. Dit komt door de beperkte afstand tussen beide locaties en het gegeven dat op dit tussenstuk geen zijrivieren in de Bovenschelde uitmonden. Het effect van de onttrekking ter hoogte van het kanaal kan bijgevolg rechtstreeks geëvalueerd worden aan de hand van de hydrologische invoer uit het bekken Bossuit. Met deze bevindingen kan aangevangen worden met de scenario-analyse.

Hoofdstuk 7

Scenario-analyse

In de scenario-analyse worden twee scenario's geëvalueerd. Ten eerste zal een verhoogde oppomping worden onderzocht. Ten tweede wordt dit scenario gecombineerd met de effecten ten gevolge van klimaatverandering. De impactanalyses worden uitgevoerd aan de hand van de modelresultaten van het bekken Bossuit.

7.1 Impact verhoogde oppomping/productieverhoging

Het debiet op het kanaal werd in dit onderzoek bepaald als $0.81m^3/s$, dit is het gemiddeld debiet op jaarbasis. De WPC neemt bij zijn huidige productie van $30\ 000m^3/dag$ 39% van dit debiet op. Andere bedrijven nemen gemiddeld dagelijks $1500m^3/dag$. Bij een productieverhoging naar $50\ 000m^3/dag$ verbruikt de WPC gemiddeld bijna 80% van het huidig netto debiet op het kanaal. Er zijn geen gegevens beschikbaar over wat er met het overige debiet gebeurt. Dit debiet kan onder meer noodzakelijk zijn aan de sluis van Kortrijk.

Omdat het deel van het debiet dat niet door het WPC wordt opgenomen, mogelijk voor andere gebruikers noodzakelijk is, werd beslist bij een productieverhoging ook het netto pompdebiet naar het kanaal te verhogen. Zo zal het WPC ook onder toekomstige productievolumes nog steeds slechts 39% van het debiet opnemen. Een productieverhoging naar $50\ 000m^3/dag$ betekent in dit geval een gemiddeld netto pompdebiet van $1.45m^3/s$ op het kanaal. Er zijn voldoende voorzieningen aan het kanaal getroffen om hieraan te kunnen voldoen. De pompcapaciteit is immers voldoende en de sluizen van het kruinpad in de richting van Kortrijk zijn voorzien van een bypass, zodat ongeacht de scheepvaart voldoende water naar het laatste pand kan stromen.

De hydrologische modellen beschrijven de neerslagafstroom zoals men hem zou kennen zonder menselijke invloeden op dit bekken. Om de beschikbare debieten te kennen te Bossuit, moet de natuurlijke afvoer verminderd worden met het aandeel dat in de Noord-Franse kanalen uit de Bovenschelde wordt gepompt. Dit debiet

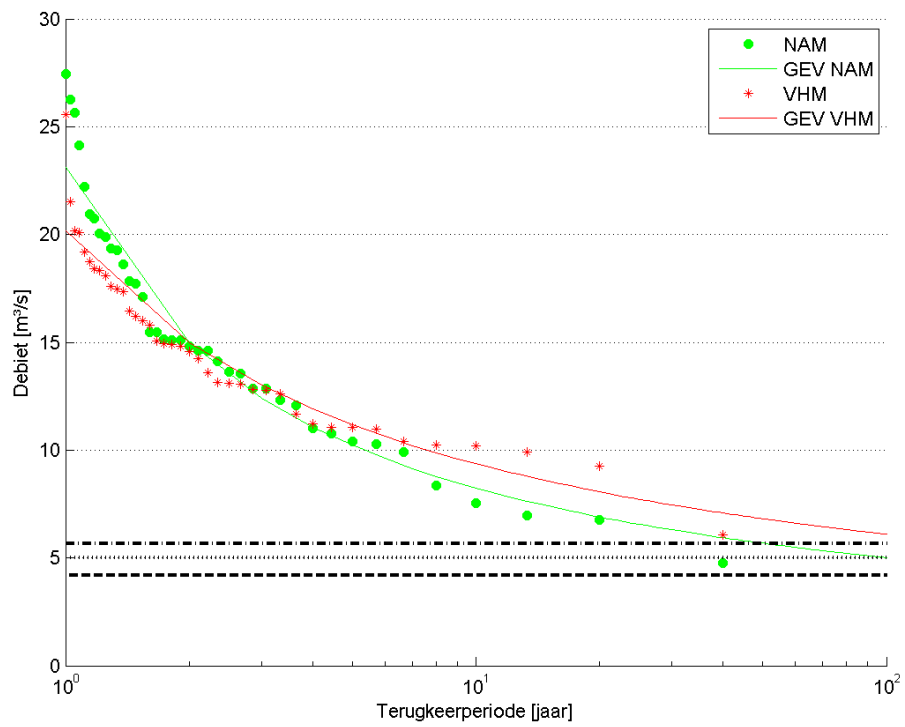
bedraagt bij laagwaterafvoeren $4.2m^3/s$.

Voor de bevoorrading van het kanaal moet $0.8m^3/s$ in de huidige situatie tot $1.45m^3/s$ in geval van een productieverhoging beschikbaar blijven op de Bovenschelde om het kanaal op peil te houden. Om de watervraag tijdens laagwaterafvoeren visueel voor te stellen, wordt op de figuren gewerkt met debietdrempels. Het kanaal kan niet meer van voldoende water voorzien worden, wanneer de laagwaterafvoer onder deze drempel zakt. De verschillende drempels stellen het debiet voor dat nodig is voor de bevoorrading van de Noord-Franse kanalen. Dit debiet wordt vermeerderd met het huidige debiet voor de watervoorziening van het kanaal Bossuit-Kortrijk, dan wel met het debiet nodig na een productieverhoging van de WPC. Op de figuren kunnen tevens de restfracties en de marge afgelezen worden. Hierdoor kan bepaald worden hoeveel water er na het pompemaal op de Bovenschelde beschikbaar blijft tijdens droge perioden.

Op figuur 7.1 zijn zowel de resultaten van het NAM- als VHM-model weergegeven. Bovendien is de extreme waarde verdeling voor deze laagwaterafvoeren bepaald. Neemt men de empirische terugkeerperiode in beschouwing, dan geeft het VHM-model aan dat er geen bijkomende problemen zullen ontstaan door een productieverhoging. Wel is duidelijk dat de marge tussen het beschikbare en het gevraagde debiet voor grote terugkeerperiodes zeer klein is geworden. Het NAM-model geeft voor grote terugkeerperiodes mogelijk tekorten aan voor de bevoorrading van het kanaal. Als besluit kan gesteld worden dat de invloed van een productieverhoging slechts klein is en dat mogelijk eens in de 60 jaar een watertekort voor de bevoorrading van het kanaal kan voorvallen.

De spreiding in de resultaten ten gevolge van onzekerheden op het hydrologisch model enerzijds en anderzijds doordat gewerkt wordt met empirisch bepaalde terugkeerperiodes, leidt ertoe dat conclusies minder scherp kunnen geformuleerd worden. De resultaten moeten noodzakelijkerwijs met de nodige omzichtigheid worden geïnterpreteerd.

7.1. Impact verhoogde oppomping/productieverhoging



FIGUUR 7.1: Invloed productieverhoging op laagwaterafvoeren Bovenschelde

7.2 Impact klimaatverandering

De historische neerslag- en evaporatiereeks voor een periode van 40 jaar wordt met behulp van de *CCI-HYDR Perturbatie tool* naar drie toekomstige tijdhorizonten gewijzigd. De tijdhorizonten in deze studie zijn 2030, 2060 en 2100.

7.2.1 Horizont 2030

De impact van de klimaatverandering op laagwaterafvoer op de Bovenschelde tegen 2030 kan op figuur 7.2 geanalyseerd worden. De debietafname voor het middenscenario is zeer beperkt. Voor het laag- en hoogscenario is een gelijkaardige daling op te merken. Laagwaterafvoeren zullen volgens deze twee scenario's met gemiddeld een kwart afnemen ten opzichte van de referentieperiode tussen 1967 en 2007, zie tabel 7.1. Deze gemiddelde daling blijkt wel variatie te bevatten.

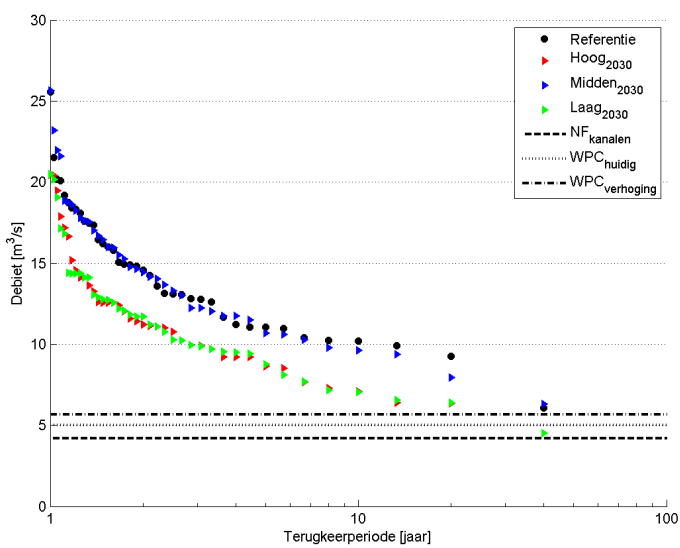
Op figuur 7.2 is deze variatie ten opzichte van de referentieperiode uitgedrukt in functie van de terugkeerperiode. Als trend kan men opmerken dat voor een kleine terugkeerperiode ($T < 5$ jaar) de daling voor het laag- en hoogscenario zich situeert rond -20% . Debieten met een hogere terugkeerperiodes blijken een sterkere daling te hebben tot -30% .

Hoewel voor het laag- en hoogscenario de debieten sterk dalen, en hierdoor vanaf terugkeerperiodes groter dan 10 jaar dicht in de buurt van de debietvraag bij verhoogde drinkwaterproductie komen, snijden ze deze lijn nog net niet. Omwille van de onzekerheid op de modelresultaten, kan men voor deze scenario's beter van een mogelijk tekort uitgaan.

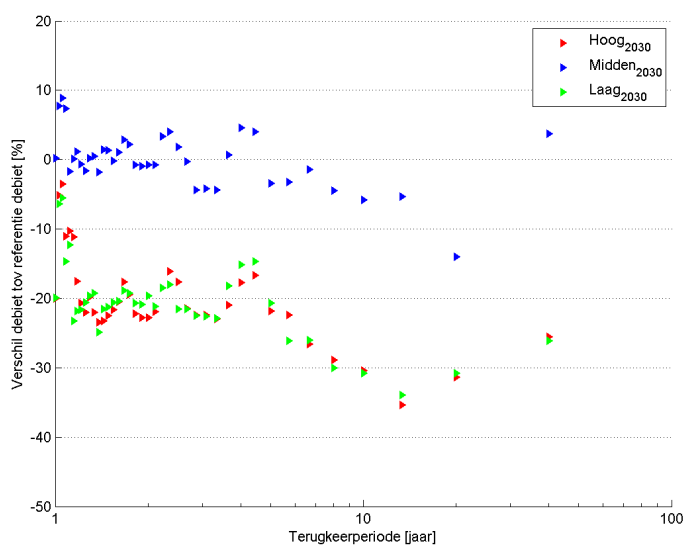
Het middenscenario is het meest waarschijnlijke scenario en vertoont slechts een minimale daling van de laagwaterdebieten. Als men deze factoren in rekening neemt, kan men voorzichtig besluiten dat tegen 2030 er waarschijnlijk geen waterproblemen zullen optreden. Een verhoging van de productiecapaciteit verandert hier weinig aan.

Horizont	Hoog	Midden	Laag
VHM 2030	-24%	-2%	-24%

TABEL 7.1: Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2030



FIGUUR 7.2: Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2030



FIGUUR 7.3: Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2030

7.2.2 Horizont 2060

Voor de horizont van 2060 werd zowel een simulatie met het VHM-model als met het NAM-model uitgevoerd. Het VHM-model leek tijdens de validatie de trend te vertonen de laagwaterafvoeren mogelijk licht te overschatten, het NAM-model de laagwaterafvoeren te laag te simuleren. Door beide modellen door te rekenen kan de spreiding op het resultaat aangegeven worden.

Voor 2060 vertoont het VHM-model nu ook voor het middenscenario een duidelijke daling. Deze daling ten opzichte van de referentieperiode is gemiddeld -17% . Ook in het laag- en hoogscenario zijn de laagwaterafvoeren gedaald tot gemiddeld -40% . Hierbij valt op dat deze sterke daling zich situeert voor kleinere terugkeerperioden ($T < 5$ jaar), maar dit voor grotere terugkeerperiodes de daling ten opzichte van de situatie in 2030 slechts beperkt blijft. Een belangrijk besluit hierbij is dat laagwaterafvoeren volgens het middenscenario nu ook dicht bij de minimale debietvraag komen. De mogelijkheid dat watertekorten voor de bevoorrading van het kanaal zullen plaatsvinden, wordt hierdoor reëel.

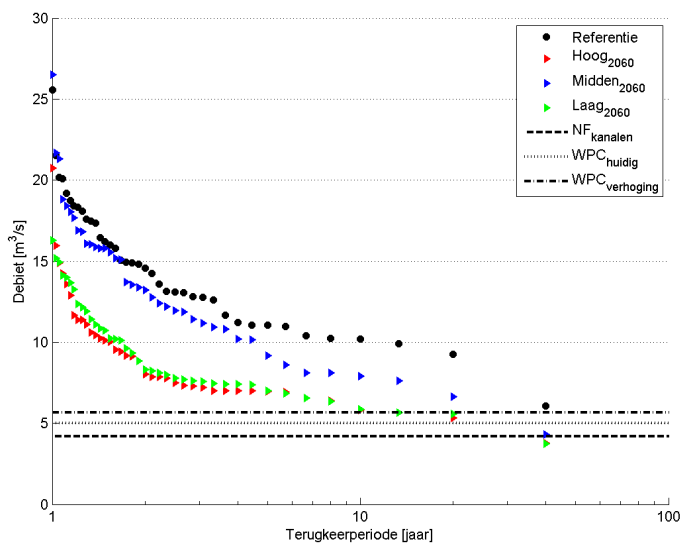
Voor het NAM-model kunnen gelijkaardige conclusies getrokken worden. De gemiddelde daling ten opzichte van de simulatieresultaten voor de referentieperiode is vrij gelijkaardig aan de gemiddelde daling die het VHM-model aangeeft, zie tabel 7.2. Dit geldt zeker voor het middenscenario. De dalingen voor het laag- en hoogscenario is een 10% groter dan die volgens het VHM-model.

De debietdrempels die het minimaal benodigde debiet aangeven, tonen voor het NAM-model een merkbaar slechtere situatie, zie figuur 7.6. Voor het middenscenario geeft het NAM-model aan dat de debietdrempel bij verhoogde productie met een terugkeerperiode tussen 10 en 20 jaar wordt onderschreden. Het VHM-model geeft voor deze terugkeerperiode nog geen problemen aan. Beide modellen geven wel een duidelijke daling aan. Ook het VHM-model geeft aan dat de marge tussen de debietdrempel en het beschikbare debiet op de Bovenschelde sterk verkleint vanaf 2060.

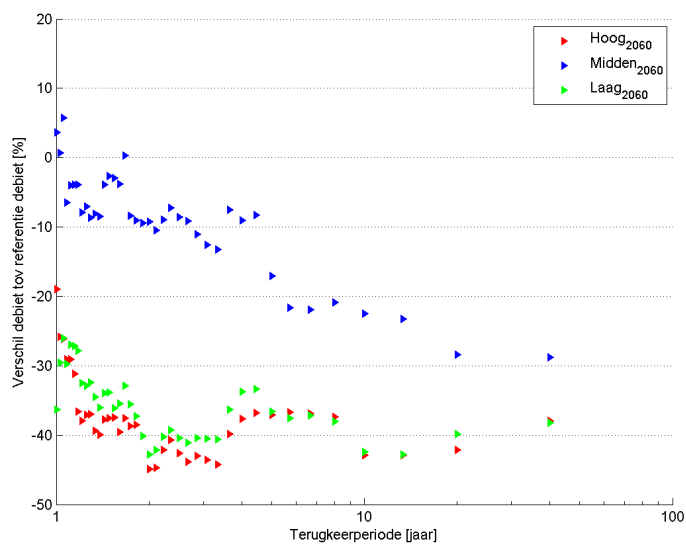
Horizont	Hoog	Midden	Laag
VHM 2060	-40%	-17%	-39%
NAM 2060	-47%	-16%	-47%

TABEL 7.2: Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2060

7.2.3 VHMmodel

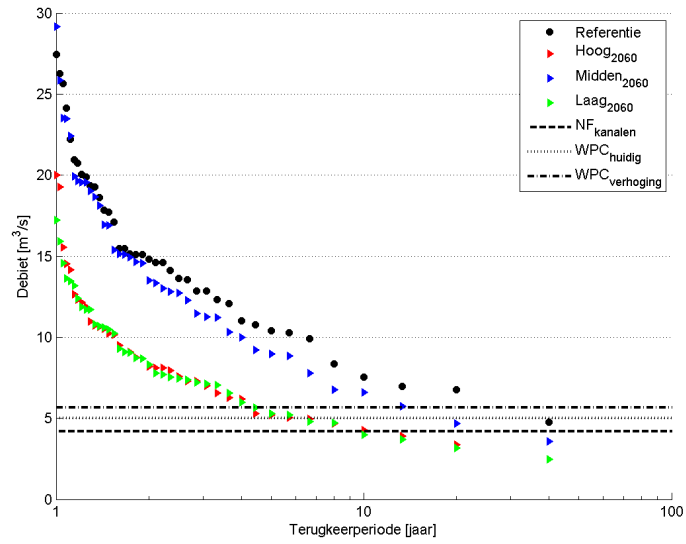


FIGUUR 7.4: Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2060 - VHM-model

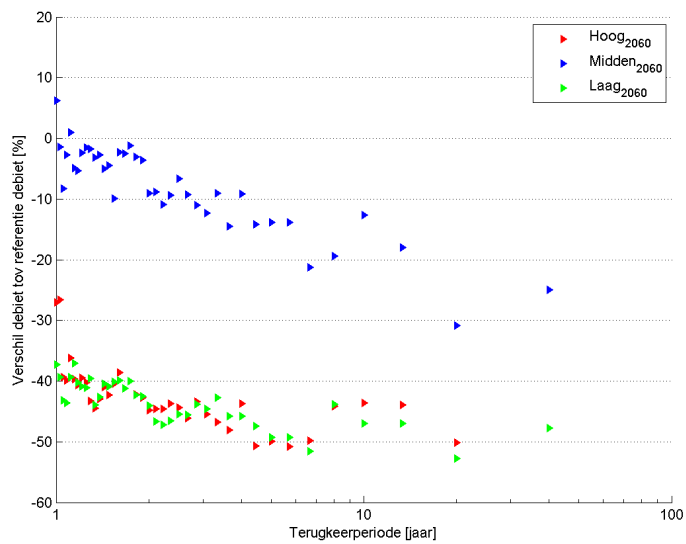


FIGUUR 7.5: Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2060 - VHM-model

7.2.4 NAM-model



FIGUUR 7.6: Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2060 - NAM-model



FIGUUR 7.7: Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2060 - NAM-model

7.2.5 Horizont 2100

De impact van de klimaatverandering tegen 2100 is het meest uitgesproken. De onzekerheid op deze resultaten is hierdoor ook het grootst. Toch is dit een interessante termijn om in rekening te nemen. Hier wordt aangegeven naar welke toestand het hydrologisch systeem op lange termijn evolueert.

De laagwaterafvoeren nemen voor de drie scenario's verder af. Het middenscenario geeft een afname van -25% ten opzichte van de referentietoestand. Dit is -8% ten opzichte van de situatie van 2060. Opvallend hierbij is dat het voornamelijk laagwaterafvoeren zijn die een kleine terugkeerperiode hebben, die voor deze gemiddelde afname zorgen. Laagwaterafvoeren met grote terugkeerperiode dalen niet uitgesproken ten opzichte van de toestand van 2060. Dit is een interessant gegeven in verband met het onderschrijden van de minimale vraag.

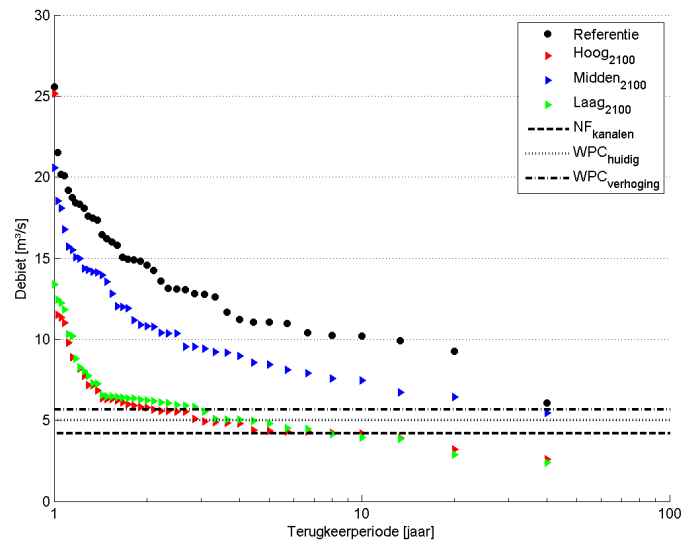
Het laag-en hoogscenario geven een daling van -60% aan, zodat op regelmatige basis ($T < 3$ jaar) de aanvoer lager zal zijn dan de debietvraag. Problemen met de watervoorziening van het kanaal zullen frequent voorkomen. Deze problemen zullen evenzeer optreden zonder een productieverhoging.

In een studie van het WL[2] uit 2009 die het *effect van klimaatwijziging op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituaties voor Leie en Bovenscheldebekken* bestudeert, werd deze laagwaterproblematiek ook bestudeerd. De resultaten voor het bekken Bossuit gaven toen zeer afwijkende resultaten. Er werd immers gebruik gemaakt van het bestaande NAM-model[6]. De resultaten van dit thesisonderzoek konden niet vergeleken worden met de resultaten uit de studie van het WL.

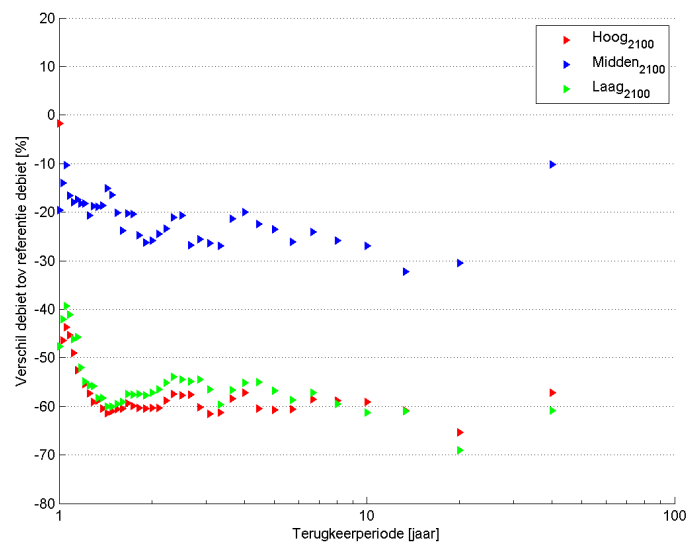
Horizont	Hoog	Midden	Laag
VHM 2100	-60%	-25%	-58%

TABEL 7.3: Gemiddeld percentage van variatie in laagwaterafvoer tegen 2100

7. SCENARIO-ANALYSE



FIGUUR 7.8: Terugkeerperiode laagwaterafvoer tegen 2100



FIGUUR 7.9: Percentage verandering laagwaterafvoer tegen 2100

7.3 Besluit

Dit hoofdstuk onderzocht de impact van een productieverhoging door het WPC en de impact van de klimaatwijziging voor België op debieten op de Bovenschelde. Het gecombineerd effect van beide impacten werd geëvalueerd op basis van het verloop van laagwaterextremen in functie van hun terugkeerperiode.

Door de verhoogde waterproductie aan *de Gavers* zou het debiet op het kanaal moeten stijgen van $0.8m^3/s$ tot $1.45m^3/s$. Dit heeft tot gevolg dat er meer water aan de Bovenschelde moet onttrokken worden om het kanaal op peil te houden. De invloed van deze verhoging was, gezien de onzekerheid van de modellen en de impact van de klimaatverandering, eerder klein.

De impact van de klimaatverandering gaf een duidelijke sterke daling van de laagwaterdebieten. Dit zal ertoe leiden dat in de toekomst - afhankelijk van het beschouwde scenario - aan de debietvraag op het kanaal niet altijd voldaan zal kunnen worden. De marge tussen het beschikbare debiet en de watervraag van de verschillende maatschappelijke partijen wordt bovendien zeer klein. Zelfs wanneer de onzekerheid van het modelresultaat in rekening wordt genomen kan men stellen dat watertekorten voor het kanaal in de toekomst op frequente basis zullen voorkomen.

Hoofdstuk 8

Conclusie en aanbevelingen

Gezien de suggesties gesteld in het onderzoek van 2009 en de vraag van de VMW, werd in dit onderzoek de focus gelegd op de waterkwantiteit. Uit de resultaten van 2009 bleek dat het bestaande hydrologisch model de laagwatertoestand op de Bovenschelde onnauwkeurig simuleert. Dit leidde ertoe dat geen conclusies over het voorkomen van watertekorten voor de bevoorrading van het kanaal en het waterproductiecentrum *de Gavers* konden getrokken worden. In voorgaande studie werd aangegeven dat het bekken opwaarts van Bossuit hier een belangrijke rol in speelt. Dit bekken Bossuit is gelegen in Noord-Frankrijk. Door de grootte van het bekken en de wisselwerking van kanalen bleek het vroeger moeilijk te modelleren op laagwaterafvoeren.

In voorliggend onderzoek werden twee conceptuele hydrologische modellen opgesteld. Voor het opstellen van deze modellen waren slechts te beperkte gegevens beschikbaar. Een deel van het onderzoek werd besteed aan het uitbreiden van de neerslag- en evaporatiereeksen en de reeksen werden bijgewerkt tot 2009. Om de invloed van de kanaalwerking op het natuurlijke afvoerregime in het bekken Bossuit in rekening te brengen werd het debiet tijdens droge periodes bestudeerd. Hieruit kwam als resultaat dat de debietmeting tijdens zeer droge periodes een duidelijke periodieke verstoring op dagbasis bevat die geen natuurlijke oorzaak kan hebben. Deze verstoring gaf tijdens zeer droge periodes een zeer laag schommelend debiet aan. Om een meer natuurlijk laagwaterdebiet te bepalen werd de reeks op dagbasis uitgemiddeld. Daarnaast werd het debiet dat in Noord-Frankrijk uit de Bovenschelde wordt ontnomen voor de bevoorrading van enkele kanalen, terug toegevoegd aan de debietmeting. De gewijzigde daggemiddelde debietreeks stelde hierdoor een meer natuurlijke neerslagafvoer voor. Aan deze meting werden de twee hydrologische modellen afgeijkt.

Deze modellen waren het VHM- en het NAM-modelleringsysteem. Voor de kalibratieperiode van 8 jaar konden betere resultaten naar laagwaterafvoeren bereikt worden. Het bleek echter moeilijk zowel de laag- als hoogwaterafvoeren simultaan correct te modelleren. Gezien de focus van dit onderzoek op laagwater lag, werd er minder aandacht aan hoogwaterafvoer besteed. De modelparameters van het

NAM-model bleken sterk af te wijken van normale parameterwaarden, waardoor de twijfel rees dat het model overgeparametriseerd was. Als een mogelijke oorzaak van deze sterke afwijking van normale parameterwaarden kon aan de zeer grote oppervlakte van het bekken Bossuit gedacht worden. Desondanks werden goede resultaten bekomen.

Het debiet op het kanaal werd in de studie opnieuw bepaald aan de hand van 4 jaar pomp- en versassingsgegevens, zodat een goede schatting gemaakt kon worden over het jaarlijkse gemiddelde debiet op het kanaal Bossuit-Kortrijk. Hieruit bleek dat er een sterk verschil bestaat tussen het netto pompdebiet dat het kanaal instroomt in de zomer- en wintermaanden. De oorzaak van dit verschil kon in dit onderzoek niet bepaald worden. Er werd daarom met een constant debiet gewerkt.

Met behulp van het beschikbare hydrodynamische model werd het effect van de routing bestudeerd tussen het hydrologisch debiet van het bekken Bossuit, dat als opwaartse randvoorwaarde aan het model wordt aangelegd, en het debiet op de Bovenschelde ter hoogte van het pompgemaal van Bossuit. De afstand waarop deze twee locaties gelegen zijn, bleek te beperkt om significante verschillen in debiet te veroorzaken. Hierdoor kon het debiet afkomstig uit het hydrologisch model rechtstreeks voor de impact-analyse gebruikt worden.

In de impact-analyse werd zowel een productieverhoging als de invloed van klimaatverandering in rekening gebracht. Daartoe werd het voorkomen van laagwaterafvoeren uitgezet in functie van hun terugkeerperioden. Er werd een toekomstige debietvraag van het kanaal bepaald in functie van de productieverhoging van de watermaatschappij. Grafieken werden opgesteld waarop zowel het beschikbare debiet op de Bovenschelde als de debietvraag voor de voeding van het kanaal aangegeven werden. Zo kon op eenvoudige wijze het voorkomen van watertekorten in functie van de terugkeerperiode afgelezen worden.

De simulaties werden voor drie termijnen (2030, 2060 en 2100) uitgevoerd met het VHM-model, zodat ook een beeld op middellange termijn werd verkregen. Hieruit bleek dat vanaf 2060 de laagwaterafvoeren sterk dalen op de Bovenschelde. Voor het middenscenario gaf dit een daling tot -25% , voor hoog- en laagscenario een daling tot -60% . Hierdoor daalde de marge tussen het beschikbare debiet en de debietvraag zeer sterk, zodat gezien de onzekerheden van het model een watertekort op frequente basis, om de 10 jaar, tot zeer frequent, om de 2 jaar, niet uitgesloten is, afhankelijk van welke termijn en welk scenario in beschouwing wordt genomen. De invloed van de productieverhoging werd als klein ervaren in vergelijking met de daling ten gevolge van klimaatverandering.

Voor de tijdhorizont 2060 werd zowel het VHM-model als het NAM-model doorerekend. Beide modellen bleken dezelfde daling te simuleren, al was de daling ten opzichte van de referentieperiode bij het NAM-model iets meer uitgesproken. Absoluut gezien bleek het NAM-model de laagwaterafvoeren wel lager te simuleren

dan het VHM-model. In het onderzoek was het niet duidelijk of het VHM-model de laagwaterdebieten te hoog inschat, dan wel het NAM-model de debieten te laag simuleert. Het VHM-model kan daarom gezien worden als een ondergrens van de mogelijke debietdaling, terwijl het NAM-model meer de maximale debietdaling van laagwaterafvoer weergeeft.

Als besluit kan gesteld worden dat beide modellen een significante daling voorspellen, zodat de debietvraag in de toekomst op de Bovenschelde frequent groter zal zijn dan de aanvoer. Of dit noodzakelijk tot watertekorten voor de drinkwatermaatschappij zal leiden kon in deze studie niet bepaald worden. Dit is sterk afhankelijk van de duur van de laagwaterperioden alsook van de manier waarop het debiet en het peil op het kanaal behouden blijven. Dit laatste is sterk bepaald door overeenkomsten tussen de verschillende maatschappelijke actoren en is daarom moeilijk in rekening te brengen. Deze actoren zijn niet alleen de watermaatschappij en andere industrieën langs het kanaal, maar ook opwaartse en afwaartse gelegen gebruikers van het Scheldewater.

Verder onderzoek zou zich kunnen toespitsen op een verfijning van de laagwaterafvoer uit het bekken Bossuit. Hoewel in dit onderzoek betere resultaten werden bekomen, bleek tijdens de studie dit gebied te groot om het met één conceptueel model te beschrijven. Hierdoor onstond er niet te verwaarlozen onzekerheid op de modelresultaten. Een oplossing zou zijn dat het bekken Bossuit opgedeeld wordt in kleinere subbekkens en voor deze subbekkens aparte hydrologische modellen worden opgesteld. De invloed van debietafname door kanalen en stuwwerking zou dan binnen de hydrodynamische component kunnen in rekening gebracht worden. In hoeverre dit mogelijk is, daar dit bekken in Noord-Frankrijk gelegen is, daarover kan in dit werk geen uitspraak gedaan worden.

Ook moet nader bepaald worden hoe het peil op het kanaal behouden blijft en of men het beperkt laat dalen tijdens periodes waarin het debiet op de Bovenschelde kleiner wordt dan de watervraag van het kanaal. Bij dit aspect zou de duur van laagwaterafvoeren een belangrijke rol spelen. In de studie werd opgemerkt dat het debiet op het kanaal naargelang het seizoen sterk verschillend is. Voor een gedetailleerde studie van het kanaal zal het nodig zijn voor dit verschil een verklaring te vinden. Wanneer men het waterpeil in het kanaal laat dalen en nadien terug opvult met grotere hoeveelheden Scheldewater, zal het aspect van de waterkwaliteit sterk aan belang winnen. Dit kan in de toekomst onderzocht worden, en de resultaten van het kwaliteitsonderzoek uit 2009 kunnen hierbij een leidraad vormen.

Bijlagen

Bijlage A

Hoogwaterafvoer Bossuit

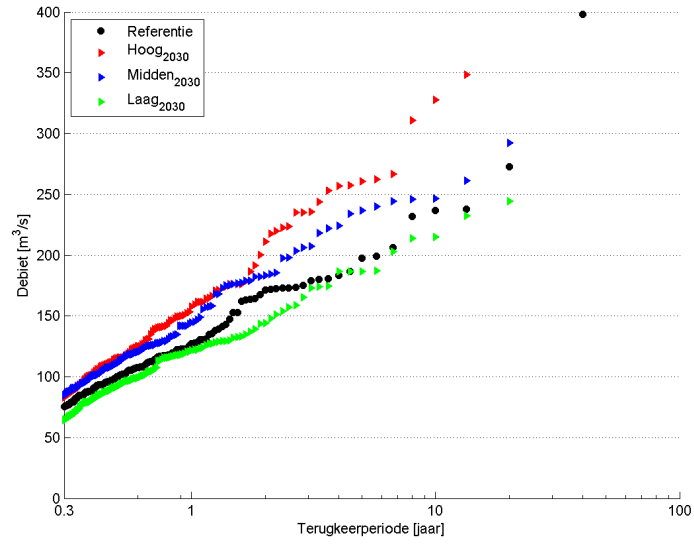
In deze bijlage worden de grafieken van de verschillende scenario's van klimaatverandering voor de hydrologische afstroming uit bekken Bossuit op de Bovenschelde weergegeven. Dit gebeurt met het VHM-model voor de drie termijnen; 2030, 2060 en 2100. Voor 2060 werd tevens een simulatie met het NAM-model gedaan. De resultaten kunnen vergeleken worden met de resultaten uit een studie van het WL [2]. De studie bestudeert het effect van klimaatwijziging op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituaties voor Leie- en Bovenscheldebekken. Onderstaande tabel A.1 geeft het gemiddelde percentage van de variatie aan hoogwaterafvoer. Op de volgende pagina's zijn de grafieken voor de modellering met het VHM-model weergegeven.

Horizont	Hoog	Midden	Laag
VHM 2030	+35%	+16%	-4%
VHM 2060	+44%	+11%	-4%
NAM 2060	-34%	-43%	-56%
VHM 2100	+65%	+10%	-12%
vgl NAM 2100[2]	-18%	-20%	-56%

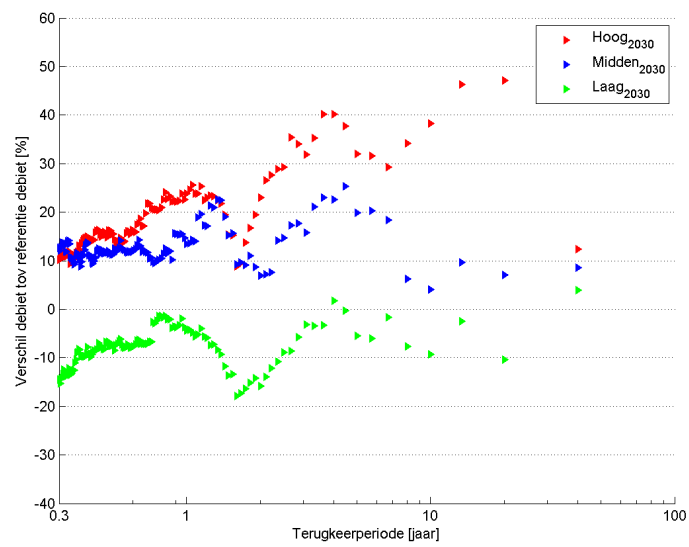
TABEL A.1: Gemiddeld percentage van variatie in hoogwaterafvoer

De conclusies die hieruit kunnen opgemaakt worden, zijn niet eenduidig. Het VHM-model geeft een stijging van de hoogwaterafvoeren tegen 2100 weer voor het hoogscenario en een beperkte daling voor het laagscenario ten opzichte van de referentieperiode. De resultaten van de studie van het WL[2] geven een zeer sterke daling weer. Het nieuw opgestelde NAM-model in dit thesisonderzoek geeft voor 2060 eveneens een sterke daling van de hoogwaterafvoeren onder de drie scenario's. Het wordt hierdoor moeilijk een uitspraak over de nauwkeurigheid van de modellen te doen. Bovendien werden de simulaties in dit thesisonderzoek op dagelijkse stap gesimuleerd terwijl voor hoogwaterafvoer een uurlijkse simulatie zou moeten worden uitgevoerd. Een mogelijke oorzaak van de sterk uiteenlopende resultaten zou de uitgestrektheid van het gebied kunnen zijn. Een opdeling in kleinere deelbekkens is hier een mogelijkheid voor verder onderzoek.

A.1 Horizont 2030

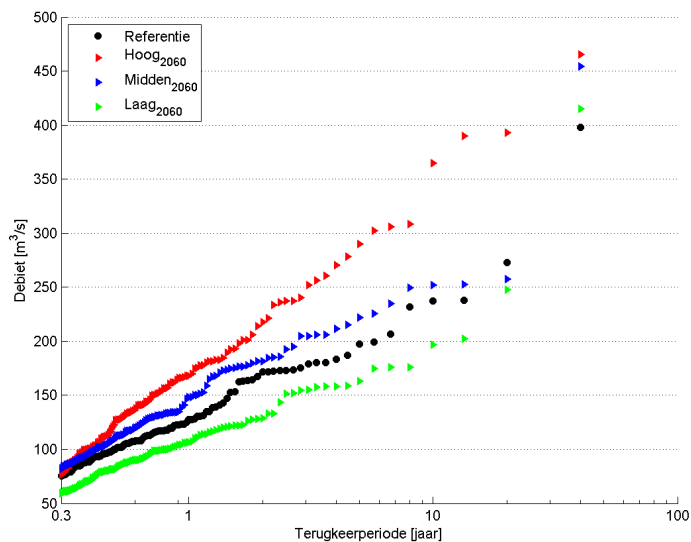


FIGUUR A.1: Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2030

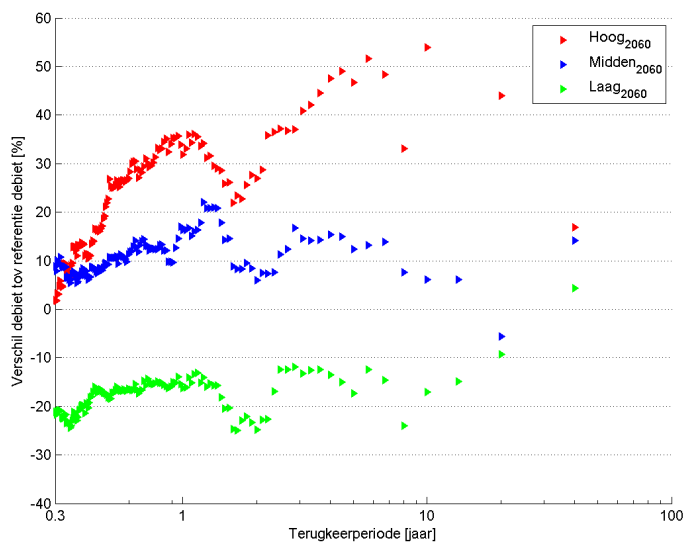


FIGUUR A.2: Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2030

A.2 Horizont 2060

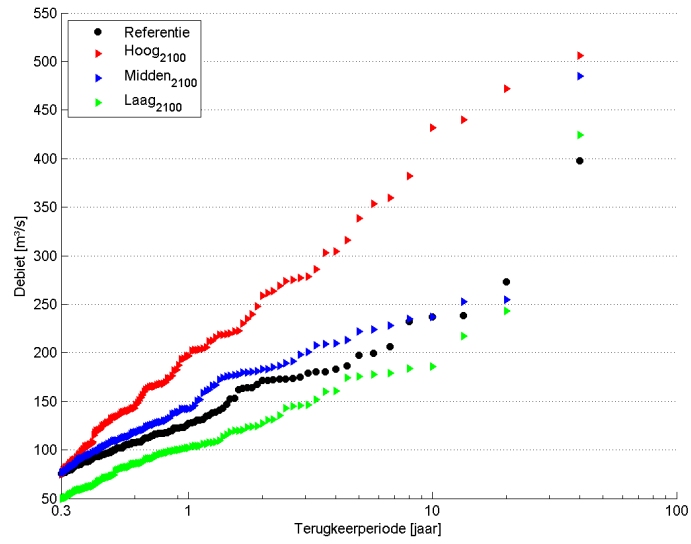


FIGUUR A.3: Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2060

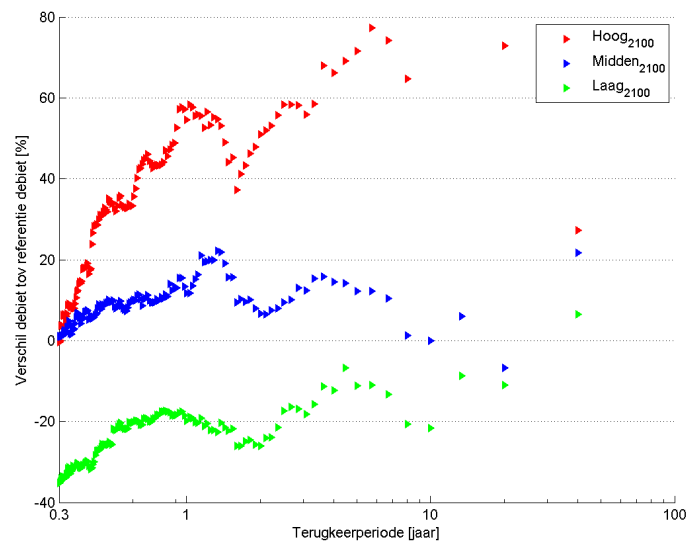


FIGUUR A.4: Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2060

A.3 Horizont 2100



FIGUUR A.5: Terugkeerperiode hoogwaterafvoer tegen 2100



FIGUUR A.6: Percentage verandering hoogwaterafvoer tegen 2100

Bibliografie

- [1] P. Willems, L. De Bruyn, and J. Brouwers, “Klimaat,” *Natuurverkenning 2030*, pp. 55–66, 2009.
- [2] T. Vansteenkiste, K. Holvoet, P. Willems, W. Vanneuville, P. Deckers, and F. Mostaert, “Effect van klimaatwijzigingen op afvoerdebieten in hoog- en laagwatersituaties en op de globale waterbeschikbaarheid. deel 1: Gevalstudie voor Leie en Bovenschelde bekken,” tech. rep., Waterbouwkundig Laboratorium (Vlaamse Overheid), 2009.
- [3] K. Holvoet and W. Vanneuville, “Climate change impact on hydrological extremes in Flanders: Regional differences,” 2008.
- [4] Anoniem, “Grondwaterbeheer in Vlaanderen - het onzichtbare water doorgrond,” tech. rep., Vlaamse Milieumaatschappij, 2006.
- [5] R. Ven, “Impact van de klimaatverandering op watertekorten voor drinkwaterproductie in Vlaanderen,” Master’s thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2009.
- [6] IMDC, “Opmaak van hydrologische en hydraulische modellen voor de Bovenschelde, het kanaal Gent-Terneuzen en het kanaal Gent-Oostende (Eindrapport),” tech. rep., IMDC ism DHI, februari 2005.
- [7] O. Boukhris, *Climate change impact on hydrological extremes along rivers in Flanders*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2008.
- [8] P. Willems, “Impact van klimaatverandering op Vlaamse rivieren,” *Het Ingenieursblad*, pp. 28–33B, 2007.
- [9] P. Willems, V. Ntegeka, P. Baguis, and E. Roulin, “Climate change impact on hydrological extremes along rivers and urban drainage systems in Belgium. Phase 1: Development of climate change scenarios for rainfall and ETo,” tech. rep., CCI-HYDR project, april 2008.
- [10] P. Willems, “Invloed van klimaatverandering in Vlaanderen,” *Het Ingenieursblad*, vol. 11-12, pp. 2–6, 2008.

- [11] P. Willems and V. Ntegeka, *CCI-HYDR Perturbation Tool: a climate change tool for generating perturbed time series for the Belgian climate*. CCI-HYDR project, 2008.
- [12] P. Willems, “Actualisatie en extrapolatie van hydrologische parameters in de nieuwe Code van Goede Praktijk voor het Ontwerp van Rioleringsystemen,” tech. rep., Katholieke Universiteit Leuven, september 2009.
- [13] P. Willems, “Invloed van klimaatverandering op hoog- en laagwater in Vlaanderen,” 2009.
- [14] Anoniem, “Kaart van waterwegen in West-Vlaanderen, Oost-Vlaanderen en Noord-Frankrijk.”
- [15] PINE, “Prospects of Inland navigation within the Enlarged Europe (Full Final Report),” tech. rep., PINE, 2004.
- [16] F. Desmyter, “De Europese Kaderrichtlijn: Water,” tech. rep., VIWC (Vlaams Integraal Wateroverleg Comité), 2001.
- [17] Anoniem, “Waterproductiecentrum De Gavers,” 2008.
- [18] W. Rogge and L. Liekens, “Waterproductiecentrum ‘De Gavers’,” *Water*, vol. 86, pp. 15–20, januari/februari 1996.
- [19] J. Hammenecker, “In de weer voor water (Waterproductiecentrum De Gavers).”
- [20] Anoniem, “Ultrafiltratie voor WPC De Gavers,” 2008.
- [21] Anoniem, “Uitbreidingswerken in De Gavers zijn voltooid,” 2005.
- [22] Anoniem, “VMW neemt eerste grijswaterinstallatie in gebruik,” 2009.
- [23] P. Willems, “Waterloopmodellering,” tech. rep., Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [24] P. Willems, “A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models,” *Environmental Modelling & Software (Elsevier)*, vol. 24, p. 311–321, 2009.
- [25] P. Willems, *WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool*. Faculty of Engineering: Department of Civil Engineering: Hydraulics Section, 2.0 ed., 2004.
- [26] P. Willems, “VHM approach: transparant, step-wise and data mining based identification and calibration of parsimonious conceptual rainfall-runoff models,” 2009.
- [27] Anoniem, *MIKE 11: A modelling system for Rivers and Channels*. DHI, 2008 ed., 2008.

- [28] Anoniem, “Deelrapport: Neerslag en Verdamping,” tech. rep., Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI), 2008.
- [29] KMI, “De belangrijkste meteorologische gebeurtenissen vanaf de 20 ste eeuw (statistieken en gebeurtenissen).”
- [30] Kennislink, “Koelwaterprobleem stapje erger.”
- [31] P. Willems, *ECQ: Hydrological extreme value analysis tool*. Katholieke Universiteit Leuven - Hydraulics Laboratory.

Fiche masterproef

Student: Bert Mulleman

Titel: Impact van de klimaatverandering op watertekorten voor drinkwaterproductie in Vlaanderen

Engelse titel: Impact of climate change on drinking water shortage in Flanders

UDC: 69

Korte inhoud:

De studie handelt over mogelijke watertekorten voor oppervlaktewaterwinning als bron voor drinkwaterproductie in Vlaanderen. Drinkwaterproducenten zoeken alternatieven voor winning uit diepe grondwaterlagen. De druk op de grondwatertafel dient immers te worden verminderd; en er is de blijvende toename van de vraag naar meer zuiver drinkwater. Oppervlaktewater, dit zijn waterlichamen zoals kanalen en rivieren, is een mogelijk alternatief. Voldoende onderzoek moet echter gebeuren over de vraag of deze productie ook tijdens periodes van droogte gewaarborgd kan worden. Het debiet in deze waterlichamen schommelt immers sterk tijdens droge periodes. Studies naar de gevolgen van een klimaatwijziging tonen aan dat laagwaterafvoeren van Vlaamse rivieren sterk zouden kunnen dalen. Vandaar de noodzaak de impact van deze debietdaling te onderzoeken op de waterproductie uit oppervlaktestructuren. Voor dit thesisonderzoek wordt een specifiek waterproductiecentrum - *de Gavers* nabij Stasegem-Kortrijk (West-Vlaanderen) - als studieobject genomen. Het productiecentrum is gelegen langs het kanaal Kortrijk-Bossuit. Men wint water uit dit kanaal om het tot drink- en proceswater te zuiveren. Het kanaal wordt via een pompemaal nabij Bossuit gevoed met water uit de Bovenschelde. Het zijn deze toekomstige laagwaterdebieten op de Bovenschelde die bepalen of er al dan niet watertekorten voor het productiecentrum zullen optreden. Laagwaterdebieten op de Bovenschelde worden bepaald door de neerslagafstroming in het opwaartse bekken gelegen in Noord-Frankrijk. Voor dit bekken wordt in de studie een nieuw conceptueel neerslagafstromingsmodel opgesteld. Er wordt getracht de laagwatertoestand zo correct mogelijk te modelleren, waarbij wordt rekening gehouden met menselijke invloeden die het natuurlijke afvoerregime verstoren. Een impact-analyse wordt voor drie termijnen tot 2100 uitgevoerd met de voor België ontwikkelde klimaatscenario's. Zo kan de evolutie van een mogelijk dalen van de laagwaterdebieten in kaart gebracht worden en kan de impact op watertekorten voor het drinkwaterproductiecentrum *de Gavers* bepaald worden.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Promotor: Prof. dr. ir. Patrick Willems

Assessoren: Prof. dr. ir. Jean Berlamont
Ir. Dirk De Smet (VMW)

Begeleiders: Ir. Thomas Vansteenkiste
Ir. Victor Ntegeka