

RELATIE TUSSEN KANSVERDELING VAN AFVOER EN LOKALE WATERSTANDEN VAN DE RIJN

DOOR MIDDEL VAN EEN STATISTISCHE ANALYSE VAN LAAGWATER- EN HOOGWATERPERIODEN



Luuk Vonk
S1586661
Bachelor Eindopdracht Civiele Techniek
Universiteit Twente

Begeleiders:
Dr. Arjan Tuijnder (Arcadis)
Dr. Ir. Bart Vermeulen (Universiteit
Twente)

UNIVERSITY OF TWENTE.

 **ARCADIS** | Design & Consultancy
for natural and
built assets

5 juli 2017

SAMENVATTING

In Nederland stroomt veel water via de rivieren tot zee. Om ons land beter te beschermen tegen deze grote hoeveelheden water voert Rijkswaterstaat het Ruimte voor de Rivierproject uit. Voor dit project worden veel maatregelen op verschillende locaties uitgevoerd. Bij de uitvoering van deze projecten wordt er soms hinder ondervonden door de uitvoerder als gevolg van laagwater of hoogwater. Bij uitzonderlijk lange perioden van hinder kan de uitvoerder aanspraak maken op schadevergoeding, waarbij wel vastgesteld dient te worden of deze periode uitzonderlijk lang is. Dit is de aanleiding geweest om een statistisch onderzoek te doen naar de kans op laagwaterperioden op basis van afvoeren bij Lobith.

Het voordeel van het gebruiken van de afvoerverdeling bij Lobith is dat deze mogelijk toepasbaar is voor alle Rijntakken. Het kan echter zo zijn dat externe invloeden, zoals stuwen, de relatie tussen afvoer en waterstand dusdanig beïnvloeden dat er niet langer sprake is van eenzelfde verdeling, en dus dat een verdeling bij Lobith op basis van afvoer niet representatief is voor de verdeling van afvoeren ergens langs een van de Rijntakken.

Door een statistische analyse van zowel de afvoeren bij Lobith als de waterstanden op twaalf verschillende locaties langs de Rijn(takken) is bepaald in hoeverre de verdelingen overeenkomen en dus voor welke locaties het mogelijk is de veel generiekere verdeling bij Lobith te gebruiken.

Uit de analyses en de vergelijking van de lokale kansverdelingen met de op afvoer gebaseerde kansverdelingen is gebleken dat de afvoerverdeling bij Lobith niet volledig representatief is voor alle verschillende locaties en voor alle verschillende soorten gebeurtenissen.

Opgedeeld in de drie takken van de Rijn blijkt dat de overeenkomst tussen lokale verdeling en afvoerverdeling (deels) overeenkomt voor de Waal tot Vuren, de IJssel tot Kampen en de Nederrijn tot Arnhem. Bij hoogwater geldt dat de overeenkomst ook deels overeenkomt. De kansverdeling van het aantal dagen hoogwater is voor zowel afvoeren als waterstandne gelijk. Echter blijkt dat hoogwaterperiodes langer aanhouden dan dat de afvoerverdeling weergeeft. Met andere woorden duurt hoogwater op de locaties langer dan de verdeling bij Lobith aangeeft. Dit resulteert in een onderschatting van de kans op dergelijke hoogwaterperiodes.

Ook over de tijd gezien zijn er verschillen in kansverdeling. Op sommige locaties is een piek in de kans op laagwater te zien waar deze op andere locaties ontbreekt.

Het is daarom niet mogelijk om een eenduidige conclusie te geven over waar ruimtelijk gezien de afvoerverdeling bij Lobith representatief is. Er zijn afhankelijk van het type kansverdeling verschillen die zich niet in een regel laten samenvatten.

Ook kan gesteld worden dat de extreme waardenstatistiek een geschikte methode is om een onderbouwde kansverdeling op te stellen voor lange periodes van aaneengesloten laagwater of hoogwater. De lange aaneengesloten perioden zijn het meest interessant omdat deze in de praktijk de meeste hinder opleveren. De extreme waarde statistiek maakt het mogelijk om de kans op nog niet waargenomen extreme gebeurtenissen te bepalen (extrapoleren), en maakt het bovendien mogelijk een kansverdeling op te stellen voor een lange gebeurtenis waarbij de invloed van de veelvoorkomende korte gebeurtenissen is weggefilterd. Hieruit blijkt dat de kans op een lange aaneengesloten periode groter is dan wanneer wordt uitgegaan van enkel empirische data.

VOORWOORD

Voor u ligt mijn bachelor thesis, geschreven voor de afronding van de bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. In de periode van april tot juni 2017 heb ik bij de afdeling Water en Milieu van Arcadis in Zwolle gewerkt. Dit onderzoek heeft zich gericht op het toetsen van een methode gebaseerd op een analyse van afvoeren bij Lobith. Dit heeft mij de gelegenheid gegeven om mijn kennis over de statistiek weer goed op te frissen en in de praktijk te brengen. Ook heeft dit onderzoek mij een veel geleerd over het uitvoeren van data-analyse. Tevens heb ik veel geleerd over het reilen en zeilen binnen een grote organisatie als Arcadis.

Graag wil ik Arjan Tuijnder van Arcadis bedanken voor de mogelijkheid om deze opdracht uit te voeren. Hij kwam met het idee voor deze opdracht en heeft mij geholpen bij het verder inrichten van de opdracht en het beantwoorden van mijn vragen. Ook wil ik graag alle andere collega's bij Arcadis bedanken voor hun warme welkom. Vooral de lunchwandelingen waren een prettige afleiding voor het soms lang soms lang kijken naar een monitor.

Als laatste wil ik graag Bart Vermeulen bedanken. Als begeleider vanuit de Universiteit Twente heeft hij mij geholpen door mee te denken bij het opzetten van de opdracht, maar ook bij de uitvoering ervan. Ook heeft zijn feedback geholpen om het verslag verder te sturen.

Zwolle, 5 juli 2017

Luuk Vonk

INHOUD

1 INLEIDING	7
1.1 ACHTERGROND.....	7
1.2 HOOFD- EN DEELVRAGEN	8
1.3 AFBAKENING ONDERZOEK.....	9
1.4 LEESWIJZER.....	9
2 METHODE.....	10
2.1 STATISTISCHE ANALYSE.....	10
2.1.1 Data	10
2.1.2 Waterstandsgrenzen	10
2.1.3 Opbouw van de analyse.....	11
2.2 VERGELIJKEN VAN RESULTATEN	11
2.3 KANSVERDELING VAN EXTREMEN	12
3 RESULTATEN ZWOLLE EN KAMPEN	14
3.1 TIJD SERIES ZWOLLE EN KAMPEN	14
3.2 VERDELING VAN DE WATERSTANDEN EN AFVOER	14
3.3 LAAGWATER.....	16
3.3.1 Aantal dagen laagwater in een jaar.....	16
3.3.2 Aaneengesloten dagen laagwater.....	17
3.4 HOOGWATER	19
3.4.1 Aantal dagen hoogwater in een jaar.....	19
3.4.2 Aaneengesloten dagen hoogwater.....	21
3.5 VARIATIE VAN WATERSTANDEN EN AFVOER OVER HET JAAR	22
3.6 KANS OP EEN ONWERKBARE SITUATIE OVER HET JAAR.....	24
4 RESULTATEN RIJNTAKKEN	25
4.1 IJSSEL.....	27
4.2 NEDERRIJN/LEK	27
4.3 WAAL	29
5 VERDELING VAN LANGE EXCURSIELENGTEN	30
5.1 EXTREME WAARDENVERDELING.....	30
6 DISCUSSIE.....	33
7 CONCLUSIE	34
8 BIBLIOGRAFIE	36
9 BIJLAGEN.....	37
BIJLAGE 1: WATERSTANDSGRENZEN VOLGENS WATERSTANDSDUURLIJN 2012	38
BIJLAGE 2: TIJD SERIE WATERSTAND ZWOLLE EN KAMPEN	39
BIJLAGE 3: GECOMBINEERDE VERDELING (KANS PER MAAND).....	40
BIJLAGE 4: GECOMBINEERDE VERDELING O.B.V. AFVOER LOBITH.	41
BIJLAGE 5: BIJLAGEN BIJ HOOFDSTUK 4	42
BIJLAGE 6: KANSVERDELING LAAGWATER PER MAAND ZWOLLE/KAMPEN/LOBITH	45
BIJLAGE 7: OVERSCHRIJDINGSKANS EXCURSIELENGTE O.B.V. FRÉCHETVERDELING (GEV II) ..	46

LIJST MET TABELLEN

TABEL 1 RESULTATEN ANALYSE RIJNTAKKEN	26
TABEL 2 GEV-PARAMETERS.....	31

LIJST MET FIGUREN

FIGUUR 1 RIVIERENKAART NEDERLAND.....	7
FIGUUR 2 VOORBEELD VAN EEN ECDF	11
FIGUUR 3 KOLMOGOROV-SMIRNOV TEST.....	12
FIGUUR 4 ECDF WATERSTAND ZWOLLE/KAMPEN EN AFVOER LOBITH MET ONDERSCHRIJDINGSKANS LAAGWATER, HOOGWATER EN MEDIAAN	15
FIGUUR 5 HISTOGRAM AANTAL DAGEN LAAGWATER PER JAAR	16
FIGUUR 6 ECDF AANTAL DAGEN LAAGWATER PER JAAR VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER) MET 50,70 EN 90E PERCENTIEL	17
FIGUUR 7 EXCURSIELENGTE LAAGWATER VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER)	18
FIGUUR 8 ECDF EXCURSIELENGTE LAAGWATER VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER)	18
FIGUUR 9 HISTOGRAM AANTAL DAGEN HOOGWATER PER JAAR VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER)	19
FIGUUR 10 ECDF AANTAL DAGEN HOOGWATER PER JAAR VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER) MET 70E EN 95E PERCENTIEL.	20
FIGUUR 11 HISTOGRAM EXCURSIELENGTE HOOGWATER VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER)	21
FIGUUR 12 ECDF EXCURSIELENGTE HOOGWATER VOOR ZWOLLE, KAMPEN EN LOBITH (AFVOER).....	21
FIGUUR 13 VARIATIE WATERSTAND ZWOLLE EN KAMPEN EN AFVOER LOBITH	22
FIGUUR 14 STREEFPEIL IJSSELMEER.....	23
FIGUUR 15 KANS OP AANTAL NIET WERKBARE DAGEN PER MAAND ZWOLLE (A) EN KAMPEN (B).....	24
FIGUUR 16 GEANALYSEERDE LOCATIES	25
FIGUUR 17 SELECTIEMETHODEN EXTREME WAARDEN VOOR LAAGWATER (LINKS) EN HOOGWATER (RECHTS).....	30
FIGUUR 18 GEV II VOOR EXCURSIELENGTE LAAGWATER (LINKS) EN HOOGWATER (RECHTS).....	31

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Nederland ligt in de delta van drie grote Europese rivieren, de Rijn, Maas en Schelde. Van de totale hoeveelheid water die deze drie rivieren Nederland binnenvoeren komt ongeveer 90% binnen via de Rijn. Om het risico op overstromingen bij extreem hoge afvoeren te verkleinen voert Rijkswaterstaat verschillende projecten uit binnen het Ruimte voor de Rivier programma. Sinds 2007 worden er daarvoor werkzaamheden verricht die onder andere bestaan uit rivierverruimende projecten, of het aanleggen van nevengeulen of keringen (Rijkswaterstaat, 2017). Om de plannen van het Ruimte voor de Rivier project ten uitvoer te brengen worden door aannemers werkzaamheden verricht in en rondom de rivieruiterwaarden.



Figuur 1 Rivierenkaart Nederland

Door de veranderlijke omstandigheden in de rivieren is het niet altijd mogelijk deze werkzaamheden uit te voeren. Te hoge of te lage waterstanden of te hoge stroomsnelheden kunnen problemen opleveren. Denk hierbij aan schepen die niet kunnen afmeren of duikers die niet veilig het water in kunnen. Er is dan sprake van een niet werkbare situatie voor de uitvoerders. De werkzaamheden zullen dan moeten worden stilgelegd, wat tijdverlies oplevert. Dit tijdverlies gaat vaak gepaard met geldverlies.

Het risico voor een niet werkbare situatie ligt in principe bij de aannemer. Maar in uitzonderlijke gevallen kan een aannemer aanspraak maken op een vergoeding van Rijkswaterstaat. Hiervoor moet echter gesteld kunnen worden dat de oorzaak van de hinder uitzonderlijk was. Vanwege een lange periode van laagwater in 2015 heeft Rijkswaterstaat een opdracht neergelegd bij Arcadis om te bepalen wat de kans op een dergelijke laagwaterperiode als die in 2015 is.

Om deze vraag te beantwoorden is door Arcadis onderzoek gedaan naar de laagwaterperiode van 2015. Dit onderzoek gaat in op de kans van optreden van de gebeurtenissen in 2015 vergeleken met andere jaren en stelt een algemene kansverdeling op voor het optreden van laagwater.

Met dit rapport kan bepaald worden of een laagwaterperiode dan wel ieder andere periode, een uitzonderlijke gebeurtenis is, en of er sprake zou zijn van een schadevergoeding. Hiervoor is een analyse uitgevoerd van de afvoeren gemeten bij Lobith.

De Rijn stroomt Nederland bij Lobith binnen en splitst zich dan tot Waal en Nederrijn. Vervolgens splitst de Nederrijn bij Arnhem tot de Nederrijn/Lek en de IJssel. Zie ook Figuur 1.

Wanneer er geen andere invloeden op de waterstand zijn dan de afvoer zou de afvoerverdeling bij Lobith gelijk moeten zijn aan de afvoerverdeling en dus de waterstandsverdeling op de verschillende locaties langs de Rijntakken. In de praktijk zijn er echter vele invloeden die ervoor zorgen dat de afvoer gemeten bij Lobith niet een op een overeenkomt met de afvoer op een locatie verder benedenstrooms.

In dit onderzoek staat de vraag centraal op welke locaties de afvoerverdeling bij Lobith een representatief beeld geeft voor de verdeling van waterstanden langs de Rijntakken. Daarvoor zal een statistische analyse uitgevoerd worden van de gemeten waterstanden op verschillende locaties langs de Rijn. Deze worden vergeleken met de kansverdeling op basis van de afvoer bij Lobith. Zo kan worden bepaald voor welke locatie de generieke kansverdeling bij Lobith geschikt is, en waar het beter is om lokale verdelingen te gebruiken.

1.2 Hoofd- en deelvragen

Het hoofddoel van dit onderzoek is te bepalen hoe een op lokale waterstanden gebaseerde analyse van de Rijn zich verhoudt tot een op rivierafvoer gebaseerde aanpak. Dit onderzoek moet enerzijds antwoord geven op de vraag of de aanpak met lokale waterstanden tot andere resultaten en conclusies leidt, anderzijds moet het inzicht geven in uitkomsten en conclusies gebaseerd op de aanpak met lokale waterstanden en moet het duiden waar en waarom de ene aanpak boven de andere geprefereerd dient te worden.

De onderzoeksvraag is daarom als volgt geformuleerd:

‘Hoe verhoudt zich een statistische analyse van lokale waterstanden zich tot eenzelfde analyse gebaseerd op rivierafvoeren bij Lobith?’.

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn vier deelvragen opgesteld. Deze moeten gezamenlijk antwoord geven op de onderzoeksvraag, en afzonderlijk inzicht bieden in de doelen die gesteld zijn.

- (1) Hoe ziet de kansverdeling voor het optreden van laagwater er over een jaar uit?
Deze deelvraag moet inzicht bieden in het optreden van laagwater gekeken naar de specifieke projectlocaties.
- (2) Hoe ziet de kansverdeling voor het optreden van hoogwater er over een jaar uit?
Deze deelvraag gaat in op het optreden van hoogwaters bij de specifieke projectlocaties.
- (3) Hoe ziet de gecombineerde kansverdeling, waarbij er geen ‘niet werkbare situaties’ optreden, er over een jaar uit?
Deze deelvraag gaat in op de kans dat er wel gewerkt kan worden voor een x aantal dagen.
- (4) Op welke locaties is een aanpak met lokale waterstanden geschikter, en waar zijn rivierafvoeren afdoende?
- (5) Hoe ziet de kansverdeling van extreme gebeurtenissen eruit wanneer gebruik gemaakt wordt van de extreme waardenstatistiek?

1.3 Afbakening onderzoek

Dit onderzoek richt zich op de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de lokale waterstanden langs de Rijntakken. Daarvoor zal er gekeken worden naar de rivieren IJssel, Waal en Nederrijn/Lek.

In dit onderzoek wordt er gedetailleerd gekeken naar de locaties Zwolle en Kampen. Hier is voor gekozen omdat deze locaties mogelijk interessant zijn wegens hun ligging. Van met name Kampen wordt verwacht dat op deze locatie een grote invloed van het IJsselmeer aanwezig is. Deze invloed zorgt ervoor dat er mogelijk geen constante Q-h relatie is, en dus dat conclusies op basis van de afvoer bij Lobith mogelijk niet toepasbaar zijn voor de locatie Kampen. Naast deze twee locaties wordt er ook breder gekeken naar andere locaties en of de afvoer bij Lobith nog representatief is voor de kans op laag- of hoogwater op een locatie langs een Rijntak. Voor deze locaties wordt een minder uitgebreide resolutie gegeven maar wordt er meer gericht op de conclusies.

Dit onderzoek richt zich op de toepasbaarheid van de kansverdeling bij Lobith voor specifieke locaties langs de Rijn. Op dit moment is er al veel onderzoek gedaan naar de kans op afvoeren of waterstanden. Ook is er al veel onderzoek gedaan naar de duur van een hoogwatergolf, dit is van belang binnen het hoogwaterbeschermingsprogramma (Chbab H. , 2016).

Er wordt in dit onderzoek niet diep ingegaan op een fysische verklaring van verschillen of overeenkomsten. Mogelijke verbanden worden wel genoemd maar niet verder onderzocht of dit ook daadwerkelijk de oorzaak is.

Verder wordt er ingegaan op het gebruik van de extreme waarden statistiek om een betere inschatting te kunnen maken van de kans op langdurige laagwater- of hoogwaterperioden. Het gebruik van extreme waardenstatistiek is veelvoorkomend op dit gebied en wordt met name gebruikt om de kans op extreme afvoeren te bepalen, zie onder andere (Chbab H. , 2016 en Parmet et. al.,2001). Waar deze onderzoeken zich met name richten op de kans op een extreem hoge afvoer, zal deze analyse zich richten op de kans op een lange aaneengesloten periode.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de methode die wordt gebruikt om de analyses uit te voeren toegelicht. Dit omvat een toelichting van de gekozen analyses en de uitkomsten van het onderzoek van Tuijnder (2016) worden toegelicht.

In Hoofdstuk 3 worden de resultaten van deze analyse gegeven en worden deze vergeleken met de analyse op basis van de afvoeren bij Lobith. Dit wordt gedaan aan de hand van de locaties Zwolle en Kampen. Dit hoofdstuk dient daarom ook als verdere toelichting op de methode.

In Hoofdstuk 4 wordt er breder gekeken, en wordt er met behulp van dezelfde analysetechniek naar meerdere locaties langs de Rijntakken gekeken om zo in kaart te brengen waar de afvoeranalyse het meest geschikt is.

In Hoofdstuk 5 wordt getracht een verbeterde inschatting van de excursielengte te geven door gebruik te maken van de extreme waarden statistiek

Hoofdstuk 6 omvat een discussie waarin nog een kritisch wordt gekeken naar dit onderzoek en naar de ligging daarvan binnen de huidige wetenschap.

In Hoofdstuk 7 worden de deelvragen en hoofdvraag beantwoord in de conclusie.

2 METHODE

2.1 Statistische analyse

2.1.1 Data

De analyse van waterstanden is een statistische analyse waarbij gemeten waterstanden worden gebruikt. Het is dus empirische data. Het is dan mogelijk om enerzijds de empirische data te gebruiken om deze te fitten aan een theoretische verdeling. Het is echter ook mogelijk om enkel de empirische data te gebruiken. Dit is mogelijk wanneer er een grote verzameling aan empirische data is. In dit geval is er voor meer dan 100 jaar aan data beschikbaar. Het is echter de vraag hoe relevant data is van 100 jaar geleden. In dit onderzoek wordt namelijk ingegaan op de kansberekening van het overschrijden van een bepaald aantal dagen onwerkbaar situatie. Het is daarom van belang relatief recente data te gebruiken. Het rivierprofiel zal er in 1900 heel anders hebben uitgezien. Daardoor is de onderliggende verdeling ook anders. Bovendien werd de stuw bij Driel pas in 1970 in gebruik genomen (Rijkswaterstaat, sd). Deze stuw bepaalt deels de verdeling van het water over de Nederrijn/IJssel en heeft daarmee een waarschijnlijk grote invloed op de onderliggende kansverdeling van afvoeren. Ook speelt de beschikbaarheid van data een rol. Vanaf 1989 is een nagenoeg complete dataset beschikbaar van zowel afvoeren bij Lobith als waterstanden bij verschillende meetpunten langs de Rijn. Voor deze analyse zal dan ook de gemeten afvoeren/waterstanden van 1989 t/m 2015 gebruikt worden. Deze data is vrij opvraagbaar bij Rijkswaterstaat.

2.1.2 Waterstandsgrenzen

Er is sprake van een onwerkbaar situatie wanneer er laagwater danwel hoogwater optreedt. Hiervoor hanteert Rijkswaterstaat de criteria laagwater $Q_{Lobith} < 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rijkswaterstaat, 2015) en voor hoogwater $Q_{Lobith} > 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Nieuwenhuis, Teunis, Vries, & Kort, 2016).

De waarde van $Q > 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ is onderdeel van de landelijke kleurcodering die Rijkswaterstaat aanhoudt. Wanneer de afvoer van de Rijn bij Lobith de waarde van $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ overschrijdt wordt de scheepvaart geïnformeerd en worden werkzaamheden in de buitendijkse gebieden mogelijk stilgelegd.

Om deze criteria vervolgens te 'vertalen' naar een waterstand voor de verschillende locaties wordt gebruikt gemaakt van de waterstandsduurlijnen zoals opgesteld in 2012 (Waterstandsduurlijn Bovenrijn en Waal, 2012). De waterstandsduurlijn geeft voor enkele debieten bij Lobith de verwachte plaatselijke waterstand.

Door middel van lineaire interpolatie is het mogelijk voor alle locaties de waterstand behorend bij $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ te bepalen. Deze waarden zijn gegeven in Bijlage 1.

Het gebruiken van de waterstandsduurlijn voor het vertalen van de afvoer naar een waterstand is geen absolute zekerheid. Een afvoer bij Lobith resulteert niet altijd een vaste waterstand op locatie. Er zit een zekere range in waterstanden die kunnen optreden bij een afvoer van 1500 of $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rura-Arnhem, 2010).

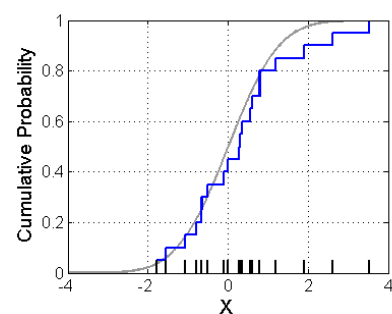
2.1.3 Opbouw van de analyse

Voor het analyseren van zowel de afvoeren (Tuijnder, 2016) als de waterstanden worden bepaalde stappen gezet. De verschillende analyses kunnen inzicht bieden in verschillende vragen en gebeurtenissen.

De analyse laat zich grofweg in vijf stappen opdelen, namelijk:

1. Analyse van de tijdserie
Door de tijdserie, dus het verloop van afvoeren/waterstanden over de tijd, te analyseren kan gezien worden of en wanneer er laagwater of hoogwaterperiodes in het jaar voorkomen. Dit wordt verder gebruikt om te beoordelen of de uitkomsten van de analyses wel gelijke gebeurtenissen beschrijven.
2. Analyse van de verdeling van afvoeren/waterstanden
Hierbij zal gekeken worden hoe laag en hoogwater zich verhoudt ten opzichte van de tijd. Deze kansverdeling laat zien in welk deel van de tijd een bepaalde waterstand of afvoer voorkomt. Tevens kunnen deze verdelingen worden vergeleken op overeenkomstigheid.
3. Het aantal onwerkbare dagen per jaar
Een maat voor laagwater/hoogwater is het aantal dagen dat dit optreedt in een jaar. Deze analyse richt zich op het totaal aantal dagen laag/hoogwater in een jaar en wat is de kans op een dergelijk aantal.
4. Het aantal aaneengesloten onwerkbare dagen per jaar
Het aantal onwerkbare dagen in een jaar kan verspreid zijn over verschillende perioden. Het is voor te stellen dat twee losstaande perioden van 20 onwerkbare dagen minder hinder opleveren dan een lange periode van 40 dagen. Daarom is er ook gekeken naar de aaneengesloten periode onwerkbare dagen, ook wel de excursiellengte genoemd.
5. Kans op een aantal onwerkbare dagen per maand bekeken
Om een verder inzicht te bieden in de kans op een onwerkbare periode wordt er een kansverdeling per maand opgesteld. Hierin is per maand bepaald wat de kans is op een x aantal dagen laagwater dan wel hoogwater of een gecombineerde verdeling met de kans waarin zowel hoogwater als laagwater wordt meegenomen.

Centraal in de analyses staan opgestelde empirische cumulatieve distributiefuncties (ECDF). Een ECDF is een verdeling die de waarnemingen beschrijft. Op de x-as staan de waarnemingen (X), op de y-as de onderschrijdingskans (P). Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 2. De blauwe lijn geeft de ECDF weer. In de ECDF valt bijvoorbeeld af te lezen dat een waarde van $X=0$ een onderschrijdingskans van 0.4 heeft. Dat wil zeggen dat 40% van de waarnemingen kleiner of gelijk zijn aan 0. Een ECDF geeft op basis van gedane waarnemingen de onderschrijdingskans van een waarde weer.



Figuur 2 Voorbeeld van een ECDF

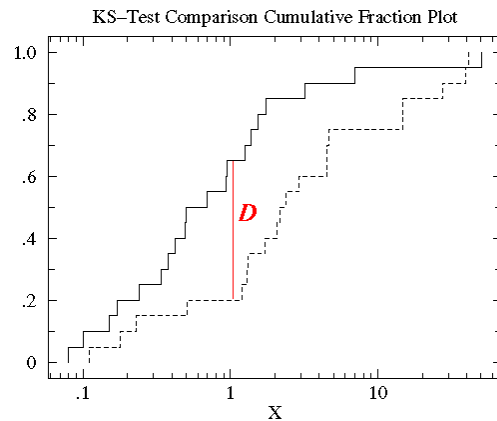
In hoofdstuk 3 wordt de analyse uitgevoerd en de resultaten gegeven voor Zwolle en Kampen op basis van waterstanden, en voor Lobith op basis van afvoer. Dit hoofdstuk dient tevens als verdere toelichting op de methode waarbij verder duidelijk gemaakt wordt hoe de verschillende analyses uitgevoerd zijn.

2.2 Vergelijken van resultaten

Om te bepalen of kansverdeling van afvoeren bij Lobith representatief is voor de kansverdeling van waterstanden langs de Rijnakken worden beide verdelingen met elkaar vergeleken. Voor het vergelijken van verdelingen zijn tal van statistische testen mogelijk.

De opgestelde verdelingen van aantal dagen laag/hoogwater per jaar en excursielengten zal worden vergeleken door middel van de Kolmogorov-Smirnov test (KS-test). De KS-test is een 'Goodness-of-Fit' test. Deze statistische test heeft als eigenschap dat het een parameter vrije test is. Dit houdt in dat er niet wordt getoetst of een dataset overeenkomt met een theoretische verdeling. De Kolmogorov-Smirnov test heeft als nulhypothese dat de twee vergeleken datasets uit eenzelfde onderliggende verdeling komen. Hiervoor worden de twee ECDF's behorend bij deze datasets met elkaar vergeleken. De grootste afstand tussen de twee verdelingen, zie D in Figuur 3, is de maat voor afwijking. Wanneer deze afwijking groter is dan de maximale afwijking behorend bij de gekozen significantie wordt de nulhypothese verworpen.

Het nadeel van deze test is echter dat de KS-test minder goed de verschillen in de staart van een verdeling kan onderscheiden (Engmann & Cousineau, 2011). Het gevolg kan zijn dat de KS-test ten onrechte de nulhypothese niet verworpt (type 2 fout). Wanneer de KS-test als uitkomst het niet verwerpen van de nulhypothese geeft is dat dus geen zekerheid dat de twee verdelingen uit eenzelfde onderliggende verdeling komen. Daarom is ook de visuele analyse van belang, omdat hierbij met name de verschillen in de staart (vorm van de verdeling) beter kunnen worden opgemerkt.



Figuur 3 Kolmogorov-Smirnov test

Er wordt in dit onderzoek gekeken naar de overeenkomsten of verschillen tussen een analyse op basis van afvoeren en een analyse op basis van waterstanden. Er wordt niet getoetst of de waterstandsgrenzen danwel afvoergrenzen van 1500 en 4200 ook daadwerkelijk tot overlast hebben geleid. Het is dus geen validatie van de analyse op basis van afvoeren.

2.3 Kansverdeling van extremen

Zoals in de voorgaande paragrafen al eerder is genoemd geeft een ECDF de verdeling van empirische data weer. Wanneer de ECDF op voldoende data gebaseerd is mag verondersteld worden dat de ECDF convergeert naar de onderliggende verdeling (Laeven & Sugihartono, 2006). Een ECDF heeft daardoor als nadeel dat de staart van de verdeling een grotere onzekerheid met zich meebrengt. Het begin en eind van de verdeling ($P=0$ en $P=1$) zijn gebaseerd op respectievelijk de laagste en hoogste waarneming. Dit is echter geen garantie dat er geen lagere dan wel hogere waarneming mogelijk is. De extreme waardenstatistiek gaat vanzelfsprekend over extreme gebeurtenissen. Dit wordt vaak gedefinieerd als gebeurtenissen met een kleine kans van voorkomen (Laeven & Sugihartono, 2006). De extreme waardenstatistiek heeft veel toepassingen binnen de hydrologie (Cirkel et. al., 2003). Zo wordt deze onder andere gebruikt voor het bepalen van hoge afvoeren voor het hoogwaterbeschermingsprogramma (Nieuwenhuis et. al, 2016) of het bepalen van extreme ontwerpbuien (Strijker & Hoes, 2004) waarbij met name de duur van een bui van belang is. De extreme waardenstatistiek wordt ook gebruikt voor het bepalen van extreme aanhoudende gebeurtenissen en is dan ook geschikt voor het bepalen van extreem lange aaneengesloten perioden laagwater of hoogwater.

De extreme waardenstatistiek is een uitgebreide theorie met veel verschillende varianten van verdelingen en voorwaarden. De meest gebruikte theorieën zijn de verdeling volgens de Gegeneraliseerde Extreme-Waarden verdeling (GEV) of de Gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV) (Chbab & van Noortwijk, 2002).

Om een betere inschatting te kunnen maken van de kans op een extreem lange aaneengesloten onwerkbaar situatie wordt een verdeling aan de hand van de extreme waarden statistiek gebruikt. Hiervoor moeten eerst de extremen bepaald worden. Hiervoor zijn de twee meest gebruikte selectiemethoden bekeken, namelijk de methode van jaarlijkse maxima en de 'peak over threshold' methode. De methode van jaarlijkse maxima behoort bij een GEV, de 'peak over threshold' methode bij een GPV.

Er is gekozen om voor het selecteren van extreme waarden te kiezen voor de jaarlijkse maxima met bijbehorende Gegeneraliseerde Extreme-Waarden verdeling. Dit om verschillende redenen.

Allereerst is het belangrijk dat de selectiemethode ervoor zorgt dat er onafhankelijke maxima worden geselecteerd. Door te kijken naar de langste excursielengte in een jaar kan worden uitgesloten dat er eigenlijk naar eenzelfde hoog/laagwaterperiode wordt gekeken. Bij de 'peak over threshold' methode wordt enkel gekeken naar de maxima van pieken over een bepaalde grens. Het kan hierbij voorkomen dat er bijvoorbeeld naar eenzelfde hoogwatergolf wordt gekeken die kort onder de grens komt en daardoor twee keer zou worden geselecteerd.

Bovendien heeft de Gegeneraliseerde Pareto verdeling een bovengrens, wat het extrapoleren naar langere excursielengten dan waargenomen niet mogelijk maakt.

3 RESULTATEN ZWOLLE EN KAMPEN

Bij aanvang van dit onderzoek zijn de locaties Zwolle en Kampen gekozen als ‘testcase’ omdat deze mogelijk interessant zouden zijn wegens hun ligging. Kampen ligt dicht bij de monding van de IJssel in het IJsselmeer, Zwolle ligt al weer enigszins verder bovenstrooms daarvan. Het vermoeden bestaat dat het IJsselmeer een dusdanig grote invloed heeft op de waterstanden bij Kampen dat de verdeling van afvoeren bij Lobith niet overeenkomt met die van de waterstanden bij Kampen. Daarom worden eerst deze twee locaties toegelicht.

Dit hoofdstuk dient tevens als toelichting op de gekozen methode, waarbij de analyse en vergelijking verder worden toegelicht.

3.1 Tijdseries Zwolle en Kampen

Om een beeld te geven van de waterstanden op de specifieke locaties zijn de tijdseries uitgezet in Bijlage 2. Gedurende een meerderheid van de tijd ligt de waterstand binnen de grenzen voor laag- en hoogwater. Er zijn echter ook grote pieken en dalen te zien zijn die de grenzen ruim en soms langdurig overschrijden. Het zijn die overschrijdingen die als laag danwel hoogwater gedefinieerd zijn.

Wanneer beide tijdseries met elkaar worden vergeleken is te zien dat het aantal dagen onder- en overschrijding van de respectievelijk laag- en hoogwatergrens niet gelijk zijn.

Bij Zwolle vindt over de periode 1989 tot en met 2015 in totaal 2554 dagen laagwater plaats, wat neerkomt op een gemiddelde van 95 dagen per jaar. Hoogwater vond in die periode 561 dagen plaats, ofwel gemiddeld 21 dagen per jaar.

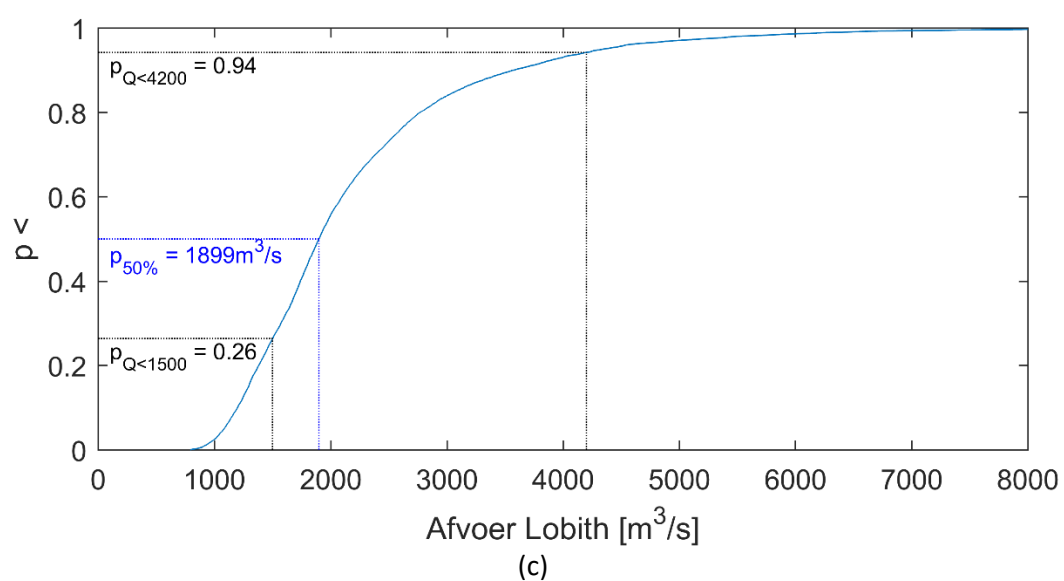
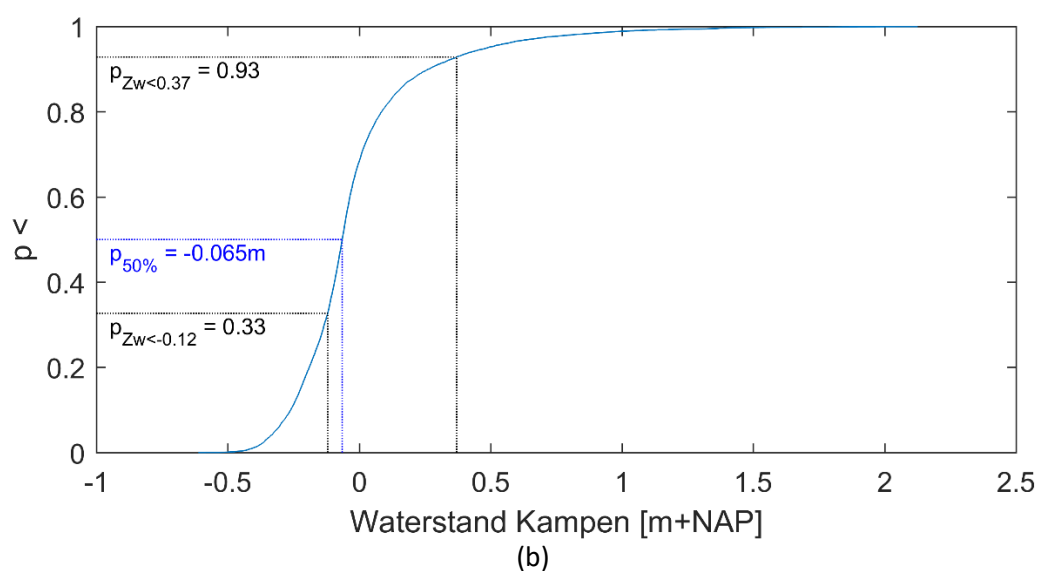
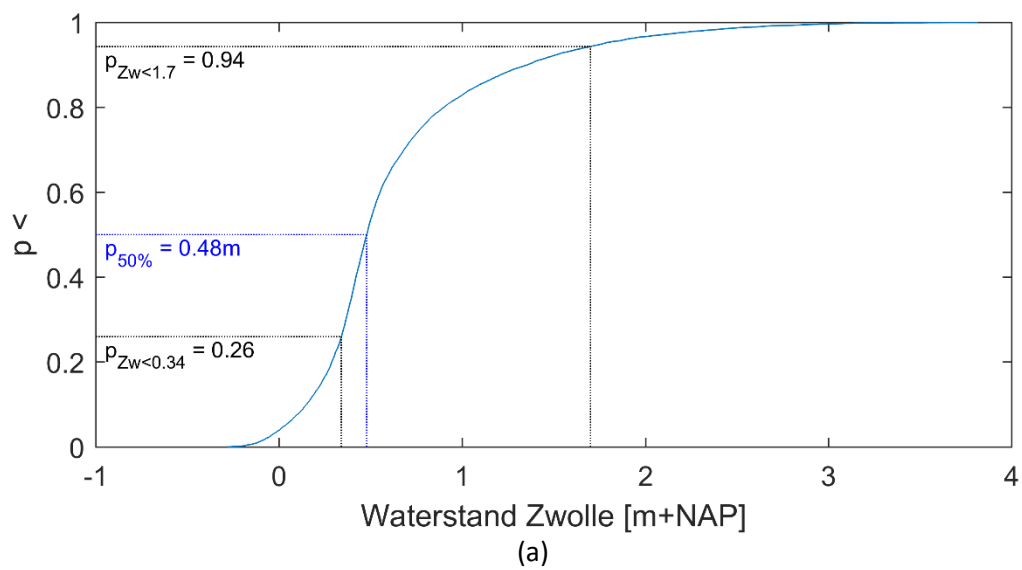
Voor Kampen geldt dat er van 1989 tot en met 2015 in totaal 3227 dagen laagwater plaatsvonden, en gemiddeld 120 dagen per jaar. Het totaal aantal dagen hoogwater was 704, en gemiddeld 26 dagen per jaar.

Op basis van de afvoer bij Lobith blijkt dat er 2560 dagen laagwater optraden in deze periode, ofwel gemiddeld 95 dagen per jaar. In diezelfde periode kwam hoogwater 553 dagen in voor totaal, ofwel gemiddeld 20 dagen per jaar.

3.2 Verdeling van de waterstanden en afvoer

De verdeling van de waterstanden voor locaties Zwolle en Kampen en de afvoer voor Lobith (ECDF) is gegeven in Figuur 4. De verdeling bij Zwolle heeft een gelijke tijd laag- en hoogwater als bij Lobith met laagwater in 26% van de tijd en hoogwater in 6% van de tijd. Bij Kampen komt laagwater echter in 33% van de tijd voor en hoogwater in 7% van de tijd.

De vorm van de drie ECDF's uit Figuur 4 zijn niet gelijk. De waterstanden (a) en (b) hebben een veel steilere vorm dan de afvoer (c). Dit betekent echter niet dat alle onderliggende verdelingen ook verschillen. Ondanks het verschil in vorm vindt namelijk voor zowel Zwolle als Lobith in een gelijk deel van de tijd laagwater en hoogwater plaats. Dit onderstreept het belang van het niet alleen vergelijken van de vorm van de verdeling door middel van een statistische test, maar ook het vergelijken van uitkomsten en conclusies. Voor het bepalen van de kans op laagwater of hoogwater is de afvoer bij Lobith namelijk wel geschikt voor de locatie Zwolle, maar niet voor de locatie Kampen.

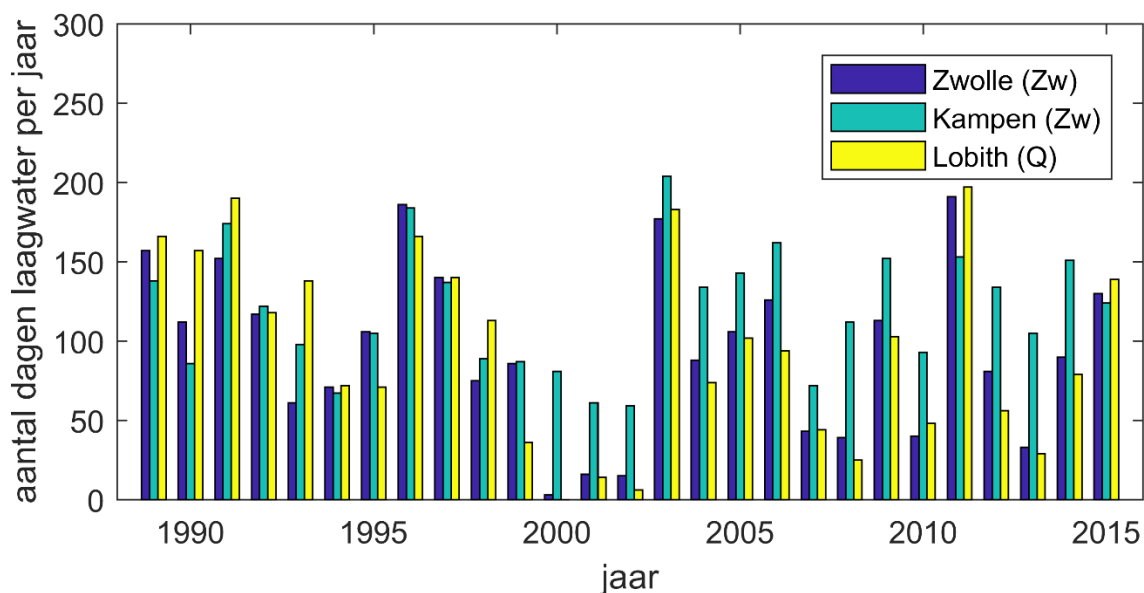


Figuur 4 ECDF Waterstand Zwolle/Kampen en afvoer Lobith met onderschrijdingskans laagwater, hoogwater en mediaan

3.3 Laagwater

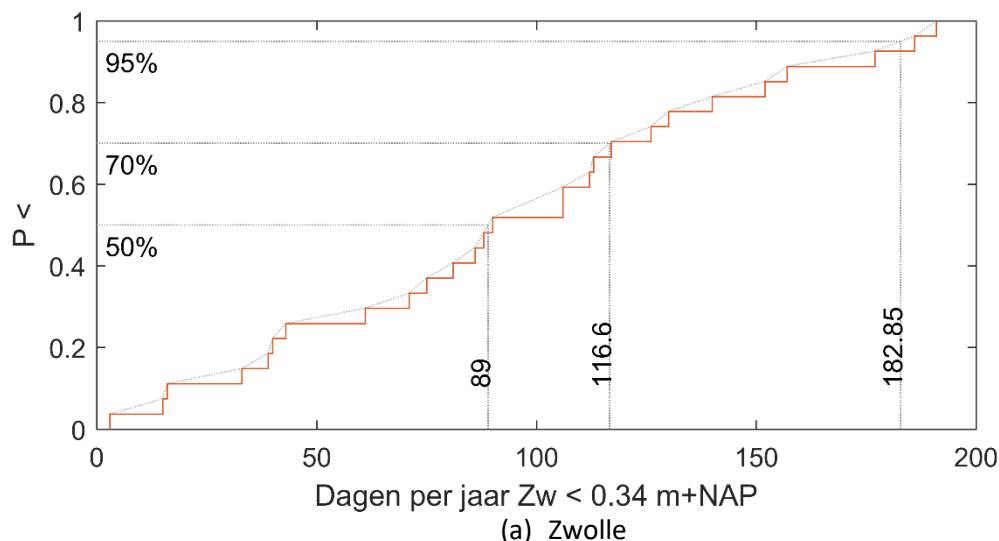
3.3.1 Aantal dagen laagwater in een jaar

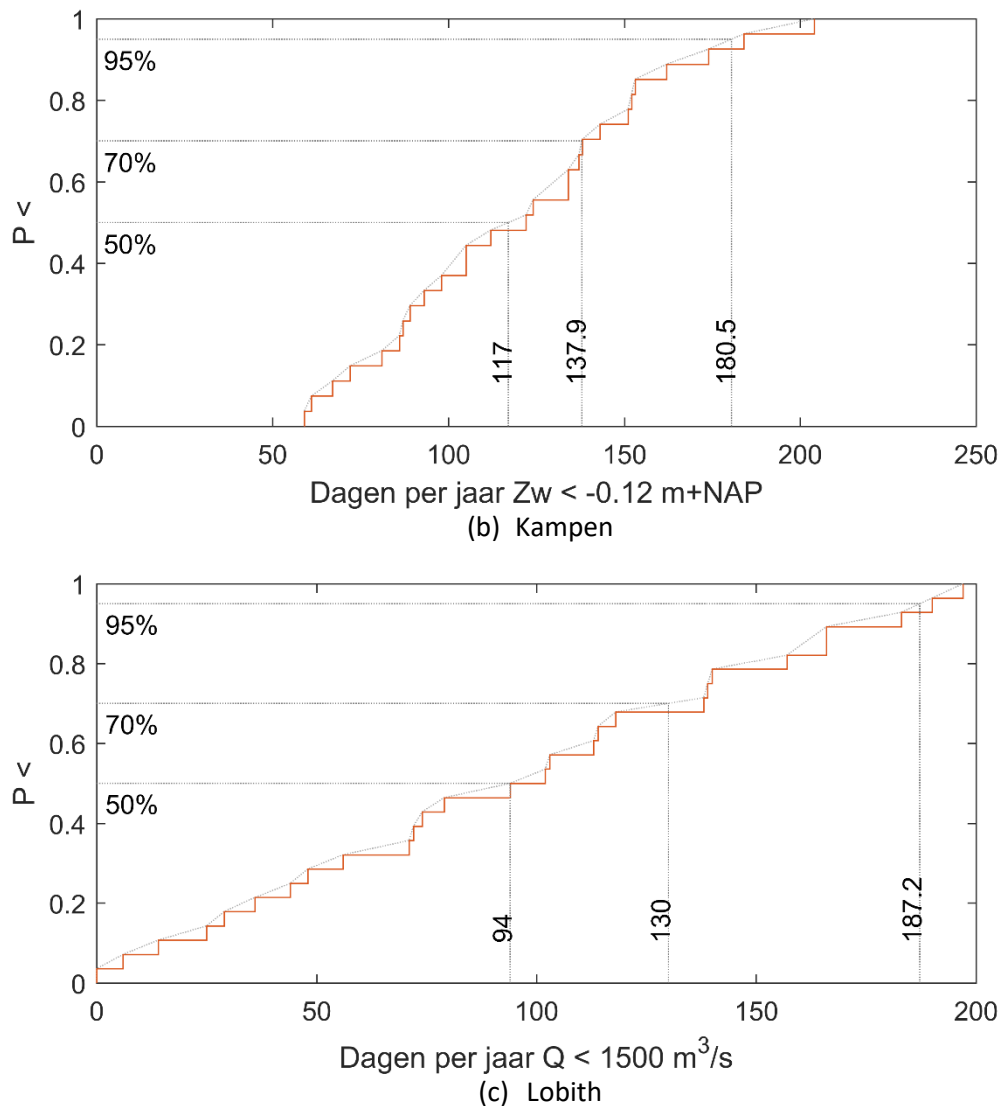
Uit de ECDF's uit Figuur 4 valt enkel het gemiddelde af te leiden voor het aantal dagen laagwater in een jaar. Het aantal dagen laagwater per jaar voor Zwolle, Kampen en Lobith is weergegeven in Figuur 5. Het aantal dagen laagwater verschilt sterk van jaar tot jaar, en ook per locatie. Voor de locatie Zwolle kan gesteld worden dat deze een goede overeenkomst toont met het aantal dagen laagwater per jaar op basis van de afvoer bij Lobith. De verschillen tussen beide analyses zijn vaak enkele dagen. Anders is dit echter voor Kampen. Daar is, met name vanaf het jaar 2000, een groot verschil zichtbaar tussen het aantal dagen laagwater dat in een jaar is voorgekomen. In bijna alle gevallen komt er in Kampen meer laagwater voor dan bij Lobith of Zwolle.



Figuur 5 Histogram aantal dagen laagwater per jaar

De ECDF in Figuur 6 geeft de kans op onderschrijding van het aantal dagen laagwater per jaar. De oranje lijn geeft de ECDF weer, de grijze lijn is een lineaire lijn tussen twee opeenvolgende punten. Bij Kampen begint de verdeling pas rond de 50 dagen en eindigt rond de 200. Het minimum is aanzienlijk kleiner terwijl het maximum nagenoeg gelijk is. De spreiding van het aantal dagen laagwater per jaar is bij Kampen een stuk kleiner dan bij Zwolle en Lobith.





Figuur 6 ECDF Aantal dagen laagwater per jaar voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer) met 50,70 en 90e percentiel

3.3.2 Aaneengesloten dagen laagwater

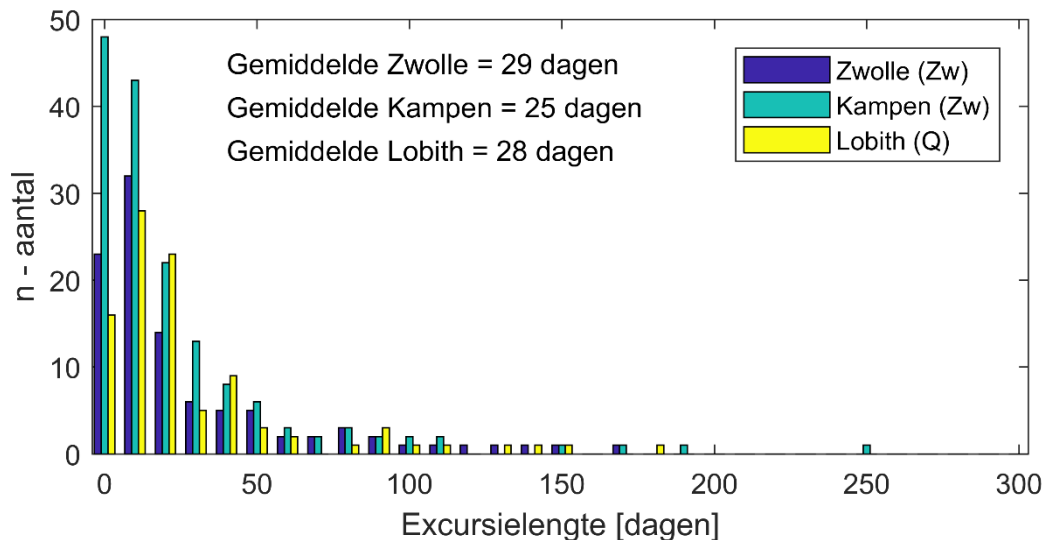
De voorgaande analyse beschrijft enkel het aantal dagen laagwater dat per jaar optreedt. Wanneer er een dag laagwater optreedt, gevolgd door meerdere dagen normale waterstanden zal er in de praktijk geen groot probleem optreden. Het tijdverlies is dan gering. De problemen worden groter wanneer er meerdere dagen aaneengesloten laagwater zijn. Daarom is er ook gekeken naar het aantal aaneengesloten dagen laagwater op de locaties, ook wel de excursielengte genoemd.

Omdat waterstanden veel fluctueren over de tijd, kan het gebeuren dat een laagwaterperiode enkele dagen boven het laagwatercriterium uitkomt, waardoor dit twee verschillende perioden zou opleveren. Om dat te onderkennen is een minimum tussentijd van zeven dagen aangehouden. Wanneer twee laagwatergolven minder dan zeven dagen uit elkaar liggen, worden deze als een en dezelfde laagwatergolf gerekend.

In Figuur 7 zijn de histogrammen van het aantal voorkomens van aaneengesloten perioden laagwater weergegeven, met daarbij de gemiddelden. Hieruit blijkt dat met name in het gebied van de relatief korte excursielengten (0-30 dagen) deze aanzienlijk vaker voorkomen in Kampen dan bij Zwolle of op

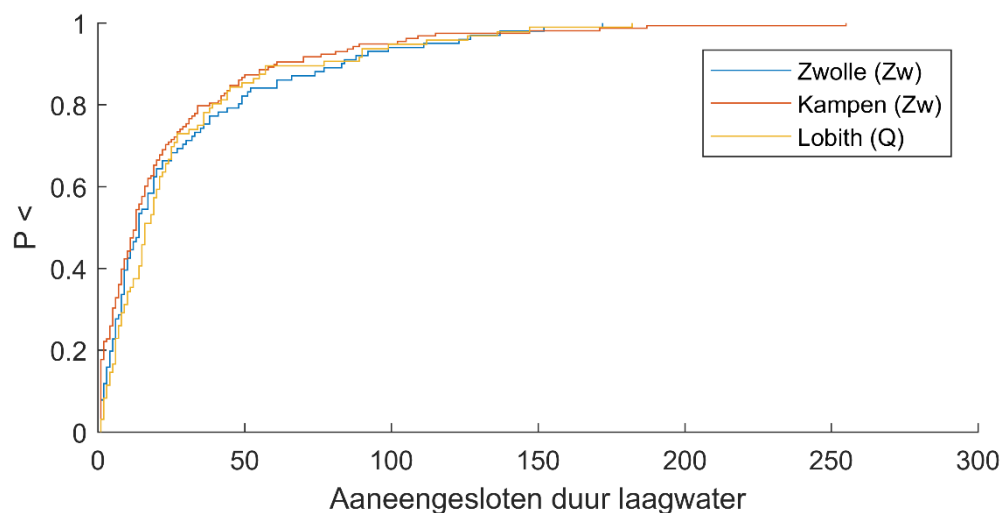
basis van afvoeren kan worden gesteld. Dit is opmerkelijk omdat er in Kampen over de periode 1989-2015 minimaal 50 dagen laagwater in het jaar zijn waargenomen. Deze duren gemiddeld 25 dagen, wat doet vermoeden dat er meerdere aaneengesloten perioden plaatsvinden in een jaar.

Anderzijds is er bij Kampen ook een aanzienlijk langere periode (255 dagen) waargenomen. Hoewel dit slechts een waarneming is, is het verschil met het maximum waargenomen in Zwolle (170) en Lobith (180) wel groot.



Figuur 7 Excursielengte laagwater voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer)

De onderschrijdingskans van een excursielengte is weergegeven in Figuur 8. De oranje lijn in Figuur 8 ligt nagenoeg geheel boven de gele (Lobith) en blauwe (Zwolle) lijnen. Dit houdt in dat de kans op een relatief korte excursielengte groter is, en waar de oranje lijn de gele lijn snijdt er daarna een grotere kans op een langere excursielengte is. Hieruit valt af te leiden dat hoewel de verdelingen eenzelfde vorm hebben en lange tijd gelijk lopen, er wel degelijk aanzienlijke verschillen zijn. De Kolmogorov-Smirnov test verworpt in dit geval de nulhypothese niet, wat inhoudt dat de drie verdelingen in Figuur 8 uit eenzelfde onderliggende verdeling zouden komen. Echter laten zowel het histogram als de ECDF zien dat er wel degelijk verschillen in het begin en eind van de verdeling zitten.

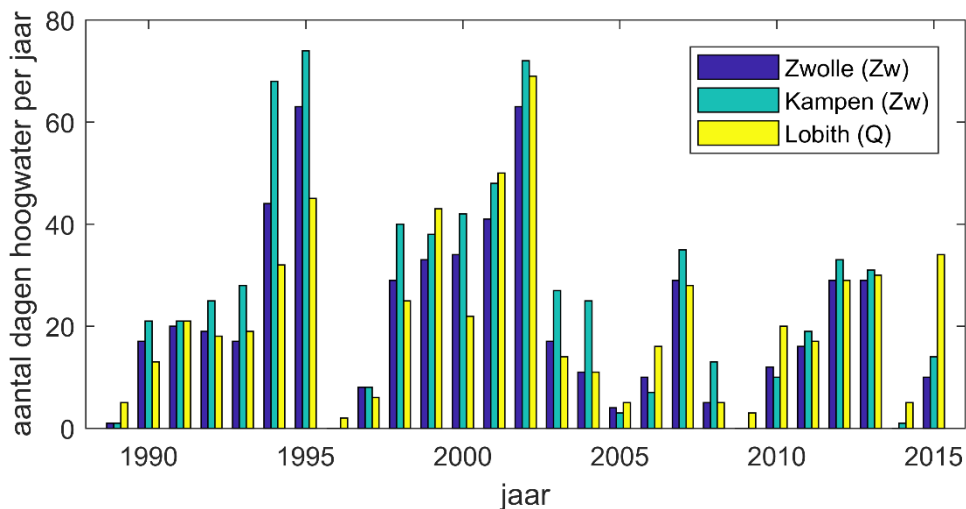


Figuur 8 ECDF Excursielengte laagwater voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer)

3.4 Hoogwater

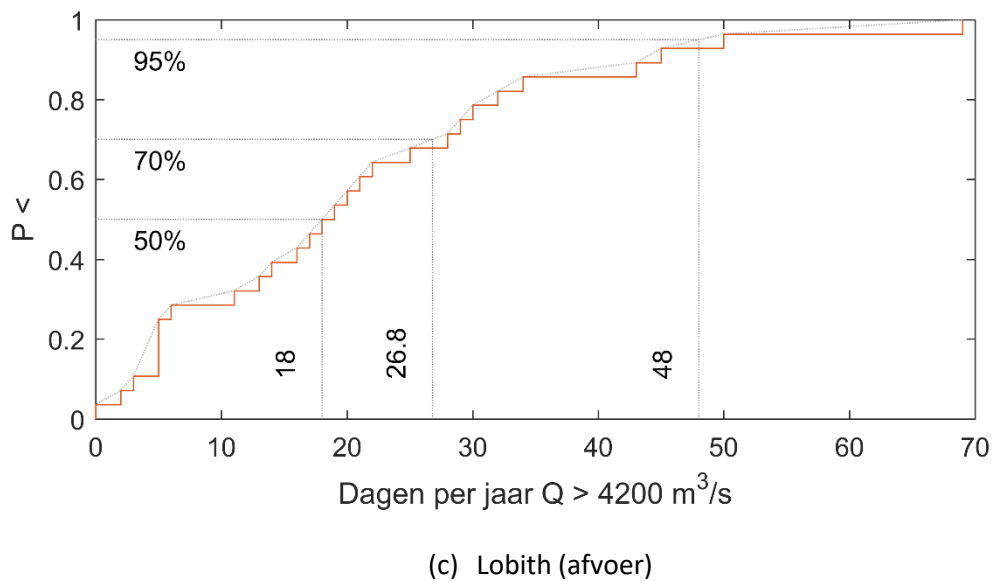
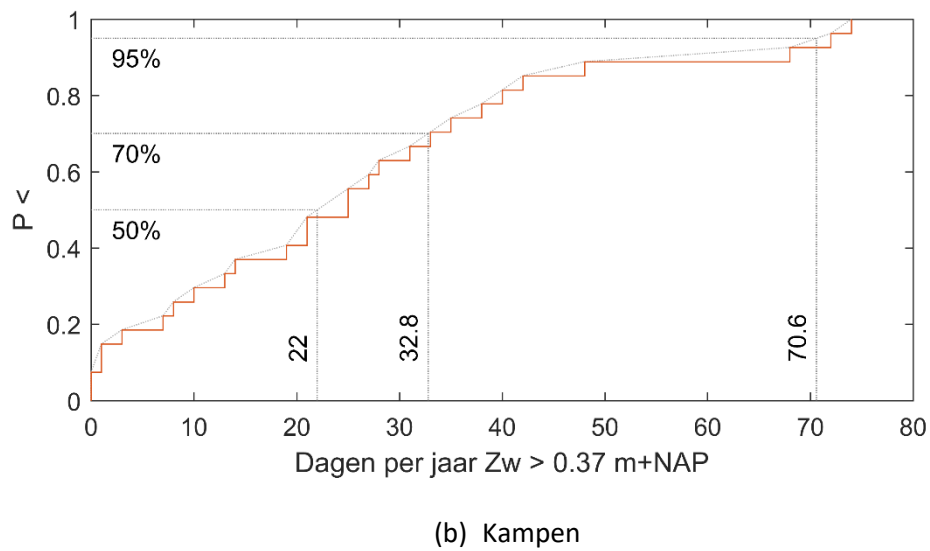
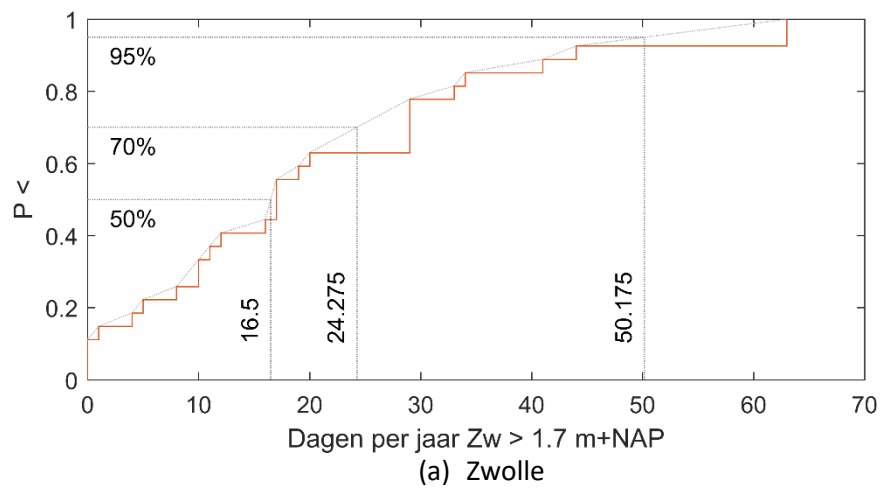
3.4.1 Aantal dagen hoogwater in een jaar

Net als voor het aantal dagen laagwater in het jaar, is ook het aantal dagen hoogwater dat optrad geanalyseerd. Zie Figuur 9. Het verschil tussen de drie locaties is kleiner dan bij laagwater. Het valt op dat vanaf 2005 het aantal dagen laagwater per jaar structureel lager lijkt te zijn geworden. Gemiddeld gezien komt er in Kampen meer hoogwater voor dan in Zwolle en Lobith. Dit valt ook af te leiden uit Figuur 4 (b).



Figuur 9 Histogram aantal dagen hoogwater per jaar voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer)

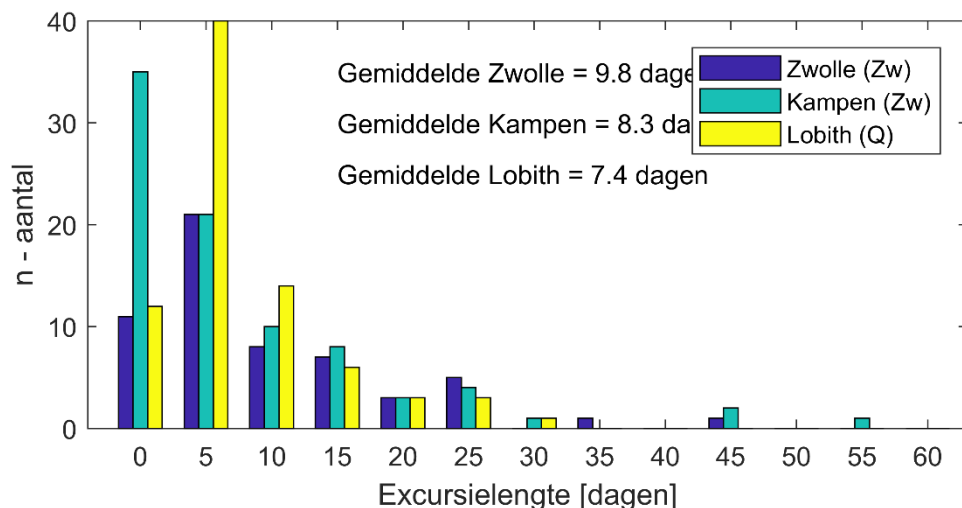
De onderliggende kansverdeling van het aantal dagen hoogwater per jaar laat ook zien dat verdelingen bij Zwolle en Lobith nagenoeg gelijk zijn. Zowel een visuele analyse als de KS-test geven geen reden om aan te nemen dat dit niet zo is. De verschillen zitten voornamelijk in de staart van de verdeling. Langdurige hoogwaterperioden komen bij Kampen vaker voor. De kansverdeling van afvoeren bij Lobith zou deze kans dus onderschatten.



Figuur 10 ECDF Aantal dagen hoogwater per jaar voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer) met 70e en 95e percentiel.

3.4.2 Aaneengesloten dagen hoogwater

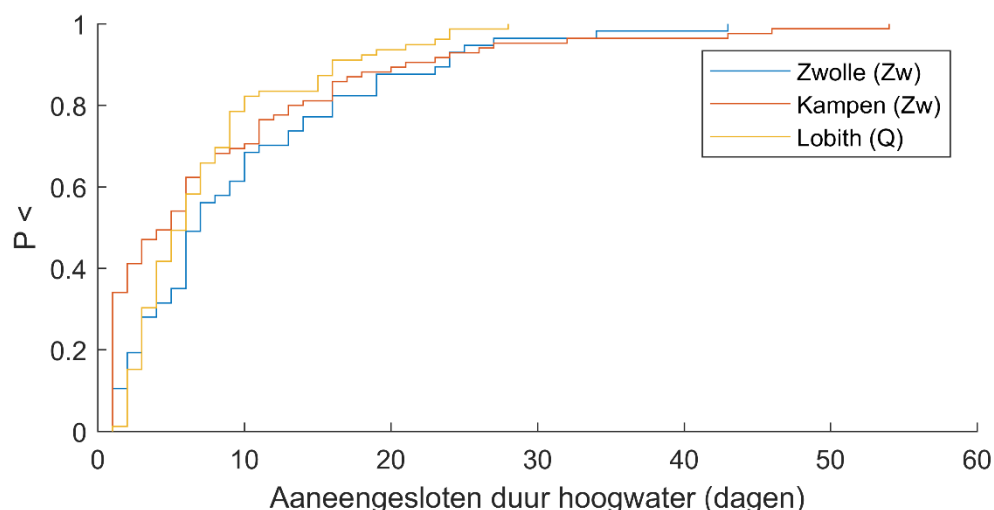
Om verder inzicht te bieden in de hoogwaterperioden is gekeken naar het aantal aaneengesloten dagen hoogwater dat optrad. Hierbij is gekeken hoe lang een hoogwaterperiode aanhield. In tegenstelling tot het aantal aaneengesloten dagen laagwater worden bij hoogwater geen perioden samengenomen. Dit omdat de hoogwatergrens niet in het gebied van veelvoorkomende waterstanden ligt. Het komt dus ook maar zeer weinig voor dat de hoogwatergrens een enkele dag wordt onderschreden om daarna weer te worden overschreden. Daarom wordt er geen minimum tussentijd aangehouden om hoogwaterperioden van elkaar te scheiden.



Figuur 11 Histogram excursiellengte hoogwater voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer)

Het aantal dagen aaneengesloten hoogwater concentreert zich rond de nul tot 30 dagen en een hoogwaterperiode houdt gemiddeld korter aan dan een laagwaterperiode. Wat opvalt in Figuur 11 is het grote verschil tussen Lobith (afvoer) en Zwolle en Kampen (waterstand) rond de 5 dagen en het ontbreken van lange (>30) excursiellengten op basis van afvoeren.

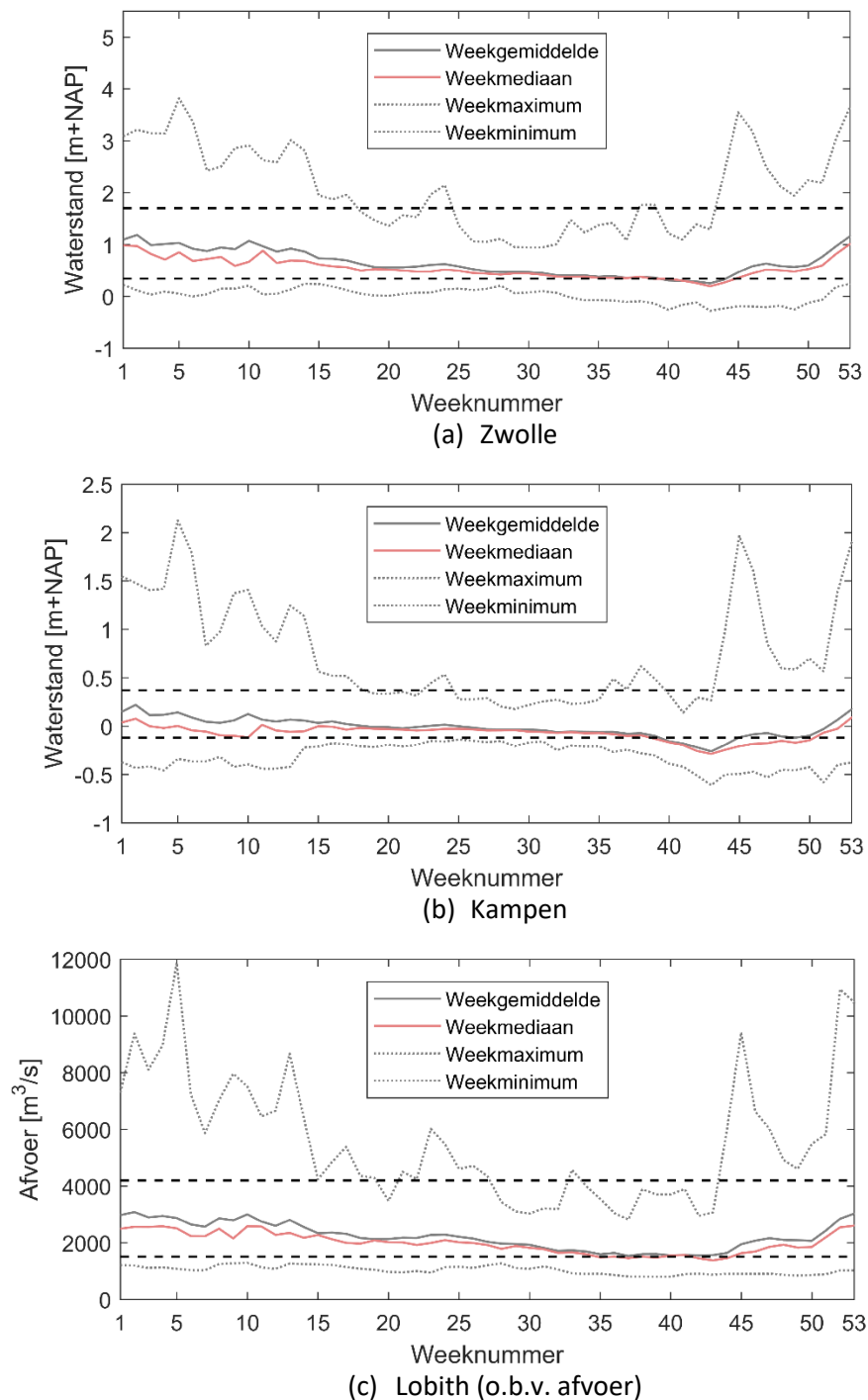
Dit verschil is dan ook te zien in een vormverschil van de ECDF's, zie Figuur 12. Er kan geconcludeerd worden dat de kansverdeling van excursiellengten op basis van afvoeren slecht overeenkomt. De KS-test verworpt deze overeenkomst ook.



Figuur 12 ECDF Excursiellengte hoogwater voor Zwolle, Kampen en Lobith (afvoer)

3.5 Variatie van waterstanden en afvoer over het jaar

Doordat de rivierafvoer gedurende het jaar varieert, varieert ook de waterstand ter plaatse over het jaar. Om inzicht te krijgen in die variatie over het jaar zijn over de periode 1989 tot en met 2015 de weekgemiddelden, weekmaxima, weekminima en weekmediaan opgesteld.



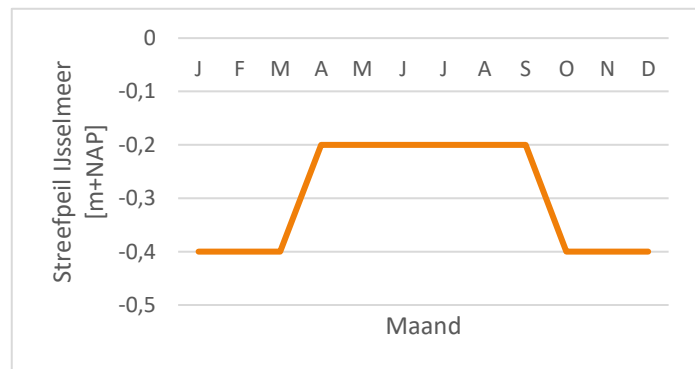
Figuur 13 Variatie waterstand Zwolle en Kampen en afvoer Lobith

De grafieken in Figuur 13 laten zien hoe de waterstand en afvoer fluctueert over de tijd. Per week is een gemiddelde opgesteld waaraan valt af te leiden wanneer een hoogwater of laagwaterperiode verwacht mag worden. Hoe dichter het gemiddelde/mediaan bij de laag- of hoogwatergrens zit, hoe groter de kans daarop is.

Zowel Zwolle als Lobith laten zien dat in de periode van week 35 tot week 45 de waterstand of afvoer nagenoeg gelijk is aan de grens voor laagwater. De mediaan volgt hierbij het gemiddelde, en zit tussen week 40 en 45 onder de laagwatergrens wat inhoudt dat in 50% van de tijd laagwater optreedt.

Bij Kampen valt echter te zien dat er ook in het voorjaar een periode is waarbij het weekgemiddelde en de weekmediaan zich rond de laagwatergrens bevinden. Dit laat zien dat er bij Kampen ook een laagwaterperiode in het voorjaar verwacht kan worden. Dit verklaart het relatief hoge aantal dagen laagwater in een jaar en juist relatief korte aaneengesloten perioden. Dus hoewel de kansverdeling welgelijkenissen toont met die van afvoeren, blijkt uit de verdeling over het jaar dat het om verschillende laagwaterperioden gaat.

Het opmerkelijk grote verschil tussen Kampen en Zwolle/Lobith kan verklaard worden door de invloed van het IJsselmeer op het waterpeil. Het IJsselmeer wordt kunstmatig op peil gehouden door Rijkswaterstaat. Hierbij ligt het zomerpeil op $-0,20$ m+NAP en het winterpeil op $-0,40$ m+NAP (ARCADIS, 2015).



Figuur 14 Streefpeil IJsselmeer

Het doel hiervan is om in de zomerperiode, wanneer er droogte kan ontstaan, voldoende zoetwater beschikbaar te hebben door het peil hoger te houden. In de winter wordt het peil lager gehouden om zo de hogere rivierafvoer te kunnen opvangen om wateroverlast en overstromingen te voorkomen (Rijkswaterstaat, 2016). Het winterpeil wordt aangehouden van oktober tot februari, en het zomerpeil van maart tot september, zie ook Figuur 14.

Doordat het waterpeil op het IJsselmeer kunstmatig wordt bijgehouden treedt er een opstuwend effect op die het waterpeil in de rivier beïnvloedt. Dit zorgt ervoor dat er in de maanden maart tot september opstuwning plaatsvindt en dus een kleinere kans op laagwater is. Dit effect is er minder in de maanden oktober tot februari, waardoor er dus ook een grotere kans op laagwater is. Dit is dan ook terug te zien in het waterstandsverloop in Figuur 13. Hierdoor verschilt de kansverdeling van waterstanden aanzienlijk van de kansverdeling van afvoeren bij Lobith. Hierdoor zegt de kans op een bepaald debiet niet meer zoveel over de kans op een bepaalde waterstand bij Kampen.

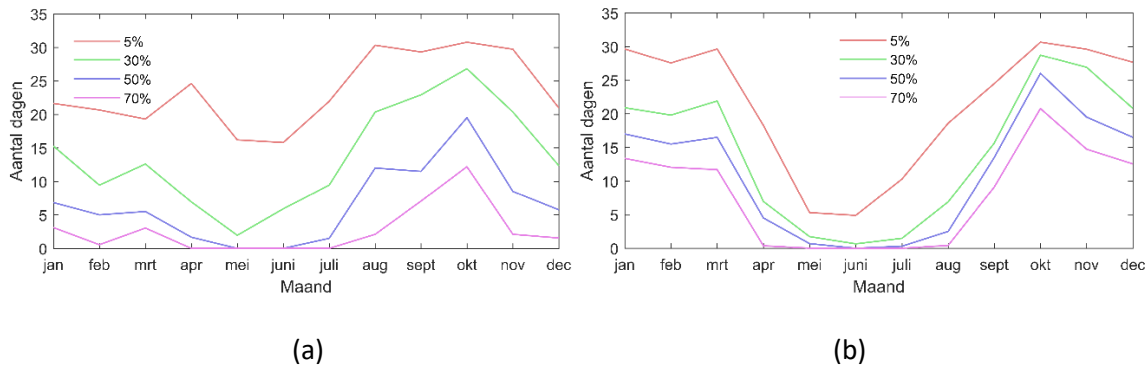
Bij Zwolle is dit effect in mindere mate, omdat Zwolle verder bovenstrooms van het IJsselmeer ligt. Het waterstandsverlagende of verhogende effect dat het IJsselmeer heeft is dan ook minder bij Zwolle waardoor daar de kansverdeling beter overeenkomt met die van afvoeren.

De wisseling van winterpeil ($-0,40$ m+NAP) naar zomerpeil ($-0,20$ m+NAP) is ook zichtbaar in het weekminimum bij Kampen, zie **Figuur 13** (b). In de periode dat het zomerpeil wordt aangehouden is de gemiddelde waterstand nagenoeg constant rond de $0,0$ m+NAP.

Wanneer het winterpeil wordt aangehouden is er een sterke daling in het weekminimum te zien.

3.6 Kans op een onwerkbare situatie over het jaar

Uit de voorgaande verdeling van waterstanden/afvoeren over de tijd valt al enigszins af te leiden wanneer de kans op een onwerkbare situatie het grootst is. In Figuur 15 is het aantal te verwachten onwerkbare dagen per maand, veroorzaakt door of laagwater of hoogwater, gegeven voor de kansen 5,30,50 en 70%. Hoe dit figuur is bepaald is toegelicht in Bijlage 3.



Figuur 15 Kans op aantal niet werkbare dagen per maand Zwolle (a) en Kampen (b)

In Figuur 15 is de kans op een aantal niet werkbare dagen per maand uitgezet. De kansverdeling bij Zwolle toont sterke gelijkenissen met die bij Lobith (zie Bijlage 4 voor de gecombineerde verdeling op basis van afvoeren). Hierin is een hoogwaterpiek in het voorjaar te herkennen en een laagwaterpiek in het najaar (zie ook Bijlage 4.2). Daarbij is de kans op laagwater aanzienlijk groter dan de kans op hoogwater. De verdelingen van Zwolle en Lobith komen niet 1-op-1 overeen, maar de verschillen zijn telkens enkele dagen, ofwel een paar procent (gemiddeld 5% afwijking).

Voor de locatie Kampen is duidelijk te zien dat er zowel in het voorjaar als in het najaar een duidelijke piek terug te vinden is. Bovendien is in het midden van het jaar een zeer lage kans op hoog/laagwater. Hier is het waterstandsverhogende effect van het IJsselmeer zichtbaar, de kans op laagwater is zeer klein. Tegelijkertijd is in het voor en najaar een aanzienlijk grotere kans op een onwerkbare situatie, die met name wordt veroorzaakt doordat dan de kans op laagwater aanzienlijk groter is. In die periode wordt het IJsselmeerpeil namelijk lager gehouden. Zie ook Bijlage 4.2.

Het gebruik van de afvoerdeling bij Lobith zou hier niet gerechtvaardigd zijn en het gebruik van een lokale verdeling is hier dan ook geschikter.

4 RESULTATEN RIJNTAKKEN

In het eerste deel van dit onderzoek is enkel gekeken naar de locaties Zwolle en Kampen omdat deze twee testlocaties interessant waren wegens hun ligging en eerder gedaan onderzoek. De gedachte daarvan is dat de analyse van afvoeren bij Lobith representatief is voor alle Rijntakken toepasbaar zou zijn. In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de andere Rijntakken om een uitspraak te kunnen doen in hoeverre dit opgaat.

Hiervoor zijn in totaal tien andere locaties bekeken langs de IJssel, Waal en Lek/Nederrijn. Hier wordt in dit hoofdstuk minder diep op ingegaan, er wordt toegelicht of er voor de locaties kan worden gesteld of de verdeling van afvoeren bij Lobith representatief is voor de verdeling van waterstanden op locatie. Relevante figuren daarbij zijn opgenomen in de bijlage.

Hiervoor is er gekeken of de kansverdeling van waterstanden vergelijkbaar is met de kansverdeling van afvoeren. Er is ook gekeken hoe de laagwater en hoogwaterperioden over de tijd zich verhouden ten opzichte van Lobith. Als laatste wordt de cumulatieve verdeling voor de kans op een onwerkbare situatie vergeleken. Hierin wordt de kans gegeven op een x aantal niet werkbare dagen per maand. Deze is met name relevant omdat hier verschillen in kans over de tijd zichtbaar worden. De locaties die zijn geanalyseerd zijn gekozen op basis van hun ligging en databeschikbaarheid. Alle locaties die zijn geanalyseerd zijn weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16 Geanalyseerde locaties

Als basis wordt de statistische test, de Kolmogorov-Smirnov test, aangehouden om te bepalen of de kansverdeling van waterstanden overeenkomt met de kansverdeling van afvoeren bij Lobith. Echter, zoals in Hoofdstuk 2 al is beschreven, biedt de Kolmogorov-Smirnov test geen absolute zekerheid en is deze minder gevoelig in de staart van de verdeling. Daarom is ook een visuele analyse van de verdelingen gedaan. Hierbij worden bij een ECDF het 70^e en 95^e percentiel vergeleken, het maximum en de vorm.

Een analyse van de verdeling over de tijd geeft vervolgens het inzicht of de kansverdeling ook gelijk is over de tijd. Het zou immers zo kunnen zijn dat hoewel beide methoden een gelijke kans op 30 dagen laagwater geven, dit bij de ene is gebaseerd op een laagwaterperiode in het voorjaar, en bij de ander op een laagwaterperiode in het najaar.

Tabel 1 Resultaten analyse Rijntakken

Locatie	Laagwater				Hoogwater			
	Verdeling over tijd	% van tijd	Dagen per jaar (mediaan)	Excursielengte (gemiddelde)	Verdeling over tijd	% van tijd	Dagen per jaar (mediaan)	Excursielengte (gemiddelde)
AFVOER		26	(87)	(28)		6	(18)	(7)
Lobith ¹	=	18	(59)	(26)	=	7	(20)	(8)
IJssel								
Deventer	=	25	(85)	(30)	=	6	(17)	(9)
Olst	=	24	(77)	(28)	=	6	(18)	(10)
Zwolle	=	26	(89)	(28)	=	6	(17)	(9)
Kampen	--/++ ²	33	(117)	(24)	=	7	(22)	(8)
Nederrijn/Lek								
Arnhem	++	18	(60)	(24)	=	6	(19)	(7)
Driel	++	17	(43)	(9)	=	6	(18)	(8)
Amerongen	--	78	(300)	(99)	=	2	(5)	(7)
Waal								
Nijmegen	+	17	(56)	(24)	=	7	(19)	(8)
Tiel	=	24	(82)	(29)	=	5	(17)	(8)
Zaltbommel	=	23	(78)	(26)	=	6	(17)	(8)
Vuren	-/+ ²	23	(85)	(18)	=	7	(21)	(8)
Legenda								
Verwerp H_0 : verdeling Zw en Q komen niet uit dezelfde onderliggende verdeling bij 95% significantieniveau								
Verwerp H_0 niet bij 95% significantieniveau, maar visuele analyse laat zien dat staart van verdeling verschillen toont								
Verwerp H_0 niet: van verdelingen Zw en Q kan niet worden uitgesloten dat ze uit eenzelfde verdeling komen bij 95% significantieniveau, visuele analyse laat goede overeenkomst zien								
De verdeling van afvoeren geeft een ____ ten opzichte van de lokaal bepaalde kansverdeling ++ een aanzienlijke (>15%) overschatting van de kans + kleine (5%-15%) overschatting van de kans = nagenoeg gelijke kans (-5% - +5%) - kleine (5%-15%) onderschatting van de kans -- aanzienlijke (>15%) onderschatting van de kans								

¹| De kansverdeling op basis van waterstanden bij Lobith.²| De verdeling bij Lobith geeft een onderschatting in het voorjaar en overschatting in het najaar

In Tabel 1 zijn de uitkomsten van de statistische analyses van de verschillende locaties beknopt weergegeven. Dit om enigszins overzichtelijk te houden waar de verdelingen overeenkomen en verschillen. De kansverdeling (ECDF) van aantal dagen laagwater/hoogwater en excursielengten van laagwater/hoogwater zijn vergeleken met die van de afvoer door middel van de Kolmogorov-Smirnov test. De uitkomst van de KS-test is met kleuren weergegeven in de tabel. Ook zijn kenmerkende getallen, zoals percentage tijd laag/hoogwater en gemiddelden of mediaan tussen haakjes weergegeven. Verder wordt beoordeeld in hoeverre de kansverdeling over het jaar (het type verdeling als in Bijlage 4 wordt gegeven) overeenkomt met de lokale variant. Dit op basis van drie categorieën, zijnde overeenkomend (5% range), klein verschil (5-15% range) en aanzienlijk verschil (>15% range). Deze ranges zijn gebaseerd op het gemiddelde verschil in dagen (0-2), (3-5) of (>5) die de kansverdeling op basis van afvoeren heeft ten opzichte van de lokale variant. Verderop in dit hoofdstuk zullen de relevante verschillen ook worden toegelicht.

Een verschil dat zich op alle locaties voordoet is dat de excursielengte van hoogwater, ofwel het aantal aaneengesloten dagen hoogwater niet overeenkomt met de kansverdeling op basis van afvoeren. Wanneer de begin en einddagen worden vergeleken dan blijkt dat het hoogwater meestal gelijktijdig begint op basis van afvoer en waterstand, maar dat het daarna langer aanhoudt op basis van de waterstand. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het langer duurt voordat de waterstand is gedaald. Wanneer de afvoer bij Lobith al is gedaald kan het nog enkele dagen duren voordat ook de waterstand ter plekke is gedaald naar het niveau onder de hoogwatergrens.

4.1 IJssel

Langs de IJssel zijn naast Zwolle en Kampen ook de locaties Olst en Deventer bekeken.

Voor zowel Deventer als Olst geldt dat de verdeling van waterstanden grote gelijkenissen toont met die van afvoeren. Laagwater komt in ongeveer eenzelfde deel van de tijd voor en ook de verdeling van aaneengesloten perioden is nagenoeg gelijk. Bij Deventer geldt dat de kans op laagwater iets groter is, bij Olst juist iets kleiner. Deze verschillen zijn echter vrij klein en zijn geen reden om aan te nemen dat de verdeling bij Lobith niet representatief is.

Hoogwater komt zowel bij Deventer als Olst in gelijke tijd voor en ook de verdeling van het aantal dagen is goed overeenkomstig.

De verdeling van aaneengesloten dagen hoogwater is echter sterk afwijkend. Deze duren aanzienlijk langer dan de verdeling van afvoeren weergeeft. Hiervoor is deze dus niet geschikt, de KS-test verworpt dit ook.

De kansverdeling per maand is ook overeenkomstig met die op basis van afvoeren met een marge van +/- 5%. Dit houdt in dat er over de tijd gezien geen significante verschillen zijn.

Zoals eerder genoemd zijn die verschillen er bij Kampen wel. Daar wijkt niet alleen de verdeling over de tijd sterk af, maar ook de verdeling van het aantal dagen laagwater en de excursielengten daarvan zijn sterk verschillend. Alleen de kans op hoogwater en het aantal dagen hoogwater per jaar heeft overeenkomsten, maar daarbij moet gesteld worden dat een hoogwaterperiode in Kampen gemiddeld vaker voorkomt.

4.2 Nederrijn/Lek

De afvoer van de Nederrijn en de Lek is afhankelijk van de bediening van de stuwen in de Nederrijn. Dit zijn de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein. Daarbij heeft de stuw bij Driel de grootste invloed op de verdeling van het water over de rivieren.

De stuw bij Driel heeft als functie om bij lage Rijnaftvoeren voldoende water naar de IJssel te laten stromen en bij een hoge afvoer juist zo snel mogelijk het water naar zee te voeren (Lemans, 2007). De stuw is gemiddeld een kwart van het jaar volledig gesloten en het halve jaar gedeeltelijk open. Bij een

afvoer groter dan 2700 m³/s wordt de stuw volledig geopend om zo het water zo snel mogelijk af te voeren naar zee. Wanneer de stuw gesloten is, en het water naar de IJssel gedreven wordt, stuwt deze de waterstand in de rivieren aanzienlijk op. Dit effect is tot bovenstrooms van Lobith aanwezig (Ogink & Stolker, 2004).

Dit houdt echter niet in dat de afvoeren bij Lobith niets zeggen over de waterstanden. Dat komt doordat de debieten bij Lobith worden bepaald aan de hand van de gemeten waterstand bij Lobith. Deze wordt vervolgens middels een Qf-relatie vertaald naar een debiet. In deze Qf-relatie is het waterstand verhogende effect van de (deels) gesloten stuw bij Driel meegenomen (Ogink & Stolker, 2004).

Toch speelt het opstuwende effect van de stuw bij Driel wel mee wanneer gekeken wordt naar de Nederrijn. Bij meetpunt Arnhem, op 20 km van Lobith, toont de verdeling van de waterstanden weliswaar eenzelfde vorm (zie Bijlage 5.1), maar zijn er wel aanzienlijke verschillen. Laagwater treedt namelijk aanzienlijk minder (18%/tijd) op. De verdeling is ook aanzienlijk steiler dan bij Lobith. Dit houdt in dat een groter deel van de waarnemingen in het midden van de range valt, oftewel er zijn minder hoog- en laagwaters voorgekomen. Daardoor is de kans op laagwater dan ook kleiner.

Dit is ook terug te zien in de aaneengesloten lengte van laagwaterperioden. Deze zijn gemiddeld korter en komen minder vaak voor, zie ook Bijlage 5.2.

Bij Arnhem zijn de laagwaterperioden gemiddeld van kortere duur dan bij Lobith. Ook dit kan verklaard worden door het effect van de stuw bij Driel.

De verdeling over de tijd heeft een gelijke vorm als bij Lobith, maar met een kleinere kans van voorkomen. Dit wil zeggen dat over de tijd gezien de laagwater/hoogwaterperioden op dezelfde momenten verwacht mogen worden, maar dat de kans erop wel kleiner is dan dat de kansverdeling op basis van afvoer weergeeft.

Bij meetpunt Driel, gemeten bovenstrooms van de stuw, is het opstuwende effect nog duidelijker zichtbaar. Ook hier is de vorm van de verdeling gelijk, maar is de onderliggende kansverdeling wel anders. De laagwaterpiek ligt ook hier in het najaar, maar met veel lagere kans, zie ook Bijlage 5.3.

Bij Driel treedt laagwater ongeveer bijna twee keer zo weinig op als bij Lobith en zijn de laagwaterperioden van veel kortere duur, zie ook Bijlage 5.4.

Bij hoogwater ($Q > 4200$) treedt dit effect niet op. De stuw wordt namelijk al geopend bij $Q > 2700$. De verdeling voor hoogwaters laat dan ook een betere gelijkenis zien. Net als bij andere locaties zijn er wel kleine verschillen over de tijd, maar die liggen binnen de 5% marge. Opmerkelijk is dat de verdeling van aaneensloten dagen hoogwater wel overeen lijkt te komen met die bij Lobith op basis van afvoer. Driel is daarbij de enige locatie die niet wordt verworpen door de KS-test, zie Tabel 2.

De locatie Amerongen, benedenstrooms van de stuw bij Driel en dus nog meer beïnvloed door de stuwen, is geenszins overeenkomstig met de verdelingen bij Lobith. Het stuwregime heeft een erg grote invloed op de waterstand die daar kunstmatig op peil wordt gehouden. De relatie tussen Q_{Lobith} en de lokale waterstand is hier dan ook verloren gegaan.

Al met al is kan gesteld worden dat voor de Nederrijn de verdeling bij Lobith niet representatief is voor de kans op laagwater. Door de stuwen ontstaat er een dusdanige invloed op lokale waterstanden dat de verdeling van de afvoer bij Lobith niet overeenkomstig is met die van lokale waterstanden. Bij hoogwater is dit verschil er niet wegens het openen van de stuwen. Ook hier blijft echter het verschil tussen de duur van een hoogwaterperiode aanwezig.

4.3 Waal

De Waal is verantwoordelijk voor het grootste deel van de afvoer die Nederland via de Rijn binnenkomt, gemiddeld 65%. Langs de Waal is vanaf Nijmegen (22 km van Lobith) tot aan Vuren (90 km van Lobith) gekeken in hoeverre de verdelingen overeenkomen.

Nijmegen

Bij Nijmegen komt in 17% van de tijd laagwater voor. Dit is aanzienlijk minder dan bij Lobith maar ongeveer evenveel als bij Arnhem. Hoogwater komt in 7% van de tijd voor tegen 6% bij Lobith.

De verdeling van aantal dagen laagwater/hoogwater in een jaar komt goed overeen en de KS-test verwerpt dit ook niet. Echter duurt een laagwaterperiode bij Nijmegen gemiddeld korter dan op basis van afvoeren. Dit wordt verklaard door een groter aantal korte perioden, en niet door het ontbreken van langere perioden. De verdeling is dan ook nog wel representatief.

De verdeling over de tijd laat eenzelfde vorm zien, met een laagwaterperiode in het najaar en hoogwater in het voorjaar. Echter is de kans op laagwater iets kleiner bij Nijmegen en dus geeft de afvoerverdeling een lichte overschatting van de kans, zie ook Bijlage 5.5.

Tiel

Het meetpunt bij Tiel ligt op 51 km van Lobith. Bij Tiel komt over de tijd gezien iets minder laagwater en hoogwater voor.

De kansverdeling van het aantal dagen laagwater en hoogwater per jaar is goed overeenkomend met die op basis van afvoeren en ook hier wordt deze op basis van de KS-test niet verworpen.

De gecombineerde verdeling voor de kans op een niet werkbare situatie toont eenzelfde trend. Er zijn ook hier kleine verschillen van enkele dagen zichtbaar, maar deze liggen binnen een 5% marge.

Al met al kan op basis hiervan geconcludeerd worden dat de verdeling van afvoeren bij Lobith representatief is voor de locatie Tiel met uitzondering van de excursielengte van hoogwaterperioden. Deze is net als bij de andere locaties is de verdeling van hoogwaterperioden niet gelijk, waarbij ook bij Tiel langere perioden voorkomen dan bij Lobith.

Zaltbommel

Meetpunt Zaltbommel aan de Waal op 73 km van Lobith. Dit meetpunt zit halverwege Tiel en Vuren. De verdeling bij Zaltbommel is nagenoeg gelijk aan de verdeling bij Tiel. Net als bij Tiel is de kans op hoogwater enigszins groter dan bij Lobith. Hierdoor ontstaat er een grotere kans op een hoogwater in het voorjaar en laagwater in het najaar dan op basis van de verdeling bij Lobith. Wegens de grote gelijkenis met Tiel wordt deze verdeling niet verder toegelicht.

Vuren

Bij Vuren komt zowel laagwater als hoogwater in hetzelfde deel van de tijd voor als bij Lobith op basis van afvoer. Echter is er een verschil in tijd waarop dit plaatsvindt. De kans op laagwater is bij Vuren in het voorjaar groter en in het najaar kleiner dan op basis van afvoeren gesteld wordt, zie ook Bijlage 5.6. De verdeling van hoogwater is daarbij beter overeenkomen over de tijd. Enkel de duur van hoogwaterperioden is langer dan de verdeling van afvoeren. Dit is ook zo bij de andere locaties.

Concluderend voor de Waal kan gesteld worden dat de verdeling bij Lobith een representatief beeld schets voor de locaties langs de Waal en dat rond Vuren er ruis ontstaat waardoor er grotere verschillen ontstaan. Tot aan Vuren zijn er wel verschillen te bemerken, maar deze zijn enkele procenten dan wel dagen. Voor de gehele Waal geldt, net als voor de andere Rijntakken, dat de verdeling van hoogwaterduur niet gelijk is en dat de afvoerverdeling deze kans onderschat.

5 VERDELING VAN LANGE EXCURSIELENGTEN

In het oogpunt van het ontstaan van hinder door laagwater of hoogwater is het met name interessant te weten hoelang een periode aanhoudt. Zoals al eerder genoemd levert een korte periode nou eenmaal minder hinder op dan een zeer lange. In voorgaande analyses is door middel van empirische data een kansverdeling opgesteld voor de lengte van een onwerkbaar periode, zowel voor laagwater als voor hoogwater. Daarom is er als extra analysemogelijkheid bekeken of de extreme waardenstatistiek een geschikte methode is om deze analyse op te laten berusten in plaats van enkel empirische data.

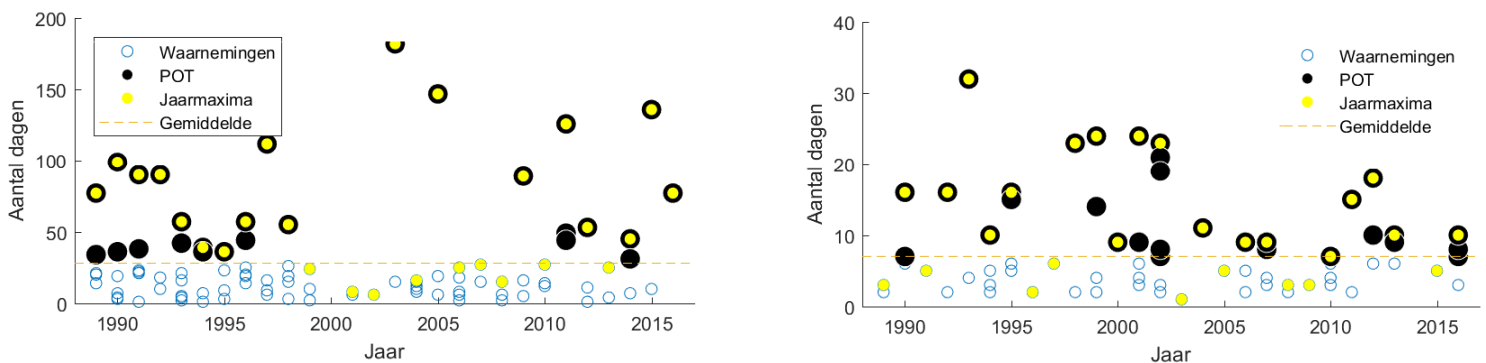
5.1 Extreme waardenverdeling

In de tijdperiode 1989-2016 wordt de laagwatergrens van $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ jaarlijks regelmatig onderschreden. Om te compenseren voor laagwaterperioden die worden onderbroken door even boven de grens te komen wordt een minimum tussentijd van zeven dagen aangehouden, net als in de eerdere analyses. Na deze correctie blijven er gemiddeld drie laagwaterperioden per jaar over. Veruit de meeste van deze laagwaterperioden duren korter dan het gemiddelde van 28 dagen. Er zijn echter ook uitschieters die veel langer duren. Hetzelfde geldt voor hoogwaterperioden, al zijn die gemiddeld minder langdurig.

Een verdeling op basis van empirische data (ECDF) geeft vaak niet een correcte verdeling voor de staart van de verdeling, waar maar weinig waarnemingen beschikbaar zijn (Laeven & Sugihartono, 2006). Het is echter juist de staart van de verdeling waar de lange perioden worden beschreven. Om een betere inschatting te kunnen maken van de kans op dergelijke lange aaneengesloten perioden biedt de extreme waarden statistiek uitkomst.

Om te bepalen wat extreme waarden zijn, wordt de methode van periodieke maxima gebruikt. (Chbab & van Noordwijk, 2002).

De periodieke maxima-methode selecteert de grootste excursielengten van elk jaar, zie de gele rondjes in Figuur 17. Het analyseren van 27 jaar aan data levert dus ook 27 extreme waarden op die worden meegenomen.



Figuur 17 Selectiemethoden extreme waarden voor laagwater (links) en hoogwater (rechts)

Bij de gekozen periodieke maxima-methode geldt dat het maximum van een groot aantal onafhankelijke identieke verdeelde toevalsvariabelen convergeert naar de Gegeneraliseerde Extreme-Waarden verdeling (GEV). Deze verdeling heeft de volgende vorm:

$$F(x) = e^{-(1+y\frac{x-a}{b})^{\frac{1}{y}}}$$

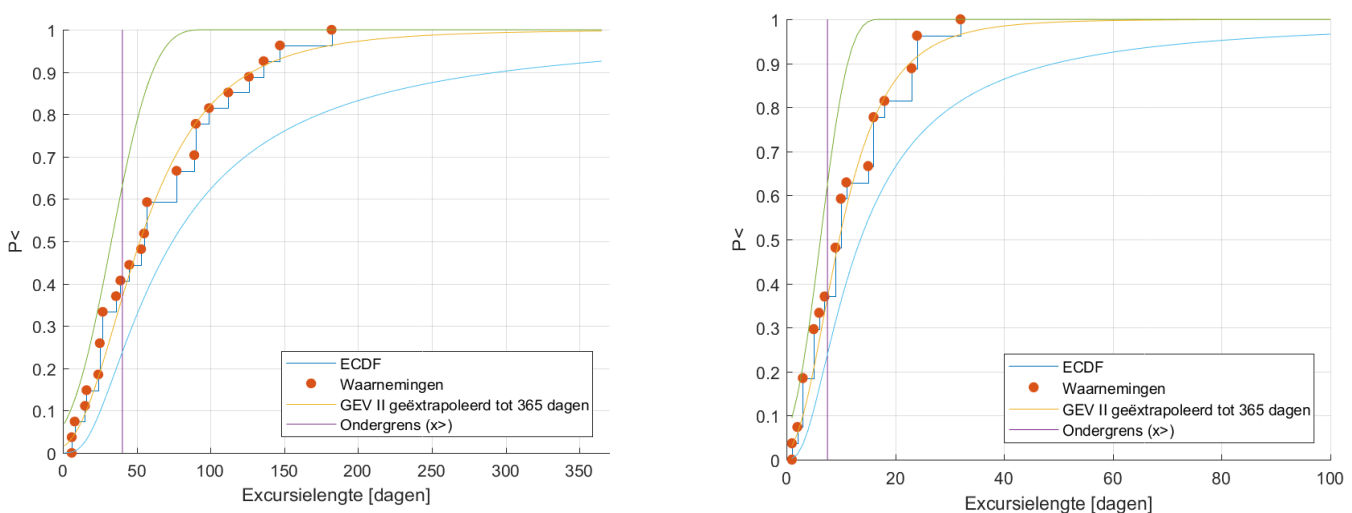
Waarbij y de vormparameter is, b de schaalfactor en a de plaatsingsfactor. De GEV-verdeling bestaat uit drie typen verdelingen, GEV I, II en III of respectievelijk Gumbelverdeling, Fréchetverdeling of Weibullverdeling.

De drie parameters die horen bij de GEV kunnen worden geschat door middel van de Maximum Likelihood methode. Dit is een benaderingsmethode die de meest waarschijnlijke parameters oplevert. Deze waarden zijn bepaald en gegeven in Tabel 2.

Tabel 2 GEV-parameters

Param.	Waarde (laagwater)	Waarde (hoogwater)
y (vorm)	0,1824	0,1398
a (locatie)	31,4891	5,7145
b (schaal)	40,2999	7,5395

Een positieve vormparameter houdt in dat de GEV van het type II is, oftewel een Fréchetverdeling. Deze is weergegeven in Figuur 18. De groene bovenlijn en blauwe onderlijn geven het 95% betrouwbaarheidsinterval weer. De paarse verticale lijn geeft de ondergrens weer vanaf waar de verdeling geldig is. Voorwaarden van x kleiner dan de ondergrens dient de ECDF afgelezen te worden.



Figuur 18 GEV II voor excursielengte laagwater (links) en hoogwater (rechts)

De extreme waardenverdeling laat zien wat de kans is op een maximale excursielengte voor een willekeurig jaar. Zo is bijvoorbeeld de kans op 250 dagen laagwater, zijnde de langste periode in dat jaar, ongeveer 1%. Hiermee is de kans op een aaneengesloten periode dienog niet is waargenomen bepaald. Het voordeel van het baseren van deze kansen op de extreme waarden statistiek is dat deze geschikter is voor het inschatten van extreme waarden. Ondanks dat deze verdeling op nog relatief weinig waarnemingen is gebaseerd kan met meer zekerheid de kans worden bepaald op een extreme waarde.

Echter moet ook opgemerkt worden dat het 95% betrouwbaarheidsinterval een erg ruime marge oplevert. Oorzaak hiervan is dat er 'slechts' 27 waarnemingen (27 jaar) gedaan zijn en er dus relatief weinig data gebruikt wordt voor het schatten van de parameters. Door meer waarnemingen mee te nemen kan dit betrouwbaarheidsinterval verkleind worden, maar daar staat tegenover dat dan oudere data meegenomen wordt. Deze data beschrijft een andere verdeling gezien het rivierverloop er toen anders uitzag. Daarom is deze data niet meegenomen en enkel de recente data, net als in eerdere analyses, gebruikt.

Ook het gebruik van de extreme waardenstatistiek levert geen 100% zekerheid op. Echter kan wel gesteld worden dat, mede door het bewezen toepasbaarheid van de extreme waardenstatistiek in vergelijkbare vraagstukken, de extreme waardenstatistiek een geschikte methode is om voor extreme gebeurtenissen als lange aaneengesloten perioden laagwater of hoogwater de kans te bepalen.

6 DISCUSSIE

In deze discussie wordt enerzijds kritisch gekeken naar het onderzoek en naar mogelijke verbeteringen. Anderzijds wordt bekeken waar deze kennis te plaatsen valt in een breder perspectief.

Een mogelijke aanbeveling is om voor de verschillende locaties exacte waterstandsgrenzen te bepalen. Deze zijn afhankelijk van het rivierprofiel en het moment dat daadwerkelijk overlast ondervonden wordt van de te hoge/lage waterstand. Het is dan te kort door de bocht om te stellen dat elke waterstand op iedere locatie onder gelijke omstandigheden overlast oplevert. Het kan daarvoor nuttig zijn een tool te ontwikkelen die, afhankelijk van de lokale parameters, kan bepalen wat de kansverdeling is.

Andere toepassingen van dit principe zouden kunnen worden gevonden voor de binnenvaart op de rivieren. Deze schepen zijn afhankelijk van voldoende waterdiepte om te kunnen varen. Hiervoor hanteert Rijkswaterstaat voor de ongestuwde rivieren (IJssel en Waal) de Overeengekomen Laagste Rivierstand (OLR). Deze is in 2002 vastgesteld op een afvoer van $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith (Dillingh, 2013). Dit houdt in dat er bij $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ voldoende diepgang in de vaargeul moet zijn. Deze waarde is gebaseerd op een onderschrijdingskans van 5%, ofwel 18 dagen per jaar $Q < 1020$. Het kan echter ook interessant zijn om te kijken naar een periode van aaneengesloten dagen. Hiervoor kan de in dit rapport verkregen informatie, en die van Tuijnder (2016) inzicht bieden over geschikte methoden om dit te doen.

Een mogelijk interessante vervolgvraag kan ook gesteld worden voor de kans op hoogwater. De grens voor hoogwater wordt in dit onderzoek gesteld op $Q > 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ zoals gesteld in het hoogwaterdraaiboek van Rijkswaterstaat (Nieuwenhuis, Teunis, Vries, & Kort, 2016). Echter wordt in dit draaiboek een onderscheid gemaakt tussen de zomerperiode en winterperiode, waarbij in de winterperiode een grens van $Q > 5260 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt aangehouden. Omdat de verdeling van waterstanden en afvoer bij Lobith geen gelijke vorm kent, is de conclusie gebaseerd op $Q > 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ niet ook zomaar geldig voor $Q > 5260 \text{ m}^3/\text{s}$.

In bredere context kan dit onderzoek bijdragen aan de kennis over de relatie tussen afvoer en waterstand en dan met name het verband tussen de kansverdeling van dagen laagwater op basis van afvoer of waterstand. Er is in eerder onderzoek veel gekeken naar de kans op extreme afvoeren, extreme droogten en de duur van extreme afvoergolven. Hier is het hoogwaterbeschermingsprogramma in Nederland op gebaseerd. Evenzo is er al in veel onderzoeken en beheersplannen gekeken naar de relatie tussen Q en h . Hierop zijn ook de waterstandsduurlijnen gebaseerd. Er is echter nog niet veel onderzoek gedaan naar onderliggende $Q - h$ relaties. Zoals bijvoorbeeld de tijd dat Q boven een bepaalde grens zit ten opzichte van de tijd dat h boven een bepaalde grens zit.

In dit onderzoek is daar wel verder op in gegaan en is gebleken dat de variatie in afvoer niet altijd eenzelfde variatie in waterstand ten gevolge heeft. Dit heeft als gevolg dat hoge waterstanden soms langer aanhouden dan hoge afvoeren, of dat de kans op een lage afvoer groter is dan de kans op een lage waterstand.

7 CONCLUSIE

Het doel van dit onderzoek was om te achterhalen hoe een op lokale waterstanden gebaseerde statistische analyse van laagwaterperioden en hoogwaterperioden zich verhoudt tot eenzelfde analyse op basis van afvoeren bij Lobith. Kortgezegd een vergelijking van twee analysemethoden. Daarvoor zijn als testlocaties Zwolle en Kampen aangewezen omdat deze mogelijk interessant zijn wegens hun ligging (grenzend aan het IJsselmeer) en omdat de locatie Zwolle expliciet is behandeld in het onderzoek van Arcadis.

Daarnaast is er ook breder gekeken naar de andere Rijntakken, in hoeverre de kansverdelingen van afvoeren representatief zijn voor de verschillende Rijntakken.

De onderzoeksvraag luidde:

‘Hoe verhoudt zich een statistische analyse van lokale waterstanden zich tot eenzelfde analyse gebaseerd op rivierafvoeren bij Lobith?’

Op basis van analyses van de afvoer bij Lobith en waterstanden langs de Rijntakken kan geconcludeerd worden dat:

- De verdeling van afvoeren niet exact gelijk is aan de verdeling van waterstanden
- Het verschil in verdeling echter niet direct tot gevolg heeft dat alle andere verdelingen ook ongelijk zijn
- Voor de kansverdeling van zowel het aantal dagen laagwater in een jaar als de aaneengesloten duur van laagwaterperioden is de verdeling van afvoeren bij Lobith wel representatief voor:
 - de Waal tot Vuren
 - de IJssel tot Kampen
 - de Nederrijn geheel niet
- De kansverdeling van het aantal dagen hoogwater goed overeenkomt met de kansverdeling gebaseerd op afvoeren, met als uitzondering de Nederrijn vanaf Amerongen.
- De afvoerverdeling van aaneengesloten duur van hoogwaterperioden niet representatief is voor alle locaties langs de Rijn. De kansverdeling op basis van afvoeren onderschat de kans op een lange periode hoogwater.
- Er over de tijd gezien verschillen zijn, waardoor de kansverdeling van afvoeren over de tijd gezien een verkeerd beeld geeft.
- De kans van lange excursielengten bepaald kan worden aan de hand van de extreme waarden statistiek.

Uit dit onderzoek blijkt dat de afvoerdeling bij Lobith deels representatief is voor de kans op laag- of hoogwater langs de Rijntakken. Allereerst is er een ruimtelijke factor. Vanaf de bovengenoemde locaties zijn de verschillen dusdanig groot dat niet langer over eenzelfde verdeling gesproken kan worden. Vanaf die locaties heeft het de voorkeur om sowieso lokale verdelingen op te stellen. Ook blijkt dat niet elke gebeurtenis zich even goed laat beschrijven door de afvoerdeling. Bij met name hoogwaterperioden, en dan de aaneengesloten duur daarvan, blijkt dat de afvoerdeling een onderschatting geeft van de kans, waarbij met name lange hoogwaterperioden slecht overeenkomen. Als laatste is gebleken dat de extreme waardenstatistiek ook binnen deze analyse een geschikte methode is om de kans op lange aaneengesloten perioden te bepalen. Zowel de literatuur als een uitvoering van een dergelijke analyse toont aan dat deze analysetechniek geschikt is voor het bepalen van de kans op lange laagwater/hoogwaterperioden.

8 BIBLIOGRAFIE

- ARCADIS. (2015). *Uitwerking methodiek waterbeschikbaarheid hoofdsysteem zaaknummer 31104592*. Zwolle: ARCADIS.
- Chbab, E., & van Noordwijk, J. (2002). *Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden*. Lelystad: RIZA, HKV.
- Chbab, H. (2016). *Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas*. Delft: Deltares.
- Circkel, D., Querner, E., Torfs, P., & Lanen, H. v. (2003). *Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem*. Wageningen: Alterra.
- Dillingh, D. (2013). *Kenmerkende waarden Kustwateren en Grote Rivieren*. Delft: Deltares.
- Engmann, S., & Cousineau, D. (2011). Comparing distributions: the two sample Anderson-Darling test as an alternative to the Kolmorov-Smirnoff test. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 1-17.
- Laeven, R., & Sugihartono, T. (2006). De extreme waarde van extreme waarde theorie. *Professie en praktijk*, 34-36.
- Lemans, J. (2007). *Afvoerverdeling Rijntakken*. Delft: TU Delft.
- Nieuwenhuis, S., Teunis, B., Vries, H. d., & Kort, B. (2016). *Landelijk Draaiboek Hoogwater en Overstromingen*. Lelystad: Watermanagement Centrum Nederland.
- Ogink, H., & Stolker, C. (2004). *Verbetering Qf-relaties*. Arnhem: RWS/RIZA.
- Parmet, B., Chbab, E., Kwadijk, J., Diermanse, F., & Klopstra, D. (2001). *Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith*. Arnhem: RIZA.
- Rijkswaterstaat. (2015, 11 24). *Laagwaterperiode Rijn voorbij*. Opgeroepen op 05 09, 2017, van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/nieuws/nieuwsarchief/p2015/11/laagwaterperiode-rijn-voorbij.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2016). *Doelen en resultaten*. Opgeroepen op 05 29, 2017, van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/ijsselmeer-zoetwatervoorraad-op-peil/doelen-en-resultaten.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2017). *Ruimte voor de rivier*. Opgeroepen op 03 28, 2017, van Projecten: <https://www.ruimtevoorderivier.nl/projecten/>
- Rijkswaterstaat. (sd). *Doelen en resultaten*. Opgeroepen op 06 28, 2017, van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/nederrijn-en-lek-renovatie-stuwensemble/doelen-en-resultaten.aspx>
- Rura-Arnhem . (2010). *Betrekkinglijnen Rijn*. Arnhem: Rura-Arnhem.
- Strijker, J., & Hoes, O. (2004). Extreme neerslaghoeveelheden voor ontwerpbuien. *H2O*, 18-21.
- Tuijnder, A. (2016). *Statistische analyse laagwater Rijntakken*. Zwolle: ARCADIS.
- Waterstandsduurlijn Bovenrijn en Waal. (2012).

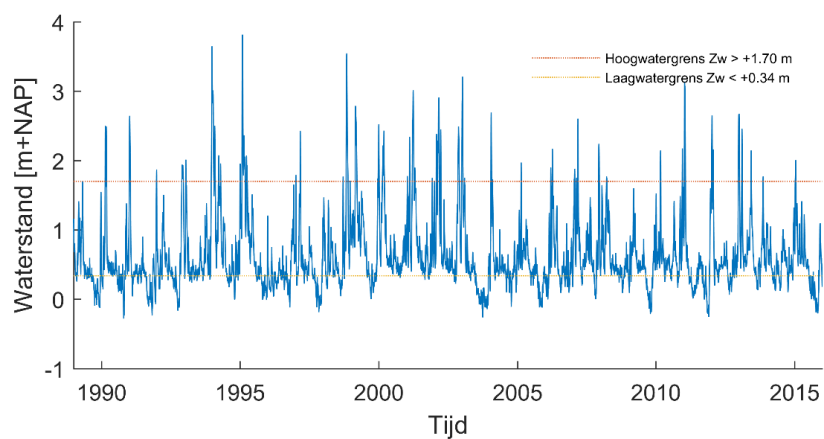
9 BIJLAGEN

BIJLAGE 1: WATERSTANDSGRENZEN VOLGENS WATERSTANDSDUURLIJN 2012	38
BIJLAGE 2: TIJDSERIE WATERSTAND ZWOLLE EN KAMPEN	39
BIJLAGE 3: GECOMBINEERDE VERDELING (KANS PER MAAND)	40
BIJLAGE 4: GECOMBINEERDE VERDELING O.B.V. AFVOER LOBITH.....	41
BIJLAGE 5: BIJLAGEN BIJ HOOFDSTUK 4	42
BIJLAGE 6: KANSVERDELING LAAGWATER PER MAAND ZWOLLE/KAMPEN/LOBITH.....	45
BIJLAGE 7: OVERSCHRIJDINGSKANS EXCURSIELENGTE O.B.V. FRÉCHETVERDELING (GEV II).....	46

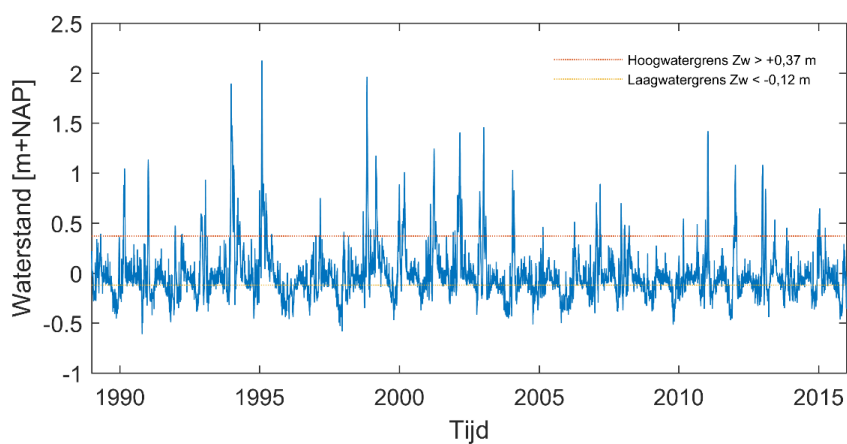
BIJLAGE 1: WATERSTANDSGRENZEN VOLGENS WATERSTANDSDUURLIJN 2012

Locatie	Laagwatergrens (Q<1500) [m+NAP]	Hoogwatergrens (Q>4200) [m+NAP]
Amerongen	3,74	5,8
Arnhem	7,91	10,05
Deventer	2,57	5,00
Dodewaard	4,84	8,27
Kampen	-0,12	0,37
Nijmegen	6,35	9,82
Olst	1,71	3,89
Vuren	0,68	1,80
Westervoort	7,67	10,35
Wijhe	1,20	3,16
Zaltbommel	1,44	4,11
Zutphen	3,86	6,47
Zwolle	0,34	1,70
Tiel	3,64	7,04
Lobith	8,40	12,00
Driel	7,58	8,88

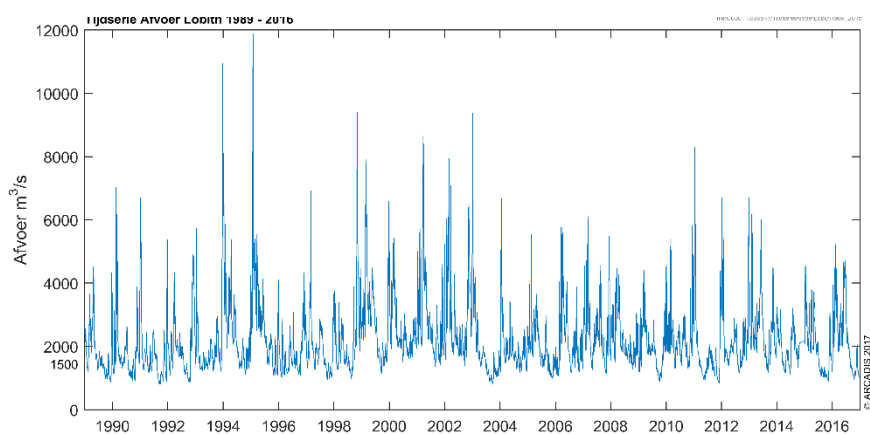
BIJLAGE 2: TIJDSERIE WATERSTAND ZWOLLE EN KAMPEN



Tijdserie waterstand Zwolle



Tijdserie waterstand Kampen



Tijdserie afvoer Lobith

BIJLAGE 3: GECOMBINEERDE VERDELING (KANS PER MAAND)

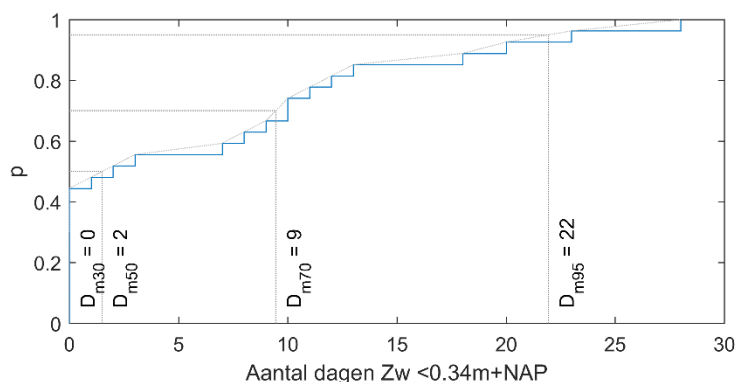
Om een inschatting te geven van wat de kans op een x aantal onwerkbaar dagen per maand is zijn de gecombineerde verdelingen opgesteld. Deze geven voor de 5,30,50 en 70% kans aan welk aantal dagen verwacht mag worden. Deze zijn opgesteld door per maand.

Voor elke maand wordt een ECDF bepaald voor het aantal onwerkbaar dagen in die maand. Zie hiernaast een voorbeeld.

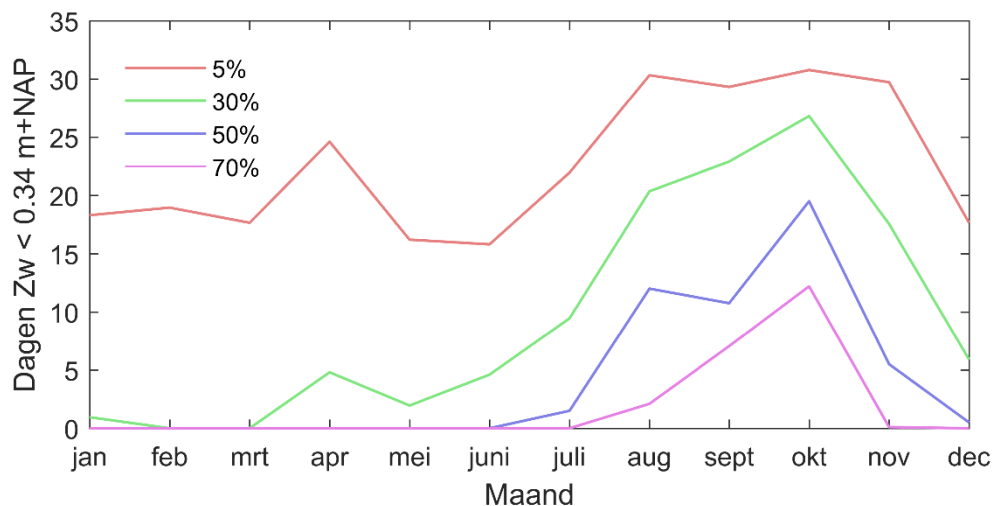
Hierin is te zien dat in 50% van de tijd 2 of minder dagen laagwater optreden, in 70% van de tijd 9 of minder dagen en in 95% van de tijd 22 dagen of minder. Dit zijn de onderschrijdingskansen.

Daarmee kan ook gesteld worden dat de kans op meer dan 22 dagen laagwater $100-95 = 5\%$ is.

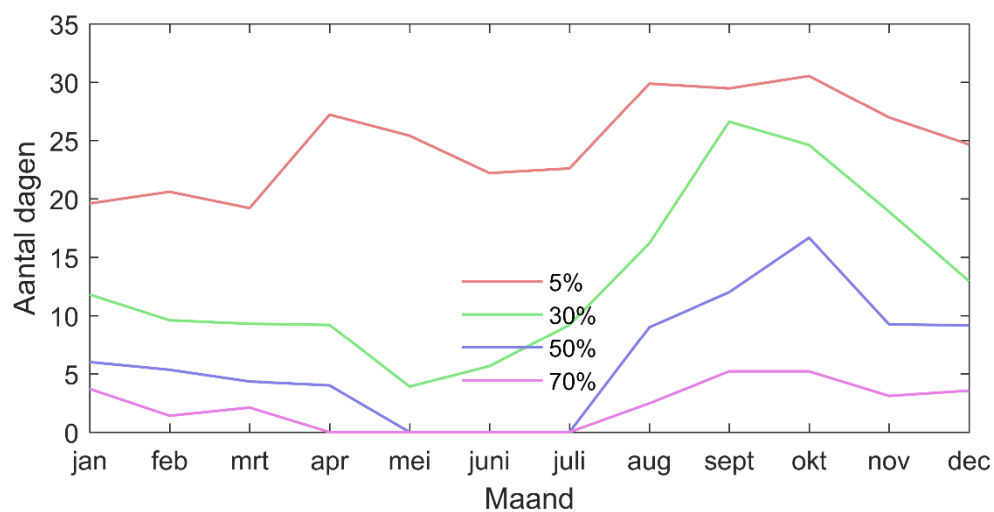
Op deze manier wordt er voor de kans 5, 30, 50 en 70% bepaald welk aantal dagen laagwater verwacht kan worden.



Dit resulteert in een kansverdeling waar per maand valt af te lezen voor 5,30,50 en 70% welk aantal dagen bij die kans hoort. Zie onderstaand voorbeeld. De kans op 11 dagen laagwater in de maand oktober is 70%.

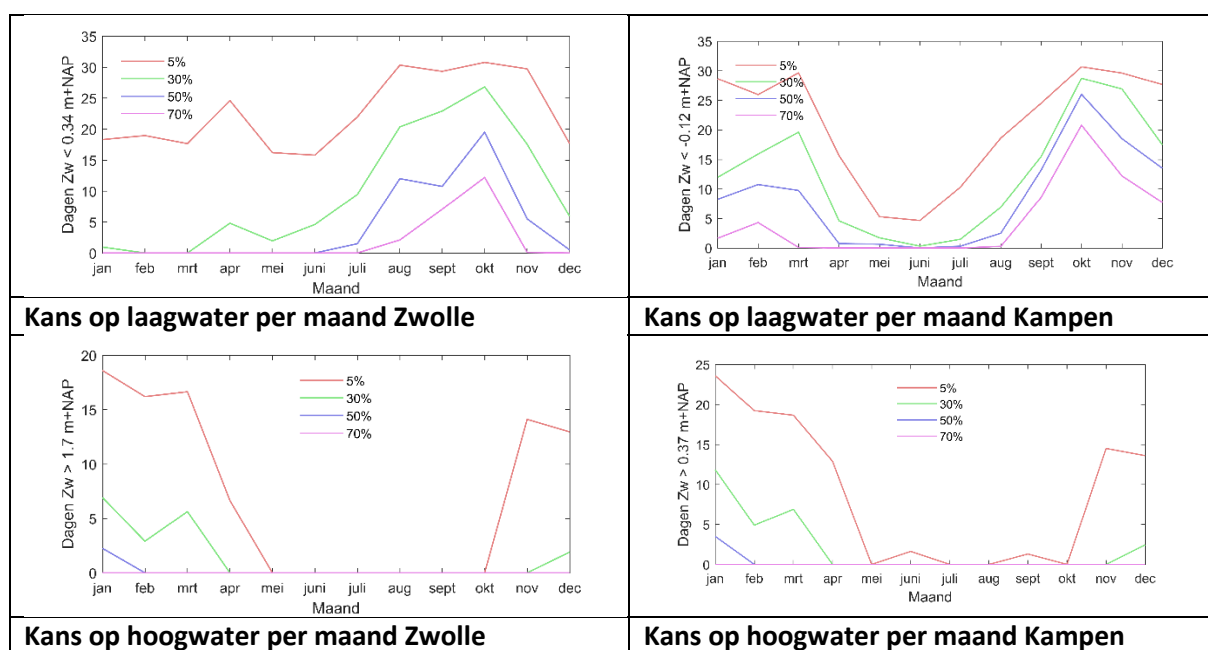


BIJLAGE 4: GECOMBINEERDE VERDELING O.B.V. AFVOER LOBITH.

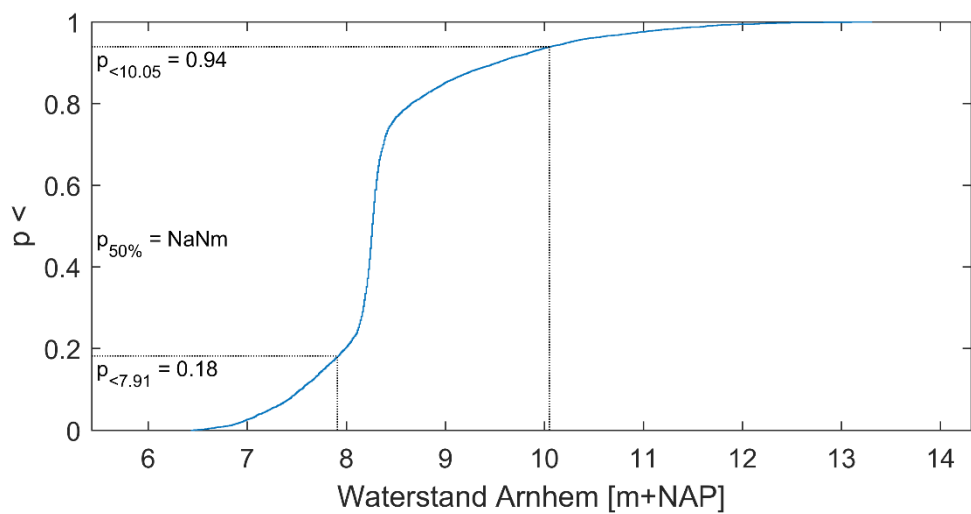


Gecombineerde verdeling kans op x aantal dagen per maand niet werkbare situatie o.b.v. Q Lobith

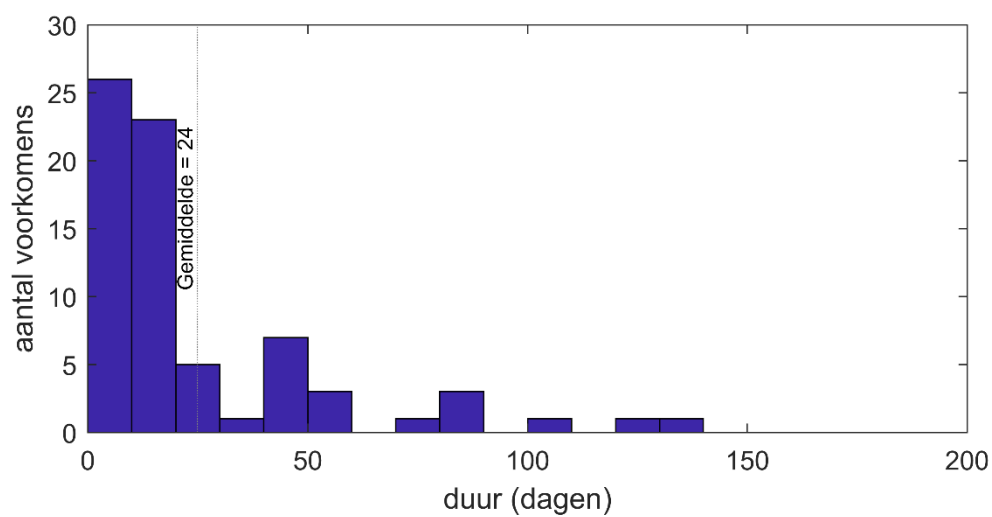
Bijlage 4.2



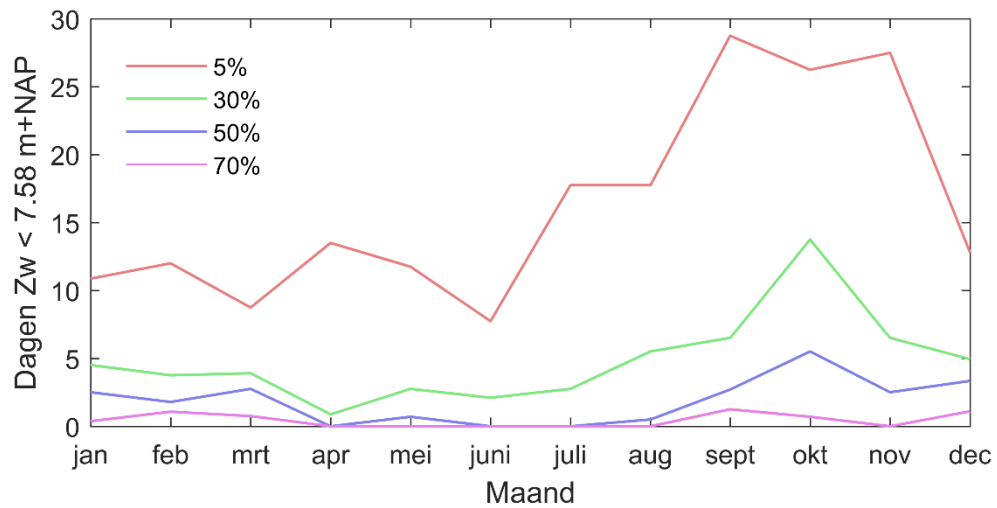
BIJLAGE 5: BIJLAGEN BIJ HOOFDSTUK 4



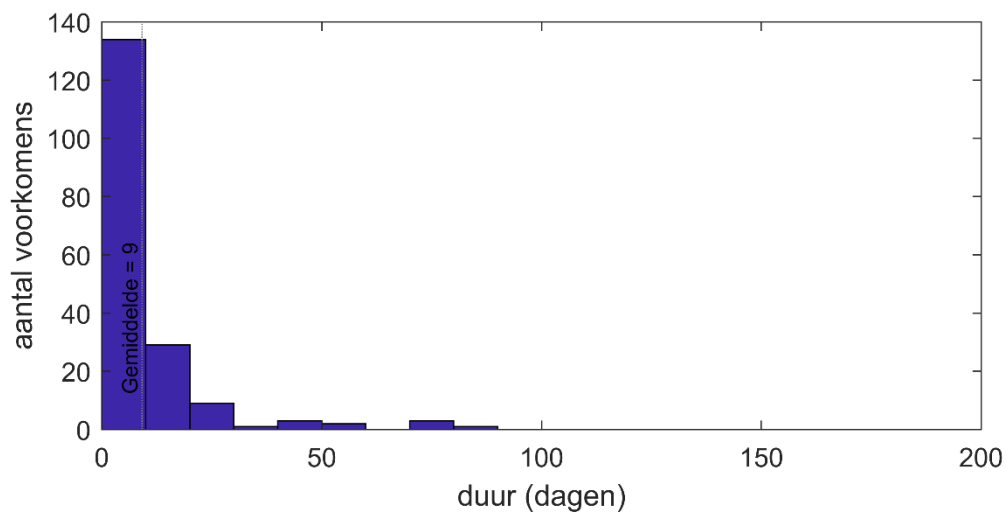
5.1 ECDF Waterstanden Arnhem



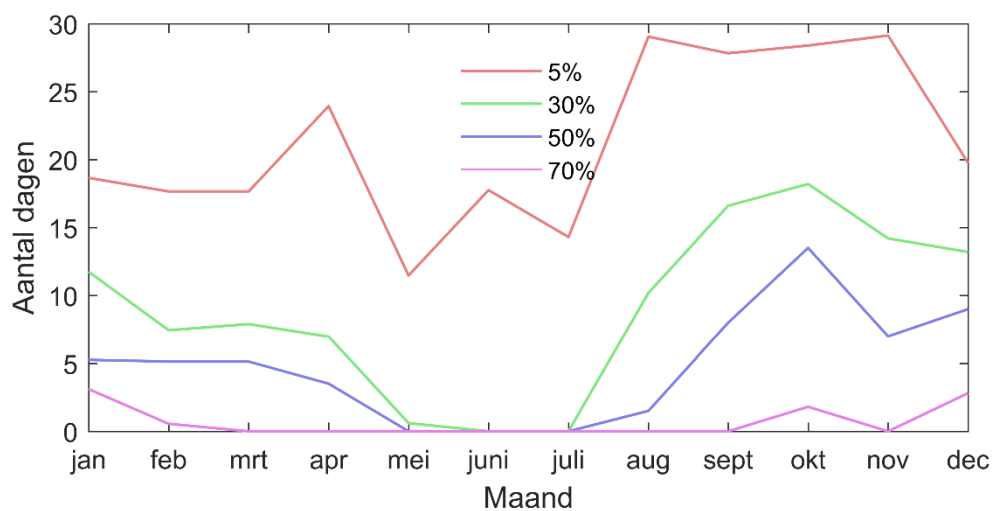
5.2 Histogram aaneengesloten duur laagwaterperioden Arnhem



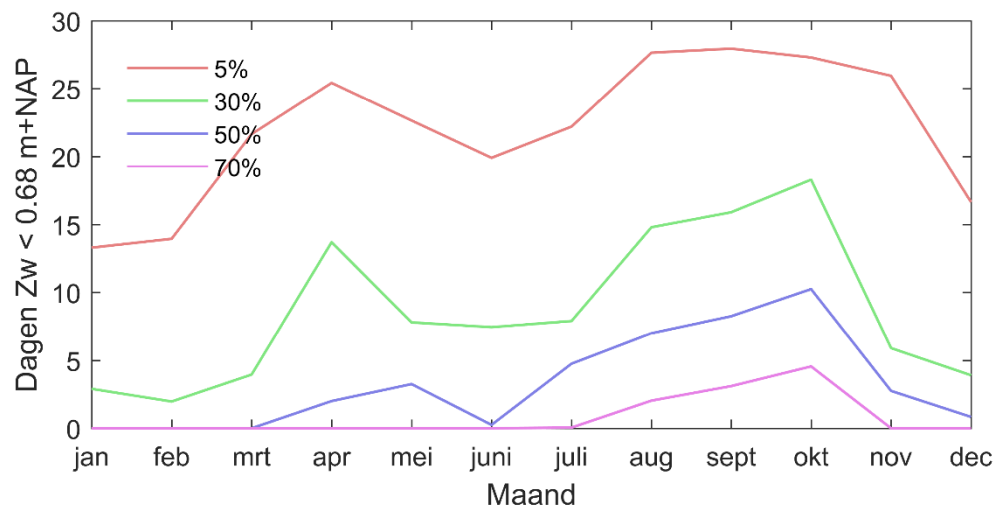
5.3 Kansverdeling over jaar op aantal dagen laagwater per maand Driel



5.4 Histogram aaneengesloten duur laagwaterperioden Driel

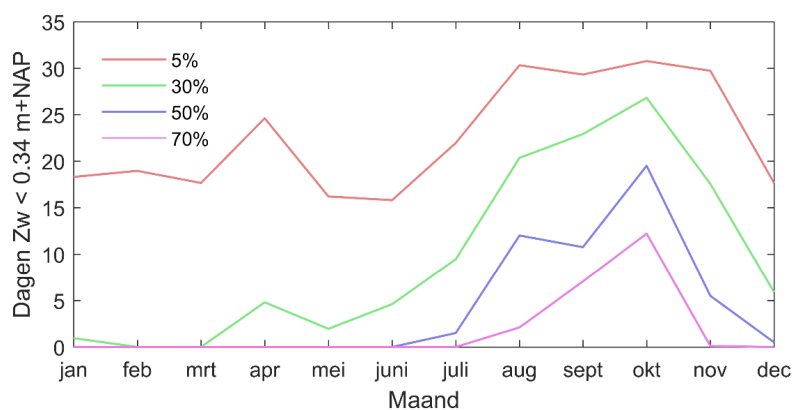


5.5 Kansverdeling over jaar op aantal onwerkbare dagen per maand Nijmegen

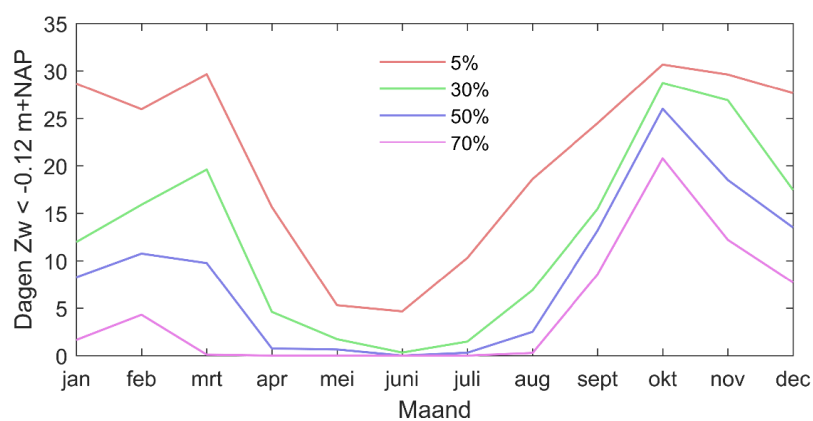


5.6 Kansverdeling over jaar aantal dagen laagwater per maand Vuren

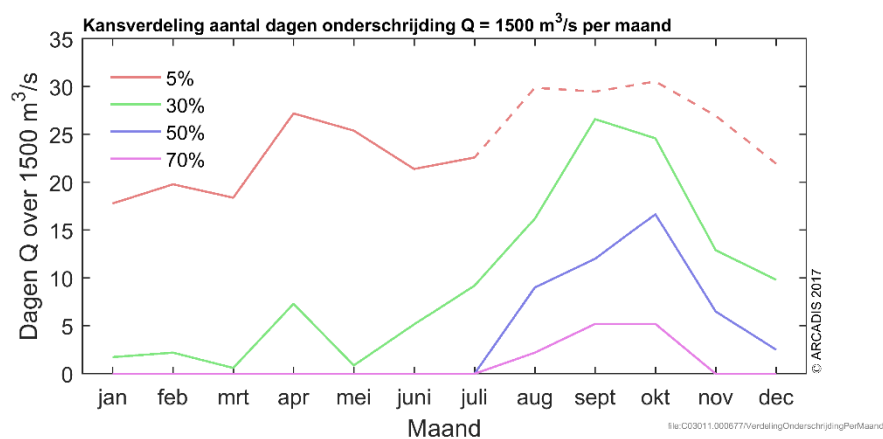
BIJLAGE 6: KANSVERDELING LAAGWATER PER MAAND ZWOLLE/KAMPEN/LOBITH



Kansverdeling laagwater per maand Zwolle



Kansverdeling laagwater per maand Kampen



Kansverdeling laagwater per maand Lobith o.b.v. afvoer (Tuijnder, 2016)

BIJLAGE 7: OVERSCHRIJDINGSKANS EXCURSIELENGTE O.B.V.
FRÉCHETVERDELING (GEV II)

Excursielengte	Overschrijdingskans x dagen aaneengesloten laagwater	Overschrijdingskans x dagen aaneengesloten hoogwater
10		0,482
20		0,138
30		0,043
40	0,641	0,015
50	0,523	0,006
60	0,425	0,003
70	0,342	0,001
80	0,275	0,001
90	0,221	<0,001
100	0,178	
110	0,144	
120	0,117	
130	0,096	
140	0,079	
150	0,065	
160	0,054	
170	0,045	
180	0,038	
190	0,032	
200	0,027	
210	0,023	
220	0,020	
230	0,017	
240	0,015	
250	0,013	
260	0,011	
270	0,010	
280	0,008	
290	0,007	
300	0,007	
310	0,006	
320	0,005	
330	0,005	
340	0,004	
350	0,003	