

Afleiden van frequentielijnen voor de Vecht

Voor de klimaatscenario's 2050W+ en 2100W+



Afleiden van frequentielijnen voor de Vecht

Voor de klimaatscenario's 2050W+ en 2100W+

Henk van den Boogaard
Laurene Bouaziz

1230045-000

Titel

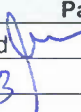
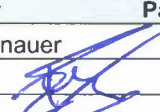
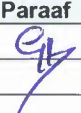

Afliden van frequentielijnen voor de Vecht

Project	Kenmerk	Pagina's
1230045-000	1230045-000-ZWS-0005	39

Samenvatting

Op basis van met GRADE berekende extreme afvoeren van de Lippe zijn frequentieanalyses uitgevoerd van extreme Vecht-afvoeren. Voor het vertalen van de afvoer extremen van de Lippe naar die van de Vecht is een systeemrelatie gebruikt. Die systeemrelatie is gekalibreerd op overeenkomstige jaarmaxima van Vecht en Lippe. Voor de Vecht zijn die afvoerjaarmaxima via een QH-relatie afgeleid voor een historische periode waarop waterhoogten van de Vecht beschikbaar waren. Voor de Lippe zijn voor dezelfde tijdsperiode de afvoerextremen berekend met GRADE. Via een regressie werd de relatie tussen de overeenkomstige ('gemeten') Vecht en (GRADE) Lippe jaarmaxima vastgesteld.

Met GRADE gegenereerde afvoerreeksen van de Lippe met een lengte van 50.000 jaar zijn daarna met die systeemrelatie omgezet naar afvoerreeksen voor de Vecht. Dat is in drievoud gedaan: voor afvoerreeksen van de Lippe die het huidige klimaat representeren, alsmede voor de twee klimaatscenario's 2050W* en 2100W*. Omdat de in WBI2017 gehanteerde werklijn voor de Vecht als referentie dient bij het vaststellen van de effecten van die klimaatscenario's heeft een herijking van de Vecht reeksen plaatsgevonden. Op de dan gevonden reeksen zijn frequentieanalyses uitgevoerd en kunnen de effecten van de klimaatscenario's worden vastgesteld. Die frequentieanalyses voor de klimaatscenario's zijn op hun beurt weer in tweevoud uitgevoerd, namelijk voor de situatie dat er niet, en dat er wèl, rekening wordt gehouden met overstromingen in het bovenstroomse stroomgebied van de Vecht.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2016	H. vd Boogaard		M. Hegnauer		G. Blom	
		L. Bouaziz					

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
2	Vergelijking van de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe	3
2.1	Vergelijking van de hoogtekaart	6
2.2	Vergelijking van de genormaliseerde hoogte naar het rivierennetwerk	7
2.3	Vergelijking van het landgebruik	7
2.4	Bodem classificatie	11
2.5	Overeenkomst in de responsen van de Lippe en de Vecht	12
2.6	Samenvatting en aanbevelingen	13
3	Aanpak van - en stappen in frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren	15
3.1	Beschikbare/gebruikte data en informatiebronnen voor Lippe en Vecht	15
3.2	Beschrijving van aanpak en stappen	16
3.2.1	Validatie van GRADE voor de Lippe	17
3.2.2	Systeemrelatie voor overeenkomstige afvoerjaarmaxima van Lippe en Vecht	17
3.2.3	Vertalen van Lippe jaarmaxima naar die voor de Vecht	18
3.2.4	Herijking van de Vecht afvoermaxima aan WBI2017 werklijn.	18
3.2.5	Effecten van bovenstroomse overstromingen	20
4	Resultaten van de frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren	21
4.1	Validatie van GRADE voor de Lippe	21
4.2	Systeemrelatie voor overeenkomstige afvoerjaarmaxima van Lippe en Vecht	24
4.3	Vertalen van GRADE jaarmaxima van de Lippe naar de Vecht	27
4.4	Herijking van de Vecht afvoermaxima aan WBI2017 werklijn	28
4.5	Effecten van bovenstroomse overstromingen	31
5	Conclusies en aanbevelingen	37
6	Literatuur	39

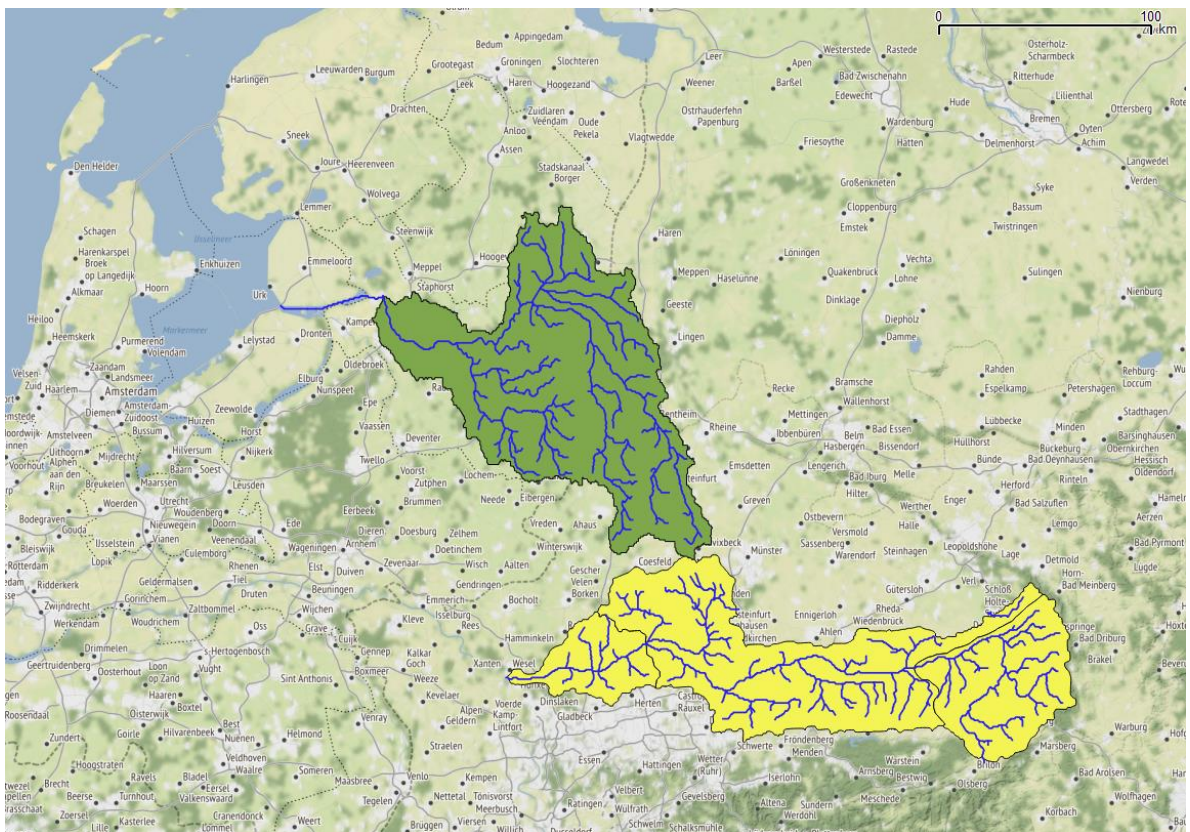
1 Introductie

Vanuit Rijkswaterstaat en Directoraat-Generaal Ruimte en Water (DGRW) is er binnen het project Ontwerpinstrumentarium 2014 de vraag om een uitspraak te doen over extreme afvoeren in de Overijsselse Vecht voor de klimaatscenario's 2050W+ en 2100W+. Voor de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen is deze statistiek berekend met GRADE (Hegnauer et al., 2014). Het stroomgebied van de Vecht is nog niet opgenomen in een GRADE systeem. Om toch iets over extreme afvoeren in de Vecht te kunnen zeggen is de aanname gemaakt dat het stroomgebied van de Lippe (zijrivier van de Rijn) dezelfde eigenschappen heeft als die van de Vecht en dat de GRADE reeksen van de Lippe gebruikt kunnen worden om hoogwaterstatistiek voor de Vecht af te leiden. Deze aanname wordt al eerder gemaakt in een studie van Stolte en Wösten (1991) waarin zij verwijzen naar een studie van Zeeman uit 1990. Deze kon helaas niet geraadpleegd worden, maar Stolte en Wösten noemen: 'RIZA decided to start the development of a hydrological model for the lowlands by developing a model for the catchment area of the river Vecht. This area is considered to be characteristic for the lowlands of the Rhine (Zeeman, 1990).' Dit duidt erop dat een correlatie verwacht wordt tussen de afvoeren van de Vecht en die van de Lippe en dat deze laatste gebruikt kunnen worden om een uitspraak te doen over extreme afvoeren in de Vecht voor huidige en toekomstige klimaatcondities.

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 een vergelijking gemaakt van de topografische en fysische karakteristieken van de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe. In Hoofdstuk 3 wordt de methode toegelicht om de frequentieanalyse van extreme afvoeren voor de Vecht stapsgewijs af te leiden op basis van de extreme afvoeren van de Lippe. Ook worden de gebruikte databronnen toegelicht. De resultaten van de statistische analyse worden in Hoofdstuk 4 stapsgewijs toegelicht en de afgeleide frequentiekrommes voor de Vecht worden hierin gepresenteerd. In Hoofdstuk 5 worden de conclusies en aanbevelingen beschreven.

2 Vergelijking van de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe

De stroomgebieden van de Lippe bovenstrooms van Schermbeck en de Vecht bovenstrooms van een Zwartsluis (iets benedenstrooms van Dalfsen) zijn weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Stroomgebied van de Lippe (geel) en van de Vecht (groen)

De rivier de Vecht heeft een lengte van 177 km en stroomt door Duitsland en Nederland in een stroomgebied van 3800 km² (2100 km² in Nederland en 1700 km² in West Duitsland). Het hoogteverschil tussen het hoogste en het laagste punt van het stroomgebied bedraagt 185 meters. De Vecht is een typische regenrivier met een sterk variërende afvoer: in de zomer kan een afvoer van slechts enkele m³/s voorkomen, terwijl in de wintermaanden van 100 tot 200 m³/s niet ongebruikelijk is (Wikipedia). In de 19^{de} eeuw, speelde de rivier een belangrijke rol voor de scheepvaart, waarbij de rivier alleen in de natte maanden bevaarbaar was (oktober tot april). In 1908, is het Nederlandse deel van de rivier gekanaliseerd en zijn veel bochten weggehaald wat de lengte van dat deel van de rivier van 85 km terug heeft gebracht naar 60 km (Wikipedia). De rivier wordt op verschillende plekken gestuwd voor operationeel beheer tijdens gemiddeld- en laagwater. De looptijd van een afvoergolf door die 60 km bedraagt circa 14 uur (Moll en Crebas, 1989).

Als illustratie is een foto van de Vecht bij Dalfsen in Figuur 2.2 te zien.



Figuur 2.2 Vecht bij Dalfsen (bron: wikipedia)

Het stroomgebied van de Lippe grenst bijna aan het zuidelijke deel van het stroomgebied van de Vecht. De Lippe rivier heeft een lengte van 230 km en de oppervlakte van het stroomgebied bij Schermbeck bedraagt ongeveer 4882 km² (Petrucek en Stöffler, 2011). Het hoogteverschil tussen het hoogste en het laagste punt in het stroomgebied bedraagt ongeveer 500 meter. Zoals in de Vecht, is de morfologie van de Lippe veel veranderd en de rivier is nu een redelijke rechte lijn met een diep en smal profiel (Petrucek en Stöffler, 2011). Alleen het bovenstroomse deel van de Lippe is heuvelachtig, in de overige 215 km is de Lippe een laaglandrivier met een kleine helling. De concentratietijd van neerslag in het bovenstroomse deel van het stroomgebied tot Schermbeck bedraagt 1-2 dagen. De bijdrage van sneeuw in de afvoer van de Lippe is waarschijnlijk beperkt, mogelijk alleen in de hogere delen kan sneeuw een rol spelen (Mierlo en Passchier, 1998).

In Figuur 2.3 staat een foto van de Lippe bij Schermbeck.



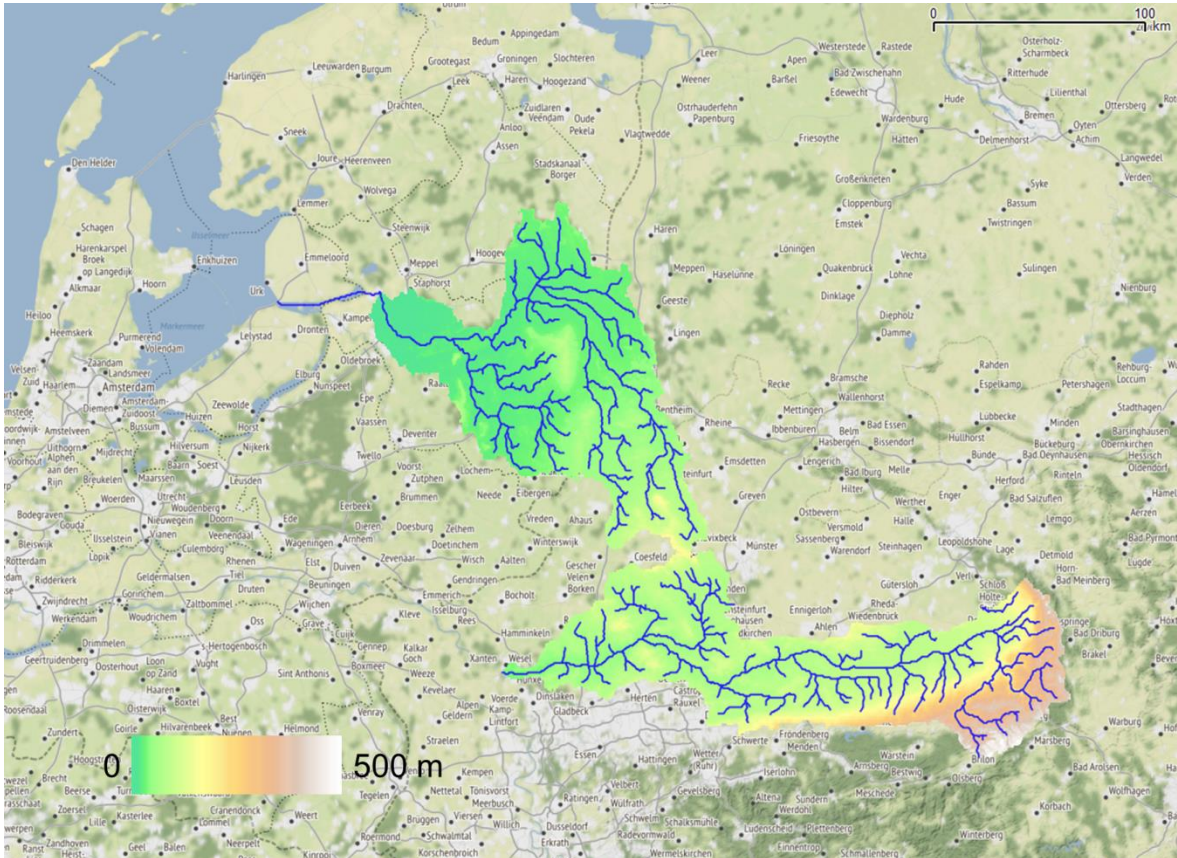
Figuur 2.3 Lippe bij Schermbeck (bron: wassernetz-rnrw.de)

De twee stroomgebieden worden in de volgende paragrafen op de volgende punten met elkaar vergeleken:

- Hoogtekaart.
- Genormaliseerde hoogtekaart naar het rivierennetwerk.
- Landgebruik.
- Bodemtype.

2.1 Vergelijking van de hoogtekaart

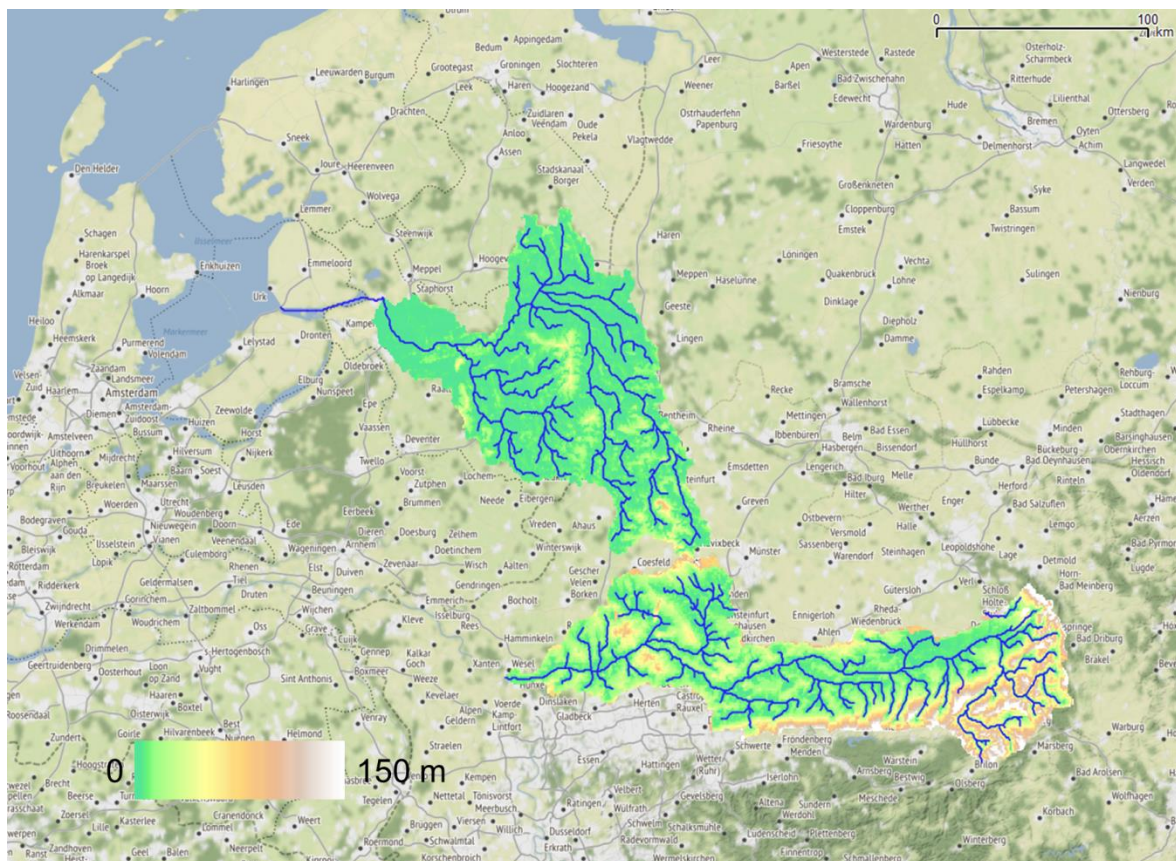
De hoogtekaart voor de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe is weergegeven in Figuur 2.4. Een deel van de Lippe is heuvelachtig met hoogtes tot meer dan 500 meter. De Vecht is vlakker en het hoogste punt is nog geen 200 meter.



Figuur 2.4 Hoogtekaart van de Lippe en de Vecht (bron: HydroSHEDS, Lehner et al. 2008)

2.2 Vergelijking van de genormaliseerde hoogte naar het rivierennetwerk

De genormaliseerde hoogte naar het rivierennetwerk (HAND, Height Above the Nearest Drain) is een veelgebruikte parameter in de hydrologie omdat het een maat is voor de relatieve hoogte ten aanzien van het dichtstbijzijnde rivier. Gebieden met een lage HAND zijn gebieden waarbij de grondwaterstand waarschijnlijk hoog is en die hydrologisch anders reageren dan gebieden met een hoge HAND waarde. De HAND kaart voor de Lippe en de Vecht is weergegeven in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 HAND kaart voor de Vecht en de Lippe

De verdeling van HAND waarden in de Lippe en de Vecht zijn in Tabel 2.1 samengevat:

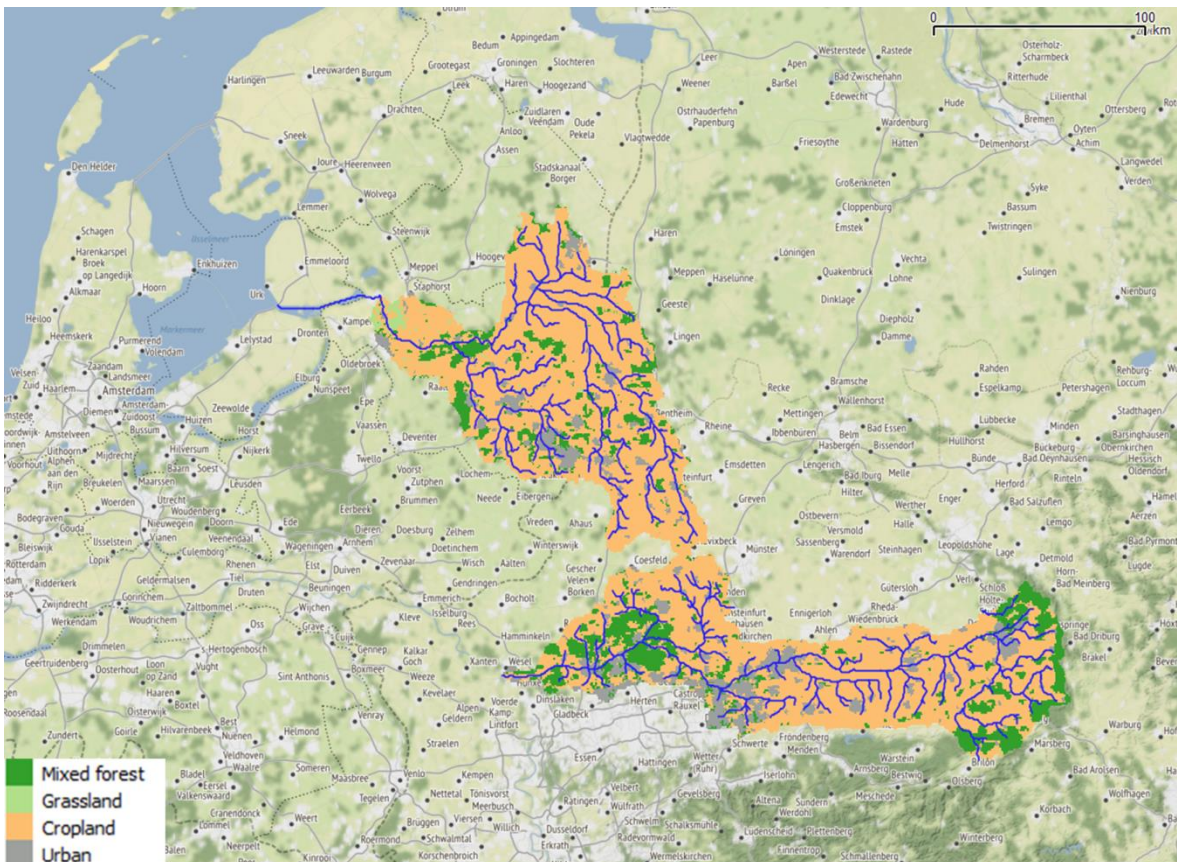
Tabel 2.1 Samenvatting van HAND waarden in de Lippe en de Vecht

HAND waarde (m)	Vecht	Lippe
Onder 5 m	77%	30%
Tussen 5 en 10 m	13%	15%
Boven de 10 m	10%	55%

Het zuidoostelijke gedeelte van de Lippe heeft hogere HAND waarden en is daar ook steiler dan in het overige deel van het stroomgebied. Dit deel wijkt af van de rest van het stroomgebied en van die van de Vecht. Het is te verwachten dat de hydrologische processen in dit gedeelte van het stroomgebied ook anders zijn dan in de rest van het stroomgebied.

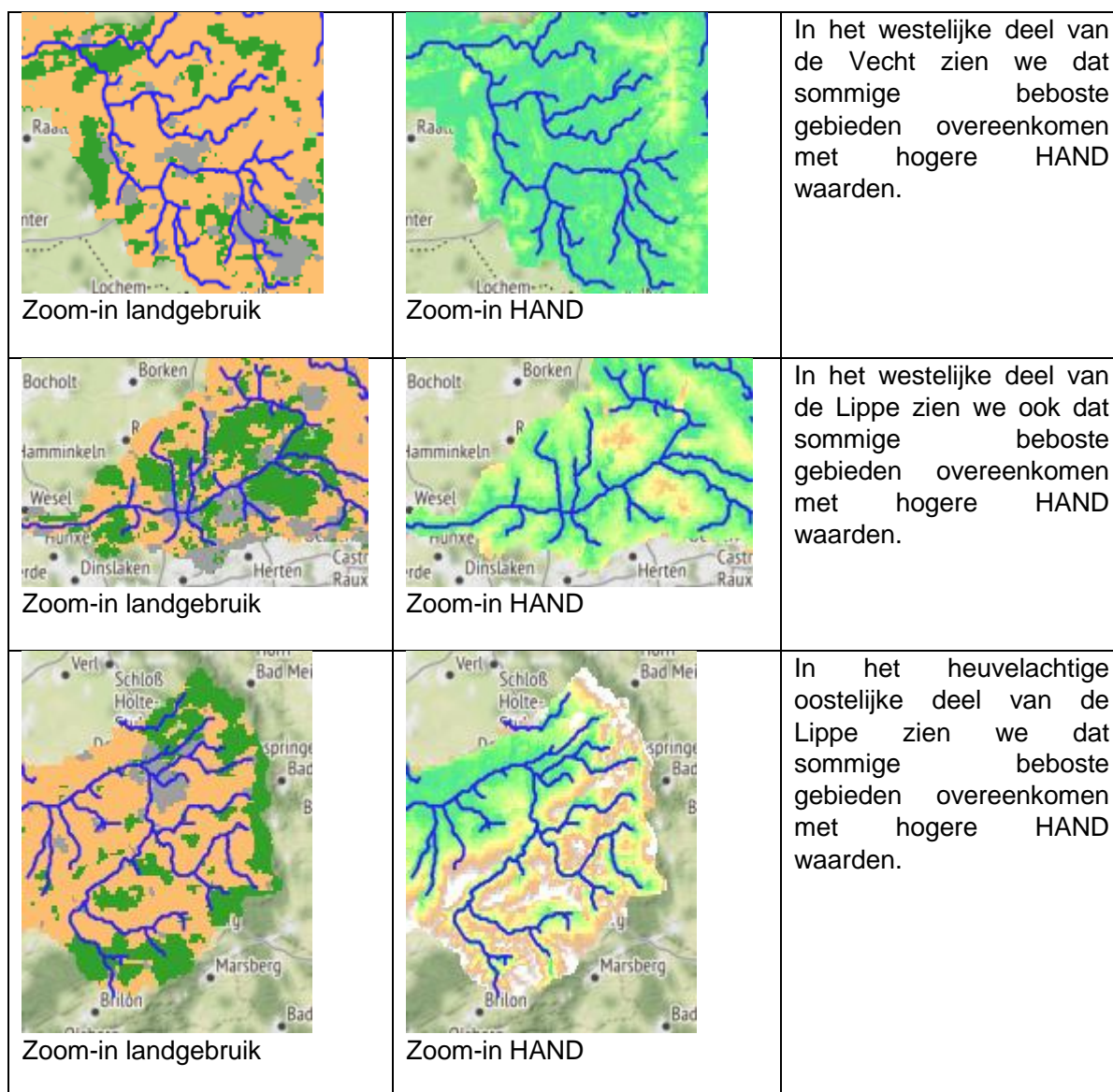
2.3 Vergelijking van het landgebruik

Het landgebruik van de Vecht en de Lippe, onderverdeeld in landbouw, bossen en urbaan gebied, is weergegeven in Figuur 2.6.



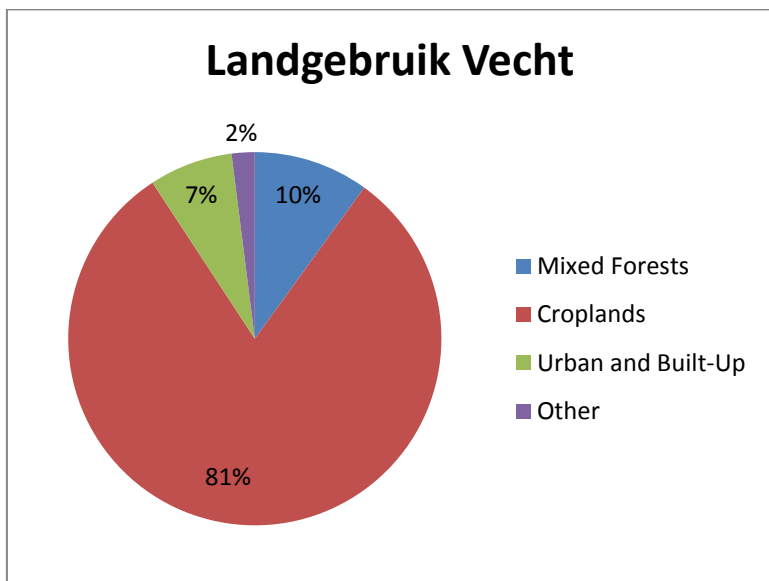
Figuur 2.6 Landgebruik in de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe (herclassificatie van CORINE dataset)

Opvallend is dat gebieden met een hoge HAND vaak beboste gebieden zijn, zoals afgebeeld in Figuur 2.7. Dit bevestigt dat de hydrologische dynamiek in deze gebieden waarschijnlijk anders zal zijn dan in gebieden met een lage HAND.

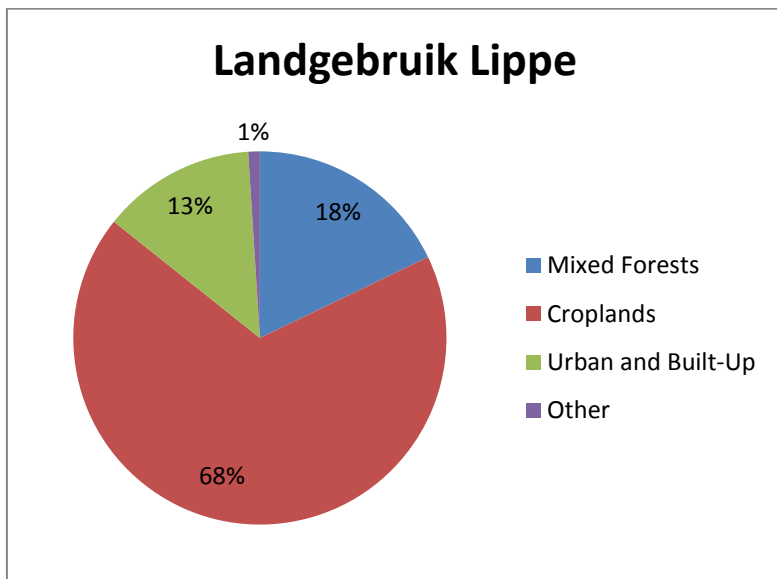


Figuur 2.7 Zoom-ins uit de landgebruik en HAND kaarten waar hoge HAND vaak overeenkomt met bebossing

Als we kijken naar de percentages van de verdeling van het landgebruik in de twee gebieden (zie Figuur 2.8 en Figuur 2.9), dan valt op dat deze percentages ongeveer gelijkwaardig zijn.



Figuur 2.8 Landgebruik in het stroomgebied van de Vecht (op basis van herclassificatie van de CORINE dataset)



Figuur 2.9 Landgebruik in het stroomgebied van de Lippe (op basis van herclassificatie van de CORINE dataset)

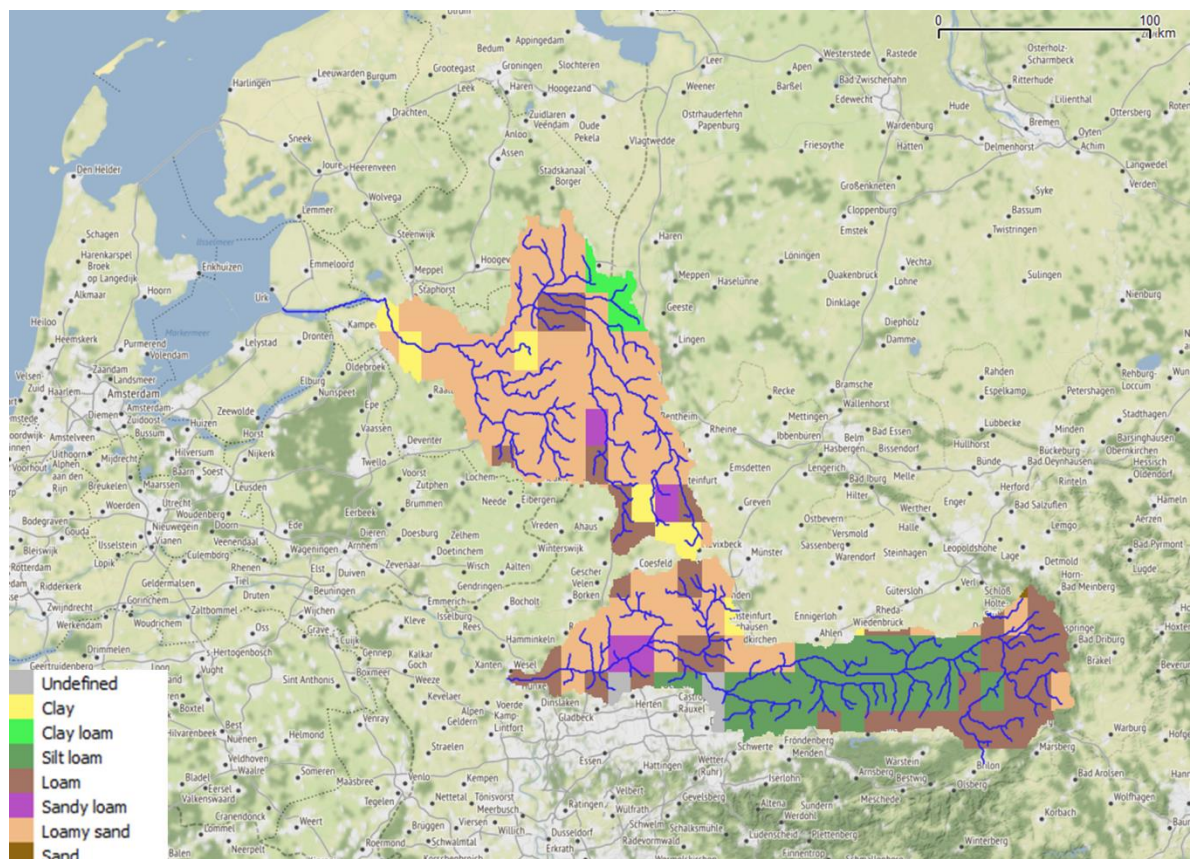
2.4 Bodem classificatie

Uit een studie van Stolte en Wösten (1991) blijkt dat het zuidelijke deel van de Vecht bestaat uit zandig leem (sandy loam). Het middelste deel van het stroomgebied is voornamelijk zand en het noordelijke vlakke deel bestaat voornamelijk uit veen.

In een studie van Mierlo en Passchier uit 1998, blijkt dat het vlakke deel van de Lippe een combinatie is van klei, silt, zand en gravel, waardoor permeabiliteit van de grond lokaal verschillend kan zijn.

In de heuvelachtige delen van de Lippe, zorgen karst en kalksteen voor een hoge permeabiliteit en infiltratie. De bodems op deze gesteentes bestaan voor een groot deel uit klei en silt wat lokaal de infiltratie van neerslag kan verminderen. De kalksteen vormt een goede aquifer voor baseflow.

Dit komt ongeveer ook naar voren in een grove globale bodemkaart (afkomstig van FAO en na herclassificatie), die gebruikt is om een inzicht te krijgen in de bodemverschillen in de stroomgebieden van de Vecht en de Lippe, zoals weergegeven in Figuur 2.10.



Figuur 2.10 Bodemkaart van de Lippe en de Vecht (op basis van een herclassificatie van FAO global soil map)

In deze kaart valt op dat het stroomgebied van de Vecht voornamelijk uit zandig leem bestaat, net als het benedenstroomse deel van de Lippe. Het bovenstroomse deel van de Lippe bestaat voornamelijk uit silt, leem en zand. Er dient te worden opgemerkt dat de data erg grof is en dat nauwkeurigere kaarten (zoals de bodemkaart van Nederland) geraadpleegd zouden moeten worden om hier betere uitspraken over te doen.

De verschillen in bodemtype zijn waarschijnlijk van invloed voor de basis afvoer, maar tijdens hoogwaterpieken is de grond waarschijnlijk helemaal verzadigd en zijn de bodemverschillen dan ook minder van belang.

2.5 Overeenkomst in de responsen van de Lippe en de Vecht

Om na te gaan of de twee stroomgebieden door dezelfde weersinvloeden worden beïnvloed, is in dit stadium gekeken naar de correlatie in afvoeren/waterhoogten. In Figuur 2.11 wordt aan de hand van een lineaire transferfunctie vastgesteld dat er een correlatie/relatie bestaat tussen de gemeten waterhoogten van de Vecht (bij Vilsteren) en de gemeten afvoer van de Lippe. Er is bij de Vecht voor waterhoogte gekozen i.p.v. afvoeren omdat de huidige QH relatie niet beschikbaar is voor waterhoogten kleiner dan 4 meter. Overigens is bij de QH-relatie het verband tussen waterstand en afvoer instantaan.

Een model is afgeleid waarbij de waterhoogte van de Lippe van tijd t wordt gemodelleerd als een gewogen gemiddelde van de afvoeren van de Lippe uit het recente verleden en/of nabije toekomst. Dit komt neer op de volgende formule:

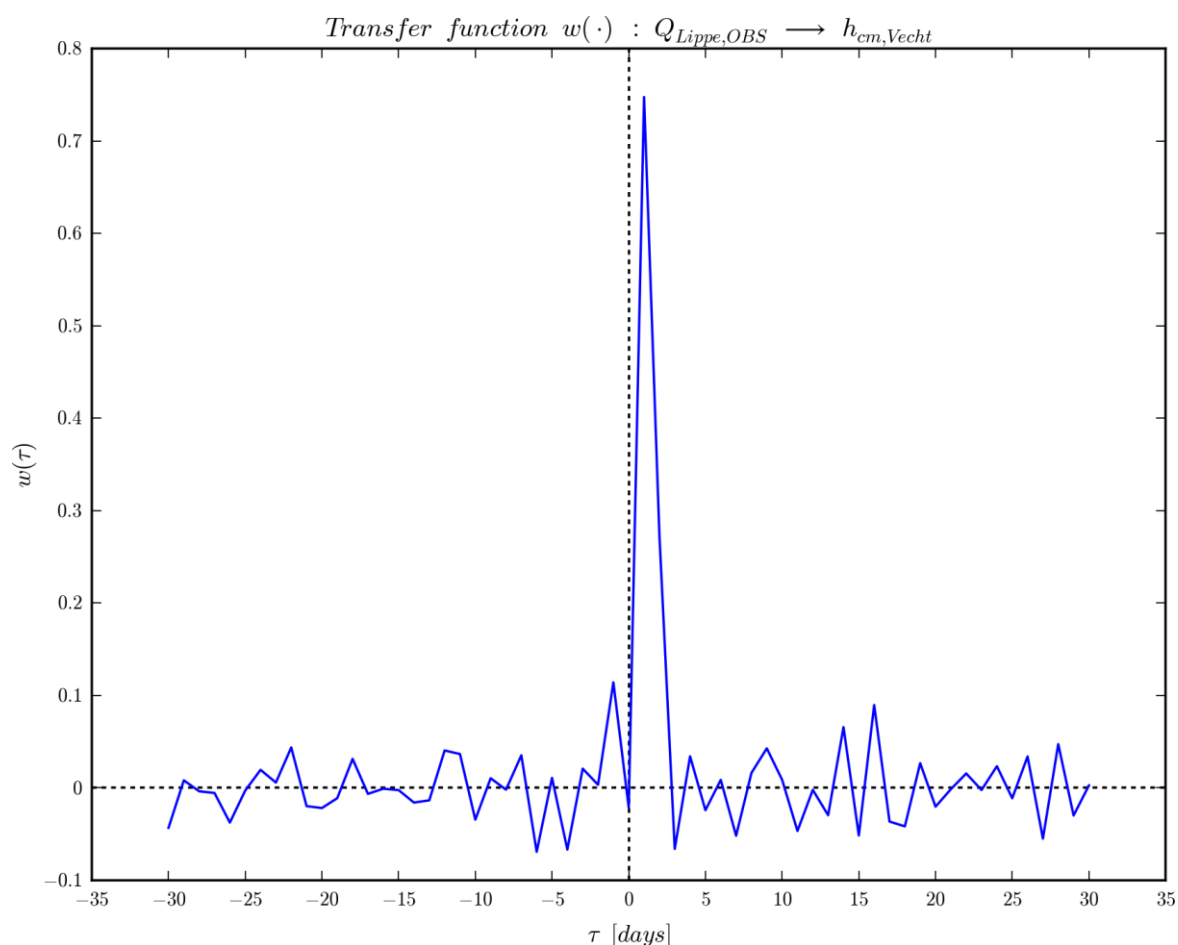
$$h_{cm,Vecht}(t) = c + \sum_{\tau} w(\tau) \cdot Q_{Lippe,Obs}(t + \tau),$$

Waarbij:

- $w(\cdot)$ is de weging van de $Q_{Lippe,Obs}(t)$ om een zo goed mogelijke schatting voor $h_{cm,Vecht}(t)$ te vinden
- τ geeft een tijdsverschuiving, hier in dagen, net zoals dat $h_{cm,Vecht}(t)$ en $Q_{Lippe,Obs}(t)$ met dagwaarden beschikbaar zijn.

Het resultaat voor de schatting van $w(\cdot)$ is te zien in Figuur 2.11. De figuur laat zien dat al het gewicht geconcentreerd is bij 1 dag verschuiving: de andere gewichten doen er weinig of niet toe. We vinden daarmee dat de schatting voor $h_{cm,Vecht}(t)$ in hoge mate gelijkvormig is met $Q_{Lippe,Obs}(t+1)$. Er is dus een grote gelijkenis in het tijdsverloop van beide tijdseries met een verschuiving van 1 dag. Dit suggereert een grote correlatie tussen de fysische (meteorologische, hydrologische, etc) processen, die tot $\hat{h}_{cm,Vecht}(t)$ en $Q_{Lippe,Obs}(t)$ leiden.

Een detail analyse op de neerslag in beide stroomgebieden zou in een vervolg nader kunnen worden onderzocht om nog beter te onderbouwen dat beide stroomgebieden meteorologisch gezien sterk op elkaar lijken. Dit is echter geen onderdeel van de nu uitgevoerde studie.



Figuur 2.11 Correlatie tussen de afvoeren van de Lippe en de waterhoogten van de Vecht. Op de x-as is te zien dat bij een verschuiving van 1 dag de relatie tussen de waterhoogten van de Vecht en de afvoeren van de Lippe het beste is

2.6 Samenvatting en aanbevelingen

In Tabel 2.2 worden de hierboven beschreven kenmerken nog eens in tabelvorm samengevat.

Tabel 2.2 Samenvatting van de karakteristieken van de Lippe en de Vecht stroomgebieden

	Vecht	Lippe
Landen	Nederland en Duitsland	Duitsland
Oppervlakte stroomgebied	3800 km ²	4900 km ²
Lengte river	177 km	220 km
Hoogte verschil ¹	185 m	500 m
Percentage HAND onder 5 m	77%	30%
Percentage bos	11%	18%
Percentage urbaan gebied	7%	13%
Percentage landbouw	81%	65%

¹ Zoals te zien is in Figuur 2.4 heeft het verschil in hoogte tussen de Lippe en de Vecht vooral te maken met het zuidoostelijke hooggelegen deel van de Lippe.

Hieruit kunnen we afleiden dat op het heuvelachtige gebied in het oosten van het stroomgebied van de Lippe na, de overeenkomst tussen de twee stroomgebieden groot is. Voor een eerste schatting van afvoermaxima in de Vecht, is het op basis van topografische en fysische karakteristieken, aannemelijk dat afvoeren van de Lippe gebruikt kunnen worden om iets over de Vecht te zeggen.

Om verder de gebieden op hydrologische vlak te vergelijken is het nodig om een grove verdeling van de jaarlijkse waterbalans te hebben. Belangrijk hiervoor is de meteorologie. In deze studie is hier niet naar gekeken, maar dit zou in de toekomst, voor een betere onderbouwing van de correlatie tussen Vecht en Lippe, wel kunnen worden uitgezocht.

3 Aanpak van - en stappen in frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren

Zoals in Hoofdstuk 2 al is genoemd wordt er een correlatie verwacht tussen de afvoeren van de Lippe en die van de Vecht. Die correlatie willen we gebruiken voor frequentieanalyses van extreme afvoeren op de Vecht bij Dalfsen. Voor de Lippe kunnen we dat al doen op basis van GRADE. Hiermee kunnen voor zeer lange periodes (wat hier en later steeds 50.000 jaar zal zijn) synthetische tijdreeksen van afvoeren worden gegenereerd waaruit vervolgens frequentiekrommes voor jaarmaxima afgeleid kunnen worden. Dat kan bovendien voor de huidige klimaatcondities als voor de KNMI'06 klimaatscenario's en eventueel ook voor de recentere KNMI'14 scenario's. Voor de Vecht kan dat niet op deze manier omdat het stroomgebied van de Vecht nog niet in een GRADE systeem is opgenomen. Voor de Vecht zijn we voor een frequentieanalyse van de afvoeren derhalve aangewezen op enkel gemeten afvoeren. Die zijn echter maar voor relatieve korte tijdsperiodes beschikbaar. Die metingen omvatten overigens niet zozeer afvoeren maar bestaan uit waterhoogten die via een QH-relatie naar schattingen voor afvoeren moeten worden omgezet. Hieruit afgeleide afvoermaxima bij lange herhalingstijden (meer dan 30 jaar) zijn dan bij de Vecht gebaseerd op statistische extrapolatie en kunnen grote onzekerheden bevatten. Voor zover de historische metingen al afdoende het huidige klimaat representeren is er daarna nog het probleem dat voor klimaatscenario's 'echte metingen' sowieso ontbreken. Dit brengt ons terug bij de in de openingzin van deze alinea genoemde correlatie tussen de afvoeren van de Lippe en de Vecht. Namelijk of en hoe we die correlatie in combinatie met GRADE kunnen gebruiken voor een frequentieanalyse van extreme Vechtafvoeren, en waarbij die analyse gebaseerd is op zeer lange reeksen van jaarmaxima van de Lippe. De aanpak in de vertaling van Lippe afvoer maxima naar die voor de Vecht, en de daarin opvolgende stappen die in het kader van dit onderzoek zijn doorlopen worden hieronder beschreven. In de hierna volgende hoofdstukken zal die aanpak worden gevolgd voor een frequentieanalyse van extreme Vecht-afvoeren onder de KNMI'06 klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺.

Als eerste worden hieronder de hierbij ter beschikking staande data, databronnen, en/of andere informatie samengevat. Daarna zal worden beschreven hoe die data is gebruikt om voor de Vecht frequentiekrommen van de jaarmaxima af te leiden, zowel voor het huidige klimaat als voor de eerder genoemde klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺.

3.1 Beschikbare/gebruikte data en informatiebronnen voor Lippe en Vecht

Voor de *Lippe* waren de volgende data beschikbaar of voor de huidige studie gegenereerd:

- *Lippe 1.* Gemeten afvoeren in de vorm van dagwaarden vanaf 2 januari 1990 tot en met 1 november 2007.
- *Lippe 2.* Met GRADE berekende dagwaarden voor de periode van 2 januari 1951 tot en met 31 december 2006. Deze zijn berekend met de referentie instelling van de parameters in de hydrologische (HBV) modellen, en met als invoer de historisch gemeten regenval en temperatuur over het stroomgebied.
- *Lippe 3.* Met GRADE berekende dagwaarden voor een periode van 50.000 jaar, met als invoer synthetische neerslag- en temperatuurreeksen over het stroomgebied van de Rijn die het huidige klimaat representeren. Ook hierin is de referentie instelling van de hydrologische modelparameters gebruikt. Van deze reeks zijn de 50.000 jaarlijkse (winterseizoen) afvoermaxima afgeleid, en in de analyses gebruikt.

- *Lippe 4*. Idem zoals in *Lippe 3*, maar nu zijn dat de 50.000 jaarmaxima die met GRADE voor de Lippe worden gevonden bij neerslag- en temperatuurreeksen die representatief zijn voor klimaatscenario 2050W⁺.
- *Lippe 5*. Idem zoals in *Lippe 3* en *Lippe 4*, maar nu representatief voor het klimaatscenario 2100W⁺.

Voor de *Vecht* zijn de volgende data en/of informatiebronnen beschikbaar en/of voor de huidige studie gegenereerd:

- *Vecht 1*. Gemeten waterhoogten te Vilsteren/"Beneden" (Waterschap Groot Salland) in de vorm van dagwaarden over de periode 1 januari 1960 tot en met 31 december 2004. In deze reeks ontbreken echter enkele jaren, en zijn er daarnaast kortere hiaten aanwezig.
- *Vecht 2*. Voor de Vecht zijn geen metingen van afvoeren beschikbaar, en moet een QH-relatie worden ingezet voor het omzetten van de onder *Vecht 1* genoemde waterhoogten naar afvoeren. In dit kader is hiervoor de QH-relatie gebruikt van Jungermann en Horn (2016) en die later ook door Geerse (2016) is aangewend in diens studie naar effecten van bovenstroomse overstromingen van de Vecht.
- *Vecht 3*. Voor de Vecht is ook de HR2006 werklijn gebruikt, die ook voor WBI2017 wordt ingezet (Chbab, 2015). Die werklijn voor extreme Vecht afvoeren komt overeen met een exponentiële verdeling voor de jaarmaxima van de afvoer. De cumulatieve kansverdelingsfunctie, $F(\cdot)$, is gegeven door:

$$F(Q) = 1 - e^{-\frac{Q-Q_0}{\sigma}} \text{ voor } Q > Q_0 \quad (3.1.1)$$

De Q_0 in deze vergelijking is een locatieparameter van de verdeling en heeft als waarde $Q_0 = 180.0 \text{ m}^3/\text{s}$. De σ is een schaalparameter en deze heeft $\sigma = 51.89 \text{ m}^3/\text{s}$ als waarde.

- *Vecht 4*. Effecten van bovenstroomse overstromingen van de Vecht op de afvoerstatistiek zoals afgeleid door Geerse (2016a, 2016b). Deze effecten zijn getalsmatig beschikbaar voor een set van 16 herhalingstijden tussen $T=2$ jaar en $T=1.000.000$ jaar. Voor elk van die T -waarden is het afvoermaximum conform HR2006 beschikbaar (zonder overstromen) en de (schatting voor de) overeenkomstige waarde wanneer er rekening wordt gehouden met overstromingen die in zowel de bovenloop van de Vecht, als langs de Nederlandse zijleidingen zou kunnen optreden.

3.2 Beschrijving van aanpak en stappen

Alvorens de aanpak en de daarbij uit voeren stappen in nader detail te beschrijven worden die stappen ter wille van het overzicht eerst schematisch samengevat:

- Validatie van de kwaliteit van GRADE voor de Lippe.
- Afleiden van een formule voor het vertalen van Lippe afvoermaxima naar die voor de Vecht.
- Toepassen van die formule op de jaarmaxima die voor drie klimaatscenario's met GRADE voor de Lippe zijn berekend. Dat geeft per scenario een reeks van 50.000 jaarmaxima van de afvoer van de Vecht.
- Afleiden van een formule voor het herijken van de met GRADE gevonden jaarmaxima van de Vecht op de binnen WBI2017 afgeleide frequentie kromme voor de Vecht. Dit is ten behoeve van de consistentie tussen WBI2017 en het OI.
- Frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren voor de drie klimaatscenario's zonder dat er met bovenstroomse overstromingen rekening wordt gehouden.

- Frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren voor de drie klimaatscenario's waarbij er ook met bovenstroomse overstromingen rekening wordt gehouden.

Deze stappen worden nu, in de hierna volgende secties, verder uitgewerkt en beschreven.

Het feitelijk startpunt in de analyse zijn met GRADE berekende jaarmaxima van de afvoer van de Lippe voor drie klimaatcondities (huidige klimaat, en die bij 2050W⁺ en 2100W⁺). Per variant zijn dat 50.000 jaarmaxima. Deze willen we vertalen naar overeenkomstige afvoermaxima voor de Vecht, en de bijhorende afvoerstatistiek berekenen. Hieruit kunnen dan o.a. de effecten van die alternatieve klimaatscenario's worden afgeleid. Die klimaateffecten zullen hier niet uitvoerig nagegaan en geëvalueerd worden. In dit geval is het afleiden van daarvoor benodigde frequentielijnen in principe het eindpunt. Dat zullen er dan twee keer drie zijn: voor de drie klimaatscenario's zonder dat er met bovenstroomse overstromingen rekening wordt gehouden, en drie waar dat wel wordt gedaan. Daarbij moet worden opgemerkt dat twee van die zes frequentiekrommes feitelijk al bekend zijn, namelijk die voor het huidige klimaat (zonder verdisconteren van potentiële overstromingen is dat de WBI werklijn, en met overstromen is dat een daarvoor de gecorrigeerde werklijn zoals die door Geerse (2016a) is afgeleid. We beschrijven nu kort de aanpak en de stappen die tot de uiteindelijk geproduceerde frequentiekrommen hebben geleid.

3.2.1 Validatie van GRADE voor de Lippe

Een essentieel onderdeel in het traject is het 'vertalen' van met GRADE berekende afvoeren van de Lippe naar die van de Vecht. Hiervoor moet op z'n minst de met GRADE berekende afvoeren van Lippe van goede kwaliteit zijn. Die kwaliteit kan worden vastgesteld door voor een historische periode, waar gemeten afvoeren van de Lippe beschikbaar zijn die metingen met overeenkomstige GRADE 'voorspellingen' te vergelijken. Bij een positieve uitkomst van deze validatie kunnen we uitsluiten dat fouten en onzekerheden in de afvoeren van de Vecht die uit die van de Lippe zijn afgeleid aan GRADE te wijten zijn.

3.2.2 Systeemrelatie voor overeenkomstige afvoerjaarmaxima van Lippe en Vecht

Deze stap omvat het in kwantitatieve vorm afleiden van een recept om jaarmaxima van de Lippe te vertalen naar overeenkomstige jaarmaxima voor de Vecht. Dit recept is later nodig om de met GRADE voor de Lippe berekende jaarmaxima (voor de drie klimaatscenario's, en daarbij telkens voor een periode van 50.000 jaar), om te kunnen zetten naar die voor de Vecht, en dan daarmee de gewenste frequentieanalyses uit te kunnen voeren.

Voor het afleiden van zo'n systeemrelatie tussen Lippe en Vecht moeten voor een zo lang mogelijk periode overeenkomstige jaarmaxima beschikbaar zijn. Voor de Vecht worden de jaarmaxima ontleend aan de periode waarvoor er waterhoogten zijn gemeten, en deze met een QH-relatie naar afvoeren kunnen worden geconverteerd. Voor de Lippe zijn er twee mogelijkheden om voor dezelfde historische periode (of een deel daarvan) overeenkomstige jaarmaxima te verzamelen. Enerzijds is dat op basis van de gemeten Lippe afvoeren, en anderzijds op basis van Lippe afvoeren die met GRADE in een hindcast worden gevonden. Om twee redenen is voor de laatste 'optie' gekozen. De eerste reden is dat bij de uiteindelijke constructie van de 50.000 jaarmaxima voor de Vecht de invoer voor de te gebruiken systeemrelatie (noodzakelijkerwijs ook) uit met GRADE berekende Lippe-maxima zal bestaan.

Ter wille van consistentie is het dan beter om te systeemrelatie eveneens op basis van GRADE Lippe-maxima te kalibreren. De tweede reden om dat te doen is dat de overlap van de periodes met (i) de 'gemeten' Vecht-afvoer en met (ii) de historische periode waarvoor een GRADE hindcast kon worden geproduceerd aanzienlijk langer is dan de overlap tussen de periodes van (i) en van (iii) met gemeten Lippe afvoeren. Met GRADE werden aldus aanzienlijk meer samenvallende 'events' gevonden, waarbij bovendien ook meer extreme(re) events geselecteerd konden worden. Van de uiteindelijke gevonden set $\{Q_{AM, Lippe}^{GRADE}(t), Q_{AM, Vecht}^{Obs}(t)\}$ van overeenkomende 'historische' jaarmaxima wordt met regressie een formule (ofwel systeemrelatie $Q_{AM, Lippe}^{GRADE} \rightarrow Q_{AM, Vecht}^{Obs}$) afgeleid om de 50.000 GRADE afvoermaxima van de Lippe te vertalen naar die voor de Vecht.

3.2.3 Vertalen van Lippe jaarmaxima naar die voor de Vecht

Met GRADE zijn voor de Rijn, en voor alle drie klimaatscenario's (huidige klimaat, 2050W⁺, en 2100W⁺) simulaties van lengte 50.000 jaar uitgevoerd. In al deze simulaties is de referentie instelling van de diverse modelparameters gebruikt. De jaarmaxima die hierbij voor de Lippe werden gevonden zijn met de systeemrelatie van de vorige sectie omgezet naar jaarmaxima van de Vecht. Dat zijn er dan ook 50.000 per klimaatvariant. Op basis van deze 'virtuele' afvoermaxima kunnen dan voor de Vecht frequentieanalyses worden uitgevoerd.

3.2.4 Herijking van de Vecht afvoermaxima aan WBI2017 werklijn.

Bij de variant waarbij met GRADE voor het huidige klimaat 50.000 afvoerjaarmaxima van de Lippe zijn berekend wordt, na de vertaling met de systeemrelatie, dan eveneens een set van 50.000 jaarmaxima gevonden die representatief is voor het huidige klimaat. In het ideale geval zou de frequentielijn die van deze 'virtuele' Vecht afvoermaxima wordt afgeleid dan overeen moeten komen met de frequentielijn zoals die in WBI2017 wordt gehanteerd. Dat "in het ideale geval" omvat niet alleen de veronderstelling dat de Lippe jaarmaxima $Q_{AM, Lippe}^{GRADE}$ heel nauwkeurig door GRADE zijn berekend, maar ook dat de systeemrelatie $Q_{AM, Lippe}^{GRADE} \rightarrow Q_{AM, Vecht}^{Obs}$ perfect is. Bovendien zou ook moeten gelden dat de WBI2017 werklijn voor de Vecht eveneens nauwkeurig strookt met de werkelijkheid. In al deze drie onderdelen zullen echter fouten en onzekerheden optreden. Het is hierbij dan de vraag hoe we om moeten gaan met (eventuele, maar wel te verwachten) verschillen tussen de WBI2017 werklijn en degene die uit de Lippe is geconstrueerd. De hiervoor in dit kader gevolgde strategie en werkwijze wordt nu nader toegelicht.

Bij de analyse van de effecten van de klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺ op de frequentie van extreme afvoeren is het in het bijzonder van belang deze effecten te relateren aan de frequentie bij het huidige klimaat. In WBI2017 is de daarin gehanteerde (en eerder al genoemde *exponentiële*) verdeling voor de Vecht afvoermaxima representatief en moet hier als referentie worden gebruikt bij het kwantificeren van de effecten van de klimaatveranderingen die met 2050W⁺ en 2100W⁺ zijn gerepresenteerd. Dit is omwille van de consistentie tussen enerzijds WBI2017 en anderzijds het ontwerp Instrumentarium noodzakelijk. Om hieraan tegemoet te komen wordt op de nu van de Lippe afgeleide afvoermaxima een transformatie toegepast. Die transformatie is zodanig dat als deze wordt toegepast op de GRADE afvoermaxima van de Vecht voor het huidige klimaat, de verdeling van die getransformeerde afvoeren overeenkomt met de verdeling van WBI2017.

Die transformatie, $\Psi(\cdot)$, moet dan van de volgende vorm zijn:

$$\Psi(\cdot) = F^{-1}(G(\cdot)) \quad (3.2.4.1)$$

Hierin is $F(\cdot)$ de cumulatieve kansverdelingsfunctie die hoort bij de WBI2017 werklijn, en $G(\cdot)$ de verdelingsfunctie die we in dit kader voor de Vecht bij het huidige klimaat met GRADE gaan vinden (en dus afgeleid van de Lippe). Voor $F(\cdot)$ is de verdeling exponentieel, $F(Q) = 1 - e^{-\frac{Q-Q_0}{\sigma}}$, zie Vergelijking 3.3.1. Hieruit kan de gewenste inverse functie, $F^{-1}(\cdot)$, analytisch worden afgeleid hetgeen de volgende uitdrukking levert:

$$F^{-1}(p) = Q_0 - \sigma \cdot \ln(1 - p) \quad (3.2.4.2)$$

Voor de verdelingsfunctie $G(\cdot)$ is geen analytische uitdrukking beschikbaar, en de functie $G(\cdot)$ moet ontleend worden aan de $N=50.000$ afvoermaxima die voor de Vecht zijn afgeleid uit de GRADE berekening voor de Lippe bij het huidige klimaat. De empirische verdeling van die 50.000 punten kan dan als schatting voor $G(\cdot)$ worden gebruikt. Voor het (na sorteren gevonden) n^e datapunt Q_n van die reeks is dan $G(Q_n) = P_n$. Hierin is $P_n := \frac{n-a}{N+b}$ de empirische kans van niet-overschrijden van het extreem Q_n . Gecombineerd geeft dat dan:

$$G(Q_n) = \frac{n-a}{N+b} \quad (3.2.4.3)$$

Voor de plotting position parameters a en b , zoals die worden gebruikt in het berekenen van P_n van niet-overschrijden worden hier de waarden 0.3 en 0.4 aangehouden, overeenkomstig met de waarden die hiervoor worden gehanteerd in de frequentie analyses voor Lobith (Rijn) en Borgharen (Maas).

Bij de $G(\cdot)$ van Vergelijking 3.2.4.3 moet het volgende worden opgemerkt

- i. Conform het gevolgde recept is deze functie in eerste instantie alleen beschikbaar voor discrete argumenten $Q \in \{Q_n\}_{n=1}^N$. Voor andere (en in het algemeen continu variërende) waarden van Q moet een interpolatie of zelfs extrapolatie worden uitgevoerd.
- ii. Met name in de rechterstaart, dat wil zeggen bij de hogere afvoeren Q , kan de uitkomst voor $G(Q)$ gevoelig zijn voor de keuze die voor de plotting position parameters a en b is gemaakt.
- iii. Om die redenen zou een schatting $\hat{G}(\cdot)$ met een continue en glad verloop een beter alternatief kunnen zijn. Dat zou men kunnen doen daar aan de empirische verdeling een geschikte extreme waarden verdeling te fitten. De vraag is of men dan op het hele bereik een nauwkeurige fit aan de empirische verdeling zal vinden, of dat daarentegen voor de lagere en de hogere afvoeren afzonderlijke fits moeten worden afgeleid en die dan eveneens 'netjes' op elkaar moeten worden aangesloten. Ook in deze aanpak kunnen diverse 'complicaties' optreden.

- iv. Daarom is in eerste instantie nog steeds het op de empirische verdeling gebaseerde recept van Vergelijking 3.2.4.3 gevolgd. Echter bij het uiteindelijk schatten van de afvoeren die bij de hogere herhalingstijden horen wordt de Weissman procedure toegepast (Weissman, 1978). Met die procedure wordt een enigszins glad gestreken schatting van de staart van de verdeling afgeleid. Dit fungeert als een variantiereductiemethode en worden er betere schattingen verkregen voor de afvoeren bij de hogere herhalingstijden. Daarbij wordt geen gebruik gemaakt van plotting position parameters.

De transformatie $\Psi(\cdot)$ van Vergelijking 3.2.4.1 wordt daarna toegepast op de Vecht-afvoermaxima die bij de klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺ worden gevonden. Hierbij moet worden genoemd dat de $\Psi(\cdot)$ 'as a matter of definition' een monotone afbeelding is. De volgorde $Q_1 \leq Q_2 \leq Q_3 \leq \dots \leq Q_{N-1} \leq Q_N$ blijft bewaard onder de transformatie. Als tweede, en in het verlengde van bovenstaande aandachtspunt (i), wordt genoemd dat bij het toepassen van $\Psi(\cdot)$ op de Vecht-afvoermaxima van de scenario's 2050W⁺ en 2100W⁺ de datapunten niet precies samenvallen met de $\{Q_n\}_{n=1}^N$ van het huidige klimaat. Voor een afvoermaximum Q tussen Q_1 en Q_N kan via interpolatie een bijhorende kans van niet overschrijden worden afgeleid en het recept van $\Psi(\cdot)$ daarna worden toegepast. Voor een Q groter dan Q_N kan dat ook maar nu via extrapolatie van de staart van de $G(\cdot)$ verdeling. Voor die extrapolatie is hier de eerder al genoemde Weissman-procedure gebruikt. Ook aan de 'linkerzijde', d.w.z. voor Q kleiner dan Q_1 , kan via een extrapolatie de transformatie worden voortgezet. Overigens is die 'linkerzijde' hier niet erg relevant: de interesse ligt hier namelijk in overmaat op extreem hoge afvoeren.

3.2.5 Effecten van bovenstroomse overstromingen

Tot nu toe is geen rekening gehouden met potentiële overstromingen in het Duitse bovenstroomse stroomgebied van de Vecht, en/of in zijleidingen in het Nederlandse gebied. Dat negeren van overstromen geldt zowel voor de GRADE simulaties van de Lippe, als bij het afleiden van de systeemrelatie voor de vertaling van de Lippe maxima naar die voor de Vecht. De Vecht afvoermaxima die bij de kalibratie van die systeemrelatie zijn gebruikt vallen ook binnen het bereik waar in het Vechtstroomgebied nog geen (wezenlijke of merkbare effecten van) overstromen worden waargenomen.

In de studies van Jungermann en Horn (2016), en Geerse (2016ab) zijn voor de Vecht effecten van overstromingen onderzocht. Dat heeft uiteindelijk geleid tot een voorstel voor het aanpassen van de frequentielijn zonder overstromen (zoals de huidige WBI2017 werklijn) tot een frequentielijn waarin effecten van overstromen wel zijn meegenomen. In kwantitatieve vorm is dat effect berekend voor 16 herhalingstijden T over het bereik van $T=2$ tot en met $T=1.000.000$ jaar. Bij elke herhalingstijd is daarbij het afvoermaximum van de Vecht zonder en met overstromen gegeven. Deze tabel is gebruikt om ook in dit kader de effecten van overstromen in rekening te brengen.

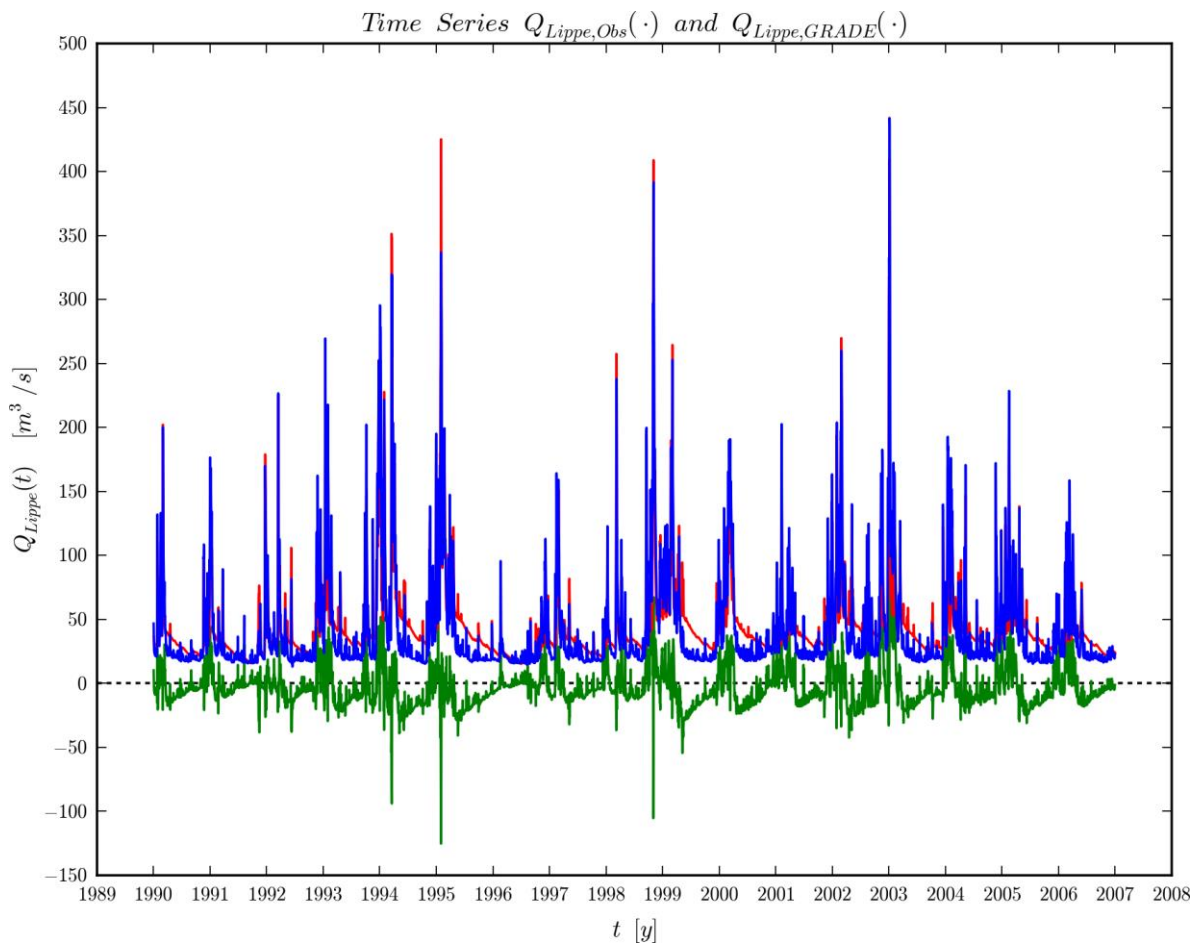
4 Resultaten van de frequentieanalyse van extreme Vecht afvoeren

4.1 Validatie van GRADE voor de Lippe

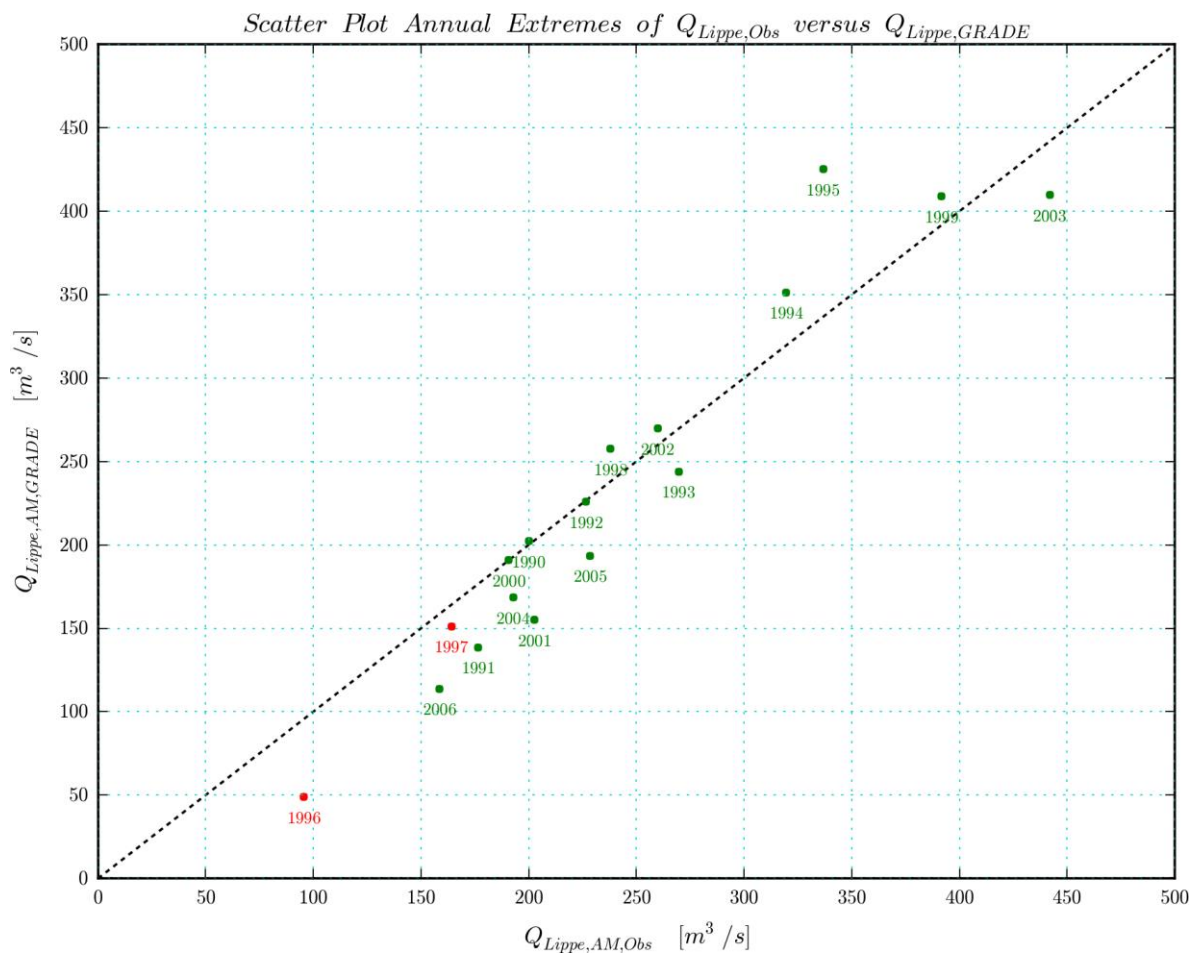
In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van GRADE nagegaan voor het simuleren van de afvoer van de Lippe. Hiervoor worden voor een historische periode waar metingen van de Lippe afvoer beschikbaar zijn deze metingen vergeleken met een hindcast van GRADE. Die hindcast is met de referentie instellingen van de diverse hydrologische modelparameters, en is de GRADE invoer voor neerslag en temperatuur eveneens gebaseerd op metingen van die grootheden ten tijde van die periode. Die periode omvat 1990 tot en met 2007. Op diverse wijzen zijn de metingen en de uitkomsten van de hindcast van GRADE met elkaar vergeleken:

- **Kruiscorrelatiefunctie.** Van de tijdreeksen (beide in vorm van dagwaarden) is de kruiscorrelatiefunctie berekend. Hieruit werd een maximale correlatie van 0.923 gevonden bij een tijdsverschuiving van $\tau = 0$ dagen. Deze uitkomsten tonen dat de reeksen niet alleen synchroon verlopen (“in de pas lopen”) maar ook in grote mate gelijkvormig zijn.
- **Tijdreeksen.** De hoge mate van overeenkomst wordt bevestigd door Figuur 4.1 waarin de tijdreeksen zijn getekend. De gemeten afvoer van de Lippe is daarin in blauw weergegeven en de overeenkomstige GRADE hindcast in rood. In groen is de verschilreeks getoond.
- **Scatterplot jaarmaxima.** In dit kader zijn vooral extreme afvoeren belangrijk. Voor het nagaan hoe goed GRADE dat in dit geval voor de Lippe doet zijn in een scatterplot overeenkomstige jaarmaxima tegen elkaar uitgezet. Overeenkomstig betekent dat die maxima van hetzelfde meteorologische event afkomstig moeten zijn. Bij het selecteren van combinaties van gemeten en met GRADE berekende maxima is daarom het criterium gehanteerd dat de tijdstippen van optreden niet meer dan 7 dagen uit elkaar mogen liggen. Verder zijn bij de metingen alleen de maxima geaccepteerd van jaren waarvan voor minstens 80% van de dagen in het jaar er reguliere metingen aanwezig zijn geweest (ofwel maximaal 20% uitval van metingen). Tenslotte moet worden opgemerkt dat de jaarmaxima niet op kalenderjaren is gebaseerd, maar bepaald zijn voor “hydrologische jaren” (hier gerekend vanaf augustus tot en met juli van het jaar daarop). In Figuur 4.2 zijn de zo uiteindelijk gevonden combinaties van overeenkomstige jaarmaxima in een scatterplot tegen elkaar uitgezet. Die punten zijn het groen getekend. De twee rode punten vertegenwoordigen twee jaren waarin in reguliere jaarmaxima werden gevonden die meer dan 7 dagen (en hier zelfs aanzienlijk langer) in de tijd uit elkaar liggen.

Al met al tonen deze bevindingen dat de GRADE hindcast met acceptabele nauwkeurigheid de metingen reproduceert. Dit biedt vertrouwen in de kwaliteit van de 50.000 jaar reeksen die in een vervolgstap voor de voor drie klimaatscenario's worden berekend, en later vertaald naar de Vecht.



Figuur 4.1 Tijdreeksen van de afvoer Lippe zoals waargenomen (blauw), en die volgens GRADE/HBV (rood). Het verschil is in groen getekend

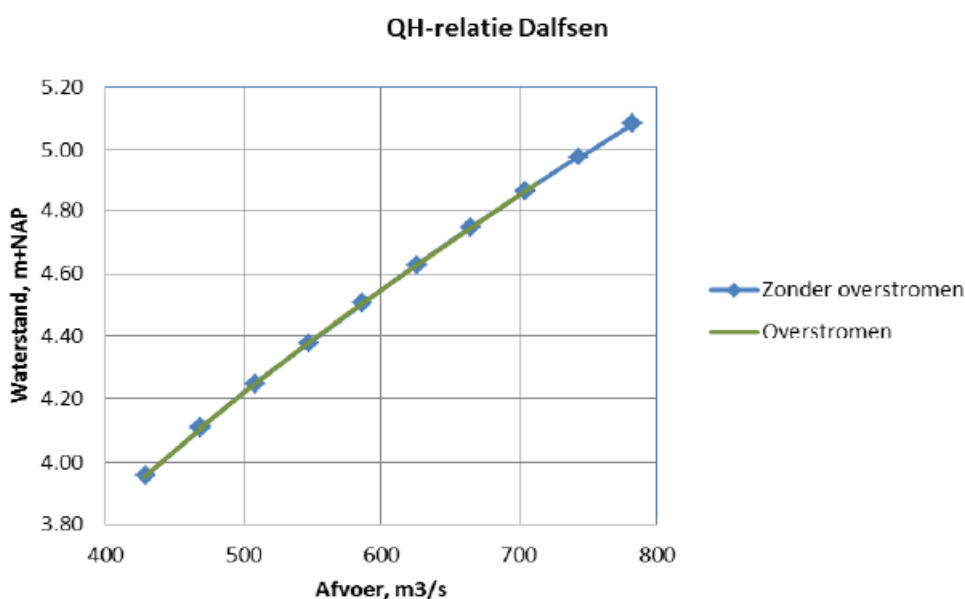


Figuur 4.2 Scatterplot van de jaarmaxima van de Lippe zoals enerzijds afgeleid uit de gemeten tijdreeksen, en anderzijds uit de met GRADE berekende tijdreeksen voor de overeenkomstige historische periode

4.2 Systeemrelatie voor overeenkomstige afvoerjaarmaxima van Lippe en Vecht

Voor de Vecht zijn er geen directe metingen van afvoeren en moeten deze afgeleid worden uit gemeten waterhoogten. Metingen van waterhoogten zijn beschikbaar voor de periode van 1 januari 1960 tot en met 31 december 2004. In deze reeks ontbreken echter een aantal jaren, en zijn daarnaast diverse kleinere hiaten aanwezig.

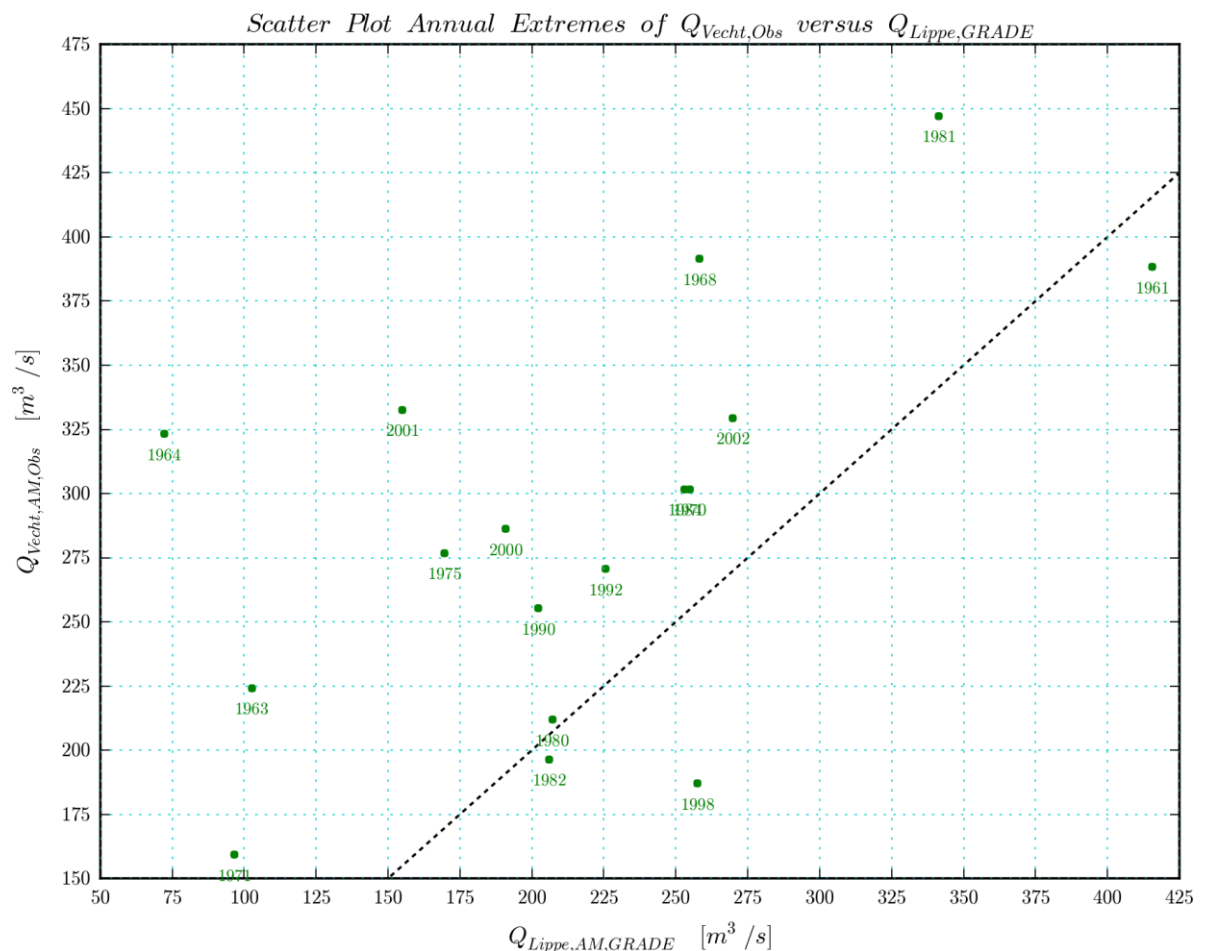
Met de QH-relatie van Jungermann en Horn (2016) zijn die waterhoogten omgezet naar "gemeten" afvoeren van de Vecht. Die QH relatie is getoond in Figuur 4.3. Deze figuur is een kopie van de Figuur 2-6 in het rapport van Geerse (2016a). In de figuur is de QH-relatie bij zowel zonder als met overstromen getekend. De bijhorende grafieken sluiten 'echter' vloeiend op elkaar aan.



Figuur 4.3 QH relatie voor de Vecht bij Dalfsen. Bron Geerse (2016a) en Jungermann en Horn (2016)

Merk op dat deze QH-relatie is gegeven voor waterhoogten groter dan 395 cm, en daarmee afvoeren produceert vanaf ongeveer 425 m³/s. Bij de frequentielijn van WBI2007 komt die afvoer overeen met een herhalingstijd van ongeveer 100 jaar. Om deze QH-relatie op een groter bereik van waterhoogten te kunnen toepassen is de die relatie aan de linker zijde (waterhoogten kleiner 380cm) lineair geëxtrapoleerd. Aan het verloop van de QH-kromme wordt verwacht dat dit dan vanaf ongeveer 300 m³/s (overeenkomend met een herhalingstijd 10 jaar) nog steeds heel nauwkeurig het "echte" verloop zal weergeven. Het lineair extrapoleren van een Q-h kromme is een simpele aanname die potentieel grote onzekerheid met zich mee brengt. Voor het onderzoek was echter geen Q-h relatie beschikbaar die het gehele bereik aan afvoeren afdekte. Het wordt geadviseerd hier in vervolgstudies voor de Vecht nog eens goed naar te kijken.

Deze QH-relatie is toegepast op de gemeten waterhoogten van de Vecht (Vilsteren Beneden). Uit zo gevonden afvoerreeks van de Vecht zijn de (waarden en tijdstippen van optreden van) de jaarmaxima berekend. Dergelijke jaarmaxima zijn ook onttrokken aan de met GRADE hindcast van de Lippe. Dat was voor de periode van 1951 tot en met 2006. Deze periode omvat die van de Vecht.



Figuur 4.4 Scatterplot van overeenkomstige jaarmaxima van de Vecht (afgeleid uit gemeten waterhoogten) en de Lippe (berekend met GRADE)

Vervolgens zijn hieruit de combinaties van overeenkomstige Lippe-Vecht jaarmaxima bepaald. Hierbij zijn dezelfde selectiecriteria gebruikt als waarmee eerder voor de Lippe waargenomen en met GRADE berekende jaarmaxima werden gecombineerd. Het resultaat van die selectie is te zien in de scatterplot van Figuur 4.4.

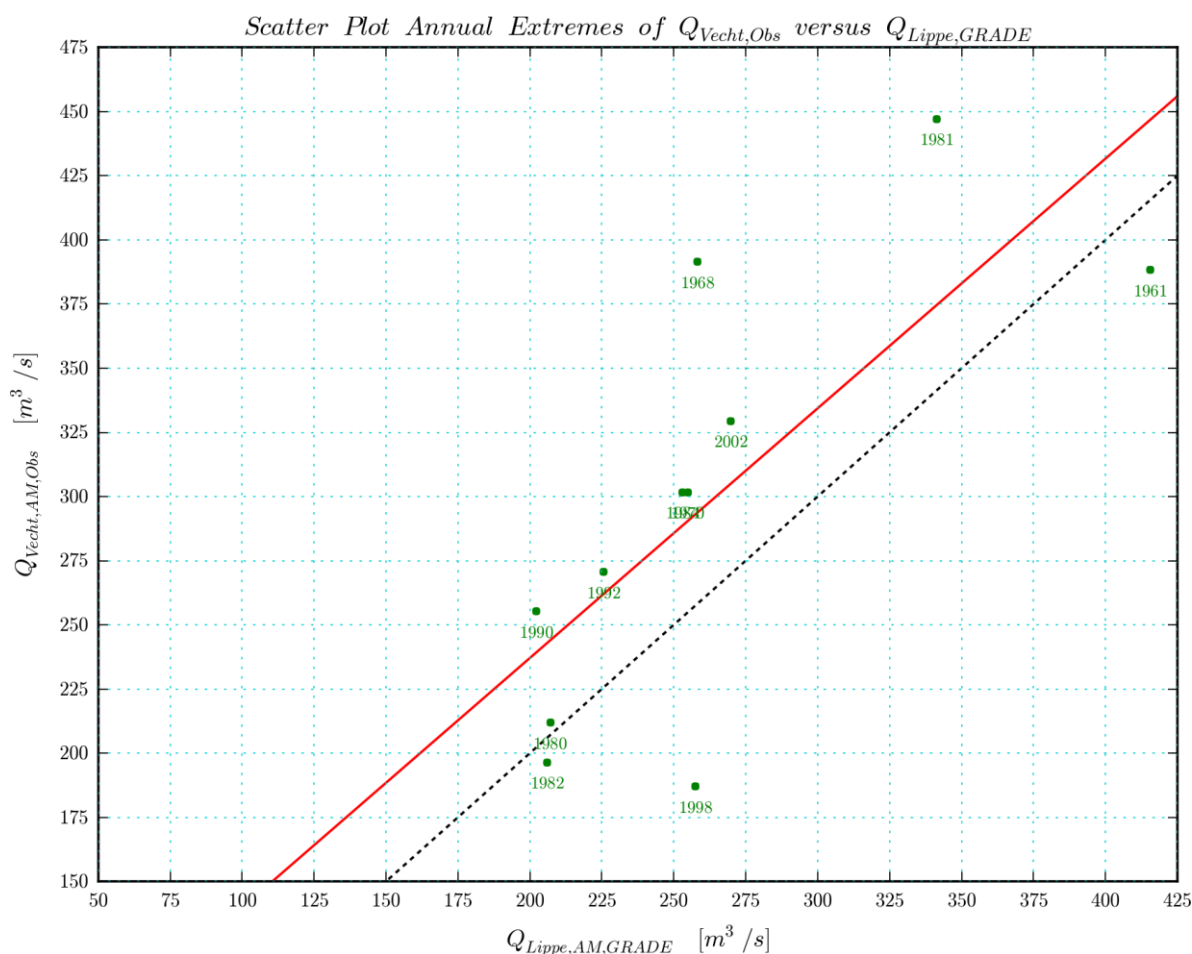
De figuur toont voor met name de lagere maxima een aanzienlijk scatter en daarmee over het geheel een matige correlatie van de Vecht en Lippe extremen. Bij hogere afvoeren, $Q_{Lippe} > 200 m^3/s$, is die correlatie echter aanzienlijk groter en is er een meer systematisch verband te herkennen. In de scatterplot uit het vorige hoofdstuk waarin waargenomen Lippe afvoerextremen tegen die van GRADE werden uitgezet kan ook worden herkend dat de correlatie vanaf $200 m^3/s$ groter wordt. Vanwege deze bevindingen, maar vooral dat in dit kader met name het verband bij hogere afvoeren zo goed mogelijk met een systeemrelatie moet worden weergegeven, is een extra selectie uitgevoerd. Die bestaat eruit dat bij het kalibreren van een hier benodigde systeemrelatie alleen de afvoermaxima combinaties worden meegenomen waarvan die van de Lippe minstens $200 m^3/s$ is. Dan blijven er van de 17 combinaties die we hadden er nog 11 over. Dat aantal is te klein, en er resteert nog te veel scatter, om hieruit een zinvol niet-lineaire systeemrelatie voor te ontwikkelen. Daarmee is uitgegaan van een zo eenvoudig mogelijk verband, en is op basis van de overblijvende punten een lineaire regressie uitgevoerd.

Dat levert dan uiteindelijk de volgende systeemrelatie op voor de afvoerjaarmaxima $Q_{Lippe,AM,GRADE}$ van de Lippe en de afvoermaxima $Q_{Vecht,AM,Obs}$ van de Vecht:

$$Q_{Vecht,AM,Obs} = a + b \cdot Q_{Lippe,AM,GRADE} \quad \text{met} \quad a = 42.5 \text{ m}^3 / \text{s} , b = 0.973 \quad (4.1)$$

Het resultaat van die regressie is met de in rood getekende rechte lijn in Figuur 4.5 weergegeven. Hierin zijn opnieuw de geselecteerde combinaties van afvoermaxima getekend, maar nu beperkt tot degene aan de regressie hebben bijgedragen. De rode lijn in Figuur 4.5 geeft redelijk de trend weer dat met het toenemen van de afvoermaxima van de Lippe ook de overeenkomende afvoermaxima van de Vecht hoger worden. Er resteert echter nog een relatief grote scatter van de $(Q_{Lippe,AM,GRADE}, Q_{Vecht,AM,Obs})$ -datapunten rondom de regressielijn. In die zin is er nog een aanzienlijke onzekerheid in de met de lijn weergegeven relatie. Dat blijkt ook uit de waarde 0.73 die voor de correlatiecoëfficiënt van de datapunten wordt gevonden.

Op basis van de constructie is de gevonden lineaire systeemrelatie in principe alleen valide voor Lippe afvoeren groter dan $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze afvoer van de Lippe komt overeen met een afvoer van ongeveer $235 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de Vecht. Voor lagere afvoeren is niet een afzonderlijk recept afgeleid en wordt in het vervolg (d.w.z. bij het converteren van de 50.000 jaar GRADE reeksen van de Lippe naar die van de Vecht) ook voor die lagere afvoeren de hierboven gepresenteerde systeemrelatie ingezet. Dat betekent dat Vecht afvoeren kleiner dan $235 \text{ m}^3/\text{s}$ minder nauwkeurig kunnen zijn. Conform de WBI werklijn komt voor de Vecht een afvoer van $235 \text{ m}^3/\text{s}$ overeen met een herhalingstijd van 'slechts' 3 jaar. Daarom heeft het ook voor de lagere Lippe afvoeren inzetten van de systeemrelatie weinig of geen effect voor het bereik van afvoeren en herhalingstijden wat in dit kader van belang is.



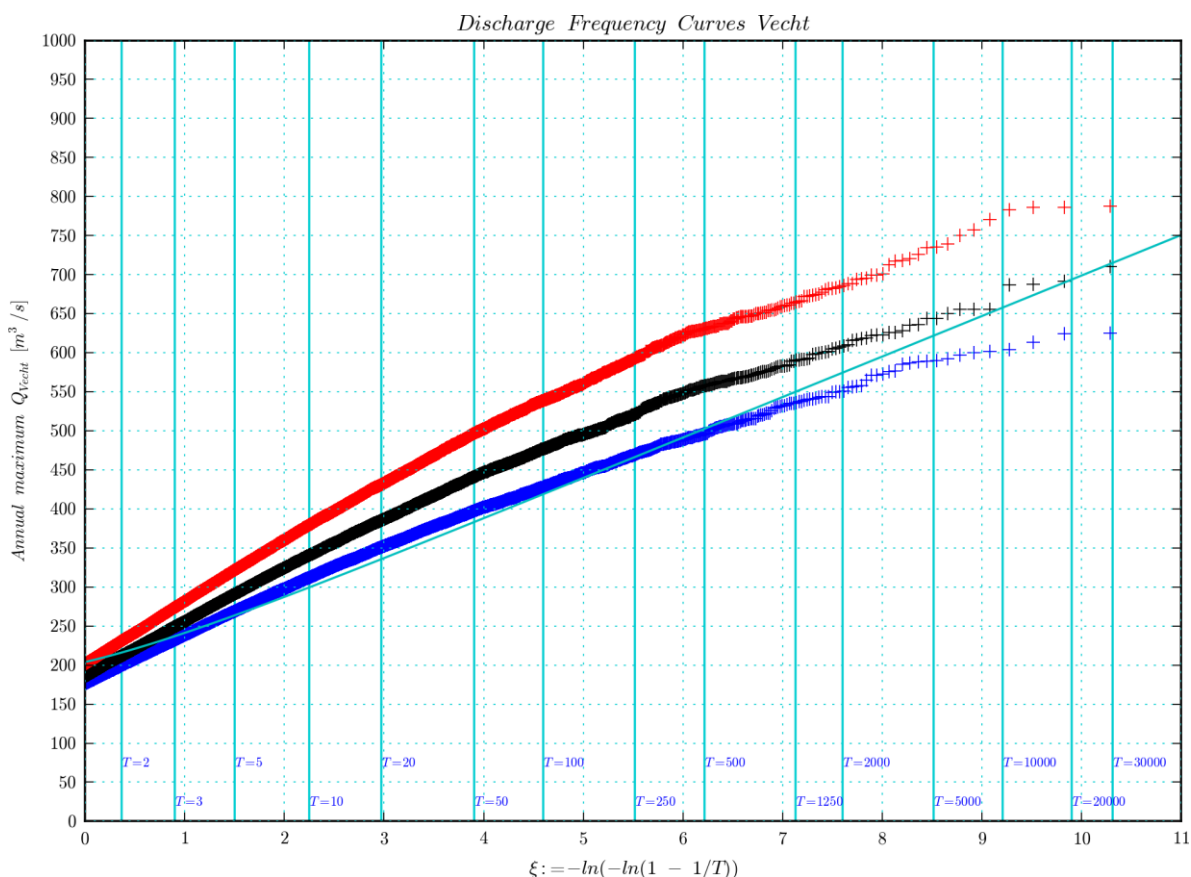
Figuur 4.5 Scatterplot van overeenkomstige jaarmaxima van de Vecht (afgeleid uit gemeten waterhoogten) en de Lippe (berekend met GRADE) en een daaraan gefitte lineaire relatie (rode lijn). De gestippelde lijn is de 1:1 lijn ter indicatie

4.3 Vertalen van GRADE jaarmaxima van de Lippe naar de Vecht

De systeemrelatie die in het vorige hoofdstuk is afgeleid is toegepast op de maxima die in de 50.000 jaar berekeningen met GRADE voor de Lippe zijn berekend. Dat is gedaan voor alle drie de klimaatscenario's, namelijk voor het huidige klimaat, en voor de varianten 2050W⁺ en 2100W⁺. Daarna zijn op de zo geconstrueerde reeksen van 50.000 Vecht-jaarmaxima frequentieanalyses uitgevoerd. Het resultaat van deze frequentieanalyses is in grafische vorm te vinden in Figuur 4.6. Hierin is frequentielijn die bij het huidige klimaat hoort in blauw getekend, en die van scenario 2050W⁺ in zwart, en van 2100W⁺ in rood. Ter vergelijking is de werklijn van WBI2017 ook getekend. Zie hiervoor de doorgetrokken lijn, die in de kleur cyaan is weergegeven. Ten opzichte van elkaar liggen de frequentiekrommes die uit de GRADE berekeningen zijn geconstrueerd in een te verwachten volgorde.

Idealiter zou de blauwe frequentielijn (gebaseerd op GRADE) moeten samenvallen met de doorgetrokken lijn (WBI2017 werklijn, in cyaan). Dat is niet geheel het geval maar tot herhalingstijden van ongeveer 1000 jaar zijn de verschillen beperkt. Die worden groter met het verder toenemen van de herhalingstijd T .

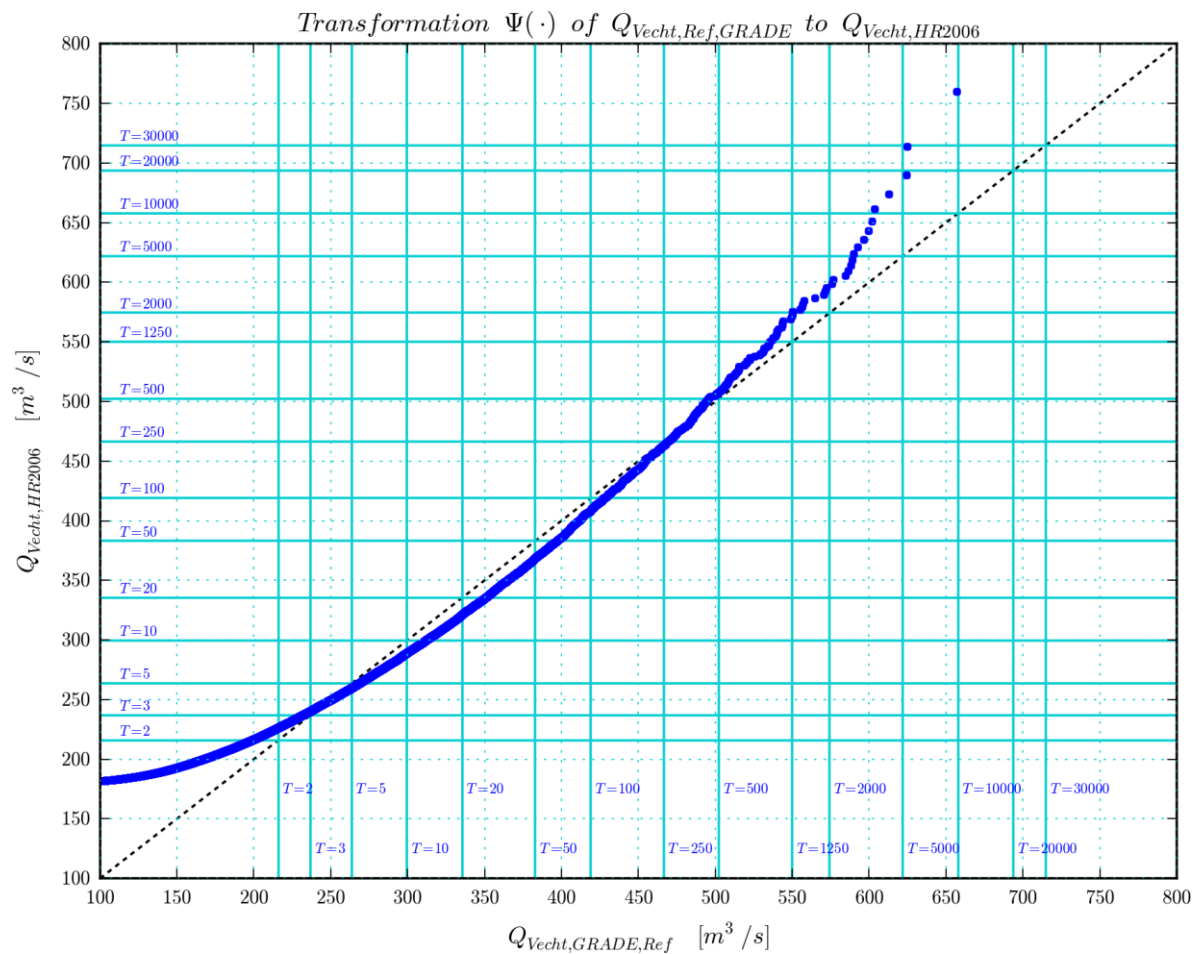
Daar waar de WBI werklijn lineair blijft groeien met de logaritme van T (wat bij een horizontale Gumbel schaal te verwachten is voor een exponentiële verdeling), is de toename in de blauwe met GRADE berekende frequentielijn minder steil, en neigt enigszins tot afvlakken. Voor beide werklijnen (WBI2017, en GRADE bij huidig klimaat) is met de huidige informatie natuurlijk niet te zeggen welke qua kwaliteit beter zou moeten zijn dan de andere.



Figuur 4.6 Frequentiekrommen van afvoer maxima van de Vecht, voor het huidige klimaat (blauw), en de klimaatscenario's 2050W+ (zwart) en van 2100W+ (rood). Hier zoals die uit GRADE simulaties van de Lippe zijn afgeleid. De in de kleur cyaan weergegeven doorgetrokken lijn representeert de WBI2017 werklijn van de Vecht

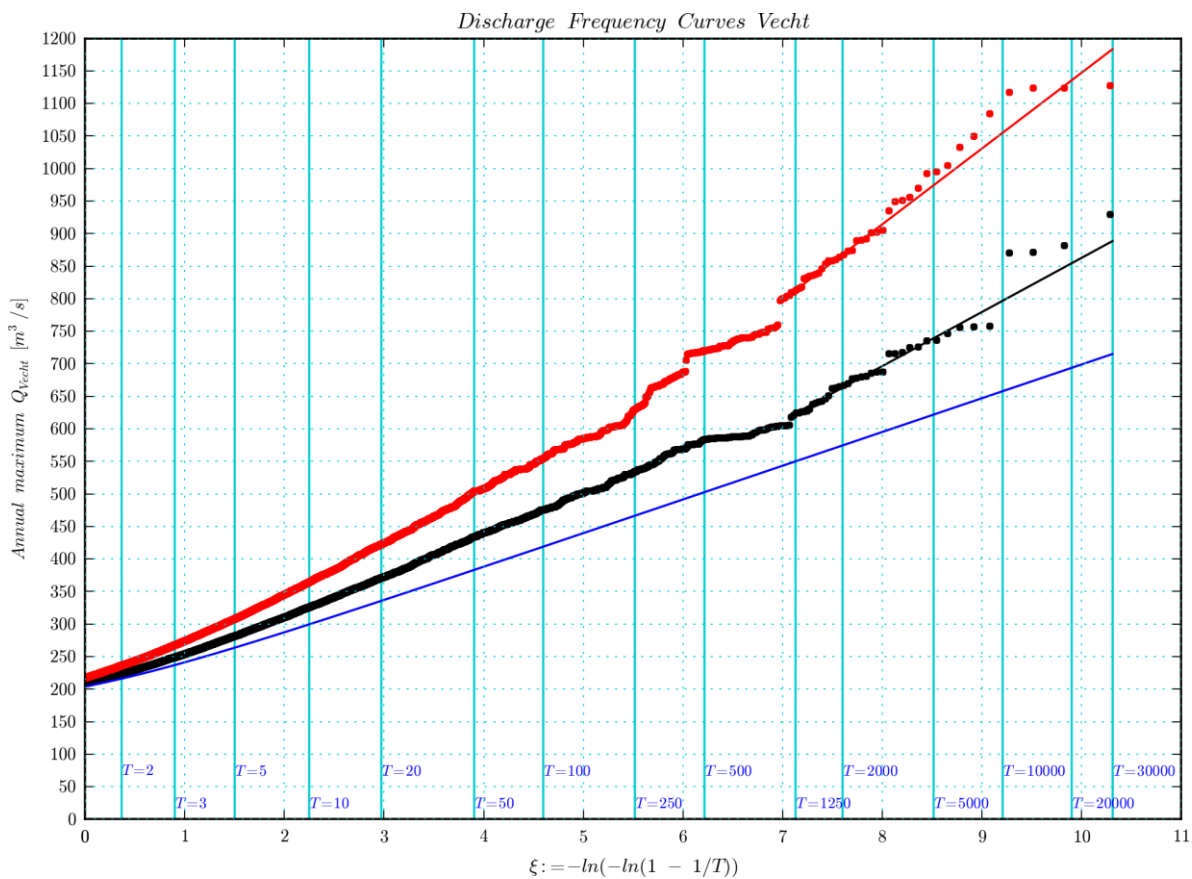
4.4 Herijking van de Vecht afvoermaxima aan WBI2017 werklijn

Zoals eerder in Sectie 3.2.4 al is uiteengezet moet de in WBI2017 gehanteerde werklijn voor de Vecht als referentie dienen bij het vaststellen van de effecten van de klimaatscenario's 2050W+ en 2100W+ op de grootte en frequentie van extreme afvoeren op de Vecht. Om dit te kunnen doen is een transformatie, $\Psi(\cdot)$, van de afvoermaxima gedefinieerd die als een soort herijking van die reeksen fungeert. Die transformatie is beschreven in Sectie 3.2.4 en is hier conform dat recept afgeleid. In Figuur 4.7 is die transformatie $\Psi(\cdot)$ via een scatterplot geïllustreerd. Hierin is via de in het blauw getekende punten $\Psi(Q_n)$ uitgezet tegen de afvoeren Q_n ($1 \leq n \leq N$, $N = 50.000$) die met GRADE voor het huidige klimaat werden gevonden.



Figuur 4.7 Afbeelding voor het aan de WBI2017 werklijn herijken van afvoeren van de Vecht, die zijn afgeleid uit met GRADE berekende extreme afvoeren van de Lippe

Deze afbeelding is voor alle klimaatscenario's op de met GRADE berekende afvoermaxima toegepast. We herinneren ons dat na deze transformatie de 50.000 jaar GRADE reeks voor het huidige klimaat dan dezelfde exponentiële verdeling krijgt als die voor de WBI2017 werklijn voor de Vecht. De frequentielijnen die na deze transformatie worden gevonden zijn getekend in Figuur 4.8. De blauwe lijn is de WBI2017 werklijn, terwijl die voor 2050W⁺ en 2100W⁺ in respectievelijk zwart en rood zijn weergegeven.



Figuur 4.8 Frequentiekrommen van afvoer maxima van de Vecht, voor het huidige klimaat (blauw), en de klimaatscenario's 2050W+ (zwart) en van 2100W+ (rood). Deze zijn uit GRADE simulaties van de Lippe afgeleid, en daarna geijkt aan de WBI2017-werklijn. Hier zijn die frequentiekrommen voor het geval er geen rekening wordt gehouden met bovenstroomse overstromingen

Via de Weissman procedure is een exponentiële verdeling gefit aan de punten met de hoogste afvoeren. Met die fit wordt een enigszins glad gestreken schatting van de staart van de verdeling verkregen. Met deze variantiereductiemethode verkrijgt men betere schattingen voor de afvoeren die bij die hogere herhalingstijden horen. In Figuur 4.8, zijn die Weissman fits in de staart van de verdelingen weergegeven met de doorgetrokken rode en zwarte lijnstukken. In het berekenen van die fits zijn de afvoeren gebruikt die horen bij een herhalingstijd van 2000 jaar of meer.

In onderstaande tabel is dan voor een aantal herhalingstijden de bijhorende afvoermaxima van de Vecht te vinden.

Tabel 4.1 Afvoermaxima van de Vecht volgens de WBI2017 werklijn (2e kolom), en voor de klimaatscenario's or 2050W+ (derde kolom) en 2100W+ (vierde kolom). Die van 2050W+ en 2100W+ zijn herleid uit met GRADE berekende afvoerreeksen van de Lippe. In dit geval is er geen rekening gehouden met bovenstroomse overstromingen

Herhalingstijd [jaar]	Afvoermaximum Vecht [m ³ /s]		
	Huidig klimaat	2050W+	2100W+
2	216	223	236
5	264	281	308
10	300	326	364
20	335	371	422
25	347	385	440
30	356	398	456
50	383	434	503
100	419	475	554
200	455	520	603
250	467	534	630
300	476	545	664
500	503	583	720
1000	538	603	755
1250	550	623	812
2000	574	663	868
2500	586	682	894
3000	595	697	915
4000	610	721	948
5000	622	739	974
10000	658	797	1055
20000	694	855	1136
30000	715	888	1183

4.5 Effecten van bovenstroomse overstromingen

In de berekeningen die hebben geleid tot de frequentiekrommen die tot nu toe zijn gepresenteerd is geen rekening gehouden met bovenstroomse overstromingen in het stroomgebied van de Vecht. Effecten van overstromingen zijn onderzocht en geschat in de studies van Jungermann en Horn (2016) en Geerse (2016ab). Een door hen afgeleide kwantitatieve schatting van die effecten is hieronder getekend in Figuur 4.9. In deze figuur is bij gegeven afvoer zonder overstroom (die hier langs de horizontale as is uitgezet) die afvoer uitgezet die dan met overstroomen wordt gevonden (langs de verticale as). De dikke zwarte punten zijn zoals afgeleid door de bovengenoemde auteurs. Via interpolatie en lineaire extrapolatie is op basis van die punten een continu verlopende kromme geconstrueerd. Die is in de figuur eveneens in zwart getekend. In rood is het verschil tussen de afvoer zonder en met overstroomen weergegeven. Bij een gegeven afvoer zonder overstroomen geeft deze kromme dan de maat waarmee deze door overstromingen gereduceerd wordt.

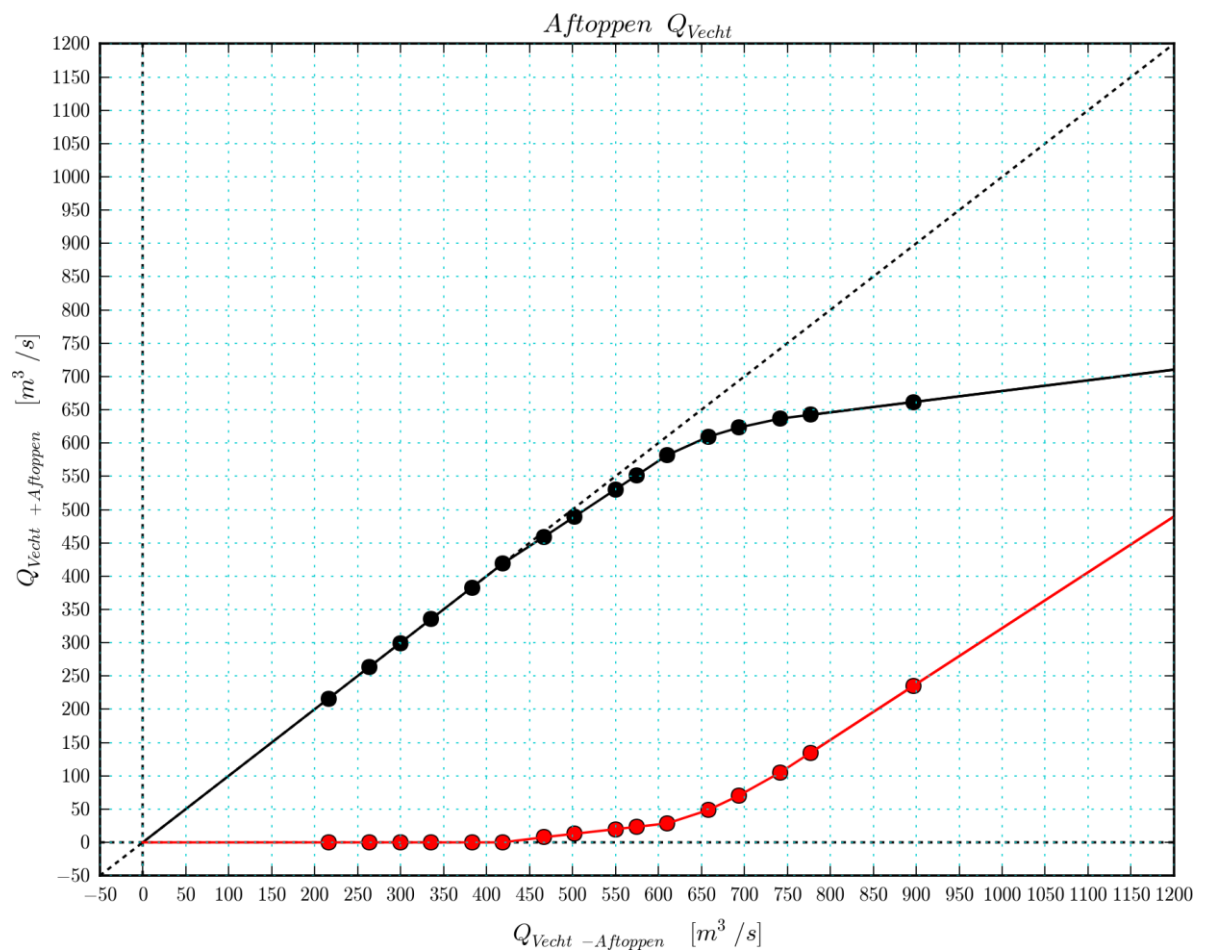
De figuur laat zien dat effecten van stromingen merkbaar worden voor afvoeren vanaf 450 m³/s. Onder de WBI2017 werklijn komt dat overeen met een herhalingstijd van 200 jaar.

Het recept voor het reduceren van de afvoeren ten gevolge van bovenstroomse overstromingen, zoals dat met de zwarte kromme in Figuur 4.9 is weergegeven, is toegepast op de afvoermaxima die in het vorige hoofdstuk voor 2050W⁺ en 2100W⁺ werden gevonden na de herijking aan de WBI2017 werklijn. Hierna is opnieuw een frequentieanalyse uitgevoerd. De afvoerfrequentiekrommen die dan worden gevonden zijn getekend in Figuur 4.10. Vergeleken met de overeenkomstige Figuur 4.8 uit het vorige hoofdstuk wordt niet alleen een aanzienlijke reductie van de afvoermaxima gevonden maar ook een sterke afvlakking. Bij de hoogste herhalingstijden is de helling van de drie frequentielijnen ongeveer gelijk. Het grootste effect van overstromingen is zoals te verwachten voor de kromme van 2100W⁺. Deze ligt bij de hogere herhalingstijden nu ongeveer net zoveel “boven” die van 2050W⁺ als dat die 2050W⁺ op zijn beurt boven de WBI2017 werklijn ligt.

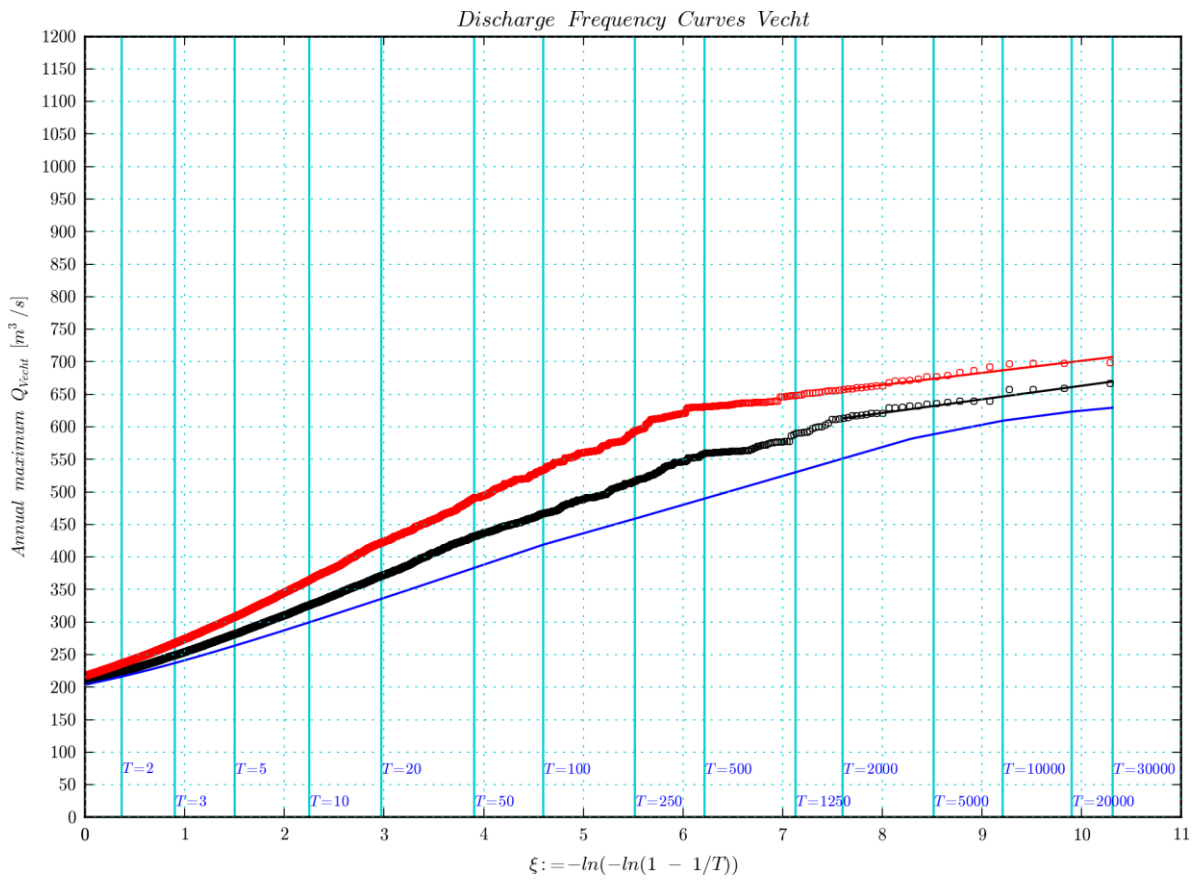
In de frequentielijn voor het 2100W⁺ scenario (de rode lijn in Figuur 4.10) is een duidelijke knik te herkennen in die lijn bij een herhalingstijd van ongeveer 300 jaar, waarbij een afvoer hoort van ongeveer 625 m³/s. Dat ‘past’ met de afbuiging ten gevolge van overstromingen, zoals die te zien is in de zwarte lijn in Figuur 4.9. Rond die afvoer van 625 m³/s begint daar de sterkste afbuiging. Zo’n knik in de frequentielijn rond 625 m³/s is aanzienlijk minder goed te herkennen voor het 2050W⁺ scenario (zwarte lijn in Figuur 4.10). Hier is de afbuiging in de staart (aan rechterzijde, en vanaf 625 m³/s) minder sterk dan het geleidelijke verloop van die lijn aan de linkerzijde (tot 625 m³/s). Op het eerste gezicht zou voor 2050W⁺ dit minder sterk of nauwelijks afbuigen dan bij 2100W⁺ mogelijk niet verwacht worden. Er moet echter worden opgemerkt dat er naast de aftopping weergegeven met Figuur 4.9 er nog een andere bron van ‘trendbreuk’ in het geding is. Die tweede bron is de afbeelding $\Psi : Q_{Vecht, GRADE, Ref} \rightarrow Q_{Vecht, HR 2006}$ waarmee de herijking aan WBI2017 heeft plaatsgevonden, en die in Figuur 4.7 is weergegeven. In die figuur is te zien bij de hoogste afvoeren (vanaf $Q_{Vecht, GRADE, Ref} \approx 575$ en vanaf $Q_{Vecht, HR 2006} \approx 600$ m³/s) de stijlheid van die $\Psi(\cdot)$ ook in een keer sterk toeneemt. Die grotere stijlheid wordt daarna teruggevonden in de 2050W⁺ en 2100W⁺ frequentielijnen van Figuur 4.8: vanaf 600 m³/s neemt de helling in beide lijnen plots toe, en zijn dus ook hier knikken te zien. Deze knikken hebben niets van doen met de knikken ten gevolge van overstromingen omdat overstromingen bij de Figuren 4.7 en 4.8 nog niet in rekening zijn gebracht. Daarnaast is het waarschijnlijk eveneens toeval dat de positie van de knikpunten (625 m³/s bij de effecten van overstromen en 600 m³/s bij de herijking) erg dicht bij elkaar liggen. In Figuur 4.8 is verder te zien dat de knik in de 2050W⁺ frequentielijn aanzienlijk minder sterk is dan die voor die 2100W⁺. Om deze reden wordt verwacht dat na het verrekenen van effecten van overstromingen de knik in de 2050W⁺ frequentielijn (zoals getoond met de zwarte lijn in Figuur 4.10) ook veel minder sterk is dan voor 2100W⁺.

Getalsmatig zijn voor een aantal herhalingstijden de bijhorende afvoermaxima van de Vecht te vinden in Tabel 4.2.

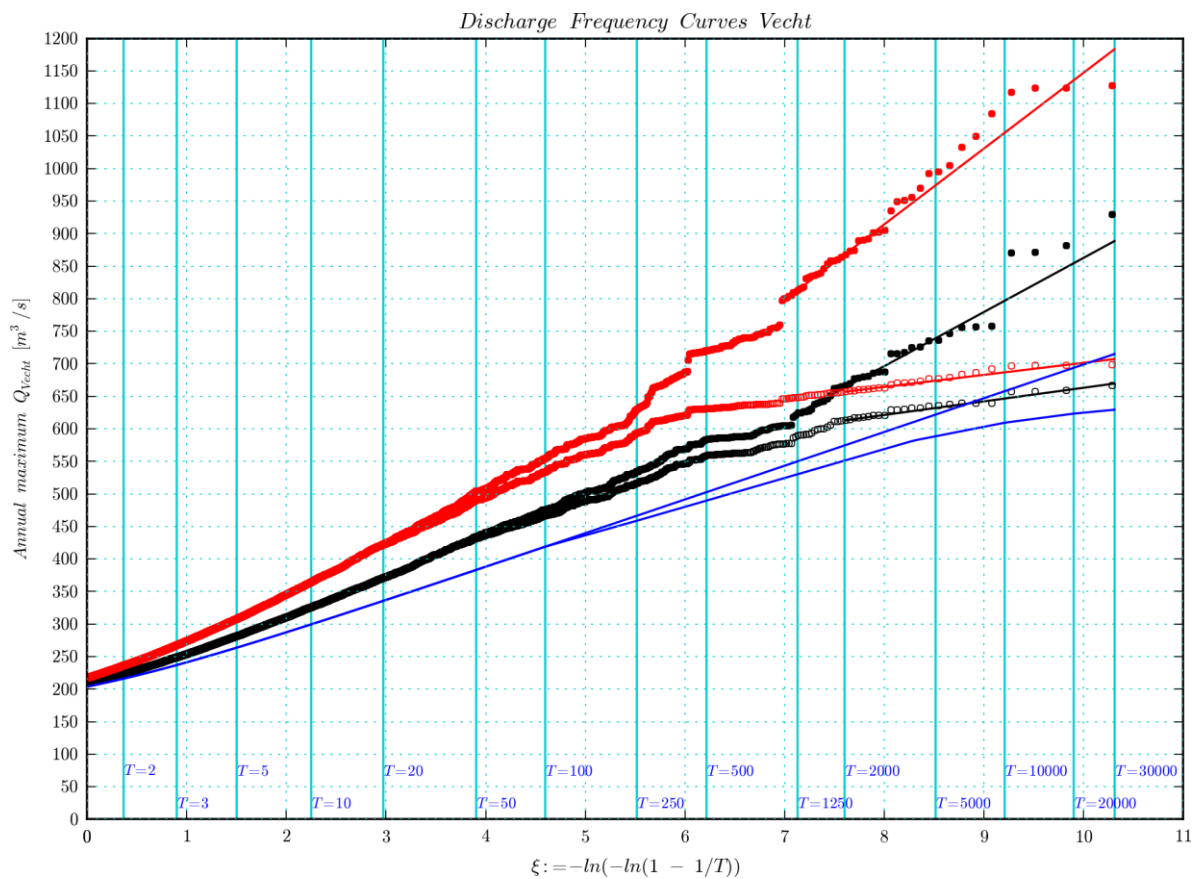
Voor het in nader detail kunnen vergelijken van het effect van het in rekening brengen van overstromen wordt verwezen naar Figuur 4.11. Hierin zijn alle zes frequentiekrommes (voor de drie klimaatscenario’s gecombineerd met wel/niet overstromen) in één figuur getekend. Dat omvat dus de drie krommes uit Figuur 4.8 (zonder overstromen) en die uit Figuur 4.10 (met overstromen).



Figuur 4.9 Effecten van bovenstroomse overstromingen in de Vecht op de afvoer zoals afgeleid door Jungermann en Horn (2016) en Geerse (2016ab). Met de in het zwart getekende lijn en stippen is de afvoer van de Vecht, met verrekening van effecten van overstromingen, uitgezet tegen die afvoer wanneer er niet met overstromingen rekening wordt gehouden. De rode lijn en stippen geven de afname van de afvoer ten gevolge van overstromingen



Figuur 4.10 Frequentiekrommen van afvoer maxima van de Vecht, voor het huidige klimaat (blauw), en de klimaatscenario's 2050W⁺ (zwart) en van 2100W⁺ (rood). Deze zijn uit GRADE simulaties van de Lippe afgeleid. Hier zijn die frequentiekrommen voor het geval effecten van bovenstroomse overstromingen, zoals afgeleid door Jungermann en Horn (2016) en Geerse (2016ab), in rekening worden gebracht



Figuur 4.11 Frequentiekrommen van afvoer maxima van de Vecht, voor het huidige klimaat (blauw), en de klimaatscenario's 2050W⁺ (zwart) en van 2100W⁺ (rood). Deze zijn uit GRADE simulaties van de Lippe afgeleid. Die frequentiekrommes zijn hier in één figuur getekend voor zowel de situatie dat niet en dat wèl met bovenstroomse overstromingen rekening wordt gehouden

Tabel 4.2 Afvoermaxima van de Vecht volgens de WBI2017 werklijn (2e kolom), en voor de klimaatscenario's or 2050W+ (derde kolom) en 2100W+ (vierde kolom). Die van 2050W+ en 2100W+ zijn herleid uit met GRADE berekende afvoerreksen van de Lippe. In dit geval zijn schattingen van de effecten van bovenstroomse overstromingen op de afvoermaxima in rekening gebracht

Herhalingstijd [jaar]	Afvoermaximum Vecht [m ³ /s]		
	Huidig Klimaat	2050W ⁺	2100W ⁺
2	216	223	236
5	264	281	308
10	300	326	364
20	336	371	422
25	347	385	437
30	356	398	450
50	383	431	490
100	419	466	534
200	449	505	576
250	459	517	593
300	467	526	612
500	489	558	631
1000	520	576	639
1250	530	589	648
2000	551	613	657
2500	561	618	661
3000	569	621	664
4000	582	627	670
5000	589	632	674
10000	609	647	687
20000	623	661	700
30000	629	670	707

5 Conclusies en aanbevelingen

De uitkomsten voor, en de kwaliteit van, de in dit kader afgeleide afvoerstatistiek van de Vecht hangen in grote mate af van de daadwerkelijke correlatie tussen de afvoeren van de Lippe en de Vecht. Die correlatie is hier nagegaan, en daarna via de systeemrelatie gekwantificeerd, aan de hand van de jaarmaxima van beide rivieren die in een historische periode gelijktijdig zijn opgetreden (d.w.z bij éénzelfde neerslag event horen). Die historische periode is de tijdsperiode waarop gemeten Vecht afvoeren beschikbaar waren. T.a.v. de gevonden correlatie kan het volgende worden opgemerkt:

- Bij lage afvoeren bleek de correlatie tussen de Vecht en Lippe afvoermaxima gering te zijn. Bij hogere afvoeren (meer dan 200 m³/s voor de Lippe) was de correlatie aanzienlijk groter, maar nog steeds met een aanzienlijke spreiding wanneer overeenkomende afvoermaxima in een scatterplot tegen elkaar worden uitgezet.
- Daarbij is er bovendien de 'complicatie' dat er maar relatief weinig van dergelijke gelijktijdige afvoermaxima beschikbaar bleken te zijn. Een groot deel van die scatter kan afkomstig zijn van de Vecht waar afvoeren die niet 'rechtstreeks' gemeten zijn maar via een QH-relatie uit waterhoogten afgeleid moesten worden.
- Een ander deel van de scatter kan voortkomen uit de met GRADE berekende afvoermaxima van de Lippe. Deze afvoermaxima zullen echter niet de grootste foutenbron zijn omdat uit een validatie met gemeten Lippe-afvoeren bleek dat deze door GRADE met redelijke nauwkeurigheid gereproduceerd werden.
- Het restant van de scatter kan ten slotte voortkomen uit wezenlijk fysische verschillen van het Vecht en Lippe stroomgebied. Het is hierbij ook de vraag in hoeverre een aantal van de in de analyse gebruikte jaarmaxima sterk beïnvloed hebben kunnen zijn door lokale of regionale gebeurtenissen. Ofwel events die wel in het ene stroomgebied zijn opgetreden, maar niet in het andere.
- Ook het feit dat we voor deze twee relatief kleine stroomgebieden met dagwaarden hebben gerekend kan een effect hebben gehad op de nauwkeurigheid waarmee de afvoermaxima zijn weergegeven.
- Op basis van de nu beschikbare data zouden daarnaast ook secundaire maxima in de analyse kunnen worden meegenomen om meer datapunten van overeenkomende maxima te verkrijgen, en daarmee mogelijk een meer eenduidig beeld van de (grootte van de) wederzijdse correlatie.

Er wordt aanbevolen om deze punten in nader detail te onderzoeken, en daarbij na te gaan of die een wezenlijke invloed hebben gehad op de niet zo heel erg grote correlatie die nu werd gevonden. Berekeningen met modellen van de Vecht, zoals hier met GRADE voor de Lippe is gedaan, kunnen hierin veel meer helderheid verschaffen.

De onzekerheid die aan de in dit onderzoek afgeleide grootheden (zoals het afvoermaximum bij een voorgeschreven herhalingstijd) moet worden toegekend is naar verwachting groot. Dat betreft niet alleen de hierboven uitgewide onzekerheid in de correlatie van Lippe en Vecht (en dus onzekerheid in de systeemrelatie) maar ook onzekerheden in de meteorologische invoer en de hydrologische modellen in GRADE. Het wordt aanbevolen om in de toekomst deze onzekerheden beter in kaart te brengen en waar mogelijk te kwantificeren.

De onzekerheden worden hieronder nog eens puntsgewijs samengevat. De onzekerheden zijn in dit onderzoek niet verder gekwantificeerd:

- De meteorologische gegevens, zowel in de metingen, als in de interpolaties zijn een mogelijke bron van onzekerheid in de kalibratie van de Lippe.
- Onzekerheden in de gekozen modelstructuur van het HBV-model en zijn parametrisatie.
- Onzekerheid in de QH relatie van de Vecht, met name de lineaire extrapolatie die nodig was om een uitspraak over het hele bereik te kunnen doen.
- De systeemrelatie van de Vecht is afgeleid uit een beperkt aantal punten met scatter en bevat daarom ook een groot deel van de onzekerheden.
- Het moet in dit kader ook worden opgemerkt dat er ook een grote onzekerheid zit in de gekozen exponentiële verdeling van de frequentielijn van de Vecht in WBI.

Een deel van de onzekerheid (systeemrelatie, kiezen van een verdeling voor de frequentielijn) kan mogelijk worden gereduceerd door een GRADE-Vecht op te zetten. Dit wordt naar aanleiding van deze studie dan ook aanbevolen.

De frequentielijn die met de systeemrelatie voor het huidige klimaat voor de Vecht werd gevonden voor de situatie zonder overstromen, bleek tot een herhalingstijd van ongeveer 500 jaar goed overeen te komen met de werklijn zoals die in WBI2017 wordt gehanteerd. Dit suggereert dat ondanks de diverse nog aanwezige onzekerheden we toch een redelijk vertrouwen kunnen uitspreken in de resultaten die voor deze en alle andere varianten (klimaat, en niet/wel overstromen) hebben gevonden.

6 Literatuur

- Chbab, H.: Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Rapport 1209433-012-HYE-0007, Deltares, 2015.
- Geerse, C.: Overschrijdingsfrequentie Vecht bij Dalfsen. Pragmatische aanpassing van de statistiek voor overstromingen bovenstrooms. Rapport PR3257.10, HKV Lijn in Water, 2016a.
- Geerse, C.: Hydraulische belastingen 2017 – Software terugvaloptie. Voorstel voor aanpassing Vechtstatistiek en modelonzekerheid waterstand. Memorandum PR3280.20, HKV Lijn in Water, 2016b.
- Hegnauer, M., Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A. & Passchier, R.A. 2014. Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018, Delft, The Netherlands.
- Jungermann N., en Horn, G.: Afvoer(beperkingen) van de Overijsselse Vecht in extreme omstandigheden. Eindrapport PR3202.10, HKV Lijn in Water, 2016
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., 2008. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94.
- Mierlo, van M.C.L.M. and R.H. Passchier, 1998. Development of rainfall-runoff models for the Sieg and the Lippe. Delft Hydraulics
- Moll, J.R. and Crebas, J.I., 1989. An operational management system for river flows. Delft Hydraulics.
- Petruck, A. and Stöffler, U., 2011. On the history of chloride concentrations in the River Lippe (Germany) and the impact on the macroinvertebrates. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 41(2), pp.143-150.
- Stolte, J. and J.H.M. Wösten, 1991. Soil physical schematisation of the catchment area of the river Vecht. The WINAND STARING CENTER, Wageningen
- Weissman, I., 1978. Estimation of parameters and large quantiles based on the k largest observations. *Journal of the American Statistical Association*, 73, 812-815.
- Zeeman, M., 1990. Towards the development of a rainfall-runoff model for the assessment of climate and land-use change impacts in the catchment area of the river Vecht, literature study. Lelystad (The Netherlands), Rijkswaterstaat Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment. Report 90.036X.