



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

# Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith

Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001

RIZA rapport 2002.012

ISBN 9036954347

Auteurs: B.W.A.H. Parmet

W. van de Langemheen

E.H. Chbab

J.C.J. Kwadijk

F.L.M. Diermanse

D. Klopstra

RIZA

Arnhem, augustus 2001

---

---

# Voorwoord

---

Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek naar de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het randvoorwaardenboek 2001 (rvw2001).

De resultaten van een aantal deelonderzoeken zijn afzonderlijk gerapporteerd. Deze deelonderzoeken betreffen de homogenisatie van de afvoerreeks van Lobith voor de periode 1901 tot en met 1998 (Lammersen *et al.*, 1999; WL, 1999c), de statistische analyse van de meetreeks vanaf 1901 tot en met 1998 (Chbab, 1999; WL, 1999a; WL 1999b), een analyse van effecten van retentiemaatregelen langs de Rijn op extreme hoogwaters (Lammersen *et al.*, 1999; WL, 1999c), een analyse naar de representativiteit van de meetreeks vanaf 1901 (WL, 1999a; WL, 1999b), een analyse van de vorm van de maatgevende afvoergolf (HKV, 1999a; WL, 1999b) en een analyse van de mogelijke effecten van klimaatverandering (NW4, 1997; Grabs *et al.*, 1997; WL,1999d).

Dit rapport is een samenvatting van alle deelrapporten, waarin slechts de hoofdlijnen zijn weergegeven. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de afzonderlijke deelrapporten.

---

---

# Inhoudsopgave

---

---

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Doelstelling</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>De maatgevende afvoer</b>	<b>11</b>
3.1	Inleiding	11
3.2	Homogeniteit meetreeks	12
3.2.1	Effecten kanalisatie Oberrhein en (geplande) retentiemaatregelen	12
3.2.2	Homogenisatie afvoeren Lobith	14
3.3	Statistische analyse	15
3.3.1	Methodiek	15
3.3.2	Resultaten	17
3.4	Effectiviteit van maatregelen	23
3.4.1	Methodiek	23
3.4.2	Samenstellen van modelhoogwaters	23
3.4.3	Berekeningen met modelhoogwaters	24
3.4.4	Vergelijking met analyse Boertien I	25
3.5	Representativiteit meetreeks	26
3.6	Onzekerheden	27
<b>4</b>	<b>De vorm van de maatgevende afvoergolf</b>	<b>31</b>
4.1	Inleiding	31
4.2	Methodiek	31
4.3	Resultaten 1993	32
<b>5</b>	<b>Samenvatting en conclusies</b>	<b>35</b>
5.1	Methodiek	35
5.2	Hoogte van de maatgevende afvoer	35
5.3	De vorm van de maatgevende afvoergolf	37
	Referenties	39

---

## Bijlagen

1	Selectie van historische hoogwaters (Lammersen <i>et al.</i> , 1999)	45
2	Reeks jaarmaxima en partiële reeks voor Lobith, meetreeks en voor 1977 gehomogeniseerde meetreeks voor 1901-1998	46
3	De vorm van de afvoergolf voor de Rijn bij Lobith volgens de opschalingsmethode en bij een piekafvoer van 16.000 m <sup>3</sup> /s	50

---

---

# 1 Inleiding

---

Met de invoering van de Wet op de waterkering wordt iedere vijf jaar een randvoorwaardenboek uitgebracht met daarin de maatgevende hydraulische randvoorwaarden voor alle primaire waterkeringen in Nederland. Een van de bepalende factoren is de maatgevende afvoer van onze grote rivieren. De maatgevende afvoer is gedefinieerd als de afvoer met een gemiddelde jaarlijkse overschrijdingskans van 1/1250. Het volgende randvoorwaardenboek wordt in 2001 uitgebracht. Onderdeel daarvan is het vaststellen van de maatgevende afvoeren voor de Rijn bij Lobith, de Maas bij Borgharen en de Vecht bij Dalfsen.

De huidige methodiek om de maatgevende afvoer vast te stellen is gebaseerd op een frequentieanalyse van historische afvoergegevens. Deze methode kent een aantal vraagpunten. De beschikbare meetreeks is erg kort om uitspraken te doen over de afvoer met een gemiddelde overschrijdingskans van 1/1250 per jaar. De vraag is hoe representatief de beschikbare meetreeks is. Een andere vraag is met welke verdelingsfunctie een goede extrapolatie naar de maatgevende afvoer gemaakt kan worden. Om te kunnen extrapoleren moet de meetreeks homogeen zijn. Aan deze randvoorwaarde is door de vele ingrepen in het stroomgebied en mogelijke instationariteiten in het klimaat niet automatisch voldaan. De ontwikkelingen richting de toekomst, bijvoorbeeld aangaande klimaatverandering, zijn ook een belangrijke factor.

Een andere beperking van de methode is dat met behulp van de statistische verdelingen alleen de hoogte van de maatgevende afvoer wordt bepaald. Over de vorm van de afvoergolf of over de genese van de golf (met andere woorden: wat is de bijdrage van de verschillende deelstroomgebieden) geeft de methode geen informatie. Dit laatste aspect is wel van groot belang in verband met de effectiviteit van eventuele bovenstroomse maatregelen.

De methodiek van extrapolatie van de meetreeks op basis van statistische verdelingen zal ook voor onderhavig onderzoek worden gebruikt, maar wel volgens de state-of-the-art. Dit betekent dat voor die vraagpunten, waar de kennis of gegevens sinds het rvw1996 zijn toegenomen, deze ook ingezet zullen worden. Ook bij toepassing van de beschikbare state-of-the-art kennis, blijven er vraagpunten bestaan. Er is nog steeds niet één methode die dé beste schatting oplevert. Daarom zal voor de hoogte van de maatgevende afvoer voor de verschillende rivieren, niet één beste schatting worden gegeven, maar meerdere varianten waar de definitieve keuze op kan worden gebaseerd.

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de maatgevende afvoer voor de Rijn bij Lobith. Het rapport is een samenvatting van de resultaten van een vijftal deelonderzoeken betreffende de homogenisatie van de meetreeks (Lammersen *et al.*, 1999; WL, 1999c), extreme waarden statistiek (WL 1999a; WL, 1999b; Chbab, 1999), effecten van retentiemaatregelen langs de Rijn (Lammersen *et al.*, 1999; WL, 1999c), representativiteit van de meetreeks (WL, 1999a; WL, 1999b) en de golfvorm (HKV, 1999a; WL, 1999d). De opzet van het onderzoek naar de maatgevende afvoeren te Lobith, Borgharen en Dalfsen is beschreven in een projectplan (Parmet, 1998).

---

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 een beschrijving van de doelstelling van het onderzoek gegeven. In hoofdstuk 3 worden de methodiek en de resultaten voor de hoogte van de maatgevende afvoergolf besproken. Hoofdstuk 4 behandelt de vorm van de maatgevende afvoergolf, waarna tenslotte een samenvatting en de belangrijkste conclusies voor de maatgevende afvoer en de maatgevende golfvorm volgen in hoofdstuk 5.



---

## 2 Doelstelling

---

Doelstelling van het onderzoek naar de maatgevende afvoer is het vaststellen van de beste schatting voor de hoogte van de maatgevende afvoer, de vorm van de maatgevende afvoergolf en de werklijn voor de meetpunten Lobith, Borgharen en Dalfsen, zoals is vastgelegd in het projectplan (Parmet, 1998).

Naast de beste schatting zullen ook de onzekerheden in beeld worden gebracht. Dit rapport beschrijft de resultaten voor de Rijn te Lobith.

In afwijking van het projectplan wordt niet één beste schatting voor de hoogte van de maatgevende afvoer gegeven, maar een viertal varianten van de beste schatting, op basis waarvan de definitieve keuze kan worden gebaseerd.

Daarnaast worden de resultaten van het onderzoek naar de golfvorm gepresenteerd.

---

---

## 3 De maatgevende afvoer

---

### 3.1 Inleiding

De maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith is in 1993 op basis van het onderzoek van de Commissie Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen vastgesteld (Boertien I, 1993a). Een uitgebreid onderzoek is uitgevoerd, waarbij veel aandacht is besteed aan de te gebruiken statistische verdelingsfuncties. Door Boertien I is een middeling van de uitkomsten van verschillende verdelingen voorgesteld. In beperkte mate is de homogeniteit van de meetgegevens onderzocht. Op basis van resultaten van een studie uit Duitsland is een schatting gemaakt van het effect van enerzijds kanalisatiewerken en anderzijds van recent aangelegde retentiebekkens. De uit de statistische analyse volgende maatgevende afvoer is op basis van deze schatting voor het effect van de rivierwerken gecorrigeerd.

Het toepassen van state-of-the-art kennis leidt tot de volgende aanpassingen ten opzichte van Boertien I:

1. de meetreeks voor Lobith wordt gehomogeniseerd voor de kanalisatie van de Oberrhein. De reeks wordt verlengd tot en met 1998. Uitgangspunt voor de statistische analyse vormen de piekafvoeren en niet zoals in Boertien I de 8-uur waarden of de maximale daggemiddelde waarden, zie sectie 3.2;
2. de verdelingsfuncties zoals voorgesteld door Boertien I worden toegepast. Daarnaast wordt ook de exponentiële verdeling gebruikt, die in het onderzoek van de Commissie Boertien II (Onderzoek Watersnood Maas) ook voor de Maas is toegepast;
3. naast de standaard middeling van de resultaten (methode Boertien I en II) zal ook een gewogen middeling, gebaseerd op Bayesiaanse analyse worden uitgewerkt. Hierbij wordt ook een extra verdelingsfunctie in beschouwing genomen, de Rayleigh verdeling, zie sectie 3.3;
4. de effectiviteit van retentiemaatregelen, die deels reeds zijn en deels nog moeten worden aangelegd, wordt onderzocht voor maatgevende omstandigheden bij Lobith, zie sectie 3.4;
5. een analyse naar de representativiteit van de meetreeks vanaf 1901 wordt uitgevoerd, zie sectie 3.5;
6. de onzekerheden worden in beeld gebracht, zie sectie 3.6. De onzekerheid die uit de statistische analyse volgt wordt uitgedrukt in een 95%-betrouwbaarheidsinterval. Voor de onzekerheid volgend uit mogelijk toekomstige ontwikkelingen wordt een best guess gegeven van de effecten van klimaatverandering voor de periode rond 2050 en 2100. De onzekerheid rond de effectiviteit van retentiemaatregelen wordt weergegeven met behulp van de resultaten voor verschillende modelhoogwaters, zie sectie 3.6.

De hoogte van de maatgevende afvoer zal in dit rapport niet als één waarde worden gegeven maar in de vorm van een viertal varianten. Deze vier varianten illustreren de verschillende mogelijkheden om tot de maatgevende afvoer te komen, waarbij niet één methode als beste aangewezen kan worden. De basis voor de varianten wordt in de secties 3.2 en 3.3 toegelicht.

---

De definitieve maatgevende afvoer kan op basis van de varianten gekozen worden. Vervolgens kan de daarbij behorende werklijn worden bepaald.

### 3.2 Homogeniteit meetreeks

#### 3.2.1 Effecten kanalisatie Oberrhein en (geplande) retentiemaatregelen

In de loop van de jaren heeft de mens veel veranderd in het stroomgebied van de Rijn, zeker ook waar het de rivieren betreft. In de bovenloop zijn in de 19<sup>e</sup> eeuw veel werken door de Zwitsers uitgevoerd. De omleiding van de Aare in de Bielersee in 1853 heeft geleid tot een aanzienlijke verlaging van de hoogwaters benedenstrooms. De eerste grootschalige aanpassingen in de Rijn zelf zijn doorgevoerd door Johan Gottfried Tulla in de 19<sup>e</sup> eeuw. Hij is gestart met het kanaliseren van de Oberrhein tussen Basel en Karlsruhe door de stroming in de hoofdgeul te concentreren. Als gevolg hiervan zijn er grote morfologische veranderingen opgetreden, de rivier heeft zich sindsdien vele meters in het zomerbed ingegraven. Met daarbij de volledige kanalisatie en bijbehorende bedijking, uitgevoerd in de 20<sup>e</sup> eeuw en afgerond in 1977 met de stuw in Iffezheim, is het afvoergedrag van de Oberrhein aanzienlijk veranderd. Hoogwaters stromen sneller door dit deel van de Rijn en lopen daardoor steiler op. De kans op samenvallen met toppen van benedenstroomse zijrivieren is vergroot. Deze veranderingen in het systeem zijn van aanzienlijke invloed op hoogwaters die ontstaan in het zuiden van het Rijnstroomgebied. Door de Hochwasser-Studienkommission is de verhoging als gevolg van de Oberrheinkanalisation voor het meetpunt Worms voor een 200-jarig hoogwater vanuit de Oberrhein op ongeveer 700 m<sup>3</sup>/s geschat (HSK, 1978). Deze verhoging voor 'zuidelijke hoogwaters' telt ook door tot Lobith. Om deze effecten teniet te doen is een internationaal verdrag opgesteld om retentie langs de Oberrhein in te richten tot een niveau waarmee de verhoging van het 200-jarig hoogwater voor Worms tot nul wordt teruggebracht. In totaal is een volume van 270 miljoen kubieke meter aan retentie voorzien. Hiervan is in de jaren tachtig reeds 120 miljoen kubieke meter gerealiseerd (IRC, 1998).

Met name door de ingrepen in de Oberrhein kan de meetreeks bij Lobith vanaf 1901 niet als homogeen worden gezien. Door Boertien I is hier rekening mee gehouden door achteraf een correctie voor deze inhomogeniteit toe te passen. Gegevens voor Keulen (HSG, 1993) zijn als basis gebruikt voor een inschatting van de grootte van de correctie voor Lobith. De verhoging van de maatgevende afvoer als gevolg van de Oberrheinkanalisation is op 1.000 m<sup>3</sup>/s geschat. Het verlagende effect van de reeds aanwezige en voor een deel nog te realiseren retentie is ingeschat op 500 m<sup>3</sup>/s. De resterende verhoging van 500 m<sup>3</sup>/s is opgeteld bij de 1/1250 afvoer zoals bepaald uit de meetreeks van Lobith, om tot de maatgevende afvoer te komen. Dit is niet de meest geschikte manier om het homogenisatieprobleem op te lossen. Het gebruik van gegevens van Keulen voor het verdere benedenstrooms gelegen Lobith leidt tot vraagtekens, en zeker ook de algemene correctie, terwijl die eigenlijk alleen geldt voor de periode van voor 1977.

In dit onderzoek is besloten niet een correctie achteraf toe te passen, maar de meetreeks vanaf 1901 te homogeniseren voor de kanalisatiewerken en vervolgens de statistische analyse met deze gehomogeniseerde meetreeks uit te voeren. De effecten van de na de kanalisatie genomen en geplande retentiemaatregelen worden door middel van modelhoogwaters ingeschat (sectie 3.4). De basis voor de homogenisatie en het bepalen van het effect van retentiemaatregelen is een flood-routing model van Basel tot Keulen en een hydrodynamisch model dat van Andernach tot Lobith beschikbaar is.

Het flood routing model, SYNHP, is door de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ontwikkeld voor de Hochwasser-Studienkommission. Het wordt up-to-date gehouden door het Land Baden-Württemberg en wordt operationeel gebruikt voor de sturing van de retentiemaatregelen langs de Oberrhein (Homagk, 1985). Het hydrodynamische model vanaf Andernach betreft een SOBEK model dat in het kader van het nieuwe hoogwatervoorspellingsmodel voor Lobith is gemaakt.

De Oberrheinkanalatie kan in een aantal fasen worden ingedeeld. Dit is weergegeven in tabel 3.1. Er zijn vier fasen te onderscheiden. De laatste betreft de situatie waarin alle geplande retentiemaatregelen ook daadwerkelijk zijn uitgevoerd. De tabel geeft ook aan welke modelschematisaties worden gebruikt.

Voor het traject Basel-Andernach zijn schematisaties van het model SYNHP beschikbaar voor de toestand in 1955, de toestand in 1977, de huidige toestand en de geplande toestand. Voor het traject Andernach-Lobith zijn twee schematisaties beschikbaar, één van de huidige toestand, die voor de gehele historische periode van toepassing wordt verklaard en één voor de toekomstige toestand, wanneer een ambitieus plan voor de Niederrhein is uitgevoerd (IRC, 1998). Gegevens ontbraken om een schematisatie voor de toestand 1955 af te leiden. Echter, de veranderingen die vanaf 1900 zijn opgetreden zijn klein en hebben weinig effect op het afvoerverloop bij Lobith gehad. Voor de geplande toestand is gebruik gemaakt van voorlopige gegevens (van Haselen, 1999).

Tabel 3.1

Beschrijving van de fasen die van belang zijn voor het inschatten van effecten van menselijke ingrepen in de Rijn voor de periode 1901-1998, zoals toegepast in de hydraulische modellering (Lammersen *et al.*, 1999)

Toestand	Traject Basel-Andernach (SYNHP)	Traject Andernach-Lobith (SOBEK)
Toestand 1955	periode voor de kanalisatie Oberrhein	huidige toestand langs de Niederrhein
Toestand 1977	periode na de kanalisatie Oberrhein, zonder retentiemaatregelen	idem
Huidige toestand	periode na kanalisatie Oberrhein met retentiemaatregelen zoals nu aanwezig	idem
Geplande toestand	periode na kanalisatie Oberrhein met alle geplande retentiemaatregelen	situatie waarin de geplande maatregelen langs de Niederrhein zijn uitgevoerd

Als basis voor de homogenisatie zijn berekeningen voor een aantal representatieve hoogwaters uitgevoerd. Voor in totaal 35 hoogwaters zijn berekeningen voor de verschillende situaties van de Ober- en Niederrhein uitgevoerd. De hoogwaters zijn vermeld in bijlage 1, zijn grotendeels ook in eerdere studies gebruikt en betreffen hoogwaters van verschillende oorsprong binnen het Rijnstroomgebied. In (Lammersen *et al.*, 1999) wordt beschreven hoe de gegevens van deze 35 hoogwaters zijn opgebouwd. Voor het belangrijkste deel van het collectief aan hoogwaters kon op de eerdere studies worden teruggevallen.

De rekenresultaten voor de representatieve hoogwaters zijn gegeven in (Lammersen *et al.*, 1999). De berekeningen voor de toestand 1955 kunnen worden getoetst aan de hoogwaters uit de periode voor 1955, en de berekeningen voor de toestand 1977 aan de gegevens van de hoogwaters van na 1977. Verschillen tussen gemeten en gesimuleerde hoogwaterstanden lopen op tot tien procent, met name voor de periode tot 1955. Model- onnauwkeurigheden spelen hier een rol. Ook onnauwkeurigheden in de 'gemeten' afvoer (vaak gebaseerd op een waterstand-afvoer relatie) zijn van belang. Dit blijkt onder andere uit het feit dat voor meer recente hoogwaters, de gesimuleerde maximale waterstanden heel goed overeenkomen met de gemeten topstanden (Lammersen *et al.*, 1999). Het is verantwoord de

modelresultaten te gebruiken voor de homogenisatie van de meetreeks bij Lobith omdat voor de homogenisatie gebruik wordt gemaakt van verschillen tussen berekeningen. Hierdoor kan de modelfout worden verwaarloosd.

Het effect van de kanalisatie varieert sterk per hoogwater. Het verschil tussen de toestand 1955 en de toestand 1977 varieert van een verhoging van meer dan 700 m<sup>3</sup>/s tot zelfs een kleine verlaging van 20 m<sup>3</sup>/s. Gemiddeld voor de 35 hoogwaters zorgt de kanalisatie van de Oberrhein voor een toename van de piekafvoeren met 240 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. De reeds aanwezige en zeker de geplande maatregelen langs Ober- en Niederrhein zorgen voor een verlaging van het effect van de Oberrheinkanalisatie. Opvallend is dat er, ook indien alle geplande maatregelen worden uitgevoerd, een resteffect overblijft. Voor Lobith bedraagt het gemiddelde resteffect voor de 35 hoogwaters 170 m<sup>3</sup>/s. Dus ondanks het uitvoeren van alle maatregelen, blijft er een afvoerhogend effect van de Oberrheinkanalisatie zichtbaar van 170 m<sup>3</sup>/s.

(Lammersen *et al.*, 1999) gaat ook uitgebreid in op andere meetpunten langs de Niederrhein. De effecten voor de meetpunten Keulen en Rees zijn vergelijkbaar met de effecten voor Lobith.

Vergelijking met de studie van de Hochwasser-Studiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth, die in het onderzoek van de Commissie Boertien I als basis is genomen, geeft voor de individuele hoogwaters enigszins verschillende resultaten (HSG, 1993). Deze verschillen kunnen worden teruggevoerd op het feit dat invoergegevens van met name de zijrivieren inmiddels verder zijn verbeterd. Het algemene beeld voor de hoogwaters vanaf 1901 is echter vergelijkbaar. De gemiddelde verhoging als gevolg van de Oberrheinkanalisatie voor Keulen is op basis van de resultaten van de (HSG, 1993) gelijk aan 240 m<sup>3</sup>/s. Volgens (Lammersen *et al.*, 1999) is dat 270 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2.2 Homogenisatie afvoeren Lobith

De rekenresultaten van de 35 representatieve hoogwaters vormen de basis voor de homogenisatie van de gehele meetreeks bij Lobith. De berekeningen voor verschillende toestanden van de Oberrhein en de Niederrhein zijn door middel van een regressie-analyse met elkaar vergeleken. De daaruit afgeleide regressievergelijkingen zijn gebruikt om de meetreeks als geheel te homogeniseren. De toestand in 1977 dient als uitgangspunt voor de statistische analyse. Het homogeniseren van de afvoerreeks bij Lobith betekent dus het omzetten van de meetreeks vanaf 1901, naar de situatie waarin de Oberrheinkanalisatie is uitgevoerd, maar zonder retentiemaatregelen in beschouwing te nemen (zie tabel 3.1).

Het effect van retentiemaatregelen voor extreme afvoeren wordt onderzocht met behulp van modelhoogwaters (zie hiertoe sectie 3.4.3). In (Lammersen *et al.*, 1999) zijn de scatterplots gegeven voor de vergelijkingen van de verschillende situaties.

De toestand 1977 is steeds het uitgangspunt. In tabel 3.2 zijn de resulterende vergelijkingen gegeven.

Tabel 3.2  
Regressievergelijkingen resulterend uit vergelijking van de resultaten van de berekeningen met 35 representatieve hoogwaters voor verschillende situaties ten opzichte van de toestand 1977 (Q staat voor afvoer)

Vergelijking toestand 1977 met	Regressievergelijking	R <sup>2</sup>	Vergelijking nummer
Toestand 1955	$Q_{\text{toestand 1977}} = 1,002 \cdot Q_{1955} + 224,28$	0,9847	[1]
Huidige toestand	$Q_{\text{ huidige toestand}} = 0,9894 \cdot Q_{1977} + 31,761$	0,9976	[2]
Geplande toestand	$Q_{\text{ geplande toestand}} = 0,9801 \cdot Q_{1977} + 101,91$	0,9985	[3]

---

De homogenisatie naar de toestand 1977 vindt plaats in een aantal stappen:

1. voor de periode 1901 tot en met 1955 wordt vergelijking [1] gebruikt om de meetwaarden naar waarden voor de toestand 1977 te vertalen;
2. voor de periode 1956 tot en met 1977 wordt vergelijking [1] als basis gebruikt. De correctie die uit vergelijking [1] volgt wordt gedurende de periode 1956 tot en met 1977 aangepast op basis van het uitgangspunt dat de kanalisatiewerken gelijkmatig in de tijd verdeeld zijn en dat de overgang van de situatie 1955 naar de situatie 1977 lineair verloopt. Dus: voor 1956 is er sprake van een bijna volledige correctie, rond 1966 van een gehalveerde correctie en voor 1977 wordt de correctie nul en kan de meetwaarde genomen worden;
3. voor de periode vanaf 1977 worden de meetwaarden genomen, behalve voor de hoogwaters van maart 1988, februari 1990 en februari 1999;
4. homogenisatie hoogwaters maart 1988, februari 1990 en februari 1999 op basis van vergelijking [2]. Tijdens deze hoogwaters zijn de aanwezige retentiemaatregelen (huidige situatie) in werking getreden en deze moeten dus naar de situatie in 1977 gehomogeniseerd worden.

De resulterende gehomogeniseerde meetreeks voor de toestand 1977 is weergegeven in bijlage 2. In (Lammersen *et al.*, 1999) zijn ook de resultaten voor homogenisatie naar de toestand 1955, de huidige toestand en de geplande toestand gegeven voor Lobith en voor andere meetpunten langs de Niederrhein (Keulen en Rees).

### 3.3 Statistische analyse

#### 3.3.1 Methodiek

##### *Variant 1*

De 1/1250 afvoer wordt gebaseerd op extrapolaties met behulp van statistische verdelingsfuncties. De statistische analyse zoals voorgesteld door Boertien I zal ook voor het rvw2001 worden gebruikt. Voor herhalingstijden kleiner dan 25 jaar wordt de Pareto verdeling gebruikt. Voor grotere herhalingstijden wordt het gemiddelde van de 3-parameter log-normale, de Pearson-III en de Gumbel verdeling gebruikt. De fit-procedures die worden gebruikt zijn gelijk aan de procedures zoals die zijn toegepast in het onderzoek van Boertien I, zie hiervoor tabel 3.3. De niet gehomogeniseerde meetreeks van afvoermaxima vormt de basis voor variant 1. Deze variant betreft in grote lijnen een herhaling van de berekening van Boertien I, met dien verstande dat een langere meetreeks wordt gebruikt en dat, analoog aan Boertien II, de afvoerpieken worden gebruikt in plaats van 8-uur of maximale daggemiddelde waarden.

Het toepassen van de genoemde verdelingen impliceert het gebruik van de meetreeks als serie van jaarmaxima (Gumbel, Pearson-III en 3-parameter log-normaal) en als partiële serie (Pareto). De serie van jaarmaxima bestaat uit de jaarlijks hoogste afvoer in een hydrologisch jaar (vanaf 1 oktober tot en met 30 september) bij een reeks van N jaar. De partiële serie bestaat uit de N hoogste afvoerwaarden boven een drempelwaarde en met een bepaalde zichtduur als tussentijd, bij een serie van N jaar. De drempelwaarde wordt zo gekozen dat het aantal afvoerpieken gelijk is aan N. Met een zichtduur van 15 dagen en een drempelwaarde van 5.778 m<sup>3</sup>/s voor de meetreeks en 5.912 m<sup>3</sup>/s voor de gehomogeniseerde reeks wordt aan de voorwaarde van N maxima voldaan. De reeks van jaarmaxima en de partiële reeksen boven de 5.000 m<sup>3</sup>/s zijn weergegeven in bijlage 2.

Bij elke verdeling wordt een 95%-betrouwbaarheidsinterval berekend. Voor herhalingstijden kleiner dan 25 jaar wordt het interval van de Pareto verdeling gebruikt. Voor herhalingstijden groter dan 25 jaar worden de intervallen bij de gehanteerde verdelingen gemiddeld om tot een 95%-interval te komen. De op deze manier bepaalde gemiddelde betrouwbaarheidsgrenzen zijn geen 'echte' statistische 95%-boven- en ondergrens, maar zijn wel een goede maat voor de nauwkeurigheid van de afvoeren behorend bij verschillende herhalingstijden.

#### Variant 2

Voor variant 2 wordt dezelfde reeks gebruikt als voor variant 1, de niet gehomogeniseerde meetreeks van afvoerpieken vanaf 1901. Ten opzichte van variant 1 worden de verdelingsfuncties gebruikt zoals in Boertien II zijn toegepast voor de Maas. Dit betekent dat voor afvoeren met een herhalings-tijd groter dan 25 jaar naast de Gumbel, de Pearson-III en de 3-parameter log-normale verdeling, ook de exponentiële verdeling wordt gebruikt. Deze laatste wordt toegepast op de partiële serie in plaats van de jaarmaxima (zie ook tabel 3.3). Analoog aan variant 1 wordt een 95%-betrouwbaarheids-interval bepaald.

#### Variant 3

De statistische verdelingsfuncties zoals toegepast door Boertien II worden ook voor variant 3 toegepast (zie tabel 3.3). Als basis voor de statistische analyse wordt echter niet de oorspronkelijke meetreeks gebruikt, zoals in de varianten 1 en 2, maar de voor de toestand 1977 gehomogeniseerde meetreeks. In vergelijking met Boertien I, geeft variant 3 invulling aan de Boertien II methodiek voor de Rijn. De exponentiële verdeling wordt gebruikt én er wordt uitgegaan van een gehomogeniseerde meetreeks. In bijlage 2 is de gehomogeniseerde reeks jaarmaxima en de partiële reeks van afvoerpieken weergegeven. Analoog aan variant 1 wordt een 95%-betrouwbaarheidsinterval bepaald.

Tabel 3.3

Gebruikte verdelingsfuncties voor de verschillende varianten en toegepaste methoden om te fitten (WL, 1999a; Chbab, 1999)

Statistische verdeling	Gebruikt voor variant	Gebruikt voor herhalings-tijd T	Type reeks	Methode om te fitten
Gumbel	1, 2, 3, 4	> 25 jaar	jaarmaxima	modified maximum likelihood method with left censoring (7.000 m <sup>3</sup> /s)
Pearson-III	1, 2, 3, 4	> 25 jaar	jaarmaxima	3-parameter verdeling, modified maximum likelihood method
3-parameter log-normaal	1, 2, 3, 4	> 25 jaar	jaarmaxima	3-parameter verdeling, modified maximum likelihood method
Exponentieel	2, 3, 4	> 25 jaar	partieel, ondergrens 5.778 m <sup>3</sup> /s (voor meetreeks) of 5.912 m <sup>3</sup> /s (voor gehomogeniseerde reeks)	parameters bepaald uit 1e en 2e momenten
Pareto	1, 2, 3, 4	< 25 jaar	partieel, ondergrens 5.778 m <sup>3</sup> /s (voor meetreeks) of 5.912 m <sup>3</sup> /s (voor gehomogeniseerde reeks)	location parameter conform ondergrens reeks, shape parameter $\theta > 0$ , momentenmethode
Rayleigh	4	> 25 jaar	jaarmaxima	parameters bepaald uit 1e en 2e momenten

#### Variant 4

In deze variant wordt niet van het gemiddelde van de gebruikte verdelingen uitgegaan bij het vaststellen van de 1/1250 afvoer en de werklijn, maar van een gewogen gemiddelde. De gewichten die aan de verschillende verdelingsfuncties moeten worden toegekend zijn gebaseerd op een zogenaamde Bayesiaanse analyse. Voor onderhavig onderzoek kan gebruik gemaakt worden van een beperkte Bayesiaanse analyse waarbij de gewichten per



---

verdelingsfunctie worden bepaald door de *goodness of fit* van de verschillende functies (Chhab, 1999). De onzekerheid van de verdelingsparameters, die bij de gewichtsbepaling een belangrijke rol kan spelen, is hier nog niet in beschouwing genomen. De methode is op dat punt nog in ontwikkeling.

In variant 4 wordt ook een extra verdelingsfunctie in beschouwing genomen. Naast de genoemde verdelingen in tabel 3.3 is er namelijk nog een verdelingsfunctie die past in het attractiegebied van de Gumbelverdeling en die daarmee ook geschikt is om te gebruiken als basis voor het extrapoleren van de meetreeks: dit is de Rayleigh verdeling. Het in beschouwing nemen van de Rayleigh verdeling is net als de Bayesiaanse analyse, een uitbreiding ten opzichte van Boertien II. Daarom worden de resultaten in een aparte variant in beeld gebracht, variant 4.

Ook voor variant 4 wordt per herhalingstijd een 95%-betrouwbaarheidsinterval bepaald. In vergelijking met de varianten 1, 2 en 3 wordt het interval rond de Rayleigh verdeling erbij betrokken voor de herhalingstijden groter dan 25 jaar en wordt een gewogen gemiddelde bepaald.

#### *Werklijn*

Voor het bepalen van de afvoer  $Q$  voor een willekeurige herhalingstijd  $T$  tussen 2 en 10.000 jaar wordt een functie afgeleid tussen deze beide grootheden. Uit het Boertien II onderzoek is gebleken dat één functie voor het gehele genoemde bereik leidt tot relatief grote fouten. Daarom wordt een samengestelde functie afgeleid, die bestaat uit twee logaritmische regressielijnen van de vorm

$$Q = a * \ln(T) + b,$$

waarbij  $Q$  de afvoer,  $T$  de herhalingstijd en  $a$  en  $b$  de parameters die gefit moeten worden. Voor de varianten 1, 2 en 3 wordt een werklijn afgeleid op basis van de resultaten met het gemiddelde van de verschillende verdelingen; voor variant 4 op basis van een gewogen gemiddelde. Op dezelfde wijze kan ook een 95%-betrouwbaarheidsinterval rond de werklijn worden bepaald. De werklijn zelf kan pas worden bepaald, nadat een keuze voor de hoogte van de maatgevende afvoer is gemaakt.

### **3.3.2 Resultaten**

#### *Variant 1*

In sectie 3.3.1 zijn de vier varianten beschreven, alsmede de methodiek waarmee de 1/1250 afvoer wordt bepaald. De 1/1250 afvoer volgens variant 1 is het resultaat van de verlenging van de meetreeks tot en met hydrologisch jaar 1998, waarbij is uitgegaan van afvoerpieken en niet van 8-uur waarden of daggemiddelden. Tabel 3.4 geeft de resultaten voor de verschillende verdelingen. Figuur 3.1 toont de resulterende afvoer en het bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval. Uitgaande van een middeling van de resultaten van de verschillende verdelingen komt de 1/1250 afvoer voor variant 1 uit op 15.590 m<sup>3</sup>/s. Voor het 95%-betrouwbaarheidsinterval geldt een 2,5%-ondergrens van 12.730 m<sup>3</sup>/s en een 97,5%-bovengrens van 18.570 m<sup>3</sup>/s.

In het Boertien I onderzoek is een 1/1250 afvoer van 14.500 m<sup>3</sup>/s vastgesteld. De uiteindelijke maatgevende afvoer is door Boertien I op 15.000 m<sup>3</sup>/s berekend door de correctie van 500 m<sup>3</sup>/s voor de Oberrheinkanalisisatie. De verhoging naar 15.590 m<sup>3</sup>/s wordt veroorzaakt door de verlenging van de reeks, en met name door de hoogwaters van december 1993 en januari 1995 die extra punten in het hoge bereik leveren. Direct na het hoogwater

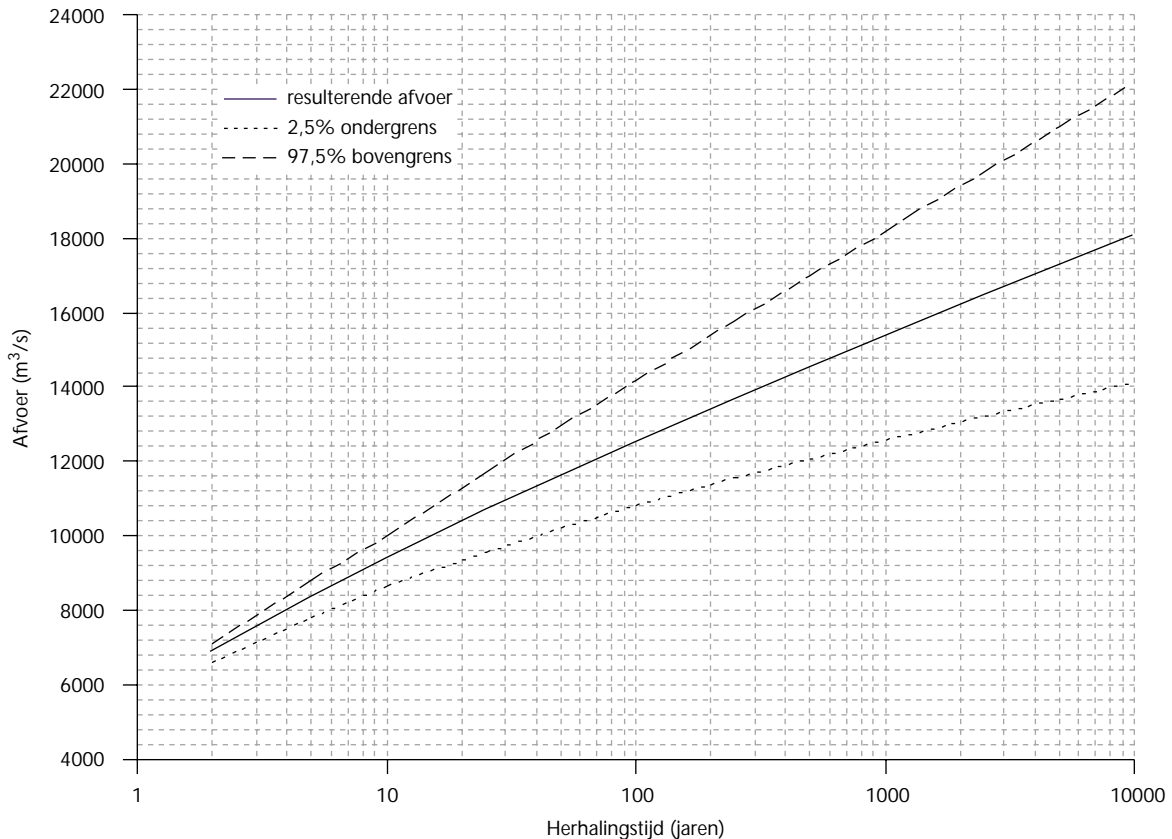
van 1995 is ook een herberekening gemaakt van de 1/1250 afvoer. Die kwam toen (niet gecorrigeerd voor rivierwerken in Duitsland) uit op 15.522 m<sup>3</sup>/s (WL, 1995). De huidige waarde ligt hoger, hetgeen met name wordt veroorzaakt door het feit dat in dit onderzoek gebruik is gemaakt van afvoerpieken in plaats van 8-uur of daggemiddelde waarden. Daarnaast speelt mee dat de meetreeks tot en met hydrologisch jaar 1998 in beschouwing is genomen.

Tabel 3.4  
Resultaten statistische verdelingen voor variant 1, meetreeks van afvoermaxima tot en met 1998 (WL, 1999a)

Herhalings- tijd [jaren]	Pearson III	3-par log- normaal	Gumbel (Q <sub>0</sub> = 7000)	Gemiddeld	Pareto (LP=5778)	Resulterende afvoer	95%-betrouwbaar- heidsinterval	
							onder- grens	boven- grens
2	-	-	-	-	6.873	6.870	6.620	7.130
5	-	-	-	-	8.294	8.290	7.800	8.790
10	-	-	-	-	9.342	9.340	8.650	10.030
25	10.619	10.569	10.683	10.624	10.692	10.660	9.570	11.730
50	11.504	11.444	11.753	11.567	-	11.570	10.210	12.950
100	12.334	12.271	12.816	12.474	-	12.470	10.820	14.180
250	13.371	13.310	14.214	13.632	-	13.630	11.550	15.780
500	14.119	14.066	15.271	14.485	-	14.490	12.080	16.980
1000	14.843	14.801	16.326	15.323	-	15.320	12.580	18.190
1250	15.071	15.035	16.666	15.591	-	15.590	12.730	18.570
2500	15.769	15.750	17.721	16.413	-	16.410	13.210	19.780
5000	16.448	16.453	18.776	17.226	-	17.230	13.670	20.980
10000	17.113	17.145	19.830	18.029	-	18.030	14.110	22.180

Q<sub>0</sub> = ondergrens toegepast voor betreffende verdeling (m<sup>3</sup>/s)  
LP = locatieparameter Pareto-verdeling (m<sup>3</sup>/s)

Figuur 3.1  
Resulterende afvoer en 95%-betrouwbaarheidsinterval behorende bij variant 1, meetreeks van afvoermaxima tot en met 1998



Tabel 3.5

Resultaten statistische verdelingen voor variant 2, meetreeks afvoermaxima tot en met 1998 (WL, 1999a)

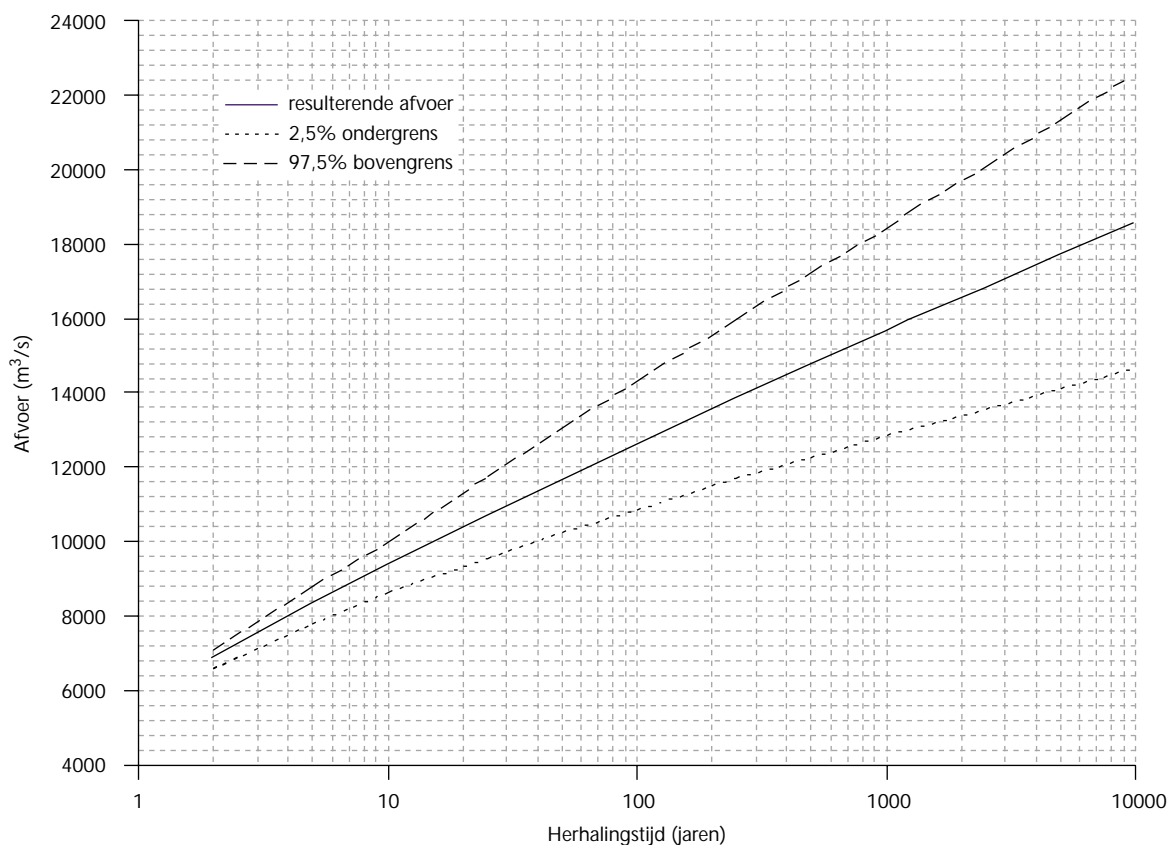
Herhalings-tijd [jaren]	Pearson III	3-par log-normaal	Gumbel (Q <sub>0</sub> =7000)	Exponentieel (Q <sub>0</sub> =5778)	Gemiddeld	Pareto (LP=5778)	Resulterende afvoer	95%-betrouwbaarheidsinterval	
								ondergrens	bovengrens
2	-	-	-	-	-	6.873	6.870	6.620	7.130
5	-	-	-	-	-	8.294	8.290	7.800	8.790
10	-	-	-	-	-	9.342	9.340	8.650	10.030
25	10.619	10.569	10.683	10.774	10.661	10.692	10.680	9.560	11.780
50	11.504	11.444	11.753	11.850	11.638	-	11.640	10.250	13.050
100	12.334	12.271	12.816	12.926	12.587	-	12.590	10.890	14.310
250	13.371	13.310	14.214	14.349	13.811	-	13.810	11.700	15.970
500	14.119	14.066	15.271	15.425	14.720	-	14.720	12.290	17.220
1000	14.843	14.801	16.326	16.501	15.618	-	15.620	12.860	18.460
1250	15.071	15.035	16.666	16.848	15.905	-	15.910	13.040	18.870
2500	15.769	15.750	17.721	17.924	16.791	-	16.790	13.590	20.110
5000	16.448	16.453	18.776	19.000	17.669	-	17.670	14.130	21.360
10000	17.113	17.145	19.830	20.075	18.541	-	18.540	14.660	22.600

Q<sub>0</sub> = ondergrens toegepast voor betreffende verdeling (m<sup>3</sup>/s)

LP = locatieparameter Pareto-verdeling (m<sup>3</sup>/s)

Figuur 3.2

Resulterende afvoer en 95%-betrouwbaarheidsinterval behorende bij variant 2, meetreeks van afvoermaxima tot en met 1998



### Variant 2

De 1/1250 afvoer in variant 2 wordt bepaald op basis van dezelfde meetreeks als gebruikt voor variant 1, maar met toepassing van de exponentiële verdeling op basis van de partiële serie. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3.5. Figuur 3.2 toont de resulterende afvoer en het bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval. De 1/1250 afvoer volgens variant 2 wordt berekend op 15.910 m<sup>3</sup>/s, met een 2,5% ondergrens van 13.040 m<sup>3</sup>/s en een 97,5% bovengrens van 18.870 m<sup>3</sup>/s. De verhoging ten opzichte van variant 1 kan toegerekend worden aan het in beschouwing nemen van de exponentiële verdeling.

### Variant 3

De basis voor variant 3 wordt gevormd door de voor de toestand 1977 gehomogeniseerde meetreeks en de verdelingsfuncties zoals door Boertien II zijn gebruikt. Ten opzichte van de oorspronkelijke meetreeks liggen de gehomogeniseerde afvoermaxima voor de periode 1901 tot 1977 hoger (zie ook sectie 3.2.1).

De 1/1250 afvoer volgens variant 3 bedraagt 16.070 m<sup>3</sup>/s, met een 2,5% ondergrens van 13.230 m<sup>3</sup>/s en een 97,5% bovengrens van 18.980 m<sup>3</sup>/s, zie tabel 3.6. De verhoging ten opzichte van variant 2 is een gevolg van de homogenisatie en de daaruit resulterende hogere afvoermaxima voor de periode tot 1977. Het resultaat van de frequentieanalyse met verschillende verdelingen is grafisch weergegeven in (WL, 1999a).

Tabel 3.6

Resultaten statistische verdelingen voor variant 3, gehomogeniseerde reeks afvoermaxima voor de toestand 1977 (WL, 1999a)

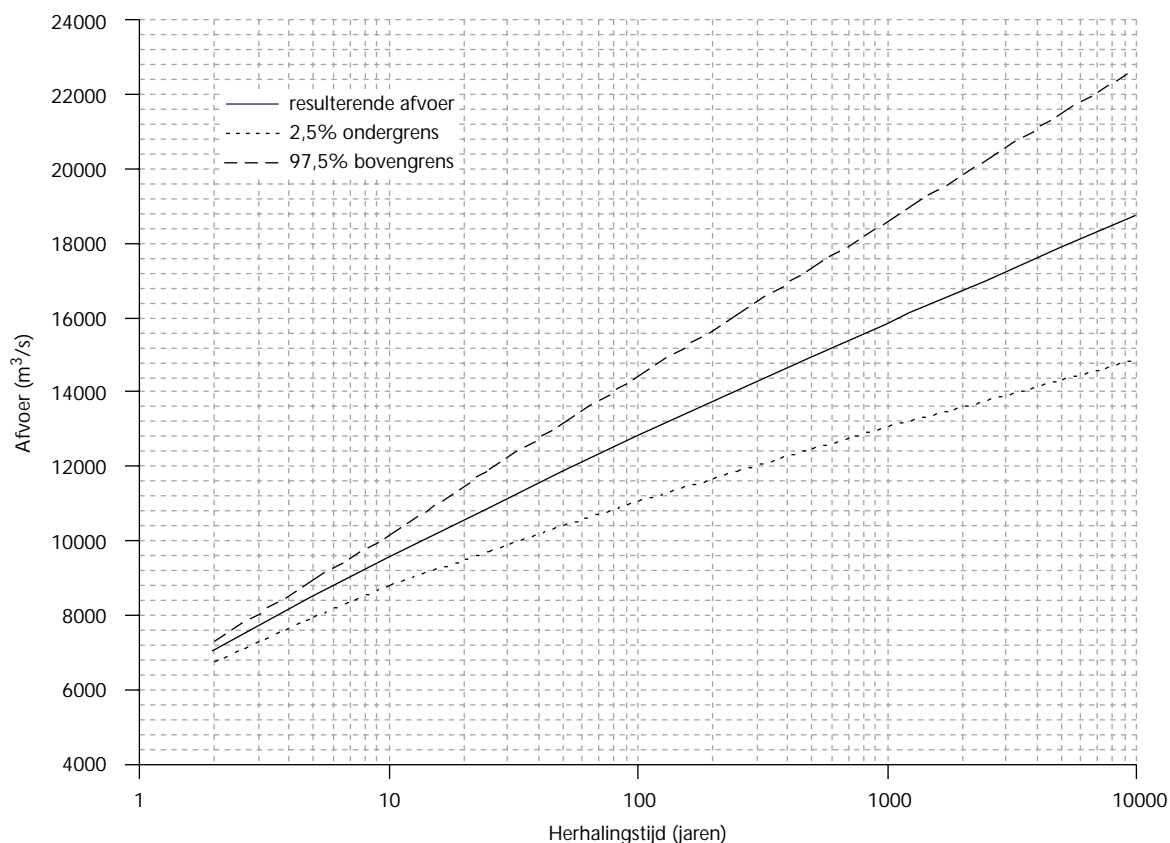
Herhalings- tijd [jaren]	Pearson III	3-par log- normaal	Gumbel (Q <sub>0</sub> =7000)	Exponentieel (Q <sub>0</sub> =5912)	Gemiddeld	Pareto (LP=5912)	Resulterende afvoer	95%-betrouwbaar- heidsinterval	
								onder- grens	boven- grens
2	-	-	-	-	-	7.033	7.030	6.770	7.290
5	-	-	-	-	-	8.463	8.460	7.970	8.960
10	-	-	-	-	-	9.505	9.510	8.820	10.190
25	10.766	10.715	10.838	10.973	10.823	10.831	10.830	9.720	11.900
50	11.644	11.583	11.910	12.063	11.800	-	11.800	10.420	13.170
100	12.469	12.402	12.974	13.153	12.750	-	12.750	11.070	14.430
250	13.497	13.430	14.374	14.594	13.974	-	13.970	11.880	16.090
500	14.240	14.177	15.432	15.685	14.884	-	14.880	12.470	17.340
1000	14.957	14.904	16.488	16.775	15.781	-	15.780	13.050	18.580
1250	15.183	15.134	16.828	17.126	16.068	-	16.070	13.230	18.980
2500	15.873	15.840	17.885	18.216	16.954	-	16.950	13.780	20.220
5000	16.546	16.533	18.941	19.306	17.832	-	17.830	14.330	21.470
10000	17.205	17.215	19.997	20.396	18.703	-	18.700	14.860	22.710

Q<sub>0</sub> = ondergrens toegepast voor betreffende verdeling (m<sup>3</sup>/s)

LP = locatieparameter Pareto-verdeling (m<sup>3</sup>/s)

Figuur 3.3

Resulterende afvoer en 95%-betrouwbaarheidsinterval behorende bij variant 3, gehomogeniseerde reeks van afvoermaxima tot en met 1998



#### Variant 4

Variant 4 wijkt af van variant 3 wat betreft de gebruikte statistische analyse. De middeling van de resultaten van de verschillende verdelingen op basis van jaarmaxima wordt een gewogen middeling, waarbij de gewichten volgens een Bayesiaanse analyse zijn vastgesteld. Daarnaast wordt een extra verdeling gebruikt, de Rayleigh verdeling. De meetreeksen zoals gebruikt voor variant 3 zijn ook als basis voor variant 4 gebruikt. In tabel 3.7 zijn de gewichten voor de verschillende verdelingen weergegeven zoals uit de Bayesiaanse analyse volgen (Chbab, 1999). Het blijkt dat uitgaande van de verdelingen zoals door Boertien II zijn gebruikt, de log-normale verdeling het grootste gewicht krijgt. Wanneer ook de Rayleigh verdeling wordt meegenomen krijgt deze het grootste gewicht. Een groot gewicht betekent dat die verdeling de beste fit op de gebruikte datareeks geeft.

Conform Boertien worden in eerste instantie gelijke gewichten van respectievelijk 25% (analyse exclusief Rayleigh verdeling) en 20% (analyse inclusief Rayleigh verdeling) aan deze verdelingen toegekend; vervolgens worden de gewichten van de verdelingen toegepast op jaarmaxima bijgewerkt met de gewichten zoals deze gegeven zijn in tabel 3.7.

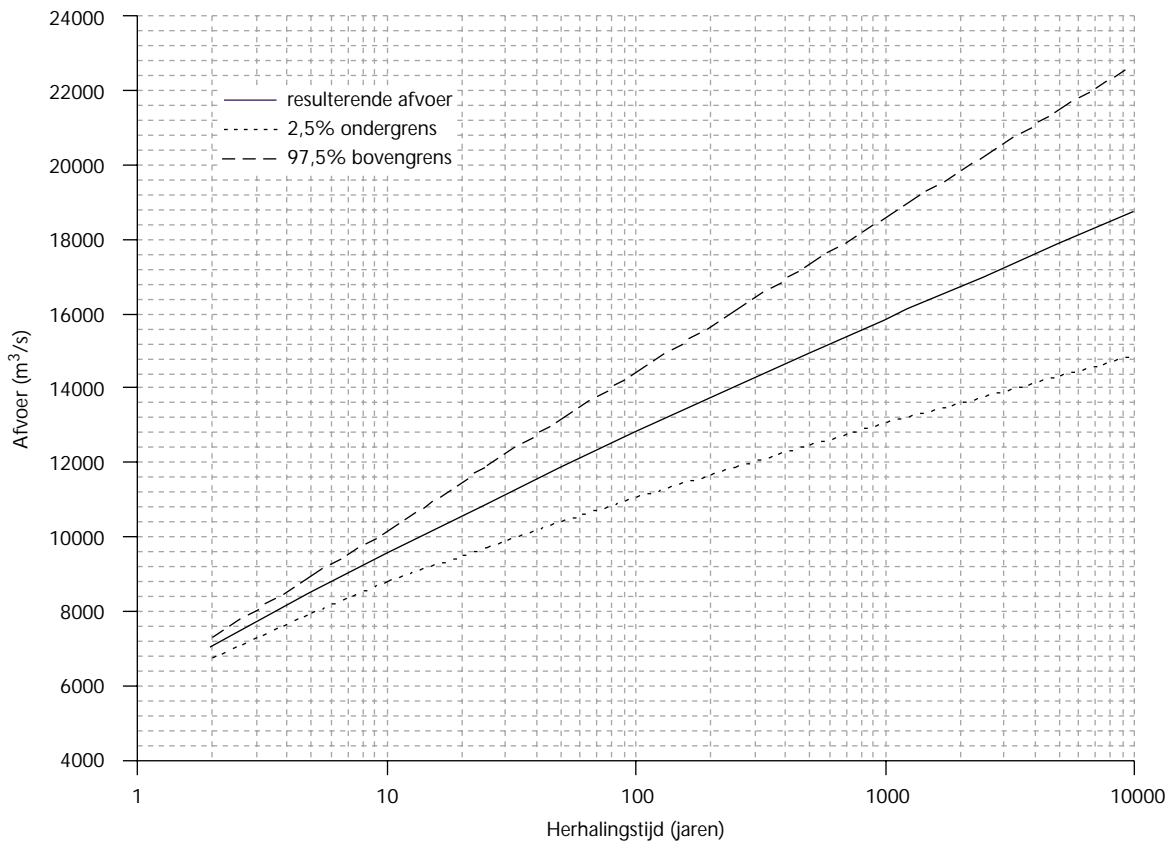
Tabel 3.7

Gewichten voor de verschillende statistische verdelingsfuncties, volgend uit Bayesiaanse analyse voor de Rijn bij Lobith (Chbab, 1999)

Verdeling	Gewicht (exclusief Rayleigh verdeling)	Gewicht (inclusief Rayleigh verdeling)
Gumbel	32%	15%
Pearson-III	33%	15,5%
Log-normaal	35%	16,5%
Rayleigh	-	53%

Figuur 3.4

Resultierende afvoer en 95%-betrouwbaarheidsinterval behorende bij variant 4, gehomogeniseerde meetreeks van afvoermaxima voor de toestand 1977 en met gebruikmaking van Bayesiaanse analyse en de Rayleigh verdeling



Tabel 3.8 geeft de resultaten inclusief de Rayleigh verdeling voor de verschillende herhalingstijden weer. De grenzen van het 95%-betrouwbaarheidsinterval zijn een gewogen gemiddelde op basis van de gewichten die in tabel 3.7 zijn weergegeven. Het gebruik van de Rayleigh verdeling in combinatie met Bayesiaanse analyse leidt tot een 1/1250 afvoer van 15.870 m<sup>3</sup>/s.

Tabel 3.8

Resultaten statistische verdelingen voor variant 4, gehomogeniseerde meetreeks van afvoermaxima voor de toestand 1977 en met gebruikmaking van Bayesiaanse analyse en de Rayleigh verdeling (WL, 1999a; Chbab, 1999)

Herhalings-tijd [jaren]	Pearson III	3-par log-normaal	Gumbel (Q <sub>0</sub> = 7000)	Rayleigh	Exponentieel (Q <sub>0</sub> = 5912)	Gewogen gemiddeld	Pareto (LP = 5912)	Resultierende afvoer	95%-betrouwbaarheidsinterval	
									ondergrens	bovengrens
2	-	-	-	-	-	-	7.033	7.030	6.770	7.290
5	-	-	-	-	-	-	8.463	8.460	7.970	8.960
10	-	-	-	-	-	-	9.505	9.510	8.820	10.190
25	10.766	10.715	10.838	11.121	10.973	10.956	10.831	10.830	9.720	11.900
50	11.644	11.583	11.910	12.028	12.063	11.914	-	11.920	10.650	13.190
100	12.469	12.402	12.974	12.856	13.153	12.821	-	12.820	11.340	14.320
250	13.497	13.430	14.374	13.861	14.594	13.967	-	13.970	12.190	15.770
500	14.240	14.177	15.432	14.567	15.685	14.802	-	14.800	12.800	16.840
1000	14.957	14.904	16.488	15.234	16.775	15.615	-	15.620	13.390	17.880
1250	15.183	15.134	16.828	15.443	17.126	15.872	-	15.870	13.580	18.220
2500	15.873	15.840	17.885	16.067	18.216	16.661	-	16.660	14.140	19.250
5000	16.546	16.533	18.941	16.665	19.306	17.434	-	17.440	14.680	20.260
10000	17.205	17.215	19.997	17.204	20.396	18.193	-	18.200	15.210	21.260

Q<sub>0</sub> = ondergrens toegepast voor betreffende verdeling (m<sup>3</sup>/s)

LP = locatieparameter Pareto-verdeling (m<sup>3</sup>/s)

---

### 3.4 Effectiviteit van maatregelen

#### 3.4.1 Methodiek

Om de afvoerverhogende effecten van de Oberrheinkanalisatie teniet te doen zijn retentiegebieden gepland en deels reeds aangelegd langs de Oberen Mittelrhein. Langs de Niederrhein zijn ook retentiegebieden gepland om de hoogwaterbescherming te verbeteren. De effecten van de in de huidige situatie reeds aanwezige en toekomstige maatregelen zijn voor de hoogwaters vanaf 1901 berekend in het kader van het homogeniteitsonderzoek (Lammersen *et al.*, 1999). Uit deze berekeningen blijkt dat er nog een rest-effect van de Oberrheinkanalisatie overblijft. De effectiviteit van de maatregelen is naar verwachting echter groter bij extremere hoogwaters dan in de meetreeks vanaf 1901 voorkomen. Daarnaast is een interessante vraag of bij de zeer extreme hoogwaters, zoals ons 1/1250 maatgevend hoogwater, de retentiebekkens niet vroegtijdig gevuld zijn, waardoor het effect op de afvoertop juist kleiner is.

De analyses met de meetreeks vanaf 1901 geven op deze vragen geen antwoord. Daarom is ervoor gekozen om op basis van modelhoogwaters in combinatie met het hydrologische model SYNHP en het hydrodynamische model SOBEK een inschatting te maken van de effectiviteit van de maatregelen voor afvoeren met herhalingstijden tot 1250 jaar.

Een modelhoogwater wordt gedefinieerd als: *een mogelijke hoogwatersituatie in het stroomgebied die leidt tot een afvoer van een bepaalde omvang bij een bepaald meetpunt*, bijvoorbeeld behorend bij herhalingstijden van 200, 500, 1000 en 1250 jaar. De modelhoogwaters moeten de verschillende mogelijkheden wat betreft de genese van hoogwaters in beeld brengen. Dit is van belang voor de effectiviteit van de maatregelen. Voor een hoogwater dat hoofdzakelijk uit het zuiden komt is deze effectiviteit veel groter dan voor een hoogwater dat het zwaartepunt in het midden van het stroomgebied heeft.

#### 3.4.2 Samenstellen van modelhoogwaters

Modelhoogwaters kunnen op verschillende manieren worden samengesteld. Een methode die op dit moment in ontwikkeling is, betreft het toepassen van een hydrologisch/hydraulisch model in combinatie met een stochastische neerslaggenerator (Brandsma & Buishand, 1997; Parmet & van Bennekom, 1998; BfG, 1999; Parmet *et al.*, 1999). Een andere mogelijkheid is het in de tijd verschuiven van afvoerplekken van zijrivieren, zodat afvoergolven op een andere manier samenkomen en hogere afvoeren in de Rijn veroorzaken dan tot nu toe zijn opgetreden. Om dit goed te onderbouwen is inzicht nodig in de mogelijke weerkundige situaties, en is in zekere zin ook zoets als een neerslaggenerator noodzakelijk. Een derde mogelijkheid betreft het verhogen van de opgetreden afvoeren van de zijrivieren met een factor. De genese van het hoogwater wordt hierbij niet veranderd. Er vindt geen verschuiving van weerkundige patronen plaats. Wel wordt er van uitgegaan dat het tijdens de hoogwaterperiode harder heeft geregend, waardoor de afvoeren van de zijrivieren hoger oplopen. Deze laatste mogelijkheid is in het kader van dit onderzoek toegepast.

Door (Lammersen *et al.*, 1999) zijn op basis van een drietal karakteristieke hoogwaters wat genese betreft, modelhoogwaters gemaakt voor extreme afvoeren met herhalingstijden van 200, 500 en 1250 jaar bij meetpunt Rees. De verhogingsfactor is toegepast op de toevoer van de Rijn bij Basel en alle zijrivieren vanaf Basel. De factor is toegepast vanaf een bepaalde basisafvoer. Daarnaast is rekening gehouden met de afvoercapaciteit (fysische maxima) van de toevoerleidingen naar de Rijn (Lammersen *et al.*, 1999).

Als karakteristieke hoogwaters zijn gekozen het hoogwater van 1955, met het zwaartepunt in het zuiden, van 1988 met het zwaartepunt in het zuiden en het midden en 1995 met het zwaartepunt in het midden en het noorden. Deze hoogwaters zijn opgeschaald tot 13.300, 14.700 en 15.800 m<sup>3</sup>/s, volgens Lammersen *et al.*, (1999) overeenkomend met respectievelijk een 1/200, 1/500 en 1/1000 hoogwater bij Rees. Het opschalen gebeurt op iteratieve wijze, tot het gewenste afvoerniveau is bereikt. Het berekende 1/1000 hoogwater bij Rees komt dicht in de buurt van de 1/1250 afvoeren zoals dat in de verschillende varianten voor Lobith is berekend.

### 3.4.3 Berekeningen met modelhoogwaters

Om de effectiviteit van reeds aanwezige en geplande retentiemaatregelen langs de Rijn te onderzoeken zijn berekeningen met in totaal negen modelhoogwaters uitgevoerd. Op basis van deze modelhoogwaters zijn simulaties uitgevoerd voor de toestand in 1955, de toestand in 1977, de huidige en de geplande toestand. Bij het samenstellen van de modelhoogwaters is rekening gehouden met fysieke maxima van de zijleidingen. Bij de simulaties met de modelhoogwaters is ook rekening gehouden met de fysieke maxima van de Rijn zelf, althans voor zover bekend. Bij een afvoer van 5.400 m<sup>3</sup>/s bij Maxau en van 6.300 m<sup>3</sup>/s bij Worms treden overstromingen van het achterland op (Lammersen *et al.*, 1999). Langs de Niederrhein is geen rekening gehouden met fysieke maxima. Naar schatting ligt het fysiek maximum langs het bedijkte deel van de Niederrhein op zo'n 18.000 m<sup>3</sup>/s, gebaseerd op een ontwerpafvoer van 15.000 m<sup>3</sup>/s en één meter freeboard bij dijk aanleg, hetgeen aanmerkelijk hoger is dan de afvoeren waarmee is gerekend volgens de modelhoogwaters.

In (Lammersen *et al.*, 1999) zijn de rekenresultaten in detail weergegeven. De berekeningen waarin geen rekening is gehouden met overstromingen langs de Oberrhein geven aan dat de effectiviteit van de retentiemaatregelen ook bij zeer extreme hoogwaters groot is. De genese van de hoogwaters speelt hierin een belangrijke rol. Bij de modelhoogwaters die gebaseerd zijn op 1955 en 1988, en waarbij de toevoer vanuit de Oberrhein een belangrijke rol heeft gespeeld, zijn de retentiebekken langs de Oberrhein volledig gevuld en is het effect groot. Bij de modelhoogwaters die op 1995 zijn gebaseerd, waar de Oberrhein een kleine rol heeft gespeeld, zijn de bekkens slechts voor een beperkt deel gevuld en zijn de effecten relatief gering. In tabel 3.9 zijn de resultaten samengevat voor een afvoer van 15.800 m<sup>3</sup>/s bij Rees. De tabel laat zien dat het resteffect van de Oberrheinkanalisisatie voor hoogwaters als in 1955 en 1988 verwaarloosbaar klein is (enkele tientallen kubieke meters per seconde). Voor een hoogwater als in 1995 is het effect van de retentiebekken echter klein. Het resteffect dat overblijft is bijna even groot als de verhoging die optreedt door de Oberrheinkanalisisatie.

Tabel 3.9

Resultaten van berekeningen met modelhoogwaters gebaseerd op de hoogwaters van 1955, 1988 en 1995, voor een afvoer van 15.800 m<sup>3</sup>/s bij Rees. Er is geen rekening gehouden met fysieke maxima langs de Oberrhein (Lammersen *et al.*, 1999)

Modelhoogwater gebaseerd op hoogwater van:	Effect Oberrheinkanalisisatie (1977-1955) [m <sup>3</sup> /s]	Effect huidige retentiemaatregelen (huidig-1977) [m <sup>3</sup> /s]	Effect geplande retentiemaatregelen (gepland-1977) [m <sup>3</sup> /s]	Resterend effect (gepland-1955) [m <sup>3</sup> /s]
1955	+ 839	- 234	- 799	+ 40
1988	+ 834	- 311	- 807	+ 27
1995	+ 285	+ 9	- 17	+ 268

Wanneer wel rekening wordt gehouden met fysieke maxima bij Maxau en bij Worms, dan treden voor de modelhoogwaters gebaseerd op 1955 en 1988 forse overstromingen op. De afvoer van 15.800 m<sup>3</sup>/s bij Rees wordt dan ook niet bereikt, omdat door de overstromingen grote hoeveelheden



water in het Oberrhein gebied tijdelijk worden opgeslagen. Het effect van de overstromingen langs de Oberrhein voor de maximale afvoer bij Rees voor de verschillende modelhoogwaters is weergegeven in tabel 3.10. Voor het modelhoogwater gebaseerd op 1995 treden geen overstromingen op.

Tabel 3.10

Resultaten van berekeningen met modelhoogwaters gebaseerd op de hoogwaters van 1955, 1988 en 1995, voor een afvoer van 15.800 m<sup>3</sup>/s bij Rees. Er is wel rekening gehouden met fysische maxima langs de Oberrhein (Lammersen *et al.*, 1999)

Modelhoogwater gebaseerd op hoogwater van:	Afvoer bij Rees zonder overstroming Oberrhein (toestand 1977) [m <sup>3</sup> /s]	Effect van overstroming Oberrhein op afvoer bij Rees (toestand 1977) [m <sup>3</sup> /s]	Afvoer die bij Rees wordt bereikt bij overstroming Oberrhein (toestand 1977) [m <sup>3</sup> /s]
1955	15.790	- 2.000	13.790
1988	15.810	- 920	14.890
1995	15.810	0	15.810

Uit de analyse met de modelhoogwaters volgt dat voor hoogwaters die voor een belangrijk deel uit het zuiden komen, het effect van de Oberrhein-kanalisatie groot is. Echter, wanneer alle retentiebekkens zijn aangelegd is dit effect bijna geheel teniet gedaan. Indien rekening wordt gehouden met fysische maxima langs de Oberrhein is het niet waarschijnlijk dat een afvoer in de grootte orde van 16.000 m<sup>3</sup>/s de benedenloop van de Niederrhein bereikt, omdat in dat geval langs de Oberrhein aanzienlijke overstromingen optreden.

Voor een hoogwater dat het zwaartepunt in het midden en het noorden van het stroomgebied heeft, treden geen overstromingen op langs de Oberrhein. Dergelijke hoogwaters kunnen naar verwachting desondanks voor maatgevende omstandigheden zorgen langs de Niederrhein. De effecten van de Oberrheinkanalisatie zijn relatief gering voor deze hoogwaters, hetgeen echter eveneens geldt voor de effecten van de maatregelen. Het resteffect is in dezelfde orde van grootte als het effect van de Oberrhein-kanalisatie.

#### 3.4.4 Vergelijking met analyse Boertien I

De resultaten van de studie van (Lammersen *et al.*, 1999) ten aanzien van de consequenties van de Oberrheinkanalisatie en de effectiviteit van maatregelen wijken aanzienlijk af van de analyse die door Boertien I is gemaakt. Het Boertien I onderzoek had de resultaten van de Hochwasser-Studiengruppe (HSG, 1993) als basis. De simulaties van historische hoogwaters wijken niet sterk af van elkaar, maar de vertaling naar de 1/1250 situatie is echter heel verschillend.

Door Boertien I zijn de resultaten van de berekeningen met de representatieve hoogwaters middels statistische analyse geëxtrapoleerd naar een 1/1250 situatie. Hierbij zijn ook gegevens van hoogwaters van voor 1900 gebruikt, onder andere van het hoogwater 1882/1883 dat als gevolg van de Oberrheinkanalisatie maar liefst 1.880 m<sup>3</sup>/s hoger uit zou vallen. Op deze manier is het effect van de Oberrheinkanalisatie voor 1/1250 hoogwaters op 1.000 m<sup>3</sup>/s ingeschat. Het effect van de aanwezige retentie is op 350 m<sup>3</sup>/s en van de geplande retentie op 775 m<sup>3</sup>/s berekend. Uiteindelijk is een waarde van 500 m<sup>3</sup>/s voor aangenomen. Boertien I heeft de waarden van Keulen gebruikt zonder een vertaling naar Lobith te maken, heeft geen rekening gehouden met dijkdoorbraken (het hoogwater van 1882/1883 zou opnieuw tot overstromingen leiden langs de Oberrhein) en heeft geen inschatting gemaakt van het effect van verschillende geneses van hoogwaters in het Rijnstroomgebied.

In (Lammersen *et al.*, 1999) zijn modelhoogwaters afgeleid. Hiermee is er de mogelijkheid om het effect van verschillende hoogwatergeneses inzichtelijk te maken, rekening te houden met dijkdoorbraken en deze tot aan meetpunt Lobith door te rekenen. De verhoging als gevolg van de Oberrheinkanalisatie is ingeschat op 300 tot ongeveer 850 m<sup>3</sup> /s, afhankelijk van de genese. Het effect van de maatregelen is ingeschat op 20 tot 800 m<sup>3</sup>/s. Indien rekening wordt gehouden met dijkdoorbraken, kunnen hoogwaters met het zwaartepunt in het zuiden nooit tot extreme hoogwaters langs de Niederrhein leiden. Dit leidt tot de conclusie dat voor het effect van de Oberrheinkanalisatie en de genomen en geplande maatregelen uitgegaan moet worden van een hoogwater met het zwaartepunt in het midden en noorden van het stroomgebied. Voor deze hoogwaters (zoals bijvoorbeeld modelhoogwater 1995) zijn de effecten van maatregelen dusdanig gering dat de maatregelen vooralsnog buiten beschouwing kunnen worden gelaten voor de 1/1250 situatie.

### 3.5 Representativiteit meetreeks

Eén van de aannames bij het baseren van de maatgevende afvoer op een meetreeks van ongeveer 100 jaar en een overschrijdingsfrequentie van eens in de 1250 jaar, is dat de gebruikte meetreeks representatief is voor een veel langere periode. Om de representativiteit van de meetreeks te onderzoeken wordt gebruik gemaakt van informatie over historische hoogwaters. De frequentie van optreden van extreme hoogwaters in het verleden wordt vergeleken met de frequenties die volgen uit de extrapolatie met behulp van de statistische verdelingsfuncties. Omdat de historische reeks op een andere wijze tot stand is gekomen dan de meetreeks vanaf 1901, gaat het om een semi-kwantitatieve vergelijking. Deze vergelijking leidt dan ook niet tot een absoluut inzicht in de representativiteit van de meetreeks vanaf 1901. Het leidt wel tot inzicht in de vraag of de hypothese dat de meetreeks representatief is, verworpen moet worden.

Voor de Rijn is door de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied een onderzoek uitgevoerd naar beschikbare informatie van historische hoogwaters in het Rijnstroomgebied (CHR, 1995). Aangezien voor het Mittelrheingebied aanzienlijk meer gegevens voorhanden waren dan voor het overige deel van het stroomgebied heeft het onderzoek zich uiteindelijk geconcentreerd op dit deel van de Rijn. Middels beschrijvingen in oude documenten als stadskronieken en dagboeken, is voor de periode 800-1772 nagegaan wanneer hoogwaters hebben plaatsgevonden en tot welke hoogte het water in die gevallen is gekomen. Voor de jaren vanaf 1772 is gebruik gemaakt van gegevens van het meetstation in Keulen.

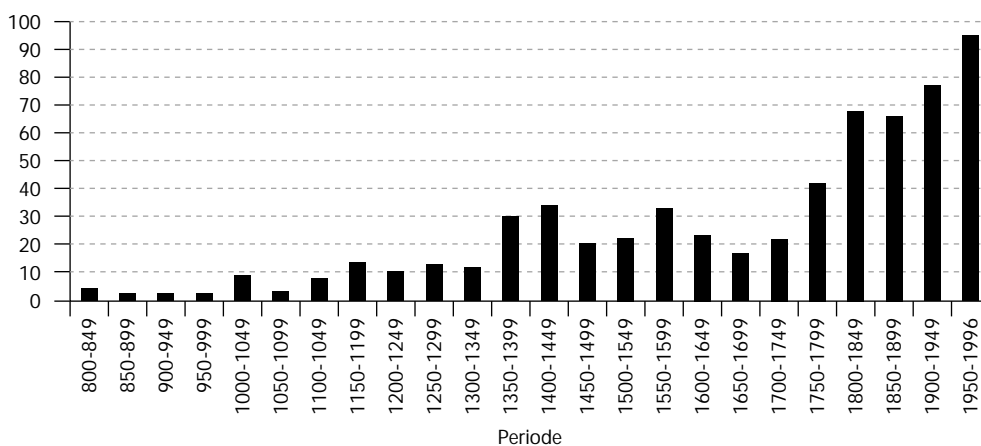
Op basis van de historische gegevens kan slechts een indicatie worden verkregen van de omvang van het hoogwater en daarom zijn de hoogwaters in een drietal klassen ingedeeld op basis van de geschatte waterhoogten. De gehanteerde klassen (meetstation Keulen) zijn weergegeven in tabel 3.11.

Tabel 3.11  
Klasseindeling voor historische hoogwaters van de Rijn bij Keulen (WL, 1999a)

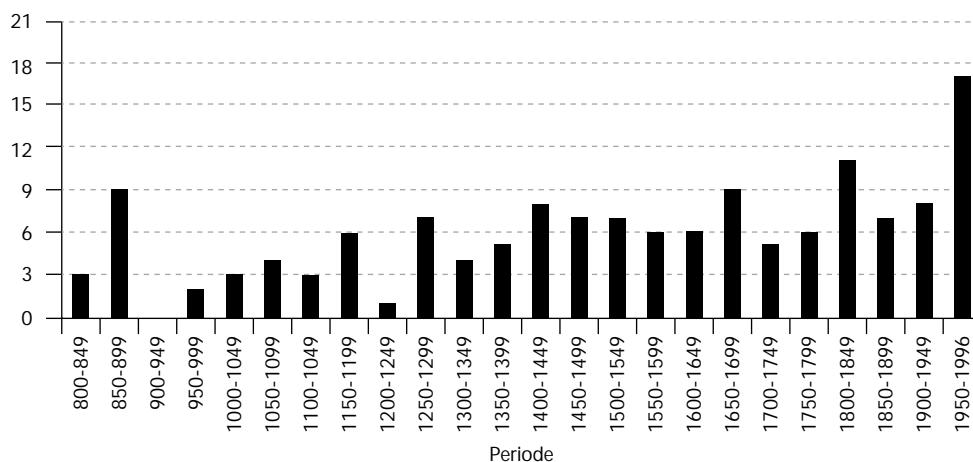
Klasse	Afvoer [m <sup>3</sup> /s]
1	4.000 - 7.000
2	7.000 - 9.000
3	> 9.000

In de figuren 3.5, 3.6 en 3.7 staan voor de drie gedefinieerde afvoerclassen de aantallen hoogwaters uitgezet tegen de tijd (over perioden van vijftig jaar). De figuren laten zien dat er voor piekafvoeren in de eerste klasse duidelijk een stijgende trend voor afvoeren in het verloop van de tijd waar te nemen is, terwijl dit voor piekafvoeren in de andere twee categorieën niet of nauwelijks het geval is. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat piekafvoeren van de laagste categorie relatief vaak voorkomen en relatief weinig schade veroorzaken, zodat deze hoogwaters in beduidend mindere mate gedocumenteerd zijn. De reeks van hoogwaters in deze klasse wordt daarom niet geschikt geacht en buiten de analyse van de representativiteit van de meetreeks gelaten. Daarnaast laten de figuren zien dat in de periode 1950-1996 voor alle drie de afvoerclassen opvallend veel meer hoogwaters waargenomen zijn dan in de voorgaande perioden van vergelijkbare tijdsduur.

**Figuur 3.5**  
Aantal hoogwaters met piekafvoer bij Keulen tussen 4.000 m<sup>3</sup>/s en 7.000 m<sup>3</sup>/s (WL, 1999a)

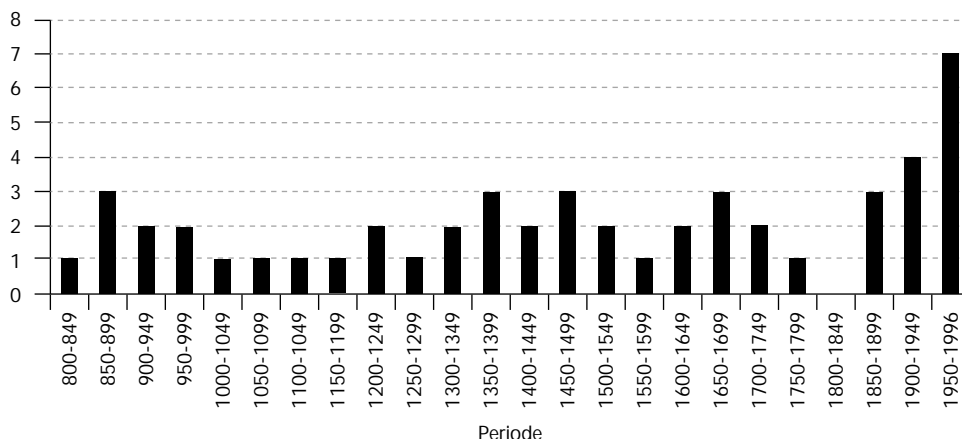


**Figuur 3.6**  
Aantal hoogwaters met piekafvoer bij Keulen tussen 7.000 m<sup>3</sup>/s en 9.000 m<sup>3</sup>/s (WL, 1999a)



Figuur 3.7

Aantal hoogwaters met piekafvoer bij Keulen groter dan 9000 m<sup>3</sup>/s (WL, 1999a)



Met de twee geschikt bevonden categorieën van afvoerreksen zijn herhalingstijden afgeleid voor historische afvoeren boven de 7.000 m<sup>3</sup>/s en boven de 9.000 m<sup>3</sup>/s, door de lengte van de periode te delen door de aantallen geobserveerde hoogwaters. Vergelijking van deze herhalingstijden met de herhalingstijden zoals afgeleid uit de meetreeks van Keulen vanaf 1901 middels frequentieanalyse geeft inzicht in de representativiteit van de meetreeks voor een langere periode. Tabel 3.12 geeft de herhalingstijden, waarbij voor de meetreeks ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval is gegeven.

Uit tabel 3.12 blijkt dat de herhalingstijden van de historische hoogwaters significant groter zijn dan de herhalingstijden van de meetreeks. In de periode 800-1996 zijn hoogwaters dus significant minder vaak gesignaleerd dan in de periode 1901-1996. Hieruit kan niet zondermeer de conclusie getrokken worden dat de reeks vanaf 1901 niet representatief is, want:

1. de gebruikte 95%-betrouwbaarheidsintervallen vormen slechts een indicatie van de werkelijke intervallen (ze zijn bepaald door resultaten van frequentieverdelingen te middelen);
2. de representativiteit van de klasse > 9.000 m<sup>3</sup>/s hoeft niet bepalend te zijn voor de representativiteit van extremere afvoeren (bijv. > 10.000 m<sup>3</sup>/s);
3. de reeks afvoeren vanaf 1901 is gebaseerd op metingen, de historische reeks grotendeels op oude documentatie. Het is mogelijk dat in de historische reeks hoogwaters ontbreken.

Tabel 3.12

Herhalingstijden te Keulen van historische hoogwaters (800-1996) en op basis van de verdelingen voor 1901-1996 (WL, 1999a)

Afvoerklasse [m <sup>3</sup> /s]	Reeks historische hoogwaters			Reeks 1901-1996	
	Aantal [-]	Herhalings-tijd [jaren]	Herhalingstijd volgens verde-lingen [jaren]	Ondergrens 95%-betrouwbaarheids-interval [jaren]	Bovengrens 95%-betrouwbaarheids-interval [jaren]
> 7.000	194	6,2	2,7	2,3	3,6
> 9.000	50	23,9	11,3	7,5	23,9

Vergelijking van de herhalingstijden gebaseerd op de meetreeks vanaf 1901 met herhalingstijden zoals afgeleid van de meetreeks bij Keulen voor de periode 1800-1899 laat zien dat voor deze periode de beide herhalingstijden van historische afvoeren buiten de 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de reeks 1901-1996 (zie tabel 3.13) liggen. Ook voor de periode 1800-1899 geldt dus dat er significant minder hoogwaters zijn waargenomen dan gedurende de periode 1901-1996. Derhalve kan geconcludeerd worden dat de piekafvoeren van hoogwaters in de periode 1901-1996 hoogst waarschijnlijk significant hoger zijn dan in de periode 800-1900. De reeks gemeten afvoeren voor 1901-1996 is derhalve niet representatief voor de periode 800-1996. Rivierwerken zullen hier hun invloed in hebben gehad, maar mogelijk ook al dan niet toevallige klimatologische verschillen en andere ingrepen die in het stroomgebied zelf hebben plaatsgehad. Gezien de belangrijke rol van de rivierwerken zal naar verwachting het verschil kleiner worden indien de historische gegevens zouden worden gehomogeniseerd voor de huidige situatie, en dan opnieuw de vergelijking wordt gemaakt met de periode vanaf 1901.

Tabel 3.13  
Vergelijking van herhalingstijden van historische hoogwaters uit de periode 1800-1899 enerzijds, en de periode 1901-1996 anderzijds (WL, 1999a)

Afvoerklasse [m <sup>3</sup> /s]	Periode 1800-1899			Periode 1900-1996	
	Aantal [-]	Herhalings- tijd [jaren]	Herhalingstijd volgens verde- lingen [jaren]	Ondergrens 95%- betrouwbaarheids- interval [jaren]	Bovengrens 95%- betrouwbaarheids- interval [jaren]
> 7.000	21	4,8	2,7	2,3	3,6
> 9.000	3	33,3	11,3	7,5	23,9

### 3.6 Onzekerheden

De vraagpunten rond de bepaling van de maatgevende afvoer kunnen worden gezien als bronnen van onzekerheden. Enerzijds gaat het daarbij om onzekerheden die direct gekoppeld kunnen worden aan de gebruikte methode, anderzijds betreft het onzekerheden die indirect met de methode samenhangen of gekoppeld kunnen worden aan toekomstige ontwikkelingen.

De onzekerheden die direct het gevolg zijn van de gebruikte methode worden op twee manieren inzichtelijk gemaakt. Het effect van het verschillend bewerken van de meetreeks en van het gebruik van verschillende statistische technieken komt tot uitdrukking in de vier varianten. Het effect van de methodiek van extrapolatie van een relatief korte meetreeks met behulp van statistische verdelingsfuncties, wordt uitgedrukt in een 95%-betrouwbaarheidsinterval (zie ook sectie 3.3).

In tabel 3.14 zijn deze intervallen voor de 1/1250 afvoer samengevat. De tabel geeft aan dat de bandbreedte als gevolg van de toegepaste tijdreeks en de statistische methode ongeveer 500 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Deze is een orde-grootte kleiner dan de onzekerheid als gevolg van het toepassen van een relatief korte meetreeks. De bandbreedte van het 95%-betrouwbaarheids-interval is bijna een factor 10 groter en bedraagt zo'n 5.000 m<sup>3</sup>/s. Ten opzichte van de 1/1250 afvoer ligt deze bandbreedte in de orde van 30%.

Tabel 3.14  
1/1250 afvoer en bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de vier varianten (WL, 1999a; Chbab, 1999)

Variant	1/1250 afvoer [m <sup>3</sup> /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval [m <sup>3</sup> /s]	Breedte van het interval [m <sup>3</sup> /s]
1	15.590	12.730 - 18.570	5.840
2	15.910	13.040 - 18.870	5.830
3	16.070	13.230 - 18.980	5.750
4	15.870	13.580 - 18.220	4.640

---

De statistische methode impliceert in het geval van de Rijn bij Lobith ook een indirecte onzekerheid. Dit betreft de effectiviteit van retentiemaatregelen die nu reeds beschikbaar zijn. De genese van de hoogwaters speelt hierin een belangrijke rol, maar die wordt in de statistische methode niet in beschouwing genomen. Deze onzekerheid speelt ook richting de toekomst ten aanzien van de nog te realiseren maatregelen. Door middel van simulaties met modelhoogwaters is getracht inzicht te krijgen in deze onzekerheden. Het belang van de genese van de hoogwaters wordt bevestigd door de simulaties. De ordegrrootte van de effecten van de Oberrheinkanalisation en van retentiemaatregelen voor extreme afvoeren kan worden afgeleid uit tabel 3.9. Uitgaande van een afvoer van 15.800 m<sup>3</sup>/s te Rees zijn de effecten maximaal in de orde van zo'n 5%. Indien wordt uitgegaan van fysische maxima langs de Rijn, blijkt dat alleen hoogwaters met het zwaartepunt in het midden en noorden van het stroomgebied tot extreme afvoeren van de orde 16.000 m<sup>3</sup>/s kunnen leiden. De effecten zijn daarom beperkt tot ongeveer 2%.

Voor de toekomst vormen veranderingen in het stroomgebied zelf een mogelijke bron van onzekerheid. In het kader van het Hoogwateractieplan Rijn zal veel gedaan worden om het waterbergend vermogen van het stroomgebied (de sponswerking) te vergroten. Echter, de effecten op de Niederrhein zijn gering als het gaat om extreme (1/1250) hoogwaters, omdat het stroomgebied dan al grotendeels verzadigd is.

Een andere belangrijke onzekere factor vormt een mogelijke verandering van het klimaat. Hiervoor zal worden uitgegaan van de beste schatting zoals die op dit moment beschikbaar is. Naar de huidige inzichten neemt de gemiddelde temperatuur op aarde in de komende decennia toe. Voor West-Europa is de beste schatting een stijging van de temperatuur met 1°C rond 2050 en met 2°C voor de periode rond 2100.

Voor de Rijn met zijn gemengde karakter (smelt- en regenwater) heeft klimaatverandering een dubbel effect. Een verhoging van de temperatuur zorgt ervoor dat minder neerslag in de vorm van sneeuw wordt opgeslagen en dat de sneeuw die valt eerder tot smelten komt. De Rijn zal meer het karakter van een regenrivier krijgen als de temperatuur gaat stijgen. Daarbij komt het effect van een eventuele verandering in de neerslag. In een uitgebreide studie (CHR, 1997) zijn op basis van verschillende klimaatscenario's de mogelijke effecten voor de Rijn vastgesteld. Deze resultaten zijn ook gebruikt bij de voorbereiding van de Vierde Nota Waterhuishouding (NW4, 1997). In de beste schatting voor 2050, die uitgaat van een temperatuurstijging van 1°C, nemen de extreme afvoeren van de Rijn toe met 5%. Voor het jaar 2100 is de beste schatting een toename van 10%.

Vergelijking van enerzijds de onzekerheden die inherent zijn aan de methode en anderzijds ontwikkelingen waarmee in de toekomst rekening moet worden gehouden (verwachte effectiviteit van maatregelen, alsmede klimatologische ontwikkelingen), geeft aan dat deze onzekerheden en de gevolgen van genoemde ontwikkelingen in dezelfde ordegrrootte liggen en aanzienlijk zijn.

De onzekerheid gekoppeld aan de methode ligt in de ordegrrootte van 15%, de verwachte veranderingen gekoppeld aan de effectiviteit van maatregelen ligt in de orde van 5% en voor de effecten van klimaatverandering is dat tussen de 5 en 10%.

---

## 4 De vorm van de maatgevende afvoergolf

---

### 4.1 Inleiding

Naast de hoogte van de maatgevende afvoer speelt ook de vorm van de afvoergolf een rol bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden. Afhankelijk van de duur van het hoogwater en de karakteristieken van de rivier, treedt een zekere mate van demping of afvlakking van de hoogwatergolf op. Naarmate het hoogwater korter aanhoudt en dus de golfvorm spitsier is en naarmate bergingscapaciteit en stromingsweerstand groter worden, wordt dit effect groter. Voor de Nederlandse Rijntakken is deze dempende werking vooral langs de IJssel, met zijn brede uiterwaarden, substantieel.

In het kader van dit onderzoek is een nieuwe methodiek ontwikkeld ter bepaling van de vorm van de maatgevende afvoergolf (Duits & Kok, 1998; HKV, 1999a; HKV, 1999b). Met behulp van een speciaal ontwikkelde applicatie kunnen naar wens golfvormen bij een gegeven topafvoer worden berekend (HKV, 1999c). De voorgestane methodiek wordt hierna toegelicht, vervolgens worden de resultaten gepresenteerd.

### 4.2 Methodiek

De vorm van de maatgevende afvoergolf moet worden afgeleid uit gemeten afvoergolven. Net als voor de hoogte van de maatgevende afvoer staat de meetreeks vanaf 1901 ter beschikking. De duur van de was, de duur van de golf als geheel en het volume van de afvoergolf zijn belangrijke kenmerken. Er wordt uitgegaan van afvoergolven met een maximaal afvoerniveau groter dan  $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Een afvoergolf begint als de afvoer een waarde van  $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$  overschrijdt en eindigt als de afvoer deze waarde weer onder-schrijdt. Als de tijdsperiode tussen twee afvoergolven 15 dagen of minder bedraagt en de afvoer is over de gehele periode groter dan de drempel-waarde  $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , dan worden deze afvoergolven als één en dezelfde afvoergolf beschouwd. Hoogwaters met een maximaal afvoerniveau kleiner dan  $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$  voegen weinig toe aan de extrapolatie van de kenmerken naar een  $1/1250$  afvoergolf en worden daarom niet gebruikt in de analyse.

In het onderzoek naar de bepaling van de golfvorm zijn op basis van de geselecteerde afvoergolven twee methoden toegepast. De methode zoals in het onderzoek van de commissie Boertien I en Boertien II is gebruikt en een methode voorgesteld door Duits & Kok (1998).

De methode Boertien I is gebaseerd op het via regressie afleiden van relaties tussen hoogte van de afvoer enerzijds en de duur van de was, de totale duur en de volumina van afvoergolven anderzijds. De regressievergelijkingen worden afgeleid uit kenmerken van de geselecteerde afvoergolven. Voor intervallen van  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  en vanaf een drempel van  $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$  worden de duur van de was, de duur van de totale golf en het volume vastgesteld bij de veronderstelde maximale afvoer van de betreffende golf. Per interval van  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  worden relaties afgeleid met behulp van regressie op basis van de kleinste kwadraten-methode. Daarbij wordt ook een 95%-betrouw-

---

baarheidsinterval bepaald. Op basis van regressiefuncties wordt de golfvorm voor de maatgevende afvoer vastgesteld en wordt een indicatie van het 95%-betrouwbaarheidsinterval gegeven.

De methode zoals voorgesteld door (Duits & Kok, 1998) is gebaseerd op het opschalen van opgetreden hoogwatergolven naar het niveau van de maatgevende afvoer. De gemeten afvoergolven met een maximale afvoer groter dan  $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$  uit de meetreeks vanaf 1901 vormen ook voor deze methode de basis. Het opschalen gebeurt door op ieder tijdstip de afvoer te vermenigvuldigen met de verhouding tussen de maatgevende afvoer en de piekafvoer van de betreffende afvoergolf. Uit deze populatie van afvoergolven met een maximum afvoer gelijk aan de maatgevende afvoer, kunnen de kenmerken als duur van de was, duur van de golf en het volume bepaald worden voor intervallen van  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Het gemiddelde van de kenmerken voor de golven geeft een gemiddelde maatgevende afvoergolf. Ook wordt een 95%-betrouwbaarheidsinterval afgeleid. Deze methode heeft als belangrijk voordeel dat, in tegenstelling tot de regressiemethode, ook in het hoge afvoerbereik voldoende informatie beschikbaar is om goede relaties af te leiden.

### 4.3 Resultaten

#### *Regressiemethode*

Als de methodiek zoals die hiervoor is beschreven wordt toegepast op de meetreeks vanaf 1901, dan zijn 21 afvoergolven beschikbaar met een maximale afvoer groter dan  $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voor zover mogelijk zijn voor de analyse uurwaarden gebruikt. In geval slechts daggegevens beschikbaar waren, zijn deze gedisaggregeerd naar uurwaarden.

Op basis van de kenmerken per interval zijn lineaire verbanden afgeleid tussen de maximale afvoer en de duur van de was en van de golf als geheel. Voor het volume wordt uitgegaan van een niet-lineaire relatie tussen volume, totale duur en afvoermaximum. Tot een waarde van  $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$  kunnen de vergelijkingen afgeleid worden. Daarboven zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om een regressie-analyse te kunnen uitvoeren.

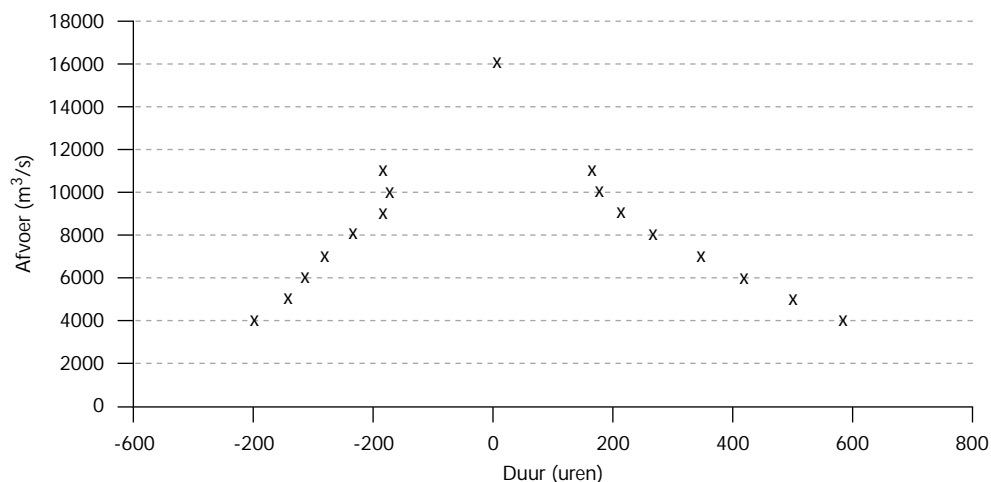
Via extrapolatie van de verkregen regressiefuncties tot een afvoerniveau van  $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$  kunnen in principe de duur van de was, de totale duur en het volume van de 1/1250 golf voor afvoeren groter dan  $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$  worden bepaald. Geconcludeerd moet echter worden dat deze extrapolatie tot een fysisch onmogelijk verloop leidt voor de vorm van de afvoergolf bij waarden boven  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$  (HKV, 1999a). Dit is zichtbaar gemaakt in figuur 4.1, welke toont dat de extrapolatie leidt tot een toenemende duur van de was boven het afvoerniveau van  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De regressiefunctie tussen de hoogte van een afvoergolf en de duur van de was is derhalve niet bruikbaar voor de vorm van de maatgevende afvoergolf boven  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Omdat de duur van de was en de totale duur gebaseerd zijn op slechts vijf afvoergolven wordt ook de extrapolatie bij een drempel van  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$  niet gebruikt. De vorm van de afvoergolf boven de drempel van  $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$  zal via een andere methode vastgesteld moeten worden. Hiertoe is de mogelijkheid onderzocht om de opschalingsmethode te gebruiken. Deze heeft als voordeel dat de golfvorm niet op basis van één enkele waargenomen afvoergolf gebaseerd hoeft te worden.



Figuur 4.1

Verwachte duren van was en val voor een maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith op basis van regressie (HKV, 1999a)



#### Opschalingsmethode

De eerste stap in deze methode is de opschaling van de 21 beschikbare afvoergolven naar fictieve afvoergolven met een piekafvoer van bijvoorbeeld 16.000 m<sup>3</sup>/s. Dit gebeurt door de verhouding van de fictieve piekafvoer en de werkelijk opgetreden piekafvoer te bepalen en vervolgens alle afvoerwaarden voor de betreffende golf te vermenigvuldigen met deze verhouding. Een gering aantal gemeten afvoergolven moet voor deze procedure worden aangepast om twee verschillende afvoergolven van elkaar te splitsen, omdat de gemeten afvoer dusdanig lang op een hoog afvoerniveau blijft dat in geval van opschaling een onwerkelijk lange duur van de afvoergolf voor de lagere afvoerdrempels zou ontstaan. Na aanpassing van enkele gemeten afvoergolven worden de kenmerken van de maatgevende afvoergolf (duur van de was, totale duur en volume) voor iedere willekeurige drempel berekend uit de set van opgeschaalde afvoergolven (HKV, 1999a).

Een belangrijk voordeel van de opschalingsmethode is dat in het hoge afvoerbereik de kenmerken van de maatgevende afvoergolf direct kunnen worden berekend. Daarnaast kan de methode worden gehanteerd ter toetsing van de uitkomsten van de regressiemethode.

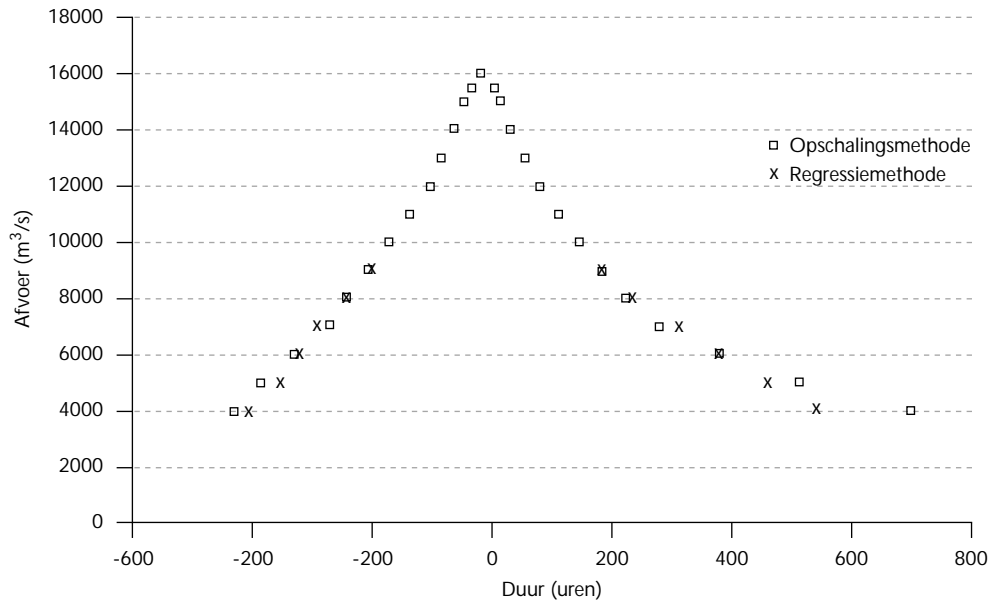
Figuur 4.2 toont het resultaat van de opschalingsmethode, waarbij in het afvoerbereik van 4.000 m<sup>3</sup>/s tot 9.000 m<sup>3</sup>/s tevens het resultaat van de regressiemethode is ingetekend. In het betreffende bereik komen de resultaten van beide methoden goed overeen.

Met de opschalingsmethode kan voor de gehele afvoergolf ook een 95%-betrouwbaarheidsinterval berekend worden. Hiervoor is uitgegaan van een log-normale verdeling die de spreiding rond het gemiddelde voor de duur van de was en de duur van de golf het beste beschrijft. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval dat wordt afgeleid is erg ruim. Per afvoerniveau is het verschil in bijvoorbeeld de duur van de was en de totale duur tussen het 2,5%- en het 97,5%-percentiel ongeveer een factor 10. Deze grote spreiding is een maat voor de onzekerheid rond de golfvorm. Bijlage 3 geeft in tabelvorm de vorm van de maatgevende afvoergolf met een piekafvoer van

16.000 m<sup>3</sup>/s (HKV, 1999a). In figuur 4.3 wordt de nieuwe golfvorm getoond naast de opgeschaalde, tot op heden gehanteerde golfvorm (Rijkswaterstaat, 1968).

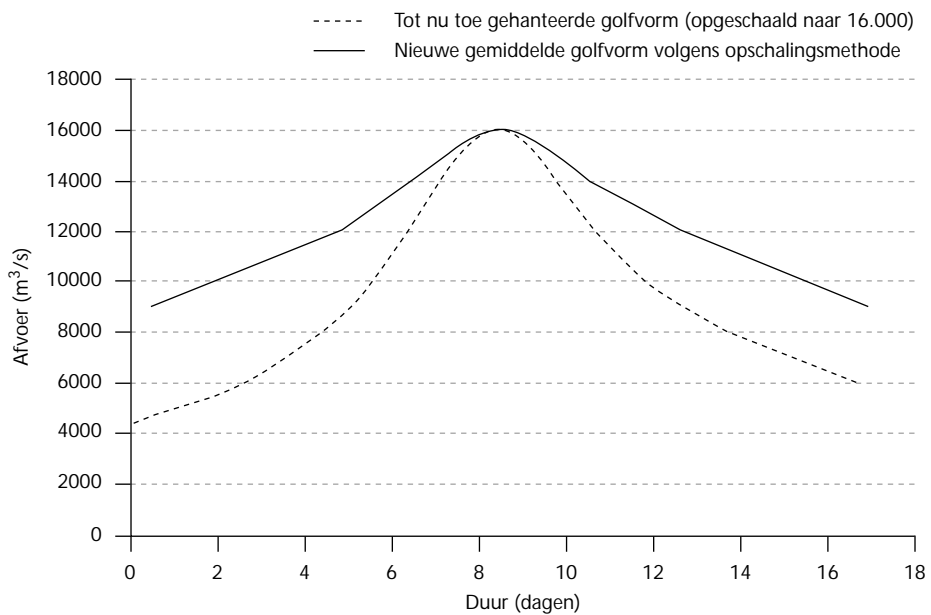
Figuur 4.2

Verwachte duren van was en val voor een maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith voor opschalingsmethode en regressiemethode (HKV, 1999a)



Figuur 4.3

Vormen van de maatgevende afvoergolf bij Lobith: de opgeschaalde, tot op heden gebruikte golfvorm vergeleken met de bredere gemiddelde golfvorm volgens de opschalingsmethode (HKV, 1999a)



---

# 5 Samenvatting en conclusies

---

## 5.1 Methodiek

In het kader van het randvoorwaardenboek 2001 wordt de maatgevende afvoer van onze grote rivieren opnieuw vastgesteld. Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek gericht op het vaststellen van de hoogte van de maatgevende afvoer en de vorm van de maatgevende afvoergolf voor de Rijn bij Lobith. De basis wordt gevormd door het onderzoek dat door de Commissie Boertien I is uitgevoerd, aangevuld met state-of-the-art kennis.

Ook bij toepassing van de state-of-the-art kennis kent de gebruikte methodiek een aantal vraagpunten. Deze betreffen de representativiteit van de meetreeks, de te gebruiken statistische verdelingsfuncties en de effecten van toekomstige veranderingen in bijvoorbeeld klimaat en het stroomgebied.

Deze vraagpunten zijn niet nieuw. De aanbevelingen van de Commissie Boertien I volgend, wordt voor de langere termijn gewerkt aan een nieuw instrumentarium. Een stroomgebiedsdekkend hydrologisch-hydraulisch model en een stochastische neerslaggenerator zijn momenteel in ontwikkeling. Statistiek en onzekerheden worden daarmee zoveel mogelijk bij de bron van de hoogwaters gelegd: de neerslag. De neerslaggenerator, die overigens ook temperatuur genereert, moet in staat zijn lange representatieve neerslagreeksen te genereren. Met behulp van het hydrologisch-hydraulisch model wordt deze neerslag in een homogene afvoerreeks bij Lobith vertaald. Dit instrumentarium biedt de mogelijkheid om de problemen met de lengte en de homogeniteit van de meetreeks aan te pakken en daarmee inzicht te geven in de geldigheid van bepaalde verdelingsfuncties. De neerslaggenerator moet ook inzicht geven in de mogelijke geneses van hoogwaters en daarmee ook in de vorm en duur van de maatgevende afvoergolf. Bovendien kunnen in de toekomst met behulp van de neerslaggenerator de effecten van verander(en)de klimaatomstandigheden in beeld worden gebracht.

## 5.2 Hoogte van de maatgevende afvoer

Voor dit onderzoek is het nieuwe instrumentarium nog niet beschikbaar en wordt voor de hoogte van de maatgevende afvoer nog uitgegaan van de methodiek van extrapolatie van de meetreeks op basis van statistische verdelingen. Vanwege de vraagpunten wordt niet één beste schatting gegeven, maar een viertal varianten. Deze varianten leveren in principe vier goede schattingen waarop de definitieve keuze kan worden gebaseerd. Bij de keuze moet ook het effect van de aanwezige en geplande retentiemaatregelen in beschouwing worden genomen. Dit effect is met behulp van modelhoogwaters onderzocht. De onzekerheden die het gevolg zijn van de gebruikte methode worden in een 95%-betrouwbaarheidsinterval tot uitdrukking gebracht. Daarnaast zijn onzekerheden voor toekomstige ontwikkelingen in beeld gebracht.

De eerste variant is een herberekening op basis van de methode zoals vastgesteld in het kader van het Boertien I onderzoek, gebruik makend van de jaarmaxima van momentane afvoeren, aangevuld met gegevens tot en met 1998. De 1/1250 afvoer op basis van deze variant bedraagt 15.590 m<sup>3</sup>/s. Dit is hoger dan de 14.550 m<sup>3</sup>/s die door de Commissie Boertien I is berekend, hetgeen het gevolg is van de toevoeging van de hoogwaters van december 1993 en januari 1995 aan de reeks en het feit dat gebruik is gemaakt van afvoermaxima. Dit laatste aspect en het feit dat de reeks tot en met 1998 is gehanteerd, verklaart ook waarom de waarde voor variant 1 ongeveer 70 m<sup>3</sup>/s hoger is dan direct na het hoogwater van 1995 is uitgerekend (WL, 1995).

Variant 2 gebruikt de statistische methodiek van Boertien II en de meetreeks van afvoermaxima tot en met 1998. De 1/1250 afvoer volgens variant 2 bedraagt 15.910 m<sup>3</sup>/s. Deze ligt hoger dan variant 1 als gevolg van het in beschouwing nemen van de exponentiële verdeling (en de partiële serie).

De gehomogeniseerde meetreeks bij Lobith voor de situatie na de Oberrheinkanalisatie vormt de basis voor variant 3. Omdat gebruik wordt gemaakt van een gehomogeniseerde meetreeks en de statistische methodiek van Boertien II wordt gebruikt, kan variant 3 als een Boertien II variant gekenschetst worden. De 1/1250 afvoer volgens variant 3 is berekend op 16.070 m<sup>3</sup>/s. Deze ligt wat hoger dan voor variant 2 is berekend, omdat de Oberrheinkanalisatie voor een afvoer verhoging zorgt, die doorwerkt in de 1/1250 afvoer. De nu bepaalde verhoging als gevolg van de Oberrheinkanalisatie ligt aanzienlijk lager dan door Boertien I vastgesteld.

De vierde variant maakt gebruik van dezelfde reeks als variant 3. Ten opzichte van het onderzoek van Boertien II is gebruik gemaakt van een extra verdeling, de Rayleigh verdeling. Daarnaast is Bayesiaanse statistiek toegepast, waarmee het mogelijk is een gewogen gemiddelde 1/1250 afvoer te berekenen. Variant 4 leidt tot een 1/1250 afvoer van 15.870 m<sup>3</sup>/s. Deze waarde ligt lager dan de berekende waarde voor variant 3. Dit ligt vooral aan het feit dat de Rayleigh verdeling een relatief lage 1/1250 afvoer genereert en deze verdeling in de Bayesiaanse analyse een groot gewicht (53%) krijgt. Variant 4 kent de smalste betrouwbaarheidsband.

In tabel 5.1 is een overzicht gegeven van de uitgangspunten per variant en de resulterende 1/1250 afvoer. In de tabel is ook het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval beschreven. De statistische bandbreedte ligt in de orde van grootte van 30% van de 1/1250 afvoer. Dit is een maat voor de huidige onzekerheid in deze afvoer.

Tabel 5.1

1/1250 afvoer, bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval en uitgangspunten voor de vier varianten (WL, 1999a; Chbab, 1999)

Variant	1/1250 afvoer [m <sup>3</sup> /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval [m <sup>3</sup> /s]	Breedte van het interval [m <sup>3</sup> /s]	Meetreeks	Statistiek
1	15.590	12.730 - 18.570	5.840	afvoermaxima meetreeks tot en met 1998	Boertien I
2	15.910	13.040 - 18.870	5.830	afvoermaxima meetreeks tot en met 1998	Boertien II
3	16.070	13.230 - 18.980	5.750	meetreeks gehomogeniseerd voor de toestand 1977	Boertien II
4	15.870	13.580 - 18.220	4.640	meetreeks gehomogeniseerd voor de toestand 1977	Boertien II, Rayleigh verdeling en Bayesiaanse analyse

---

De lengte van de meetreeks is een belangrijke oorzaak van de grote bandbreedte. De representativiteit van de meetreeks voor een langere periode is onderzocht. Uit een vergelijking met historische hoogwaters bij Keulen vanaf 800 volgt de veronderstelling dat de meetreeks vanaf 1901 niet representatief is voor een langere periode. De uitgevoerde rivierwerken spelen hierin naar verwachting een grote rol.

In de hier beschreven varianten is nog geen rekening gehouden met de effecten van reeds genomen en nog te nemen retentiemaatregelen langs de Rijn. Met behulp van simulaties met modelhoogwaters is een inschatting gemaakt naar de effectiviteit van de maatregelen voor extreme afvoeren. De effectiviteit is het grootst voor hoogwaters met het zwaartepunt in het zuiden. Indien rekening wordt gehouden met fysische maxima langs de bedijkte delen van de Rijn, leiden dergelijke hoogwaters echter niet tot hoge afvoeren in de Niederrhein, omdat in zo'n situatie dijken langs de Oberrhein overstromen.

Hoogwaters met het zwaartepunt in het midden en het noorden kunnen wel leiden tot extreme (1/1250) afvoeren in de Niederrhein. In dat geval treden nog geen grote overstromingen op. De effectiviteit van de maatregelen, die zich met name langs de Oberrhein bevinden, is klein voor dergelijke hoogwaters. Uitgaande van deze variatie in effectiviteit en de analyse dat maatgevende hoogwaters naar verwachting in het midden en noorden van het stroomgebied moeten ontstaan, leidt tot de conclusie dat de effectiviteit van retentiemaatregelen voorlopig niet afzonderlijk in beschouwing hoeft te worden genomen.

Richting de toekomst is klimaatverandering een belangrijke bron van onzekerheid. Volgens de huidige kennis hieromtrent, is een toename van extreme afvoeren tot 10% rond 2100 niet uit te sluiten. Ook zijn veranderingen in het stroomgebied zelf te verwachten. Deze zijn niet in rekening gebracht, omdat de effecten voor extreme afvoeren naar verwachting klein zijn.

### 5.3 De vorm van de maatgevende afvoergolf

Voor het vaststellen van de vorm van de maatgevende afvoergolf is gebruik gemaakt van twee methoden. De eerste methode is analoog aan de methode zoals die is toegepast in het onderzoek van de commissies Boertien I en Boertien II. Gemeten afvoergolven vormen de basis van waaruit regressiefuncties voor de duur van de was, de duur van de golf en het volume van de golf worden afgeleid. De tweede methode is gebaseerd op opschaling van gemeten afvoergolven. Deze methode heeft als voordeel dat er robuuste resultaten voor het gehele afvoerbereik beschikbaar zijn en dat er ook voor het hoge afvoerbereik, door de opschaling, voldoende gegevens zijn om relaties af te leiden. De methode biedt ook de mogelijkheid om een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de golfvorm af te leiden. Beide methoden geven vergelijkbare resultaten.

Vooraf het in het lagere afvoerbereik leidt de opschalingsmethodiek tot veranderingen in de golfvorm: een bredere basis van de golf is het resultaat. Een reden voor deze bredere basis is dat nu ook de afvoergolven van december 1993 en januari 1995 zijn betrokken bij de analyse. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval rond de golfvorm is groot. Het nieuwe instrumentarium zal mogelijk tot een betere onderbouwing leiden.

---

---

# Referenties

---

(BfG, 1999)

Mülders, R., Hydrological modelling in the river Rhine basin. Carried out in the cooperation framework Bundesanstalt für Gewässerkunde and Rijkswaterstaat RIZA. Koblenz, report BfG-1215, July 1999.

(Boertien I, 1993a)

Ministerie van verkeer en waterstaat, Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, deelrapport 2: maatgevende belastingen. Waterloopkundig Laboratorium en EAC-RAND, 1993.

(Boertien I, 1993b)

Ministerie van verkeer en waterstaat, Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, aanvullend deelrapport 2: werklijn Rijn en Maas. Waterloopkundig Laboratorium en EAC-RAND, 1993.

(Brandsma & Buishand, 1997)

Brandsma, T. & Buishand, T.A., Rainfall generator for the Rhine basin, single site generation of weather variables by nearest-neighbour resampling. KNMI publication 186-I. De Bilt, 1997.

(Burgdorffer & van den Brink, 1993)

Burgdorffer, M.C. & Brink, N.G.M. van den, De vorm van de MHW-afvoergolf. RIZA werkdocument 93.109X. Arnhem, mei 1993.

(Burgdorffer, 1993)

Burgdorffer, M.C., Topvervlakking op de Rijntakken bij een MHW-afvoer van 15.000 m<sup>3</sup>/s. RIZA werkdocument 93.110X. Arnhem, mei 1993.

(Chbab, 1999)

Chbab, H., Onderzoek 1/1250 jaar afvoer bij Borgharen en Lobith: Bayesiaanse analyse. RIZA werkdocument 2001.183x. Lelystad, november 2001.

(CHR, 1993)

CHR, Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. Berichtnr. II-8 der KHR. Koblenz/Lelystad, 1993.

(CHR, 1995)

CHR, Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. Berichtnr. II-9 der KHR. Koblenz/Lelystad, 1995.

(CHR, 1997)

CHR, Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. CHR-report no. I-16. Lelystad, December 1997.

---

(Duits & Kok, 1998)

Duits, M.T. & Kok, M., Analyse van de onzekerheid in de vorm van de afvoergolven bij Lobith. Notitie in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, januari 1998.

(van Haselen, 1999)

Haselen, C.O.G. van, Polders langs de Niederrhein. Rijkswaterstaat RIZA werkdocument 99.127X. Arnhem, 1999.

(HKV, 1999a)

Klopstra, D. & Duits, M.T., Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Rijn bij Lobith. HKV Lijn in Water in opdracht van WL|Delft Hydraulics en Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, november 1999.

(HKV, 1999b)

Klopstra, D. & Vrisou van Eck, N., Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Maas bij Borgharen. HKV Lijn in Water in opdracht van WL|Delft Hydraulics en Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, maart 1999.

(HKV, 1999c)

Klopstra, D. , Applicatie standaard afvoergolven Maas en Rijn. HKV Lijn in Water in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, september 1999.

(Homagk, 1985)

Homagk, P., Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein mit Hilfe von Mathematischen Modellen. In: 1. Wissenschaftliche Tagung "Hydrologie und Wasserwirtschaft, Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Maßnahmen", 18.-20. März 1985. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) Universität Karlsruhe.

(HSG, 1993)

Hochwasser-Studiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth, Der Einfluß des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln. Bericht: Auswirkung der Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein nach dem deutsch-französischen Vertrag von 1982. Mainz, Dezember 1992.

(HSK, 1978)

Hochwasser-Studienkommission für den Rhein, Schlußbericht (Basel-Worms). 1978.

(IRC, 1998)

Internationale Commissie ter bescherming van de Rijn, Hoogwater Actie Plan. Koblenz, 1998.

(Können, 1999)

Können, G. (1999), Persoonlijke communicatie, KNMI briefnr. 99004718. De Bilt, augustus 1999.

(Lammersen *et al.*, 1999)

Lammersen, R., Busch & N., Engel, H., Einfluß der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Bericht BfG-1221. Koblenz, Dezember 1999.



---

(NW4, 1997)

NW4, Klimaatverandering en bodemdaling: gevolgen voor de waterhuishouding van Nederland. NW4 werkgroep klimaatverandering en bodemdaling. Elshof *et al.*, juli 1997.

(Parmet, 1998)

Parmet, B.W.A.H., Projectplan werpakket A, nevenproject 'Maatgevende afvoeren Rijn, Maas en Vecht'. Rijkswaterstaat RIZA. Arnhem, april 1998.

(Parmet & van Bennekom, 1998)

Parmet, B.W.A.H. & Bennekom, A. van, Bemessungsabfluß in den Niederlanden; menschliche Einflüsse und andere Unsicherheiten. Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, 1998.

(Parmet *et al.*, 1999)

Parmet, B.W.A.H., Buishand T.A., Brandsma, T. & Mülders, R., Design discharge of the large rivers in the Netherlands, towards a new methodology. IAHS General Assembly, Birmingham 1999.

(Rijkswaterstaat, 1968)

Rijkswaterstaat, Nota 68.3, Vorm van de maatgevende hoogwatergolf op de Bovenrijn te Lobith (met 15 bijlagen). Directie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, 1968.

(Rijkswaterstaat, 1984)

Rijkswaterstaat, Nota 84.22, Mogelijke overstromingen in Duitsland en de gevolgen daarvan voor de maatgevende afvoer van de Rijn. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost. Arnhem, 1984.

(V&W, 1998)

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Vierde nota waterhuishouding: regeringsbeslissing. Den Haag, december 1998.

(WL, 1995)

Passchier, R.H., Herberekening werklijn Rijn en Maas 1995. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, februari 1995.

(WL, 1999a)

Lorenz, N.N. & Kwadijk, J.C.J., Onderzoek 1/1250 jaar afvoer bij Lobith. Representativiteit meetreeks, verdelingsfuncties en statistische extrapolatie. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, december 1999.

(WL, 1999b)

Passchier, R.H., Onderzoek 1/1250 jaar afvoer bij Lobith. Herberekening randvoorwaardenboek 2001 met verlengde series (tot en met 1998). WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, september 1999.

(WL, 1999c)

Diermanse, F.L.M., Beoordeling homogenisatie en invloed rivierwerken op de Rijnafvoeren. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, september 1999.

(WL, 1999d)

Kwadijk, J.C.J., Beoordeling effect klimaatverandering. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, september 1999.

---

---

# Bijlagen

---

---

## Bijlage 1 Selectie van historische hoogwaters (Lammersen *et al.*, 1999)

Ereignis			HSK (1978)	HSG Worms-Kaub (1985)	BfG (Busch, N. und Engel, H., 1987)	HSG Kaub-Rolandswerth (1993)	Aktuelle Untersuchung [Rang in der Hochwasserstatistik Köln 1901-1997]
Nr	Name	Zeitraum					
..	Nov/Dez 1882	22.11.82-5.12.82	X	X	X	X	
	1882/1883	23.12.82-20.1.83	X	X	X	X	
	Mrz 1896	4.3.96-30.3.96	X	X	X	X	
1	1918/1919	21.12.18-14.1.19	X	X	X	X	57
2	1919/1920	21.12.19-10.1.20	X	X	X	X	12
3	Jan 1920	10.1.20-30.1.20	X	X	X	X	4
4	Apr/Mai 1924	28.4.24-20.5.24	X	X	X	X	53
5	Okt/Nov 1924	30.10.24-17.11.24		X	X	X	10
6	1925/1926 Mai 1930	20.12.25-15.1.26	X	X	X	X	1
7	Nov/Dez 1930	16.11.30-9.12.30		X	X	X	16
8	Feb/März 1937	17.2.37-8.3.37		X	X	X	41
9	Jan/Feb 1941	20.1.41-9.2.41		X	X	X	20
10	Mrz 1942 Juni 1946	10.3.42-2.4.42 21.6.46-8.7.46		X	X	X	17
11	1947/1948	26.12.47-13.1.48	X	X	X	X	8
12	Jan 1948 Juli 1948	13.1.48-29.1.48	X	X	X	X	19
13	Mrz/Apr 1952	19.3.52-12.4.52		X	X	X	39
14	1952/1953 Juni/Juli 1953	15.12.52-4.1.53	X	X	X	X	27
15	Jan 1955	10.1.55-30.1.55	X	X	X	X	11
16	Mrz 1956	1.3.56-17.3.56	X	X	X	X	34
17	Feb/Mrz 1957	25.2.57-12.3.57	X	X	X	X	45
18	Feb 1958	5.2.58-22.2.58	X	X	X	X	24
19	Feb/Mrz 1958 Juni 1965	22.2.58-10.3.58	X	X	X	X	14
20	Dez 1965 Sept. 1968	3.12.65-25.12.65	X	X	X		30
21	Feb 1970	2.2.70-20-2.70	X	X	X		32
22	Feb/Mrz 1970	19.2.70-8.3.70	X	X	X		6
23	Mai 1970 Nov 1972	8.5.70-26.5.70	X	X	X		23
24	Feb 1977	5.2.77-18.2.77		X	X		76
25	Feb/Mrz 1977	19.2.77-8.3.77		X	X		47
26	Mai/Juni 1978	20.5.78-5.6.78		X	X		56
27	Feb 1980	31.1.80-20.2.80		X	X		13
28	1981/1982	29.12.81-21.1.82			X	X	18
29	Apr 1983	4.4.83-25.4.83			X	X	7
30	Mai/Juni 1983	20.5.83-8.6.83			X	X	5
31	Feb 1984	29.1.84-18.2.84			X	X	15
32	Mrz/Apr 1988	11.3.88-10.4.88				X	9
33	Feb 1990	11.2.90-28.2.90					26
34	1993/1994	1.12.93-31.1.94					3 + 21
35	Jan 95	11.1.95-1.3.95					2
	Weitere Hochwasser:						
	5 zwischen 1946 und 1955						X
	9 zwischen 1980 und 1986						X

## Bijlage 2 Reeks jaarmaxima en partiële reeks voor Lobith, meetreeks en voor 1977 gehomogeniseerde meetreeks voor 1901-1998

Tabel 2-1 Jaarmaxima van de Rijn bij Lobith van de hydrologische jaren 1901-1998 (WL, 1999a)	Jaar	Jaarmaxima (hydrologisch jaren van 1 oktober tot 30 september)	
		Waargenomen [m <sup>3</sup> /s]	Gehomogeniseerd, toestand 1977 (V1)
1901	4.824	5.058	
1902	5.480	5.715	
1903	5.845	6.081	
1904	3.500	3.731	
1905	6.460	6.697	
1906	5.885	6.121	
1907	4.824	5.058	
1908	5.865	6.101	
1909	6.630	6.868	
1910	6.397	6.634	
1911	5.335	5.570	
1912	5.165	5.400	
1913	7.555	7.794	
1914	6.250	6.487	
1915	6.980	7.218	
1916	7.525	7.764	
1917	7.805	8.045	
1918	7.125	7.364	
1919	11.465	11.712	
1920	2.800	3.030	
1921	6.110	6.347	
1922	6.265	6.502	
1923	6.780	7.018	
1924	9.374	9.617	
1925	12.600	12.849	
1926	5.245	5.480	
1927	6.510	6.747	
1928	5.509	5.744	
1929	4.576	4.809	
1930	9.105	9.347	
1931	5.844	6.080	
1932	4.444	4.677	
1933	2.905	3.135	
1934	5.855	6.091	
1935	5.895	6.131	
1936	7.390	7.629	
1937	5.012	5.246	
1938	5.960	6.196	
1939	8.635	8.877	
1940	7.940	8.180	
1941	8.520	8.761	
1942	3.220	3.451	
1943	3.725	3.957	
1944	8.640	8.882	
1945	9.170	9.413	
1946	5.990	6.226	
1947	9.890	10.134	
1948	2.790	3.020	
1949	4.444	4.677	
1950	6.650	6.888	
1951	7.190	7.429	
1952	7.630	7.870	
1953	3.365	3.596	
1954	9.545	9.788	
1955	7.630	7.859	
1956	6.940	7.156	
1957	9.270	9.480	
1958	5.310	5.502	
1959	3.255	3.433	
1960	5.652	5.823	
1961	5.790	5.951	
1962	3.607	3.754	

---

Jaar	Jaarmaxima (hydrologisch jaren van 1 oktober tot 30 september)	
	Waargenomen [m <sup>3</sup> /s]	Gehomogeniseerd, toestand 1977 (V1)
1963	5.274	5.423
1964	6.071	6.200
1965	7.443	7.562
1966	7.364	7.483
1967	7.380	7.478
1968	5.637	5.733
1969	9.850	9.928
1970	3.633	3.696
1971	2.228	2.280
1972	4.942	4.995
1973	4.005	4.037
1974	5.912	5.944
1975	3.459	3.469
1976	6.296	6.296
1977	6.373	6.373
1978	6.991	6.991
1979	8.839	8.839
1980	6.643	6.643
1981	7.960	7.960
1982	9.779	9.779
1983	8.720	8.720
1984	4.926	4.926
1985	6.212	6.212
1986	7.705	7.705
1987	10.300	10.378
1988	5.297	5.297
1989	7.069	7.113
1990	6.757	6.757
1991	5.401	5.401
1992	5.758	5.758
1993	11.100	11.100
1994	12.060	12.060
1995	4.112	4.112
1996	7.004	7.004
1997	3.912	3.912
1998	9.487	9.487

Tabel 2-2 Partiële reeks afvoeren van de Rijn bij Lobith: afvoerpieken boven 5000 m <sup>3</sup> /s met een zichtduur van 15 dagen, kalenderjaren vanaf 1901 tot september 1999 (WL, 1999a)	Afvoerpieken groter dan 5000 m <sup>3</sup> /s	
	Jaar	Waargenomen [m <sup>3</sup> /s]
1901	5.509	5.744
1901	5.676	5.912
1903	5.480	5.715
1904	5.845	6.081
1906	5.108	5.342
1906	6.460	6.697
1907	5.885	6.121
1909	5.865	6.101
1910	6.305	6.542
1910	6.356	6.593
1910	6.630	6.868
1910	5.230	5.465
1910	6.397	6.634
1912	5.335	5.570
1913	5.165	5.400
1914	5.539	5.774
1914	7.555	7.794
1915	6.250	6.487
1915	6.584	6.821
1916	6.980	7.218
1917	7.525	7.764
1918	7.805	8.045
1919	7.125	7.364
1919	5.311	5.546
1920	10.084	10.328
1920	11.465	11.712
1922	6.110	6.347
1923	5.615	5.851
1923	6.265	6.502
1923	5.570	5.805
1923	5.813	6.049
1924	6.780	7.018
1924	5.047	5.281
1924	9.374	9.617
1926	12.600	12.849
1926	6.148	6.385
1927	5.245	5.480
1927	5.154	5.389
1928	6.510	6.747
1928	5.509	5.744
1930	6.417	6.654
1930	5.230	5.465
1930	9.105	9.347
1931	5.935	6.171
1931	5.164	5.399
1931	6.082	6.318
1932	5.844	6.080
1935	5.855	6.091
1935	5.164	5.399
1935	5.600	5.835
1936	5.895	6.131
1936	5.189	5.424
1936	5.245	5.480
1937	7.390	7.629
1937	6.219	6.456
1939	5.960	6.196
1939	5.311	5.546
1939	6.397	6.634
1939	8.635	8.877
1940	6.873	7.111
1940	5.828	6.064
1941	7.940	8.180
1941	5.392	5.627
1942	8.520	8.761
1944	8.354	8.595
1945	8.640	8.882
1946	9.170	9.413
1947	5.990	6.226
1948	9.890	10.134
1948	6.914	7.152
1948	5.377	5.612
1950	6.148	6.385
1951	6.650	6.888
1952	5.154	5.389
1952	7.190	7.429



Jaar	Afvoerpieken groter dan 5000 m <sup>3</sup> /s	
	Waargenomen [m <sup>3</sup> /s]	Gehomogeniseerd, toestand 1977 (V1)
1952	5.646	5.882
1952	6.812	7.050
1952	7.630	7.870
1954	5.778	6.014
1955	9.545	9.788
1955	5.276	5.511
1956	7.630	7.859
1957	6.940	7.156
1958	9.270	9.480
1959	5.310	5.513
1961	5.652	5.823
1962	5.447	5.607
1962	5.790	5.951
1963	5.274	5.423
1965	6.071	6.200
1965	5.045	5.173
1965	5.093	5.221
1965	7.150	7.280
1966	7.443	7.562
1966	6.661	6.780
1966	7.364	7.483
1967	6.632	6.740
1967	6.430	6.538
1968	7.380	7.478
1968	5.637	5.733
1969	5.267	5.352
1970	9.850	9.928
1970	5.093	5.168
1970	7.373	7.449
1974	5.184	5.216
1974	5.912	5.944
1977	6.296	6.296
1978	6.090	6.090
1978	6.373	6.373
1979	5.476	5.476
1979	6.658	6.658
1979	6.991	6.991
1979	5.713	5.713
1980	8.839	8.839
1980	6.485	6.485
1981	5.610	5.610
1981	6.643	6.643
1981	6.121	6.121
1981	6.735	6.735
1982	7.960	7.960
1982	7.299	7.299
1982	7.186	7.186
1983	5.622	5.622
1983	9.397	9.397
1983	9.779	9.779
1984	5.221	5.221
1984	8.720	8.720
1984	5.371	5.371
1986	6.212	6.212
1986	5.794	5.794
1987	7.705	7.705
1987	7.075	7.075
1987	5.719	5.719
1988	5.200	5.200
1988	10.300	10.378
1988	5.297	5.297
1990	7.069	7.113
1991	6.757	6.757
1991	5.401	5.401
1993	5.758	5.758
1993	11.100	11.100
1994	5.916	5.916
1994	5.399	5.399
1995	12.060	12.060
1995	5.428	5.428
1995	5.561	5.561
1997	7.004	7.004
1998	9.487	9.487
1999	7.974	8.027

### Bijlage 3 De vorm van de afvoergolf voor de Rijn bij Lobith volgens de opschalingsmethode en bij een piekafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s

.....

Afstanden (tijdsduren) vanaf de top: golfvormen bij een piekafvoer van 16.000 m <sup>3</sup> /s (HKV, 1999a)			
Afvoer [m <sup>3</sup> /s]	Verwachtingswaarde [uren]	2,5% [uren]	97,5% [uren]
4000	-424,8	-91,9	-1257,6
5000	-379,1	-79,2	-1141,5
6000	-324,6	-69,6	-965,0
7000	-260,5	-59,6	-750,0
8000	-229,6	-54,6	-648,5
9000	-191,8	-51,3	-509,1
10000	-157,6	-45,6	-400,4
11000	-120,4	-41,4	-277,0
12000	-86,8	-36,9	-174,5
13000	-65,9	-29,3	-128,7
14000	-47,3	-22,5	-88,2
15000	-27,2	-11,7	-54,1
15500	-15,8	-5,3	-36,8
15600	-13,2	-4,0	-32,5
15700	-10,3	-2,8	-27,0
15800	-7,4	-1,7	-21,4
15900	-4,2	-0,7	-13,8
15950	-2,2	-0,3	-7,6
16000	0,0	0,0	0,0
15950	4,2	0,9	13,0
15900	8,3	1,6	26,1
15800	14,0	3,4	39,3
15700	17,5	5,6	42,1
15600	20,4	7,9	43,7
15500	23,2	10,3	45,4
15000	34,0	19,6	55,0
14000	51,5	33,9	75,1
13000	77,2	32,4	156,7
12000	101,1	34,6	233,0
11000	134,2	36,6	352,4
10000	170,4	39,0	490,3
9000	206,7	48,8	585,6
8000	250,7	61,7	695,5
7000	306,8	89,1	778,4
6000	411,3	126,8	1008,5
5000	548,5	185,1	1275,4
4000	742,7	280,3	1612,3