



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

# Analyse van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen

Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001

RIZA rapport 2002.013

ISBN 9036954347

Auteurs: B.W.A.H. Parmet

W. van de Langemheen

E.H. Chbab

J.C.J. Kwadijk

N.N. Lorenz

D. Klopstra

RIZA

Arnhem, augustus 2001

---

---

# Inhoudsopgave

---

Voorwoord 5

**1 Inleiding 7**

**2 Doelstelling 9**

**3 De maatgevende afvoer 11**

3.1 Inleiding 11

3.2 Homogeniteit meetreeks 11

3.3 Statistische analyse 12

3.3.1 Methodiek 12

3.3.2 Resultaten 14

3.4 Representativiteit meetreeks 17

3.5 Onzekerheden 19

**4 De vorm van de maatgevende afvoergolf 21**

4.1 Inleiding 21

4.2 Resultaten 22

**5 Samenvatting en conclusies 25**

5.1 Methodiek 25

5.2 Hoogte maatgevende afvoer 25

5.3 Vorm maatgevende afvoergolf 27

Referenties 29

---

## Bijlagen

- 1 Hydrologische jaarmaxima (1 oktober - 30 september) voor de Maas te Borgharen vanaf 1911 33
- 2 Afvoerpieken groter dan  $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$  (partiële reeks van afvoermaxima) te Borgharen, met een zichtduur van 8 dagen voor de periode 1911 tot en met 1998 35
- 3 De vorm van de afvoergolf voor de Maas te Borgharen volgens de opschalingsmethode en bij een piekafvoer van  $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$  37

---

---

# Voorwoord

---

Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek naar de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen. 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 bij Borgharen voor de periode vanaf 1984 tot en met 1992 (HKV, 1999a), de statistische analyse van de meetreeks vanaf 1911 tot en met 1998 (Chbab, 1999; WL, 1999a; WL 1999c), een analyse naar de representativiteit van de meetreeks vanaf 1911 (WL, 1999a), de analyse van de vorm van de maatgevende afvoergolf (HKV, 1999b; WL 1999b) en een analyse van mogelijke effecten van klimaatverandering (NW4, 1997; Parmet en Burgdorffer, 1996).

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

---

---

# 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 afvoergolf voor de Maas bij Borgharen. Het rapport is een samenvatting van de resultaten van een viertal deelonderzoeken naar achtereenvolgens aanpassingen van de meetreeks (HKV, 1999a), representativiteit van de meetreeks (WL, 1999a), extreme waarden statistiek (WL 1999a; WL, 1999c; Chbab, 1999) en de golfvorm (HKV, 1999b; WL 1999b).

De opzet van het onderzoek naar de maatgevende afvoeren te Lobith, Borgharen en Dalfsen is beschreven in een projectplan (Parmet, 1998).

---

Na de beschrijving van de doelstelling in hoofdstuk 2, worden in hoofdstuk 3 de methodiek en de resultaten voor de hoogte van de maatgevende afvoergolf besproken. Hoofdstuk 4 behandelt de vorm van de maatgevende afvoergolf. Een samenvatting en de 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 Maas te Borgharen.

In afwijking van het projectplan wordt niet één beste schatting voor de hoogte van de maatgevende afvoer gegeven, maar een drietal 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 Maas te Borgharen is in 1994 door de Commissie Boertien II vastgesteld (WL-RIZA, 1994). Een uitgebreid onderzoek is uitgevoerd, waarbij veel aandacht aan de homogeniteit van de gegevens is besteed. De reeks bij Borgharen is gehomogeniseerd voor uitgevoerde rivierwerken langs de Waalse Maas. Ook is uitgebreid onderzocht wat het effect van de verstedelijking en van mogelijke klimaatveranderingen is.

De resultaten van Boertien II vormen een belangrijk uitgangspunt voor het rvw2001. Het toepassen van state-of-the-art kennis leidt tot de volgende aanpassingen ten opzichte van Boertien II:

1. de meetreeks voor Borgharen zoals gehomogeniseerd door Boertien II is uitgangspunt. De reeks wordt aangepast vanaf 1993 als gevolg van de nieuwe  $Q(h)$ -relatie van Borgharen (Bastings en Barneveld, 1998). De reeks wordt verlengd tot en met 1998. Daarnaast wordt de reeks vanaf 1984 tot en met 1992 gehomogeniseerd op basis van de nieuwe  $Q(h)$ -relatie en de veranderingen in de bodemligging, zie sectie 3.2;
2. de verdelingsfuncties zoals voorgesteld door Boertien I (en ook door Boertien II gebruikt) worden toegepast. Naast de standaard middeling van de resultaten zal ook een gewogen middeling, gebaseerd op Bayesiaanse analyse worden uitgewerkt, waarbij ook een extra verdeling zal worden toegepast, zie sectie 3.3;
3. de analyse naar de representativiteit van de meetreeks vanaf 1911 wordt nogmaals uitgevoerd met de meest recente informatie, zie sectie 3.4;
4. de onzekerheden worden in beeld gebracht in sectie 3.5. 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 hoogte van de maatgevende afvoer zal in dit rapport niet als één waarde worden gegeven maar in de vorm van een drietal varianten. Deze drie 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

De door Boertien II gehanteerde reeks van afvoermaxima bij Borgharen van 1911 tot en met 1993 is het uitgangspunt. Deze reeks is al gehomogeniseerd voor ingrepen die in het verleden in de rivier hebben plaatsgevonden, maar zal in dit onderzoek niet één op één worden overgenomen. Op twee manieren vinden aanpassingen plaats.

---

De eerste aanpassing betreft de verlenging van de reeks tot en met het kalenderjaar 1998. Hiermee wordt niet het volledige hydrologische jaar 1998 gedekt, maar wordt wel de meest recente informatie meegenomen. Vanaf januari 1993 wordt de nieuwe Q(h)-relatie toegepast, zoals voor Borgharen is vastgesteld op basis van analyses met meetgegevens van de recente hoogwaters (Barneveld en Bastings, 1998). Op basis van deze nieuwe Q(h)-relatie liggen de topafvoeren bij Borgharen lager dan tot dan toe werd aangenomen. Deze verlengde Boertien II reeks wordt gebruikt als basis voor variant 1 (zie sectie 3.3) en is weergegeven in bijlage 1.

De tweede aanpassing betreft de gegevens voor de periode 1984 tot en met 1987. Met de nieuwe Q(h)-relatie is namelijk ook twijfel ontstaan over de waarden van de hoogwaters vanaf 1984. Met name de Q(h)-relatie die tussen 1984 en 1988 gehanteerd is, wijkt voor het hoge afvoerbereik sterk van de nieuw afgeleide relatie af. Voor de periode vanaf 1984 is een homogenisatie uitgevoerd door de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen ook voor die periode toe te passen, rekening houdend met veranderingen in de bodemligging van het zomerbed (HKV, 1999a). In het SOBEK model 1998.1, dat is afgeregeld voor de geometrie van 1995 (van der Veen, 1998), zijn de veranderingen in het zomerbed voor de periode 1984 tot en met 1995 doorgevoerd.

Door modelberekeningen uit te voeren met de nieuwe schematisatie is het effect van de zomerbedverandering op de Q(h)-relatie bij Borgharen bepaald, en is een aangepaste relatie voor de periode van 1984 tot en met 1987 afgeleid. De aangepaste Q(h)-relatie leidt tot lagere afvoeren voor de hoogwaters in deze periode. Met name het hoogwater van 1984 wordt fors lager (ongeveer 270 m<sup>3</sup>/s, ofwel 13%). Deze lagere afvoer past bij uitgevoerde modelsimulaties en bij meer benedenstrooms gemeten afvoeren. Echter, de metingen uitgevoerd tijdens dat hoogwater kunnen niet als niet-representatief of onnauwkeuriger dan gewoonlijk worden beschouwd (Bastings, 1999). Een verschil van 13% is echter wel groter dan waar met een normale meting rekening mee moet worden gehouden. Dit betekent dat de metingen niet verworpen kunnen worden. Vandaar dat is gekozen de homogenisatie als aparte variant op te nemen, variant 2. De reeks voor variant 2, die alleen voor de periode 1984-1987 afwijkt van de reeks voor variant 1, is eveneens weergegeven in bijlage 1.

### 3.3 Statistische analys

#### 3.3.1 Methodiek

##### *Varianten 1 en 2*

De maatgevende afvoer wordt gebaseerd op extrapolaties met behulp van statistische verdelingsfuncties. De statistische analyse zoals voorgesteld door Boertien I en ook toegepast door Boertien II zal ook voor het rvw2001 worden gebruikt. De meetreeksen zoals weergegeven in bijlage 1 vormen de basis om de parameters van de verschillende verdelingen zo goed mogelijk te fitten (het hydrologisch jaar 1999 was ten tijde van de analyse nog niet afgelopen). Analooq aan Boertien II wordt voor de herhalingstijden kleiner dan 25 jaar de Pareto verdeling gebruikt. Voor grotere herhalingstijden wordt het gemiddelde van de 3-parameter log-normale, de Pearson-III, de Gumbel en de exponentiële verdeling gebruikt. De fit-procedures die worden gebruikt zijn gelijk aan die zoals zijn toegepast in het onderzoek van Boertien II.

---

Het toepassen van deze verdelingen impliceert het gebruik van de reeks van jaarmaxima (Gumbel, Pearson-III en 3-parameter log-normaal) en als partiële serie (Pareto en exponentieel). De serie van jaarmaxima bestaat uit de jaarlijks hoogste afvoer in een hydrologisch jaar (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 drempelwaarde van 1.300 m<sup>3</sup>/s en een zichtduur van 8 dagen (identiek aan Boertien II) wordt aan de voorwaarde van N maxima voldaan. De resulterende reeksen van jaarmaxima en de partiële reeksen zijn weergegeven in bijlage 2.

De Boertien II methode, waarbij de 1/1250 afvoer en de werklijn voor herhalingstijden groter dan 25 jaar gebaseerd zijn op een middeling van de uitkomsten van vier verdelingsfuncties, wordt toegepast voor de meetreeksen van variant 1 en 2. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de gebruikte verdelingsfuncties.

Bij elke verdeling wordt een 95%-betrouwbaarheidsinterval berekend. Deze intervallen worden voor herhalingstijden groter dan 25 jaar gemiddeld om tot een gemiddeld 95%-interval te komen. Voor herhalingstijden kleiner dan 25 jaar wordt het interval van de Pareto verdeling gebruikt. 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 herhalings-tijden.

#### *Variant 3*

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 Bayesiaanse analyse. De methodiek van Bayesiaanse analyse is in ontwikkeling. Voor het rww2001 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 (Chbab, 1999). De onzekerheid van de parameters, die bij de gewichtsbepaling een belangrijke rol moet spelen, kan nog niet in beschouwing worden genomen. De methode is op dat punt nog in ontwikkeling.

In variant 3 wordt ook een extra verdelingsfunctie in beschouwing genomen. Naast de verdelingen die in het Boertien II onderzoek zijn gebruikt, 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 meetreeksen. Dit is de Rayleigh verdeling (CHR, 1993). Het in beschouwing nemen van de Rayleigh verdeling is een uitbreiding ten opzichte van Boertien II. Daarom is deze in een aparte variant in beeld gebracht.

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

Tabel 3.1

Gebruikte verdelingsfuncties voor de verschillende varianten en toegepaste fitprocedures (WL, 1999a; Chbab, 1999)

Statistische verdeling	Gebruikt voor variant	Gebruikt voor herhalingsstijd T	Type reeks	Methode om te fitten
Gumbel	1,2,3	> 25 jaar	jaarmaxima	gemodificeerde 'maximum likelihood'-schatting-methode met weglating van waarden onder een drempelwaarde van 1.000 m <sup>3</sup> /s
Pearson-III	1,2,3	> 25 jaar	jaarmaxima	3-parameter verdeling, gemodificeerde 'maximum likelihood'-schattingmethode
Log-normaal	1,2,3	> 25 jaar	jaarmaxima	3-parameter verdeling, gemodificeerde 'maximum likelihood'-schattingmethode
Exponentieel	1,2,3	> 25 jaar	partieel (ondergrens 1.300 m <sup>3</sup> /s)	parameters bepaald uit 1e en 2e moment
Pareto	1,2,3	< 25 jaar	partieel (ondergrens 1.300 m <sup>3</sup> /s)	ondergrens in de verdeling van 1.300 m <sup>3</sup> /s, vormparameter q < 0, gemodificeerde 'maximum likelihood'-schattingmethode
Rayleigh	3	> 25 jaar	Jaarmaxima	parameters bepaald uit 1e en 2e momenten

#### Werklijn

Voor het bepalen van de afvoer Q voor een willekeurige herhalingsstijd 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 bereik leidt tot relatief grote fouten. Daarom wordt een samengestelde functie afgeleid, die bestaat uit twee logaritmische regressielijnen van de vorm

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

met Q de afvoer, T de herhalingsstijd en a en b als parameters die gefit moeten worden. Per variant wordt een werklijn afgeleid op basis van de resultaten met het gemiddelde van de verschillende verdelingen (en voor variant 3 hun bijbehorende gewicht).

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 definitieve maatgevende afvoer is gemaakt.

#### 3.3.2 Resultaten

##### Variant 1

In 3.3.1 zijn de drie varianten beschreven, alsmede de methodiek waarmee de 1/1250 afvoer wordt bepaald. De 1/1250 afvoer volgens variant 1 is het resultaat van verlenging van de meetreeks tot en met 1998, waarbij rekening is gehouden met de nieuwe Q(h)-relatie vanaf 1 januari 1993.

Tabel 3.2 geeft de resultaten voor verschillende verdelingen. Uitgaande van een middeling van resultaten van de verschillende verdelingen komt de 1/1250 afvoer voor variant 1 uit op 3.850 m<sup>3</sup>/s, met een 2,5%-ondergrens van 3.140 m<sup>3</sup>/s en een 97,5%-bovengrens van 4.595 m<sup>3</sup>/s.

Tabel 3.2

Resultaten statistische verdelingen voor variant 1, verlenging reeks Boertien II (WL, 1999c)

T	Gumbel ( $Q_0 = 1000$ )	Pearson III	3-par log- normaal	expo- nentieel	gemid- delde	Pareto (LP= 1300)	resulteren- de afvoer	95%-betrouwbaar- heidsinterval	
								onder- grens	boven- grens
2	-	-	-	-	-	1554	1555	1490	1620
5	-	-	-	-	-	1894	1895	1765	2020
10	-	-	-	-	-	2154	2155	1970	2340
25	2527	2521	2506	2507	2515	2503	2510	2220	2805
50	2798	2749	2733	2768	2762	-	2760	2415	3120
100	3067	2964	2951	3029	3003	-	3005	2580	3435
250	3422	3235	3227	3375	3315	-	3315	2790	3855
500	3689	3432	3429	3636	3547	-	3545	2945	4175
1000	3956	3623	3629	3898	3776	-	3775	3095	4490
<b>1250</b>	<b>4042</b>	<b>3683</b>	<b>3692</b>	<b>3982</b>	<b>3850</b>	-	<b>3850</b>	<b>3140</b>	<b>4595</b>
2500	4309	3868	3888	4243	4077	-	4075	3285	4915
5000	4576	4049	4081	4505	4303	-	4305	3425	5235
10000	4843	4226	4273	4766	4527	-	4525	3565	5555

T = herhalingsdij (jaren)

 $Q_0$  = ondergrens toegepast voor de betreffende verdeling ( $m^3/s$ )LP = locatieparameter Pareto-verdeling ( $m^3/s$ )

In het Boertien II onderzoek is een 1/1250 afvoer van  $3.800 m^3/s$  vastgesteld. De verhoging naar  $3.850 m^3/s$  wordt veroorzaakt door de verlenging van de reeks, en met name door het hoogwater van januari 1995, dat een extra punt in het hoge bereik levert.

Direct na het hoogwater van 1995 is ook een herberekening gemaakt van de 1/1250 afvoer. Die kwam toen uit op  $3.935 m^3/s$ . Dat de huidige waarde lager ligt, komt door de nieuwe  $Q(h)$ -relatie die vanaf 1 januari 1993 geldig is, waardoor de topafvoeren van de recente hoogwaters lager liggen dan in de analyse direct na het hoogwater van 1995 toegepast, zie bijlage 1.

#### Variant 2

De 1/1250 afvoer in variant 2 wordt bepaald op basis van de meetreeks waarin de hoogwaters tussen 1984 en 1992 zijn gehomogeniseerd voor de nieuwe  $Q(h)$ -relatie, zie ook bijlage 1. Ten opzicht van variant 1 is met name het hoogwater van 1984 een stuk lager. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3.3.

De 1/1250 afvoer volgens variant 2 wordt berekend op  $3.805 m^3/s$ , met een 2,5%-ondergrens van  $3.110 m^3/s$  en een 97,5%-bovengrens van  $4.535 m^3/s$ .

Het verhogend effect van het extra punt in het hoge bereik, het hoogwater 1995, wordt gecompenseerd door de als gevolg van de homogenisatie lagere waarden voor de maxima in de periode 1984-1992. Het verschil met de in het Boertien II onderzoek berekende waarde is klein.

Tabel 3.3

Resultaten statistische verdelingen voor variant 2, verlenging reeks Boertien II en homogenisatie hoogwaters voor de periode 1984-1992 (WL, 1999c)

T	Gumbel ( $Q_0 = 1000$ )	Pearson III	3-par log- normaal	expo- nentieel	gemid- delde	Pareto (LP= 1300)	resulteren- de afvoer	95%-betrouwbaar- heidsinterval	
								onder- grens	boven- grens
2	-	-	-	-	-	1550	1550	1485	1610
5	-	-	-	-	-	1885	1885	1760	2010
10	-	-	-	-	-	2141	2140	1960	2320
25	2508	2501	2486	2488	2496	2484	2490	2205	2780
50	2776	2725	2709	2745	2739	-	2740	2395	3090
100	3041	2936	2921	3002	2975	-	2975	2560	3400
250	3390	3202	3190	3342	3281	-	3280	2765	3810
500	3653	3394	3388	3600	3509	-	3510	2920	4125
1000	3917	3581	3582	3857	3734	-	3735	3065	4435
<b>1250</b>	<b>4002</b>	<b>3640</b>	<b>3643</b>	<b>3940</b>	<b>3806</b>	-	<b>3805</b>	<b>3110</b>	<b>4535</b>
2500	4265	3821	3833	4197	4029	-	4030	3250	4845
5000	4528	3998	4021	4454	4250	-	4250	3390	5160
10000	4791	4172	4207	4711	4470	-	4470	3525	5475

T = herhalingstijd (jaren)

$Q_0$  = ondergrens toegepast voor de betreffende verdeling ( $m^3/s$ )

LP = locatieparameter Pareto-verdeling ( $m^3/s$ )

### Variant 3

Variant 3 kijkt niet alleen af van het onderzoek van Boertien II wat de gebruikte meetreeks betreft, maar ook ten aanzien van de gebruikte statistische analyse. De middeling van de resultaten van de verschillende verdeling wordt een gewogen middeling, waarbij de gewichten met Bayesiaanse analyse zijn vastgesteld. Daarnaast wordt een extra verdeling gebruikt, de Rayleigh verdeling. De meetreeksen zoals gebruikt voor variant 2 zijn ook als basis voor variant 3 gebruikt.

In tabel 3.4 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 Gumbel verdeling het grootste gewicht krijgt. Wanneer ook de Rayleigh verdeling wordt meegenomen krijgt deze het grootste gewicht. Dit betekent dat die verdeling de beste fit op de gebruikte datareeks geeft.

Tabel 3.4

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

Verdeling	Gewicht (exclusief Rayleigh verdeling)	Gewicht (inclusief Rayleigh verdeling)
Gumbel	41 %	22 %
exponentieel	22 %	12 %
Pearson-III	18 %	10 %
Log-normaal	19 %	10 %
Rayleigh	-	46 %

Tabel 3.5 geeft de resultaten inclusief de Rayleigh verdeling weer. De grenzen van het 95%-betrouwbaarheidsinterval zijn een gewogen gemiddelde op basis van de gewichten die in tabel 3.4 zijn weergegeven. Het gebruik van de Rayleigh verdeling in combinatie met Bayesiaanse analyse leidt tot een 1/1250 afvoer van  $3.690 m^3/s$ .



Tabel 3.5

Resultaten statistische verdelingen voor variant 3, verlenging van de Boertien II reeks, homogenisatie hoogwaters voor de periode 1984-1992 en met gebruikmaking van Bayesiaanse analyse en de Rayleigh verdeling (WL, 1999c; Chbab, 1999)

T	Gumbel ( $Q_0 = 1000$ )	Pearson III	3-par log- normaal	expo- nentieel	Ray- leigh	gewogen gemiddeld	Pareto (LP= 1300)	resulteren- de afvoer	95%-betrouwbaar- heidsinterval	
									onder- grens	boven- grens
2	-	-	-	-	-	-	1550	1550	1343	1540
5	-	-	-	-	-	-	1885	1885	1748	2041
10	-	-	-	-	-	-	2141	2140	1982	2334
25	2508	2501	2486	2488	2499	2499	2484	2485	2247	2752
50	2776	2725	2709	2745	2705	2728	-	2730	2426	3032
100	3041	2936	2921	3002	2833	2946	-	2945	2596	3300
250	3390	3202	3190	3342	3121	3222	-	3220	2800	3644
500	3653	3394	3388	3600	3282	3424	-	3425	2959	3900
1000	3917	3581	3582	3857	3433	3620	-	3620	3100	4148
<b>1250</b>	<b>4002</b>	<b>3640</b>	<b>3643</b>	<b>3940</b>	<b>3500</b>	<b>3692</b>	-	<b>3690</b>	<b>3170</b>	<b>4227</b>
2500	4265	3821	3833	4197	3622	3874	-	3875	3293	4472
5000	4528	3998	4021	4454	3758	4061	-	4060	3454	4714
10000	4791	4172	4207	4711	3888	4246	-	4245	3568	4954

T = herhalingstijd (jaren)

$Q_0$  = ondergrens toegepast voor de betreffende verdeling ( $m^3/s$ )

LP = locatieparameter Pareto-verdeling ( $m^3/s$ )

### 3.4 Representativiteit meetreeks

Eén van de aannames bij het baseren van de maatgevende afvoer met een overschrijdingsfrequentie van eens in de 1250 jaar op een meetreeks van ongeveer 100 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 1911, gaat het om een semi-kwantitatieve vergelijking. Deze vergelijking leidt dan ook niet tot een absoluut inzicht in de representativiteit van de meetreeks vanaf 1911. Het leidt wel tot inzicht in de vraag of de hypothese dat de meetreeks representatief is, verworpen moet worden.

Voor de Maas is ten tijde van de Boertien II studie een uitgebreid onderzoek verricht naar historische hoogwaters vanaf het jaar 1000. Vanwege de onzekerheid over de precieze omvang van de hoogwaters, die moest worden afgeleid uit historische bronnen, zijn de historische hoogwaters ingedeeld in klassen met een relatief grote klassebreedte (zie tabel 3.6).

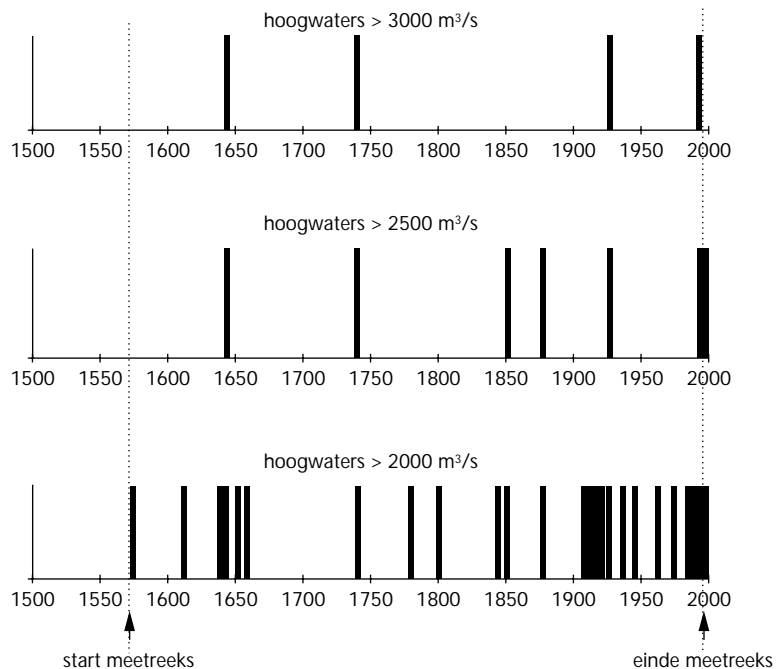
Om tot overschrijdingsfrequenties te komen zijn de hoogwaters ingedeeld in klassen: onderscheiden worden afvoeren groter dan  $2.000 m^3/s$ , groter dan  $2.500 m^3/s$  en groter dan  $3.000 m^3/s$ . Voor de bepaling van de herhalingstijd is ook de periode waarin de hoogwaters zijn voorgekomen van belang. Hoogwaters die worden ingeschat als zeer extreem, worden voor het eerst geregistreerd in 1571. Het is niet bekend of daarvoor ook dergelijke hoogwaters zijn opgetreden. Daarom is gekozen om de periode vanaf dit hoogwater te kiezen en het hoogwater van 1571 zelf niet mee te tellen. Het kalenderjaar 1572 is daarmee het beginjaar van de historische analyse.

**Tabel 3.6**  
Klassebreedtes van de afvoerclassen waarin de historische hoogwaters zijn ingedeeld (WL, 1999a)

klasse	afvoer (m <sup>3</sup> /s)
normaal	< 1500
hoog	1500 - 2000
zeer hoog	2000 - 2500
extreem	2500 - 3000
zeer extreem	> 3000

In figuur 3.1 zijn de hoogwaters chronologisch uitgezet in de tijd. De frequentie van zeer extreme hoogwaters is redelijk gelijkmatig verdeeld. Naarmate de hoogwaters lager worden is de frequentie in deze eeuw hoger dan daarvoor. Dit geldt in beperkte mate voor de hoogwaters boven de 2.500 m<sup>3</sup>/s en heel sterk voor de hoogwaters boven de 2.000 m<sup>3</sup>/s. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat naarmate het hoogwater minder extreem is geweest, de registratie in historische kronieken minder accuraat heeft plaatsgevonden. Tabel 3.7 geeft de gemiddelde herhalingstijden op basis van de frequentie van de historische hoogwaters, samen met de gemiddelde herhalingstijden die volgen uit variant 2 (tabel 3.3). Voor de zeer extreme hoogwaters liggen de frequenties zoals bepaald op grond van de meetreeks en op basis van historische hoogwaters heel dicht bij elkaar. De afwijking voor de klasse zeer hoge hoogwaters (2.000-2.500 m<sup>3</sup>/s) is groot. Zoals aangegeven is de waarde van een vergelijking met deze klasse hoogwaters gering omdat de registratie naar verwachting niet accuraat is geweest. Voor de lagere klassen hoogwaters zijn de verschillen groter. Voor de extreme hoogwaters (2.500-3.000 m<sup>3</sup>/s) liggen ze nog wel in het 95% betrouwbaarheids interval zoals voor variant 2 is afgeleid. Op basis van deze resultaten kan de aanname dat de meetreeks vanaf 1911 representatief is voor een langere periode, niet verworpen worden. Met andere woorden, de historische analyse ondersteunt daarmee de resultaten van de statistische analyse op basis van de meetreeks vanaf 1911.

**Figuur 3.1**  
Frequentie van geregistreerde hoogwaters in het verleden (WL, 1999a)



Tabel 3.7

Herhalingstijden T (jaren) van historische hoogwaters in vergelijking met de gemiddelde waarden en het 95%-betrouwbaarheidsinterval van variant 2 (WL, 1999a)

	T op grond van de reeks 1572-1997	T op grond van de reeks 1572-1911	T op grond van analyse variant 2	Ondergrens T 95%-interval (variant 2)	Bovengrens T 95%-interval (variant 2)
Q > 3000 m <sup>3</sup> /s	105	170	110	730	40
Q > 2500 m <sup>3</sup> /s	55	80	26	90	15
Q > 2000 m <sup>3</sup> /s	15	25	7	13	5

### 3.5 Onzekerheden

De vraagpunten rond de bepaling van de maatgevende afvoer kunnen worden gezien als bronnen van onzekerheden. Enerzijds gaat het daarbij om onzekerheden die gekoppeld kunnen worden aan de gebruikte methode en anderzijds onzekerheden die gekoppeld kunnen worden aan toekomstige ontwikkelingen.

De onzekerheden die het gevolg zijn van de gebruikte methode worden op twee manieren inzichtelijk gemaakt. Het effect van een verschillende bewerking van de meetreeks en van het gebruik van verschillende statistische technieken komt tot uitdrukking in de drie 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 sectie 3.3). In tabel 3.8 zijn deze voor de 1/1250 afvoer samengevat. De tabel geeft aan dat de bandbreedte als gevolg van de toegepaste tijdreeks en statistische methode ongeveer 150 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Deze is veel kleiner dan de onzekerheid als gevolg van het toepassen van een relatief korte meetreeks. De bandbreedte van het 95%-betrouwbaarheidsinterval is bijna een factor 10 groter en bedraagt zo'n 1.450 m<sup>3</sup>/s. Ten opzicht van de 1/1250 afvoer ligt deze bandbreedte in de orde van 40%.

Tabel 3.8

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

Variant	1/1250 afvoer (m <sup>3</sup> /s)	95%-interval (m <sup>3</sup> /s)
1	3850	3140 - 4595
2	3805	3110 - 4535
3	3690	3170 - 4227

Richting de toekomst vormen klimaatverandering en direct ingrijpen van de mens in het stroomgebied en de rivier de bronnen van onzekerheid. De effecten van toekomstig menselijk ingrijpen worden niet in beschouwing genomen. Wat betreft ingrepen in de rivier geeft de huidige informatie in het Hoogwater Actieplan Maas aan dat de geplande rivierwerken bovenstrooms van Nederland in de Maas kleinschalig van aard zullen zijn en voornamelijk lokaal een effect zullen hebben. Grote werken zijn vooralsnog niet voorzien en er is, zeker in de Ardennen, ook niet veel ruimte voor grote maatregelen vanwege de smalle rivierdalen en de grote verhangen. Ingrepen in het stroomgebied, om het watervasthoudend vermogen te vergroten, zullen de komende jaren wel worden uitgevoerd. De effecten bij extreme hoogwaters zullen overigens naar verwachting gering zijn, omdat bij dergelijke hoogwaters het stroomgebied al grotendeels verzadigd zal zijn.

Voor klimaatverandering 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 in de temperatuur van 1°C rond 2050 en 2°C voor de periode rond 2100. Door het KNMI is een relatie afgeleid tussen temperatuur en neerslag (Klein Tank en Buishand, 1993). Op basis van deze relatie zorgt een stijging van 1°C voor een toename in extreme neerslag van 10%. Het effect van deze toename in neerslag op extreme afvoeren van de Maas wordt geschat op 9% (Parmet en Burgdorffer, 1996). Uitgaande van een temperatuurstijging van 1°C, respectievelijk 2 °C, neemt de extreme afvoer rond 2050 met 9% en rond 2100 met 18% toe. Deze schattingen zijn ook gebruikt voor de Vierde Nota Waterhuishouding (NW4, 1997) en zijn nog steeds up-to-date (Können, 1999). Vergelijking van de onzekerheden nu en de onzekerheden richting de toekomst geeft aan dat ze in dezelfde orde grootte liggen. De 97,5%-bovengrens ligt zo'n 20% boven de 1/1250 afvoer. De mogelijke toename rond 2100 ligt eveneens rond de 20%.

---

## 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.

De vorm van de maatgevende afvoergolf kan worden afgeleid uit gemeten afvoergolven. Net als voor de hoogte van de maatgevende afvoer staat de meetreeks vanaf 1911 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  $1.750 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kleinere hoogwaters voegen weinig toe voor de extrapolatie van de kenmerken naar een  $1/1250$  afvoergolf. In het deelonderzoek naar de golfvorm zijn twee methoden toegepast (HKV, 1999b). De methode zoals in het onderzoek van de commissie Boertien I is gebruikt (en overgenomen in Boertien II) en een methode voorgesteld door (Duits *et al.*, 1998).

De methode Boertien I is gebaseerd op met *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  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  en vanaf een drempel van  $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$  worden de duur van de was, de duur van de totale golf en het volume vastgesteld ten opzicht van de maximale afvoer van de betreffende golf. Per interval van  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  worden relaties afgeleid met behulp van regressie op basis van de kleinste kwadratenmethode. Per functie wordt ook een 95%-betrouwbaarheidsinterval opgesteld. Op basis van deze regressiefuncties wordt de golfvorm voor de maatgevende afvoer vastgesteld en wordt een indicatie van het 95%-betrouwbaarheidsinterval gegeven.

De methode zoals voorgesteld door (Duits *et al.*, 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  $1.750 \text{ m}^3/\text{s}$  uit de meetreeks vanaf 1911 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  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ . 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 methode van regressie-vergelijking, ook in het hoge afvoerbereik voldoende gegevens beschikbaar zijn om goede relaties af te leiden.

---

## 4.2 Resultaten

### *Regressiemethode*

Uit de meetreeks vanaf 1911 zijn 22 afvoergolven geselecteerd met een maximale afvoer groter dan  $1.750 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voor deze golven is per interval van  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ , vanaf een drempel van  $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$  de duur van de was, de duur van de golf en het volume bepaald. Samengestelde golven zijn, in geval de afvoer gedurende 10 dagen hoger dan  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  was, als één golf beschouwd. Voor zover uurwaarden beschikbaar waren zijn deze gebruikt. De overige golven waarvan alleen daggegevens beschikbaar zijn, zijn 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 drempel van  $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$  kunnen de vergelijkingen afgeleid worden. Daarboven zijn onvoldoende data beschikbaar om de regressie vergelijking te kunnen bepalen.

Met de regressiefuncties kunnen tot een afvoerniveau van  $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$  de duur van de was, de totale duur en het volume van de maatgevende golf worden geëxtrapoleerd. De duur van de val kan worden afgeleid uit de totale duur en de duur van de was. Het resultaat voor een maximale afvoer van  $3.805 \text{ m}^3/\text{s}$  (variant 2) staat weergegeven in figuur 4.1.

De extrapolatie met de regressiefuncties leidt voor afvoerniveaus groter dan  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$  tot een fysisch onmogelijk verloop. De methode kan dan ook niet gebruikt worden voor afvoeren groter dan  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit impliceert dat ook de 95%-betrouwbaarheidsintervallen alleen bepaald kunnen worden voor intervallen tot  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### *Opschalingsmethode*

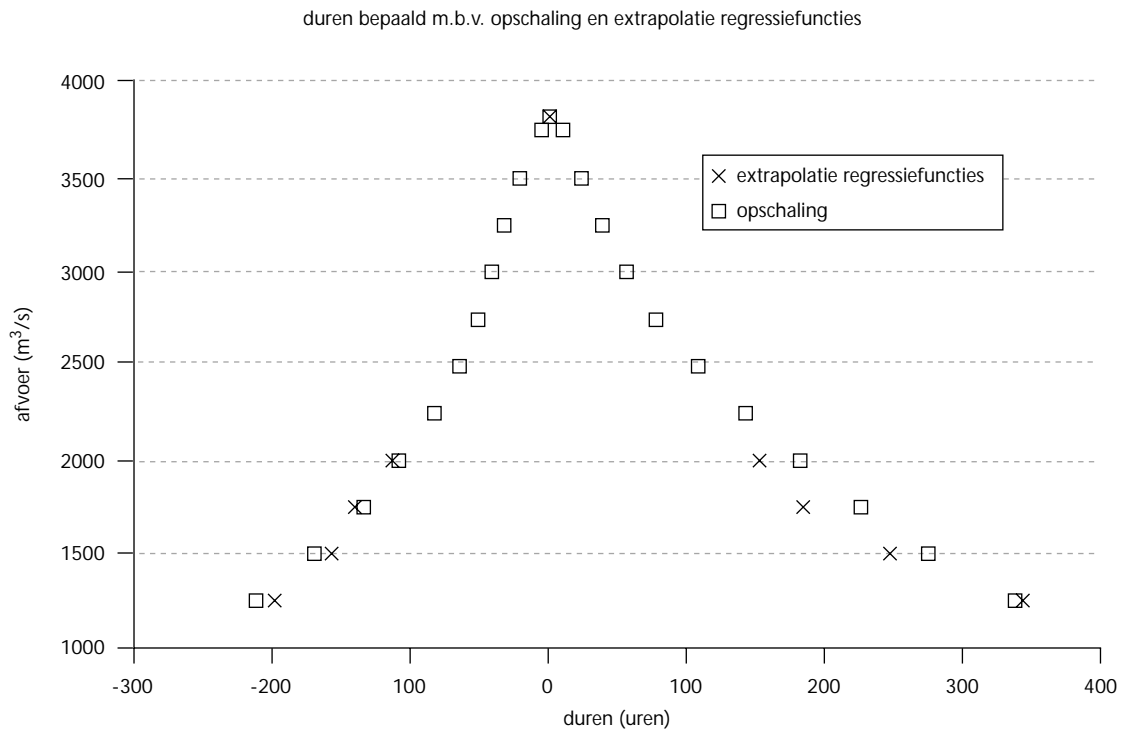
Een belangrijke eerste stap in deze methode is de opschaling van de 22 geselecteerde afvoergolven. Als maatgevende afvoer is de waarde van variant 2 aangehouden. Door de opschaling is voor ieder interval tot aan de maximale afvoer voor iedere golf een waarde voor de duur van de was, de duur van de golf en het volume. Het voordeel van de opschaling is dat op een robuuste manier de vorm van de golf voor het hele afvoerbereik kan worden geschat, wat niet het geval is voor de regressiemethode. Dit wordt geïllustreerd in figuur 4.1.

Voor afvoerniveaus boven  $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$  leidt de opschalingsmethode wel tot resultaten en moet voor de regressiemethode een schatting van de vorm worden gemaakt. In bijlage 3 zijn de kenmerken voor een gemiddelde golf gegeven.

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 interval dat wordt afgeleid blijkt erg ruim te zijn (zie bijlage 3). 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.

Figuur 4.1

Vorm maatgevende afvoergolf (uitgaande van maatgevende afvoer van 3.805 m<sup>3</sup>/s) zoals afgeleid uit regressievergelijkingen en afgeleid uit de opschalingsmethode (HKV, 1999b)



---



---

## 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 en de vorm van de maatgevende afvoergolf en de werklijn voor de Maas bij Borgharen. De basis wordt gevormd door het onderzoek dat door de Commissie Boertien II is uitgevoerd, aangevuld met state-of-the-art kennis. Ook met de state-of-the-art kennis, kent de gebruikte methodiek een aantal vraagpunten. Deze betreffen de representativiteit en de homogeniteit van de meetreeks, de te gebruiken statistische verdelingsfuncties en de effecten van toekomstige veranderingen in bijvoorbeeld klimaat en het stroomgebied.

De 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 statistische neerslaggenerator zullen in dit verband worden ontwikkeld. Het probleem van de statistiek wordt bij de bron van de hoogwaters gelegd, de neerslag. De neerslaggenerator, die overigens ook temperatuur genereert, moet in staat zijn lange reeksen te genereren. Met behulp van het hydrologisch-hydraulisch model wordt deze neerslag in een homogene afvoerreeks bij Borgharen 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. Ook is voorzien dat de neerslag-generator een rol kan spelen voor veranderde klimaatomstandigheden.

### 5.2 Hoogte 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 drietal varianten. Deze drie varianten zijn in principe drie goede schattingen waarop de definitieve keuze kan worden gebaseerd. De onzekerheden die het gevolg zijn van de gebruikte methode worden in een 95%-betrouwbaarheidsinterval tot uitdrukking gebracht. Daarnaast zijn de onzekerheden voor toekomstige ontwikkelingen in beeld gebracht.

De eerste variant is een herberekening op basis van de methode en de meetreeks zoals vastgesteld in het kader van het Boertien II onderzoek, aangevuld met de beschikbare data tot en met 1998.

De 1/1250 afvoer op basis van deze variant bedraagt 3.850 m<sup>3</sup>/s. Dit is hoger dan de waarde van 3.800 m<sup>3</sup>/s die door de Commissie Boertien II is vastgesteld, wat het gevolg is van de toevoeging van het hoogwater van januari 1995 aan de reeks. De waarde van variant 1 ligt lager dan direct na het hoogwater 1995 is uitgerekend (WL, 1995). De belangrijkste reden

hiervoor is de nieuwe Q(h)-relatie bij Borgharen die vanaf 1 januari 1993 geldig is. De topafvoeren van de hoogwaters van januari 1993, december 1993 en januari 1995 zijn volgens deze Q(h)-relatie lager.

Variant twee gebruikt de statistische methodiek van Boertien II, maar heeft een aangepaste meetreeks voor de periode 1984 tot en met 1987. Dit deel van de reeks is gecorrigeerd aan de hand van de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen die vanaf januari 1993 geldig is. De 1/1250 afvoer volgens variant 2 bedraagt 3.805 m<sup>3</sup>/s. Deze ligt lager dan variant 2 omdat door de correctie het hoogwater van 1984 fors lager uitvalt.

De derde variant maakt gebruik van dezelfde reeks als variant twee. 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 3 leidt tot een 1/1250 afvoer van 3.690 m<sup>3</sup>/s. Deze waarde ligt een stuk lager dan de andere varianten wat met name ligt aan het feit dat de 1/1250 afvoer volgens de Rayleigh verdeling relatief laag is en deze verdeling volgens de Bayesiaanse analyse een groot gewicht krijgt.

In de 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 40% van de gemiddelde 1/1250 afvoer, hetgeen een maat voor de huidige onzekerheid aangeeft. De beperkte 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 vanaf 1571 volgde dat de aanname dat de meetreeks representatief is, niet verworpen kan worden. Deze conclusie kan gezien worden als een ondersteuning van het gebruik van de korte meetreeks voor een veel langere periode.

Richting de toekomst is klimaatverandering een belangrijke bron van onzekerheid. Volgens de state-of-the-art kennis, is een toename van extreme afvoeren tot 20% rond 2100 niet uit te sluiten. Veranderingen in het stroomgebied zijn niet in rekening gebracht omdat de effecten voor extreme afvoeren naar verwachting klein zijn. De effecten voor mogelijke veranderingen in de rivier zijn niet in rekening gebracht, omdat grootschalige ingrepen niet te verwachten zijn.

.....  
Tabel 5.1  
Overzicht opzet en resultaten varianten 1/1250 afvoer Borgharen

Variant	Meetreeks	Statistiek	1/1250 afvoer (m <sup>3</sup> /s)	95%-betrouwbaarheidsinterval (m <sup>3</sup> /s)
1	verlenging reeks Boertien II tot en met 1998	Boertien II	3850	3140 - 4595
2	verlenging reeks Boertien II tot en met 1998, aanpassing reeks 1984-1987	Boertien II	3805	3110 - 4535
3	idem variant 2	Boertien II, Rayleigh verdeling en Bayesiaanse analyse	3690	3170 - 4227

---

### 5.3 Vorm 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 is gebruikt in het onderzoek van de commissie Boertien I (en ook gebruikt in het Boertien II onderzoek). 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 ook voor het hoge afvoerbereik er, 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.

Voor het deel van de afvoergolf boven 2.500 m<sup>3</sup>/s zijn de resultaten van dit onderzoek vergelijkbaar met de golfvorm zoals in het Boertien II onderzoek is vastgesteld. Voor het deel van de golf beneden 2.500 m<sup>3</sup>/s leiden de resultaten van dit onderzoek tot een bredere basis van de golf dan in het Boertien II onderzoek is vastgesteld. 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 (neerslaggenerator in combinatie met een hydrologisch-hydraulisch model) zal naar verwachting tot een betere onderbouwing leiden.

---

---

# Referenties

---

(Barneveld en Bastings, 1998)

Barneveld H.J. en Bastings A.J.T., Q(h)-relatie Borgharen-Dorp, ontwikkeling vanaf 1993. Rijkswaterstaat Directie Limburg, 1998.

(Bastings, 1999)

Persoonlijke communicatie met ing. A.J.T. Bastings, RWS Directie Limburg.

(Chbab, 1999)

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

(CHR, 1993)

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

(Duits *et al.*, 1998)

Duits, M.T., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Valk, C.F. de, Noortwijk, J.M. van & Kok, M., Gevoeligheidsanalyse Probabilistische Belastingmodellen en Reken-technieken. Deelrapport 3: locatie Duursche Waarden, faalmechanisme overloop en golfoverslag. HKV Lijn in Water, TNO en Argoss in opdracht van Rijkswaterstaat/RIZA, mei 1998.

(HKV, 1999a)

Klopstra, D., Nader onderzoek afvoeren Maas, hoogwaters 1984-1987. HKV Lijn in Water in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Lelystad, september 1998.

(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.

(Klein Tank en Buishand, 1993)

Klein Tank, A. en Buishand, T.A. (1993), Modelling daily precipitation as a function of temperature for climate change impact studies. KNMI scientific report WR 92-02. De Bilt, 1993.

(Können, 1999)

Können, G., Persoonlijke communicatie KNMI-RIZA. Augustus 1999.

(V&W, 1998)

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

(V&W, 1994)

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Onderzoek Watersnood Maas. Deelrapport 4, hydrologische aspecten. December 1994.

---

(NW4, 1997)

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

(Parmet & Burgdorffer, 1996)

Parmet, B.W.A.H. & Burgdorffer, M.C. Relatie neerslag en extreme afvoeren. Achtergronddocument NW4, 1996.

(Parmet, 1998)

Parmet, B.W.A.H. (1998) Projectplan, Maatgevende afvoer Lobith, Borgharen en Dalfsen, Werkpakket A, Nevenproject Maatgevende afvoeren Rijn, Maas en Vecht.

(Parmet *et al.*, 1999)

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

(Veen, van der, 1998)

Veen, R. v.d. Calibratie SOBEK-Maas. Rijkswaterstaat RIZA rapport 98.038.

(WL, 1999a)

Lorenz, N.N., Kwadijk, J.C.J. & Diermanse F.L.M., Bepaling van de maatgevende afvoer bij Borgharen. Representativiteit meetreeks, verdelingsfuncties en statistische extrapolatie. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, oktober 2000.

(WL, 1999b)

Diermanse, F.L.M., Mierlo, M.C.M.L. van & Kwadijk, J.C.J., Memo kwaliteitsbeoordeling m.b.t. de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Maas bij Borgharen. WL|Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, juni 1999.

(WL, 1999c)

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

---

# Bijlagen

---

---



---

**Bijlage 1      Hydrologische jaarmaxima (1 oktober - 30 september)  
voor de Maas te Borgharen vanaf 1911**

.....

Toelichting. Variant 1 is een verlenging van de reeks zoals in het kader van de Boertien II studie is afgeleid, waarbij vanaf 1 januari 1993 gebruik is gemaakt van de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen. Variant 2 is inclusief een extra homogenisatie voor de periode 1984 tot en met 1987, gebaseerd op de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen.

Hydrologisch jaar	Boertien II	Variant 1 (verlenging Boertien II reeks)	Variant 2 (verlenging Boertien II reeks plus extra homogenisatie 1984-1987)
1911	1.333	1.333	1.333
1912	1.243	1.243	1.243
1913	1.733	1.733	1.733
1914	1.364	1.364	1.364
1915	2.031	2.031	2.031
1916	1.716	1.716	1.716
1917	1.874	1.874	1.874
1918	1.243	1.243	1.243
1919	2.279	2.279	2.279
1920	669	669	669
1921	839	839	839
1922	1.339	1.339	1.339
1923	1.131	1.131	1.131
1924	2.086	2.086	2.086
1925	3.175	3.175	3.175
1926	1.582	1.582	1.582
1927	1.309	1.309	1.309
1928	1.315	1.315	1.315
1929	1.103	1.103	1.103
1930	1.712	1.712	1.712
1931	1.236	1.236	1.236
1932	1.338	1.338	1.338
1933	553	553	553
1934	1.061	1.061	1.061
1935	1.186	1.186	1.186
1936	1.415	1.415	1.415
1937	1.556	1.556	1.556
1938	1.513	1.513	1.513
1939	2.147	2.147	2.147
1940	1.384	1.384	1.384
1941	1.152	1.152	1.152
1942	1.284	1.284	1.284
1943	759	759	759
1944	2.022	2.022	2.022
1945	1.744	1.744	1.744
1946	1.527	1.527	1.527
1947	1.575	1.575	1.575
1948	627	627	627
1949	1.282	1.282	1.282
1950	1.576	1.576	1.576
1951	1.706	1.706	1.706
1952	1.938	1.938	1.938
1953	678	678	678
1954	1.373	1.373	1.373
1955	1.863	1.863	1.863
1956	1.448	1.448	1.448
1957	1.989	1.989	1.989
1958	1.276	1.276	1.276
1959	809	809	809
1960	2.171	2.171	2.171

Hydrologisch jaar	Boertien II	Variant 1 (verlenging Boertien II reeks)	Variant 2 (verlenging Boertien II reeks plus extra homogenisatie 1984-1987)
1961	1.714	1.714	1.714
1962	1.075	1.075	1.075
1963	1.588	1.588	1.588
1964	1.317	1.317	1.317
1965	1.924	1.924	1.924
1966	1.999	1.999	1.999
1967	1.590	1.590	1.590
1968	758	758	758
1969	2.207	2.207	2.207
1970	944	944	944
1971	506	506	506
1972	1.065	1.065	1.065
1973	839	839	839
1974	1.253	1.253	1.253
1975	697	697	697
1976	1.225	1.225	1.225
1977	1.096	1.096	1.096
1978	1.364	1.364	1.364
1979	2.142	2.142	2.142
1980	1.351	1.351	1.351
1981	1.421	1.421	1.421
1982	1.126	1.126	1.126
1983	2.570	2.570	2.300 <sup>1)</sup>
1984	1.641	1.641	1.584 <sup>1)</sup>
1985	1.765	1.765	1.682 <sup>1)</sup>
1986	1.577	1.577	1.526 <sup>1)</sup>
1987	1.922	1.922	1.922
1988	1.275	1.275	1.275
1989	1.449	1.449	1.450 <sup>1)</sup>
1990	1.845	1.845	1.843 <sup>1)</sup>
1991	1.660	1.660	1.660
1992	2.388	2.280 <sup>2)</sup>	2.280 <sup>2)</sup>
1993	3.120	3.039 <sup>2)</sup>	3.039 <sup>2)</sup>
1994	-	2.746	2.746
1995	-	837	837
1996	-	1.124	1.124
1997	-	1.280	1.280
1998	-	1.823	1.823

- 1) Gecorrigeerde cijfers tussen 1984 en 1992 door vertaling van de nieuwe Q(h)-relatie vanaf 01-01-1993 bij Borgharendorp rekening houdend met bodemdaling (HKV, 1999a).
- 2) Nieuwe cijfers op basis van Q(h)-relatie Borgharendorp vanaf 01-01-1993 (Barneveld en Bastings, 1998)

**Bijlage 2 Afvoerpieken groter dan 1.300 m<sup>3</sup>/s (partiële reeks van afvoermaxima) te Borgharen, met een zichtduur van 8 dagen voor de periode 1911 tot en met 1998**

Toelichting. Variant 1 betreft een verlenging van de reeks zoals in het kader van de Boertien II studie is afgeleid, waarbij vanaf 1 januari 1993 gebruik is gemaakt van de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen. Variant 2 is inclusief een extra homogenisatie voor de periode 1984 tot en met 1987, gebaseerd op de nieuwe Q(h)-relatie voor Borgharen.

Kalender jaar	Boertien II	Variant 1 (verlenging Boertien II reeks)	Variant 2 (verlenging Boertien II reeks plus extra homogenisatie 1984-1987)
1911	1.315	1.315	1.315
1912	1.333	1.333	1.333
1914	1.733	1.733	1.733
1914	1.496	1.496	1.496
1914	1.327	1.327	1.327
1915	1.364	1.364	1.364
1915	2.031	2.031	2.031
1915	1.677	1.677	1.677
1916	1.657	1.657	1.657
1917	1.716	1.716	1.716
1918	1.874	1.874	1.874
1919	1.677	1.677	1.677
1920	2.279	2.279	2.279
1923	1.339	1.339	1.339
1923	1.303	1.303	1.303
1924	2.086	2.086	2.086
1925	1.443	1.443	1.443
1925	1.390	1.390	1.390
1926	3.175	3.175	3.175
1926	1.582	1.582	1.582
1928	1.309	1.309	1.309
1928	1.315	1.315	1.315
1930	1.376	1.376	1.376
1930	1.712	1.712	1.712
1931	1.564	1.564	1.564
1931	1.421	1.421	1.421
1931	1.320	1.320	1.320
1932	1.338	1.338	1.338
1937	1.415	1.415	1.415
1937	1.395	1.395	1.395
1938	1.556	1.556	1.556
1939	1.513	1.513	1.513
1939	2.147	2.147	2.147
1940	1.384	1.384	1.384
1944	1.911	1.911	1.911
1944	1.316	1.316	1.316
1945	2.022	2.022	2.022
1946	1.744	1.744	1.744
1947	1.527	1.527	1.527
1948	1.527	1.527	1.527
1948	1.575	1.575	1.575
1951	1.576	1.576	1.576
1952	1.428	1.428	1.428
1952	1.706	1.706	1.706
1952	1.457	1.457	1.457
1952	1.938	1.938	1.938
1955	1.373	1.373	1.373
1956	1.863	1.863	1.863
1957	1.448	1.448	1.448
1957	1.377	1.377	1.377

Kalender jaar	Boertien II	Variant 1 (verlenging Boertien II reeks)	Variant 2 (verlenging Boertien II reeks plus extra homogenisatie 1984-1987)
1958	1.989	1.989	1.989
1960	1.614	1.614	1.614
1961	2.171	2.171	2.171
1962	1.714	1.714	1.714
1963	1.588	1.588	1.588
1965	1.317	1.317	1.317
1965	1.914	1.914	1.914
1965	1.924	1.924	1.924
1966	1.704	1.704	1.704
1966	1.304	1.304	1.304
1966	1.999	1.999	1.999
1966	1.343	1.343	1.343
1967	1.590	1.590	1.590
1968	1.369	1.369	1.369
1970	2.207	2.207	2.207
1979	1.364	1.364	1.364
1979	1.473	1.473	1.473
1979	1.473	1.473	1.473
1980	2.142	2.142	2.142
1981	1.351	1.351	1.351
1981	1.382	1.382	1.382
1982	1.421	1.421	1.421
1984	1.421	1.421	1.391 <sup>1)</sup>
1984	2.570	2.570	2.300 <sup>1)</sup>
1984	1.641	1.641	1.584 <sup>1)</sup>
1986	1.765	1.765	1.682 <sup>1)</sup>
1987	1.577	1.577	1.526 <sup>1)</sup>
1988	1.922	1.922	1.922
1990	1.449	1.449	1.450 <sup>1)</sup>
1991	1.845	1.845	1.843 <sup>1)</sup>
1991	1.660	1.660	1.660
1993	2.388	2.280 <sup>2)</sup>	2.280 <sup>2)</sup>
1993	3.120	3.039 <sup>2)</sup>	3.039 <sup>2)</sup>
1994	-	1.664	1.664
1994	-	1.373	1.373
1995	-	2.746	2.746
1998	-	1.823	1.823
1999	-	1.482	1.482

- 1) Gecorrigeerde cijfers tussen 1984 en 1992 door vertaling van de nieuwe Q(h)-relatie vanaf 01-01-1993 bij Borgharendorp rekening houdend met bodemdaling (HKV, 1999a).
- 2) Nieuwe cijfers op basis van Q(h)-relatie Borgharendorp vanaf 01-01-1993 (Barneveld en Bastings, 1998)

**Bijlage 3 De vorm van de afvoergolf voor de Maas te Borgharen volgens de opschalingsmethode en bij een piekafvoer van 3.800 m<sup>3</sup>/s**

Afstanden (tijdsduren) vanaf de top; golfvormen bij een piekafvoer van 3800 m <sup>3</sup> /s (HKV, 1999b)			
afvoer (m <sup>3</sup> /s)	verwachtingswaarde (in uren vanaf de top)	2.50%	97.50%
1250	-210,5	-36,2	-694,0
1500	-169,2	-30,9	-543,2
1750	-132,9	-26,0	-412,6
2000	-108,0	-20,8	-338,1
2250	-81,5	-15,6	-256,0
2500	-63,9	-13,1	-194,3
2750	-51,1	-10,8	-153,3
3000	-40,7	-8,6	-121,8
3250	-31,7	-5,7	-102,2
3400	-25,5	-4,2	-85,5
3500	-19,5	-3,4	-63,6
3550	-16,5	-2,9	-54,1
3600	-13,7	-2,3	-45,5
3650	-9,7	-1,8	-31,0
3700	-6,2	-1,2	-19,2
3725	-5,0	-0,9	-16,3
3750	-3,6	-0,5	-12,8
3775	-2,2	-0,2	-8,5
3800	0,0	0,0	0,0
3775	4,4	0,4	18,7
3750	7,9	0,9	31,1
3725	10,0	1,3	37,2
3700	11,6	1,8	40,1
3650	14,7	2,6	47,9
3600	17,3	3,4	53,2
3550	19,6	4,8	54,8
3500	21,9	6,3	55,8
3400	26,8	10,4	57,2
3250	36,5	13,8	79,3
3000	53,6	17,7	126,3
2750	74,9	26,7	168,5
2500	105,2	37,1	238,4
2250	140,4	41,1	354,3
2000	178,0	44,9	487,0
1750	222,6	56,3	608,7
1500	273,2	68,8	748,7
1250	332,3	81,1	925,9

---