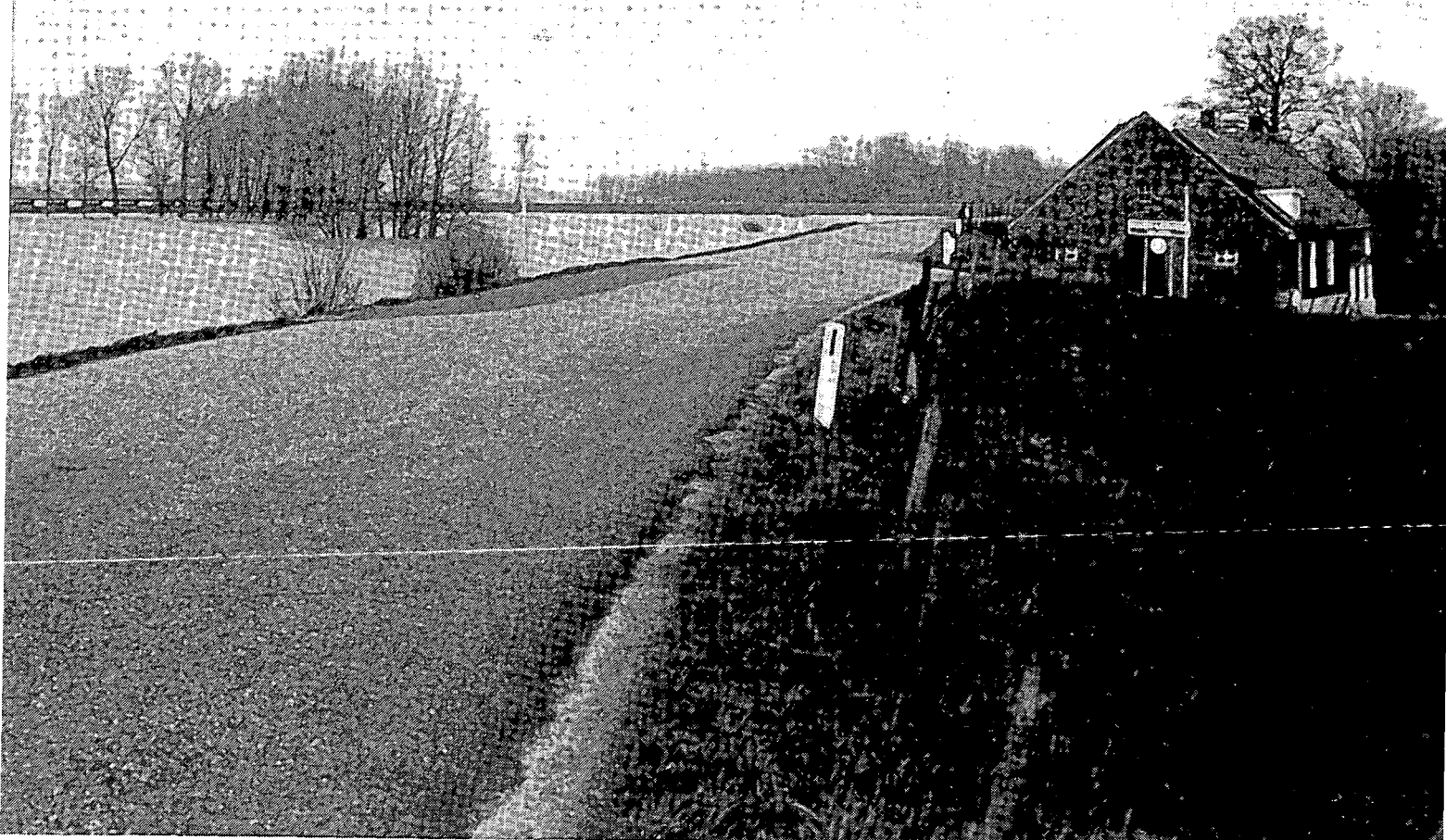


Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen

Aanvullend rapport 1: Maatgevende Afvoer Maas



waterloopkundig laboratorium | WL

EAC European-American Center
for Policy Analysis RAND

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Woord vooraf

Rapportsamenvatting

1	Inleiding	1 — 1
1.1	Probleemstelling	1 — 1
1.2	Bepaling maatgevende afvoer; algemeen	1 — 3
1.3	Aanpak	1 — 6
1.4	Opdracht	1 — 7
1.5	Uitvoering	1 — 7
2	Gegevensverzameling	2 — 1
3	Evaluatie berekeningsprocedure afvoeren	3 — 1
3.1	Inleiding	3 — 1
3.2	Historisch overzicht afvoerbepaling te Borgharen	3 — 1
3.3	Conclusies en samenvatting	3 — 14
4	Meteorologische omstandigheden bij extreme afvoeren	4 — 1
4.1	Inleiding	4 — 1
4.2	Samenhang tussen piekafvoeren en atmosferische circulatietypen	4 — 1
4.3	Toetsing en conclusies	4 — 3
5	Afvoergedrag bij extreem hoge afvoeren	5 — 1
5.1	Inleiding	5 — 1
5.2	Het stroomgebied van de Maas	5 — 1
5.3	Normalisatiewerken	5 — 3
5.4	Hoogwatergolven	5 — 4
5.5	Gevolgen van veranderingen in het stroomgebied	5 — 7
5.6	Conclusies	5 — 8
6	Resultaten frequentie-analyse afvoerreeks Maas	6 — 1
6.1	Inleiding	6 — 1
6.2	Resultaten analyse met jaarmaxima	6 — 2
6.3	Resultaten analyse met afvoerpieken	6 — 7
6.4	Gevoeligheidsanalyse	6 — 10
6.5	Discussie	6 — 11
6.5.1	Keuze van de meest geschikte frequentie-verdeling(en).	6 — 11
6.5.2	Maatgevende afvoer te Borgharen voor een herhalingstijd van 1.250 jaar.	6 — 12
6.6	Conclusies en aanbevelingen	6 — 14
6.6.1	Conclusies:	6 — 14
6.6.2	Aanbeveling:	6 — 14

7	Herhalingstijd piekafvoer 1926	7 – 1
8	Vorm van het maatgevend hoogwater te Borgharen	8 – 1
	8.1 Inleiding	8 – 1
	8.2 Voorgaande studies	8 – 1
	8.3 Beschrijving procedure en resultaten	8 – 2
9	Bepaling golfdemping	9 – 1
	9.1 Golfdemping algemeen	9 – 1
	9.2 Eén-dimensionale modellering	9 – 2
	9.3 Heralibratie ZWENDL (voorlopig)	9 – 4
	9.4 Golfdemping	9 – 7

Literatuur

Lijst van tabellen

- 3.1 Afvoer Borgharen, waterstand Visé (1933-1950)
- 3.2 Afvoeren te Maastricht Hoofdsluis en Borgharen-beneden
- 3.3 Waterstanden aan de hoofdpeilschalen gedurende de hoogwaterperioden in 1924, 1926, 1939 en 1952
- 3.4 Historisch overzicht afvoermetingen Borgharen

- 4.1 Piekafvoeren en atmosferische circulatietypen

- 5.1 Topstanden bij diverse hoogwaters

- 6.1 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen (Gecorrigeerde data)
- 6.2 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen
- 6.3 Overzicht gevoeligheidsanalyse bij herhalingsstijd van 1.250 jaar (in m³/s)
- 6.4 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen (Gecorrigeerde data)

- 7.1 Herhalingsstijden behorende bij verschillende piekafvoeren
- 7.2 Overzicht extreme afvoeren vòdr 1900.

- 8.1 Coëfficiënten voor de regressielijnen

- 9.1 Overzicht gebruikte hoogwaters en de topstand/afvoer te Borgharen
- 9.2 Verschil tussen gemeten en berekend topwaterstand
- 9.3 Heralibratie ZWENDL m.b.v. Maatgevende Hoogwater (voorlopig!)
- 9.4 Verschil tussen gemeten en berekende topwaterstand na hercalibratie

Lijst van figuren

- 1.1 Stroomgebied van de Maas
- 3.1 Afvoerkromme Maas te Maastricht (rivier + overlaat) volgens Lely (1926)
- 3.2 Q-h relaties op basis van stokdrijvermetingen te Maastricht
- 3.3 Afvoerkrommen Maas voor Borgharen-beneden
- 3.4 Verloop van de waterstanden te Borgharen-beneden bij middelbare afvoer ma (= 100 m³/s)
- 3.5 Afvoerkromme Borgharen t.o.v. waterstanden te Visé van 1951 t/m 1957
- 3.6 Afvoerkromme Borgharen 1956 definitief, 1957 voorlopig
- 3.7 Afvoerkromme Borgharen 1958 definitief, 1959 voorlopig
- 3.8 Afvoerkromme Borgharen 1958 - 1962
- 3.9 Afvoerkromme Borgharen 1966, afvoermeting 1965
- 3.10 Afvoerkromme Borgharen Dorp 1971, 1976 en 1984
- 3.11 Afvoerkromme Borgharen Dorp 1976

- 5.1 Lengteprofiel Maas en enkele zijrivieren
- 5.2 Waterstanden aan enkele hoofdpeilschalen in februari 1984
- 5.3 Looptijden van hoogwaters
- 5.4 Afvoergolven te Borgharen

- 6.1 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Gumbel met ondergrens
- 6.2 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Log-normaal
- 6.3 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Pearson-III
- 6.4 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Exponentieel
- 6.5 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Pareto

- 8.1 Duur van de was van hoogwaters als functie van de piekafvoer
- 8.2 Totale duur van hoogwaters als functie van de piekafvoer
- 8.3 Golfvolume van hoogwaters als functie van de piekafvoer
- 8.4 Duur van de was van hoogwaters als functie van gemiddelde piekafvoer (klassen van 300 m³/s)
- 8.5 Totale duur van hoogwaters als functie van gemiddelde piekafvoer (klassen van 300 m³/s)
- 8.6 Hoogwatergolf 3.500 m³/s
- 8.7 Hoogwatergolf 3.650 m³/s

Woord vooraf

Het onderzoek 'Toetsing Uitgangspunten Dijkversterking' is uitgevoerd in opdracht van de Minister van Verkeer en Waterstaat door het WL (Waterloopkundig Laboratorium) en het European-American Center for Policy Analysis/RAND (AEC/RAND). Aan het onderzoek is meegewerkt door een aantal gespecialiseerde bureaus, zoals Grondmechanica Delft (GD), het Bureau SME, het Bureau Hamhuis, Van Nieuwenhuijze en Sijmons (H+N+S) en daarnaast door een aantal adviseurs. Het rapport werd begeleid door de Commissie Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen (Commissie Boertien). De resultaten van het onderzoek zijn vastgelegd in de volgende rapporten:

Eindrapport

deelrapport 1; 'Veiligheid tegen overstromingen'

deelrapport 2; 'Maatgevende belastingen'

deelrapport 3; 'Constructief ontwerp'

deelrapport 4; 'Functies, waarden en procedures'

In het deelrapport 'Maatgevende belastingen' geven wij een overzicht van het onderzoek naar de randvoorwaarden voor het ontwerpen van dijkversterkingen, dat door WL is uitgevoerd. Het onderzoek omvat een analyse van de parameters die voor het ontwerp maatgevend zijn. Dit betreft onder meer de rivierafvoer, de bijbehorende hoogwaterstanden en de waakhogte. Daarnaast hebben wij onderzoek gedaan naar het optreden en het effect van ijssdammen, die in het verleden vaak de oorzaak van dijkdoorbraken waren. Ook geven wij een overzicht van mogelijke maatregelen en het effect daarvan voor een verlaging van de maatgevende hoogwaterstanden voor een gegeven (maatgevende) rivierafvoer.

Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van informatie verkregen een groep adviseurs en een groot aantal instanties en groepen, zoals waterschappen, provincies, Rijkswaterstaatsdiensten, ingenieursbureaus, wetenschappelijke instellingen en actiegroepen. Zonder deze informatie was het ons onmogelijk geweest het ons opgedragen onderzoek uit te voeren. WL en EAC/RAND zijn allen die ons informatie hebben verschaft dankbaar. Wij zijn vanzelfsprekend volledig verantwoordelijk voor de wijze waarop deze informatie is gebruikt bij het opstellen van de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek. Wij verwachten echter dat het onderzoek een duidelijk antwoord geeft op de vragen van de Minister en zal kunnen bijdragen aan een veilig behoud van het rivierengebied en de daarin aanwezige waarden.

Omdat in de beperkte onderzoekstijd niet op verantwoorde wijze ook de maatgevende afvoer van de Maas kon worden onderzocht, heeft de Minister van Verkeer en Waterstaat het WL opdracht gegeven voor het uitvoeren van 'Aanvullend onderzoek maatgevende afvoer Maas'. In overleg met de Rijkswaterstaat is besloten de resultaten van dit onderzoek te rapporteren als:

aanvullend rapport 1: 'Maatgevende Afvoer Maas'.

Rapportsamenvatting

Op verzoek van de Minister van Verkeer en Waterstaat heeft het Waterloopkundig Laboratorium (WL) en het Europees Amerikaans Centrum voor beleidsanalyse (EAC-RAND) een studie uitgevoerd naar de uitgangspunten voor de rivierdijkversterking. De studie werd begeleid door de commissie 'Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen' (Commissie Boertien) en moest onder meer een antwoord geven op de vraag of zich sinds het in gang zetten van het lopende dijkversterkingsprogramma zodanige veranderingen in de uitgangspunten hebben voorgedaan dat thans andere keuzes zouden worden gemaakt. Deze studie is uitgevoerd voor het Nederlandse rivierengebied van Rijn en Maas.

Omdat in de beperkte onderzoekstijd niet op verantwoorde wijze ook de maatgevende afvoer van de Maas kon worden onderzocht, heeft de Minister van Verkeer en Waterstaat het WL opdracht gegeven voor het uitvoeren van 'Aanvullend onderzoek maatgevende afvoer Maas'.

Bij het verzamelen van gegevens hebben wij gebruik gemaakt van het Maas-archief van RWS, RIZA in Lelystad, het archief van RWS, Directie Limburg te Maastricht en van de Universiteit van Gent, België.

Het rws-archief te Lelystad bevat veel gegevens over historische afvoeren. Wij troffen in het rws-archief van de Directie Limburg veel kaartmateriaal aan, waarop dwarsprofielen zijn aangegeven van de Maas vóór de modernisering. Helaas bleken de series niet volledig te zijn, maar vooral gegevens te bevatten van de Maas bovenstrooms van Namen.

De Universiteit van Gent bleek over volledige series profielen te beschikken van de Maas ná de modernisering.

De voor de analyse van de Maasafvoeren belangrijke gegevens, zoals dagafvoeren van de Maas in België, dagafvoeren van de zijrivieren en een volledige set van dwarsprofielen van de Maas vóór de modernisering, ontbraken en zijn aangevraagd bij het Ministère Wallon. Het bleek uiteindelijk niet mogelijk deze gegevens beschikbaar te krijgen.

Voor een effectieve inzet van een één-dimensionaal (1D) hydraulisch model moesten minimaal twee volledige series dwarsprofielen beschikbaar zijn. Omdat wij niet (tijdig) over deze gegevens konden beschikken, moest worden afgezien van simulaties met een 1D-modellering.

De analyse van afvoergegevens had onder meer tot doel vast te stellen met welke nauwkeurigheid de historische afvoeren zijn gemeten, zodat de piekafvoeren hiervoor kunnen worden gecorrigeerd.

In de periode van 1911 tot 1931 werden de afvoeren bepaald met behulp van stokdrijvermetingen. Metingen met stokdrijvers geven een overschatting van de afvoeren van ca. 7%.

Na het in gebruik nemen van de stuw te Borgharen (1931) maakt men voor afvoeren kleiner dan $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ gebruik van ijk-krommen. Voor de bepaling van hoge afvoeren is in de periode van 1932 tot 1950 hoofdzakelijk gebruik gemaakt van afvoerkrommen. Door de grindwinning in Nederland traden er in Borgharen aanzienlijke bodemdalingen op, zodat voor de afvoerkrommen een relatie werd gelegd tussen de waterstand van Visé, waar de rivierbed-

ding stabiel was, en de afvoer te Borgharen. De hoge afvoeren in de afvoerkrommen zijn bepaald met behulp van stokdrijvermetingen. Na 1950 daalde ook in Visé de bodem.

Rond 1950 is de bodemdaling bij Borgharen (tijdelijk) tot stilstand gekomen. Vanaf deze tijd tot aan 1970 gaat men voor de bepaling van de afvoeren uit van afvoerkrommen, die het verband aangeven tussen de waterstand te Borgharen en de afvoer aldaar. Tot aan 1956 is nog gebruik gemaakt van stokdrijvermetingen. Voor de afvoerkrommen na 1956 zijn Ott-molens gebruikt. De nauwkeurigheid van de gemeten afvoeren met Ott-molens is geschat op 5%.

Voor de periode na 1973 worden de dagafvoeren bepaald op basis van waterstanden en afvoerkrommen waarin voor Borgharen de afvoer is uitgezet tegen de gemeten waterstand. Voor de waterstanden maakt men na 1974 gebruik van de registrerende peilschrijver van Borgharen-Dorp. De afvoerkromme is gebaseerd op gemeten afvoeren met behulp van Ott-molens.

Ten aanzien van de geregistreerde piekafvoeren geven de stokdrijvermetingen voor de periode 1910-1931 en 1932-1956 een overschatting van respectievelijk ca. 7% en ca 5%. Voorts is, vanwege de opgetreden bodemdaling, de nodige voorzichtigheid geboden bij het gebruik van de afvoerkrommen uit de periode 1940-1955. De afvoer-waterstandsrelaties voor de periode na 1955 zijn voldoende betrouwbaar.

Voor een beoordeling van de meteorologische omstandigheden die tot hoge afvoeren hebben geleid, is gebruik gemaakt van bestaande literatuur. De kans op hoge afvoeren is het grootst bij depressiebanen komend uit westelijke richtingen. Stromingen vanuit zuidwestelijke richtingen leiden daarbij vaker tot hoge afvoeren dan stromingen uit noordwestelijke richtingen. Dit wordt toegeschreven aan het feit dat zuidwestelijke circulaties in het Belgische deel met de richting van de hoogwatergolf meelopen. Het afstromen van de neerslag uit de zijrivieren valt dan min of meer samen met reeds hoge afvoeren in de Maas.

Het afvoergedrag van de Maas bij extreem hoge afvoeren hebben wij nader onderzocht, waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen het Franse, Belgische en Nederlandse deel. Neerslag in het Franse en Belgische deel komt relatief snel tot afstroming. In Frankrijk is dit het gevolg van het smalle stroomgebied en in België het gevolg van steile hellingen en het rotsachtige karakter van de bodem. De in België aanwezige stuwmeren hebben op de afvoer geen wezenlijke invloed, omdat zij voordat het hoogwater optreedt gewoonlijk al gevuld zijn. Naar verhouding verloopt de afvoer in het Nederlandse deel traag als gevolg van het geringere verhang en de verhouding tussen de bergende breedte en de stroomvoerende breedte. De normaliseringswerken in Nederland hebben geen grote invloed gehad op de looptijden van hoogwatergolven.

De gemeten waterstanden langs de Maas vertonen bij gelijke piekafvoeren relatief grote verschillen. Dit is een gevolg van het feit dat de golfdemping op de Maas verhoudingsgewijs groot is. Voor het voorspellen van waterstanden is het niet voldoende om alleen uit te gaan van de grootte van de afvoer; ook de vorm van de golf speelt een rol.

In verband met de in België uitgevoerde normaliseringswerken heeft RWS in een oriënterende studie onderzocht wat de gevolgen zijn van deze werken. Resultaten van 1D-berekeningen voor het 1984 hoogwater voor het gedeelte van de Maas tussen Namen en Lixhe wijzen op

een versnelde afvoer van de hoogwatergolf, waardoor de grootte van de opgetreden golfdemping bovenstrooms van Eijsden is afgenomen en de waterstanden thans orde 0,1 à 0,3 m hoger zullen zijn dan voor de normaliseringswerken. Dit komt overeen met een afvoerverhoging in Borgharen van ca. 100 tot 350 m³/s en een wat spitsere golfvorm. Wij verwachten dat hierdoor de wateroverlast in Nederland in het bovenstroomse deel zal toenemen. Doordat de golf in benedenstroomse richting wat sterker dempt dan voorheen zal de overlast benedenstrooms minder toenemen dan in het bovenstroomse deel.

De schattingen van de verandering in de piekafvoeren als gevolg van de modernisering van de Maas in België zijn noodgedwongen gebaseerd op resultaten van 1D-berekeningen voor één hoogwater (1984), waarbij voor een deel van de rivier schattingen zijn ingevoerd voor de grootte van de veranderingen. Door de onzekerheid in de schatting van de correctie voor de maatgevende afvoer achten wij nader onderzoek met een hydraulisch model noodzakelijk om de veranderingen in de piekafvoeren betrouwbaar vast te kunnen stellen. Het gebruik van historische gegevens van afvoeren en riviergeometrie van de Maas in België is daarbij onontbeerlijk.

Voor de schatting van de maximale afvoer op basis van een aantal verschillende frequentieverdelingen is onderscheid gemaakt in de analyse van jaarmaxima en de analyse van afvoerpieken.

- Voor de jaarmaxima zijn de Gumbel Type-I, Pearson-III, Log-normale (3-parameter) en de Log-Pearson III verdeling in beschouwing genomen. Van deze verdelingen blijkt de Log-Pearson niet te voldoen, zodat deze verder niet in beschouwing is genomen. De Gumbelverdeling vertoont een discontinuïteit. In de analyse is daarom een ondergrens van 1.000 m³/s aangehouden. De Log-Pearson en de Log-normale verdeling geven vergelijkbare resultaten. De Gumbelverdeling leidt bij extrapolatie tot hogere waarden.
- Voor de analyse op basis van afvoerpieken zijn de Exponentiële-verdeling en de Pareto-verdeling toegepast. Uit de extrapolaties blijkt dat de Pareto-verdeling tot enigszins lagere waarden leidt dan de Exponentiële-verdeling. Van de verdelingen die geschikt zijn voor de toepassing op afvoerpieken (analyse van partiële series) blijkt de laatstgenoemde het beste te voldoen.

Wij hebben onderzocht in hoeverre de resultaten van de frequentie-analyses gevoelig zijn voor veranderingen in de waarde van de grootste afvoer (1926), het wel of niet weglaten van de grootste afvoer en het corrigeren van de gemeten afvoerwaarden (verlaging met 7% of 5%). Op grond van de gevoeligheidsanalyse achten wij de algemene Pareto-verdeling hier minder betrouwbaar. Op grond van een viertal factoren (aanpassing van de frequentielijn aan de data, theoretische geschiktheid van de verdeling voor het type data, gevoeligheid van de verdeling voor wijzigingen, en een beoordeling van de geëxtrapolerde waarde) is een keuze gemaakt voor vier frequentieverdelingen, te weten:

- Gumbel verdeling met een ondergrens van 1.000 m³/s,
- de Pearson-III verdeling,
- de Log-normale (3-parameter) verdeling en
- de exponentiële verdeling.

Op basis van deze frequentieverdelingen kan voor Borgharen de afvoer worden geschat bij een kans van voorkomen van 1/1.250 per jaar. Deze afvoer bedraagt 3.400 m³/s, waarbij nog geen rekening is gehouden met veranderingen in het stroomgebied bovenstrooms. Het effect van de modernisering van de Maas in België op de grootte van de piekafvoer kan thans slechts globaal worden geschat. Voor een definitieve vaststelling van de maatgevende afvoer is nader onderzoek met het eerder genoemde hydraulische model noodzakelijk om het effect van de modernisering van de Maas in België vast te stellen. Doordat wij niet tijdig over gegevens van de Maas in België konden beschikken moest in dit onderzoek van hydraulische modellering worden afgezien.

Op grond van de thans ter beschikking staande gegevens schatten wij de Maatgevende Afvoer voorlopig op 3.685 m³/s. Het verschil met de thans gehanteerde Maatgevende Afvoer (3.650 m³/s) is klein. Wij zien hierin geen aanleiding om de grootte van de Maatgevende Afvoer nu te wijzigen.

De herhalingstijd voor de piekafvoer van 1926 kunnen wij op grond van de beperkte duur van de afvoergegevens niet nauwkeuriger schatten. Wij schatten de herhalingstijd op 100 tot 225 jaar.

Bij de bepaling van de maatgevende waterstanden benedenstrooms van Borgharen speelt de golfdemping een belangrijke rol. De grootte van de golfdemping is onder meer afhankelijk van de vorm van het hoogwater. Bij gelijke topafvoeren leidt een spitsere hoogwater (minder golfvolume) tot een grotere golfdemping dan een breder hoogwater. In de onderhavige studie hebben wij daarom tevens de vorm van het maatgevende hoogwater geëxtrapoleerd uit de vorm van gemeten hoogwaters. De hier gepresenteerde vorm voor het maatgevende hoogwater wijkt enigszins af van het door Van Dixhoorn (1978) geëxtrapoleerde hoogwater. Wij komen in de huidige voorspelling tot een iets groter volume voor de maatgevende golf.

Voor de voorspelling van waterstanden tijdens hoogwaters gaat RWS uit van een 1D-model, gebaseerd op het programmapakket ZWENDL. Op grond van de grote verschillen tussen de gemeten en berekende waterstanden voor onder meer het meest recente hoogwater (januari 1993) heeft RWS het 1D-model opnieuw gecalibreerd. Wij schatten de nauwkeurigheid van voorspellingen met het 1D-model op 10 à 30 cm. Voor het bepalen van de MHW-standen is dit onvoldoende nauwkeurig. De MHW-standen moeten daarom worden bepaald op basis van berekeningen het 2DH-model, rekening houdend met een schatting van de golfdemping via het 1D-model.

Met betrekking tot de MHW-standen moet worden getoetst of de andere vorm van de Maatgevende Afvoer tot een significante verandering van de golfdemping leidt. Indien uit vergelijkende berekeningen met het 1D-model blijkt dat het verschil in golfdemping meer is dan 0,05 m dienen de MHW-standen hiervoor te worden aangepast. Doordat de grootte van de Maatgevende Afvoer (3.650 m³/s) niet wijzigt, zijn geen aanvullende berekeningen nodig met het 2D-model (WAQUA).

1 Inleiding

Op verzoek van de Minister van Verkeer en Waterstaat heeft het Waterloopkundig Laboratorium en het Europees Amerikaans Centrum voor beleidsanalyse (EAC-RAND) een studie uitgevoerd naar de uitgangspunten rivierdijkversterking. De studie werd begeleid door de commissie 'Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen' (Commissie Boertien). In deze studie is nagegaan of er, sinds het in gang zetten van de lopende dijkversterking, zodanige veranderingen zijn opgetreden in de uitgangspunten dat thans andere keuzes zouden worden gemaakt. De resultaten van deze studie zijn in januari 1993 gepresenteerd, zie WL & EAC-RAND 1993a t/m 1993f. Bij de uitwerking van deze studie is zowel aandacht besteed aan het stroomgebied van de Rijn als dat van de Maas.

Omdat er in het kader van de Hydrologische Rijn Commissie veel meer gegevens beschikbaar waren voor de Rijn, is voor een schatting van de te verwachten afvoer te Lobith veel uitgebreider onderzoek verricht naar de veranderingen in het stroomgebied van de Rijn bovenstrooms van Nederland, dan naar de veranderingen in het stroomgebied van de Maas, zie Figuur 1.1. Voorts hebben wij bij het vaststellen van de maatgevende afvoeren voor zowel de Maas als de Rijn aanbevelingen gedaan voor het toepassen van hydrologisch/hydraulische modellering. Als uitvloeisel van de uitkomsten voor de Rijn en de gevonden resultaten voor de Maas is aanvullend onderzoek voor de Maas opgedragen. Het voorliggende verslag geeft de resultaten van dit onderzoek weer.

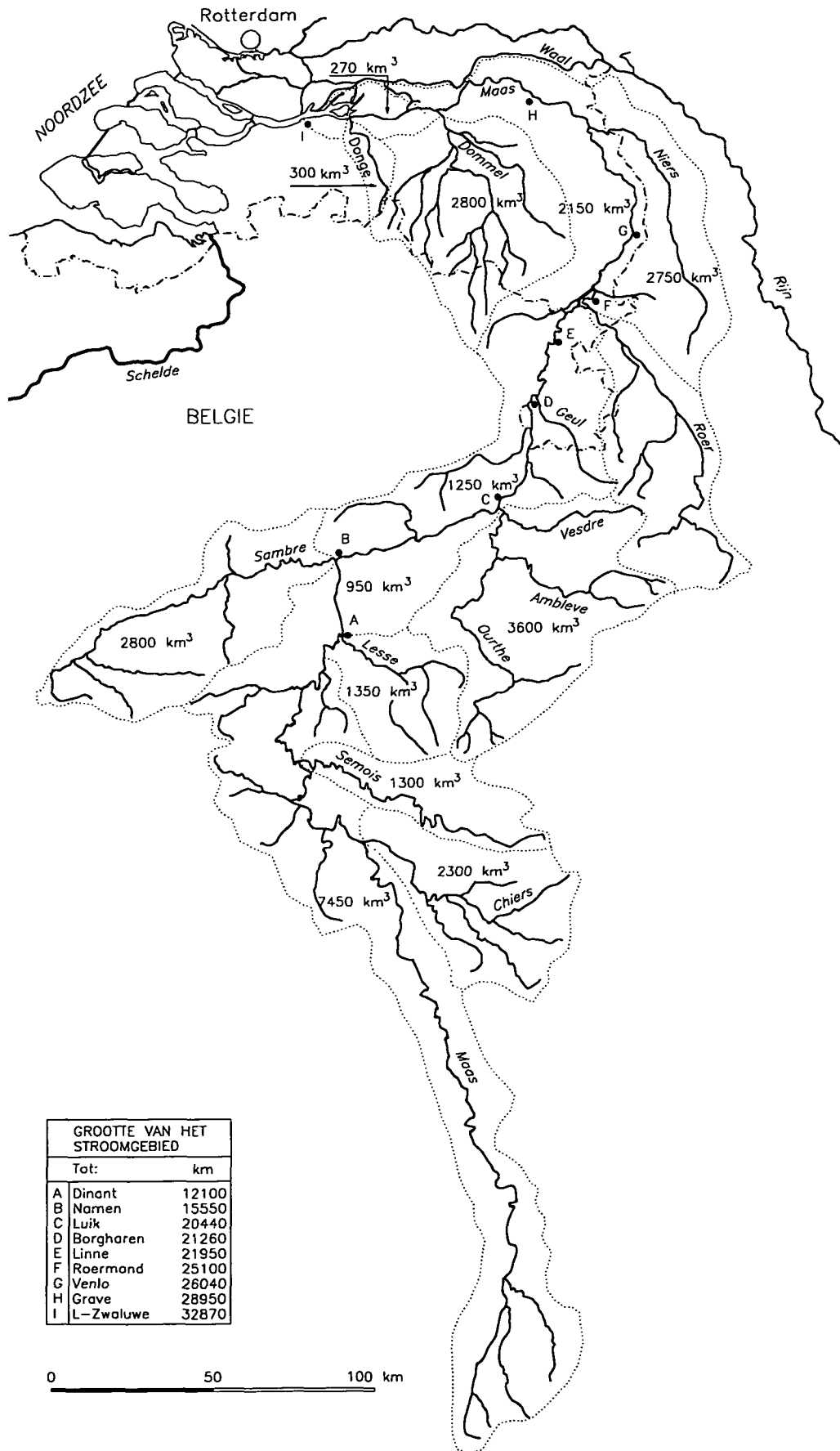
1.1 Probleemstelling

Maatgevende afvoer Borgharen.

In het deelrapport 'Maatgevende belastingen'; WL & EAC-RAND 1993d, is de maatgevende afvoer voor de Maas te Borgharen bepaald op basis van frequentieanalyse, toegepast op jaarlijkse afvoermaxima te Borgharen uit de periode 1911-1991. De analyses voor de frequentieverdelingen volgens Pearson-III en de Gumbel-verdeling leidden tot schattingen van de maatgevende afvoer van respectievelijk 3.200 en 3.600 m³/s. De gemeten afvoeren bleken voor de extreme afvoeren slecht te passen bij de frequentieverdelingen. Voorts is er in de frequentieanalyse van uitgegaan dat de gegevens homogeen zijn. Dat is gezien de veranderingen met name in het Belgische deel van het rivierbed van de Maas twijfelachtig. Tenslotte bestaan er onzekerheden ten aanzien van de nauwkeurigheid van extreme de afvoer. De thans uitgevoerde studie is er op gericht om genoemde onzekerheden weg te nemen, teneinde een meer betrouwbare schatting te kunnen maken voor de ontwerpafvoer te Borgharen.

Vorm van de hoogwatergolf te Borgharen.

In het overleg met de Hoofddirectie en de Directie Limburg van de Rijkswaterstaat is naar voren gebracht dat de golfdemping op de Maas een belangrijke rol speelt voor maatgevend hoogwater. De mate van de golfdemping is onder meer afhankelijk van de geometrie van de rivier (dwarsprofiel, langsverhang, ruwheid) en de vorm van het hoogwater. Voor de bepaling van de Maatgevende Hoogwaterstanden (MHW) langs de Maas bepaalt Rijkswaterstaat eerst de afvoer van de Maas op diverse lokaties ($Q = f(x)$) met behulp van een één-dimensionaal hydraulisch model, gebaseerd op het programmapakket ZWENDL. Vervolgens wordt met het programma-pakket WAQUA de over de verticaal gemiddelde waterbeweging (incl. de MHW-standen) bepaald.



Figuur 1.1 Stroomgebied van de Maas

Voor de bepaling van de MHW-standen tijdens extreem hoogwater is het van belang dat de afvoer juist wordt geschat. Op grond hiervan heeft WL tevens aandacht besteed aan de vorm van de hoogwatergolf te Borgharen.

Betrouwbaarheid 1D-modellering

Voor het vaststellen van de MHW-standen speelt de golfdemping op de Maas een belangrijke rol. De grootte van de golfdemping wordt door Rijkswaterstaat bepaald met behulp van een 1D-model voor de Maas op basis van het programmapakket ZWENDL. De resulterende MHW-standen langs de Maas zijn dus tevens afhankelijk van de resultaten van de 1D-modellering.

1.2 Bepaling maatgevende afvoer; algemeen

De grootte van de afvoer in de rivier wordt onder meer bepaald door:

- a. de hoeveelheid neerslag in het stroomgebied,
- b. de kenmerken van het stroomgebied, waardoor een deel van de neerslag tot afstroming komt,
- c. de met de geometrie samenhangende kenmerken van de rivier, zoals het dwarsprofiel, de hydraulische ruwheid, bergende breedte, etc...; deze kenmerken bepalen de snelheid waarmee het water wordt afgevoerd en de grootte van de optredende golfdemping.

Voorts moet bij de beoordeling van gemeten afvoeren aandacht worden besteed aan de nauwkeurigheid van de afvoermetingen. Zonodig dienen hiervoor correcties te worden ingevoerd.

Voor het bepalen van de maatgevende afvoer voor de Maas te Borgharen wordt gebruik gemaakt van frequentie-analyses. Het gebruik van frequentie-verdelingen heeft als nadeel dat er geen rekening wordt gehouden met het fysisch gedrag van het stroomgebied. Om hieraan tegemoet te komen worden studies op basis van frequentie-analyses aangevuld met hydraulische en/of hydrologisch/hydraulische modellering van het stroomgebied. We zullen hier een overzicht geven van de samenhang tussen frequentie-analyse en hydraulische en/of hydrologisch/hydraulische modellering. We maken een onderscheid tussen het toepassen van alleen een hydraulisch model en een modellering, waarbij het hydraulische model ondersteund wordt door een hydrologische component.

Frequentie-analyses

Deze zijn gebaseerd op een analyse van geregistreerde afvoeren. Voor de Maas worden sinds 1911 dagelijks afvoeren bepaald. Aangezien het meten van afvoeren in vergelijking tot het meten van waterstanden veel lastiger is, gaat men vrijwel steeds uit van gemeten waterstanden die via een bekende afvoer-waterstands-relatie (QH-relatie) worden omgerekend naar afvoeren. De QH-relatie moet door metingen worden vastgelegd.

Bij het uitvoeren van de analyses moeten de gegevens waarvan we uitgaan homogeen zijn. Inhomogeniteiten kunnen door diverse factoren worden geïntroduceerd, zoals:

- i (verschil in) meetnauwkeurigheden,
- ii veranderingen in de geometrie van de hoofdrivier,
- iii veranderingen in de geometrie van de zijrivieren,
- iv veranderingen in het gedrag van de deelstroomgebieden en
- v eventuele veranderingen in de neerslag (meteorologische omstandigheden, zoals klimaatwijzigingen).

ad i

Door een analyse van de meetmethoden die in het verleden zijn toegepast kan een schatting worden gemaakt van de aan te brengen correctie(s) om alle afvoeren dezelfde mate van nauwkeurigheid te geven. (De analyse hiervan vindt plaats in hoofdstuk 3).

ad ii

Om de invloed van veranderingen in de geometrie van de hoofdrivier vast te stellen hebben wij voorgesteld om gebruik te maken van een hydraulisch model, hetzij het door dr. ir. H.E.J. Berger ontwikkelde model, hetzij het door dr. ir. P. Troch ontwikkelde model.

De invloed van veranderingen in de geometrie van de rivier kunnen we bepalen door simulaties uit te voeren voor recent gemeten hoogwaters, waarbij we enerzijds uitgaan van de geometrie van de Maas vóór de modernisering en anderzijds uitgaan van de geometrie na de modernisering.

Indien voldoende gegevens beschikbaar zijn kunnen we de veranderingen van de afvoeren te Borgharen ook bepalen door als randvoorwaarden hoogwaters te gebruiken die vóór de modernisering zijn gemeten. Het is echter niet zeker of er voldoende gegevens beschikbaar zijn om een consistente set van randvoorwaarden te creëren voor hoogwaters die voor de modernisering van de Maas zijn opgetreden.

(Later zal blijken dat wij niet tijdig over de noodzakelijke gegevens konden beschikken om een hydraulische modellering zinvol toe te passen. De schatting van de invloed van de Maasmodernisering hebben wij daarom noodgedwongen moeten baseren op door RWS, Directie Limburg uitgevoerde berekeningen voor het hoogwater van 1984, waarbij de veranderingen van de Maas in België deels zijn geschat.)

ad iii/iv

Met mogelijke veranderingen (verstedelijking, veranderingen in de infrastructuur, retentiebekkens ...) in het gedrag van de deelstroomgebieden (zijrivieren) is in deze studie voorshands geen rekening gehouden. Een dergelijke studie heeft pas zin als uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat nader onderzoek naar veranderingen in het stroomgebied van de zijrivieren noodzakelijk is. Het uitvoeren van de hier bedoelde gevoeligheidsanalyse is gekoppeld aan een toepassing van het hydraulische model. Door het variëren van de grootte van de piekafvoer en de duur van de was van de instromende hydrograaf van zijrivieren kunnen we nagaan of de lokale afvoeren in de Maas hiervoor gevoelig is.

Als blijkt dat de afvoer te Borgharen gevoelig is voor (kleine) veranderingen in de deelstroomgebieden, is nader onderzoek met een hydrologisch/hydraulisch model noodzakelijk.

ad v

Indien de neerslag in de tijd niet homogeen is, bijvoorbeeld door wijzigingen in het klimaat, is het gebruik van een hydrologisch/hydraulisch model noodzakelijk. Met behulp van de hydrologische component kunnen we na gaan wat de afvoeren in de Maas zouden zijn geweest indien wordt uitgegaan van homogene neerslag.

Hydrologisch/hydraulische modellering.

Omdat het fysisch gedrag van het neerslag-afvoer proces met frequentie-analyses niet wordt weergegeven en deze frequentie-analyses worden gebruikt om het gedrag te extrapoleren, is het voor een verantwoorde bepaling van maatgevende afvoeren zeer gewenst dat de analyses worden ondersteund door een hydrologisch/hydraulisch model. De keuze van een geschikte frequentieverdeling kan dan worden gebaseerd op inzicht in het gedrag van het stroomgebied bij extreme omstandigheden. Hiervoor zijn in beginsel de volgende modellen nodig:

1. modellen voor de randvoorwaarden, die met name de ruimtelijke structuur van de neerslag (eventueel inclusief klimaatwijzigingen) beschrijven.
2. fysisch gefundeerde hydrologische modellen voor de simulatie van het neerslag-afvoer proces in de stroomgebieden, en
3. hydraulische modellen voor de simulatie van het afvoerproces door de rivier.

Met bovenstaand instrumentarium leidt een frequentie-analyse van de neerslaggegevens tot randvoorwaarden voor de hydrologische modellen onder extreme condities. Het resultaat van de hydrologische modellen is weer randvoorwaarde voor de hydraulische modellen, waarmee uiteindelijk de maatgevende waterstanden worden bepaald.

Hoewel de doelstelling voor de ontwikkeling van een hydrologisch/hydraulisch instrumentarium primair gericht is op de bepaling van de maatgevende afvoer, kan het instrumentarium voor meer doeleinden worden ingezet, zoals

- het in kaart brengen van historische en toekomstige veranderingen in randvoorwaarden en stroomgebied op het hele rivierregiem,
- het in "real-time" voorspellen van waterstanden en afvoeren voor hoog- en laagwater, mits het modelinstrumentarium wordt uitgebreid met een data-assimilatie module. Door het gebruik van een hydrologische component kan het optreden van hoog- of laagwater in een eerder stadium worden voorspeld dan zonder gebruikmaking van een dergelijke component.

In de onderhavige studie is slechts gebruik gemaakt van frequentie-analyses. Er is geen hydrologisch/hydraulische modellering toegepast.

1.3 Aanpak

Voor de nadere analyse van de afvoerextremen van de Maas te Borgharen hebben wij de volgende procedure voorgesteld, zie de WL-offerte RS0130/Q1563/HO/eb dd 7 januari 1993:

- 1 Verzamelen van gegevens over de afvoerextremen en het rivierbed,
- 2 Evaluatie van de berekeningsprocedure van de afvoeren,
- 3 Analyse van de meteorologische omstandigheden die tot extreme afvoeren leiden,
- 4 Studie van het afvoergedrag van het stroomgebied van de Maas bij extreem hoge afvoeren ,
- 5 Analyse van de historische en geplande veranderingen in het stroomgebied,
- 6 Schatting van het effect van de veranderingen in het stroomgebied op de afvoerextremen,
- 7 Homogeniseren van de afvoerextremen van de relevante meetstations,
- 8 Frequentieanalyse,
- 9 Schatting van de herhalingstijd van de afvoer van januari 1926,
- 10 Gevoeligheidsanalyse naar het gedrag van het stroomgebied bij extreem hoge afvoeren ook buiten het meetbereik.

Het resultaat van de uit te voeren studie is daarbij sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van historische gegevens van dwarsprofielen in het Belgische deel van de Maas en de bijbehorende randvoorwaarden. Omdat wij op voorhand niet wisten welke gegevens beschikbaar zijn, hebben wij twee onderzoekscenario's voorgesteld:

- S-1 een maximum scenario, waarbij de benodigde gegevens beschikbaar komen. In dit geval is het mogelijk een hydrodynamisch model van het Belgische deel van de Maas in te zetten bij de analyse.
- S-2 een minimum scenario, waarbij de historische dwarsprofielen en de bijbehorende randvoorwaarden niet op tijd beschikbaar zijn. Dit houdt in dat wij slechts een deel van de aanvullende studie naar de extrapolatie van de Maasafvoeren kunnen uitvoeren. In het minimum scenario zijn activiteiten 1, 2, 3, 4 deels, 5 deels en 9 voorzien.

Na overleg met dr. ir. P. Troch van de Universiteit van Gent bleek dat wij voor de uitvoering van de hydrodynamische modellering globaal één maand nodig zouden hebben. Om half april over een conceptverslag te kunnen beschikken moesten de historische gegevens van de dwarsprofielen van het Belgische deel van de Maas uiterlijk 1 maart 1993 beschikbaar zijn.

Hieraan kon uiteindelijk niet worden voldaan, zodat moest worden afgezien van een hydrodynamische modellering. Het voorliggende verslag is gebaseerd op het minimumscenario.

Voor het bepalen van de vorm van de hoogwatergolf te Borgharen is uitgegaan van een analyse van opgetreden hoogwaters. Deze analyse moet een schatting opleveren voor de duur van de golf op verschillende afvoerniveaus bij de maximaal te verwachten afvoer te Borgharen. De toegepaste procedure is uitgebreid beschreven in hoofdstuk 8.

Voor een beoordeling van de golfdemping in het stroomgebied van de Maas, benedenstrooms van Borgharen, zijn wij uitgegaan van het door Rijkswaterstaat beschikbaar gestelde conceptverslag met betrekking tot een herijking van het ZWENDL-model, zie hoofdstuk 9.

1.4 Opdracht

De opdracht is uitgevoerd onder contract HW-493B tussen de Rijkswaterstaat, Hoofddirectie en het WL.

1.5 Uitvoering

In hoofdstuk 2 geven wij een overzicht van de verzamelde gegevens. De berekeningsprocedure van de afvoeren lichten wij toe in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op de meteorologische omstandigheden. De veranderingen in het stroomgebied en het afvoergedrag bij extreme afvoeren beschrijven wij in hoofdstuk 5. De hoofdstukken 6 en 7 bevatten respectievelijk de resultaten van de frequentieanalyse en de schatting van de herhalingstijd voor het hoogwater 1926. De bepaling van de vorm van het maatgevend hoogwater is beschreven in hoofdstuk 8. Tenslotte gaan wij in hoofdstuk 9 in op de bepaling van de golfdemping in het Nederlandse deel van de Maas.

Het project is uitgevoerd door dhr. J. Bremer, ir F.C.M. van der Knaap, drs. R.H. Passchier en ir J.H.A. Wijbenga, die tevens voor de projectleiding heeft gezorgd. Tijdens het gehele project is regelmatig advies ingewonnen van prof. ir. H.J.M. Ogink.

2 Gegevensverzameling

Bij aanvang van het onderzoek naar de bepaling van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen is een grote hoeveelheid informatie verzameld. Voor deze verzameling zijn drie bronnen gebruikt:

1. Maas-archief bij RIZA in Lelystad,
2. archief rws/Directie Limburg in Maastricht, en
3. gegevens op de Universiteit van Gent.

Op 27 en 28 januari 1993 is alle relevante informatie verzameld uit het Maas-archief bij RIZA. Deze informatie is te verdelen in de volgende onderwerpen:

- historische publicaties aangaande hoogwaters op de Maas,
- lengte- en dwarsprofielen,
- afvoercurves en afvoermetingen, en
- afvoergegevens van een aantal meetstations op de Franse en Belgische Maas voor een beperkt aantal jaren tussen 1963 en 1970.

Het archief is redelijk compleet voor publicaties van historische afvoeren. Recentere studies zijn niet aanwezig.

Uit het archief van de rws/Directie Limburg is ons op 4-2-1993 een groot aantal profielen ter hand gesteld door dr. ir. H.E.J. Berger.

De tekeningen zijn te verdelen in zeven groepen:

1. algemene rivierkaarten voor navigatie;
2. ontwerptekeningen van stuwen;
3. algemene topografische kaarten van gebieden grenzend aan de Maas;
4. ontwerptekeningen voor het verdiepen/uitbaggeren van de Maas;
5. algemene rivierkaarten zonder diepte-aanduidingen;
6. lengte-profielen;
7. rivierkaarten met dwarsprofielen.

Van deze informatie zijn de rivierkaarten met dwarsprofielen belangrijk. Het betreft profielen van de Belgische Maas vóór de modernisering. Deze serie profielen vormt weliswaar een goede basis voor het uitvoeren van een hydraulische studie naar het afvoergedrag van de Maas, maar is echter niet compleet.

Voor de gegevensverzameling in België is de coördinatie verzorgd door dr. ir. P.A. Troch van de Universiteit van Gent.

Tijdens een bezoek op 10-2-1993 is een grote hoeveelheid materiaal ter beschikking gesteld. Het betreft voornamelijk volledige series profielen van de Belgische Maas na de modernisering.

De verzamelde informatie kan verdeeld worden in een aantal groepen:

1. afvoergegevens van de hoofdrijver en de zijrivieren;
2. originele gegevens van de afvoerbepalingen (meetmethode en berekeningen);
3. rivierprofielen (lengte- en dwarsprofielen) van de hoofdrijver en zo mogelijk ook van de belangrijkste zijrivieren (met name de Sambre);
4. studies van historische piekafvoeren;
5. studies naar het effect van de rivierwerken in de Maas op hoge afvoeren;

Ad 1.

Voor het eerste station in Nederland (Borgharen) zijn dagafvoeren beschikbaar sinds 1911. Deze zijn verstrekt door de rws.

Dagelijkse waarden van de afvoer op de hoofdrijver en de zijrivieren in België zijn gemeten sinds het midden van de jaren zestig. Deze gegevens zijn voor een aantal jaren beschikbaar bij het RIZA en hiervan zijn kopiën verkregen. De overige gegevens zijn opgevraagd bij het Ministère Wallon de l'Équipement et des Transportes te Brussel, maar konden voor deze studie niet beschikbaar worden gemaakt. Hierdoor zijn de ons ter beschikking staande series afvoergegevens te kort voor een frequentie-analyse van piekafvoeren.

Van de historische afvoeren (met name 1926 en 1961) zijn slechts fragmentarische gegevens beschikbaar. Ook deze gegevens zijn aangevraagd bij het Ministère Wallon de l'Équipement et des Transportes te Brussel, maar kwamen niet tijdig beschikbaar.

Ad 2.

Er zijn een aantal rapporten beschikbaar met beschrijvingen van de methode van afvoerbepaling te Borgharen voor de historische afvoeren. Een volledig overzicht is gegeven in het rapport van J. van Leeuwen (1981), dat ter beschikking werd gesteld door de rws Directie Limburg. Tevens is een kopie ontvangen van de oorspronkelijke berekening van de afvoer van de winter van 1925/26.

Ad 3.

In België is de Maas organisatorisch verdeeld in de Namense en Luikse Maas. Voor de Namense Maas zijn twee series profielen beschikbaar:

1. situatie voor modernisering (eind 70 tot begin 80-er jaren). Deze set bevat ook profielen van de Sambre;
2. tekeningen van de geplande situatie, die momenteel vrijwel geheel gerealiseerd is;

Voor de Luikse Maas is echter alleen een serie uit de 70-er jaren (d.w.z. na modernisatie) beschikbaar, die redelijk overeenkomt met de huidige situatie.

Al deze profielen zijn beschikbaar gekomen via de Universiteit van Gent.

Voor de Luikse Maas bestaat waarschijnlijk ook een derde serie profielen, die de toekomstige situatie weergeeft voor de Luikse Maas. Daar de aandacht met name is gericht op de veranderingen ten gevolge van de modernisering, is deze serie verder buiten beschouwing gelaten.

Naast deze series is een aantal historische profielen beschikbaar uit 1956, die de situatie weergeeft voor de modernisering in België. Deze serie, ter beschikking gesteld door de rws/Directie Limburg, is echter incompleet. Hoewel de historische profielen oorspronkelijk afkomstig zijn uit de Office de la Navigation in Luik, is daar deze serie onbekend en is een kopie aangevraagd bij het Ministerie in Brussel. Deze profielen zijn niet op tijd beschikbaar gekomen om deze te kunnen gebruiken als basis voor een hydraulische modellering.

Ad 4.

Studies van historische piekafvoeren zijn vooral geconcentreerd op de afvoer van 1926. Andere hoge afvoeren (zoals 1920, 1939 en 1961) zijn vrijwel niet bestudeerd. Voor de gegevens aangaande de afvoer van 1926 zijn de publikaties van Vereerstraten (1966, 1969) de meest complete bron.

Ad 5.

Naar de effecten van de modernisering van de Belgische Maas op de piekafvoeren te Borgharen bestaat een studie van S. Bastings (1987).

3 Evaluatie berekeningsprocedure afvoeren

3.1 Inleiding

Dit deel van de studie heeft als doel inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van historische piekafvoeren te Borgharen. Op basis van literatuuronderzoek is getracht een beeld te krijgen van de afvoermeetmethoden en van de extrapolatie van de afvoerkrommen zoals dat in de loop der tijd is toegepast. In paragraaf 3.2 geven wij een kort historisch overzicht van de afvoerbepaling te Borgharen. Dit overzicht is met name gebaseerd op het werk van Van Leeuwen (1981). In paragraaf 3.3 formuleren wij enkele conclusies.



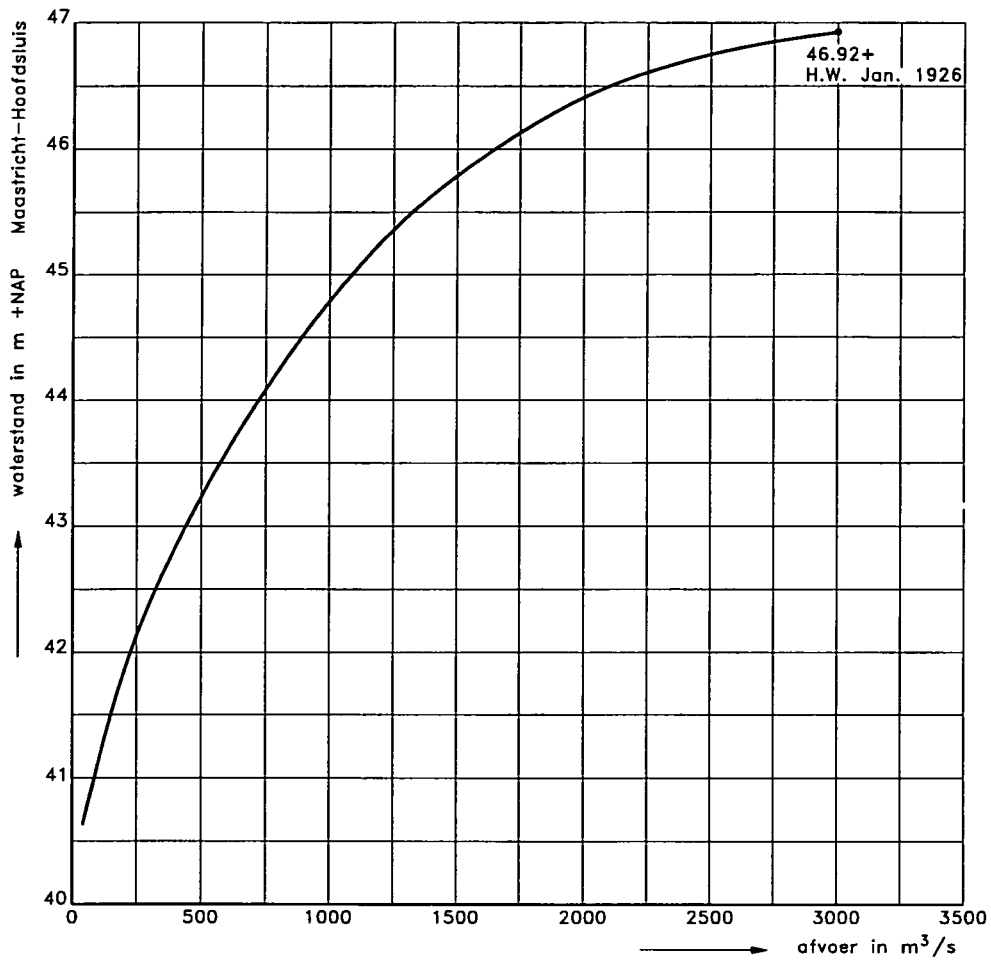
Stuw Borgharen

3.2 Historisch overzicht afvoerbepaling te Borgharen

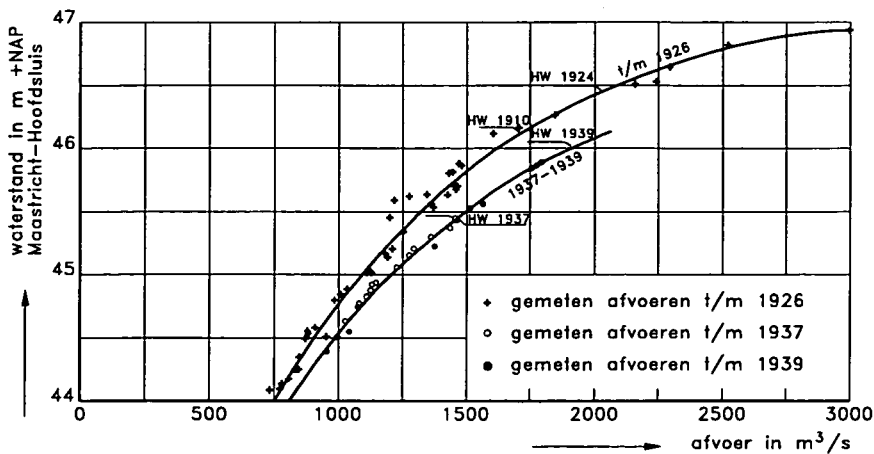
Periode 1911–1932

Volgens Van der Made (1965) zijn de afvoeren te Borgharen in de periode 1911–1932 afgeleid uit de afvoerkromme van Visé. Van Leeuwen (1981) vermeldt dat in deze periode in de jaarboeken en de desbetreffende tienjarige overzichten geen melding wordt gemaakt van afvoergegevens te Borgharen. Wel zijn gedurende deze periode vanaf 1917 met behulp van stokdrijvers afvoermetingen verricht. Op basis van deze metingen en de waterstand te Maastricht (hoofdsluis) zijn in 1924 en 1926 afvoerkrommen samengesteld, die overeenkomen met de door Lely (1926) gepresenteerde afvoerkromme (zie Figuur 3.1). Deze afvoerkromme is geldig voor de Maas + Heugeme overlaat. Van Leeuwen (1981) vermeldt voorts, dat de stokdrijvermetingen vanaf 1917 gepubliceerd zijn in de verslagen Openbare Werken. De metingen tot en met 1926 zijn opgenomen in Figuur 3.2. Hieruit blijkt, dat de afvoerkromme een interpolatie over alle meetpunten is. Er is dus geen sprake van extrapolatie vanwege de

gemeten topafvoer van 3.000 m³/s in januari 1926. Er zijn echter geen afvoeren bepaald met de in Figuur 3.1 gepresenteerde afvoerkromme.



Figuur 3.1 Afvoerkromme Maas te Maastricht (rivier + overlaat) volgens Lely (1926)

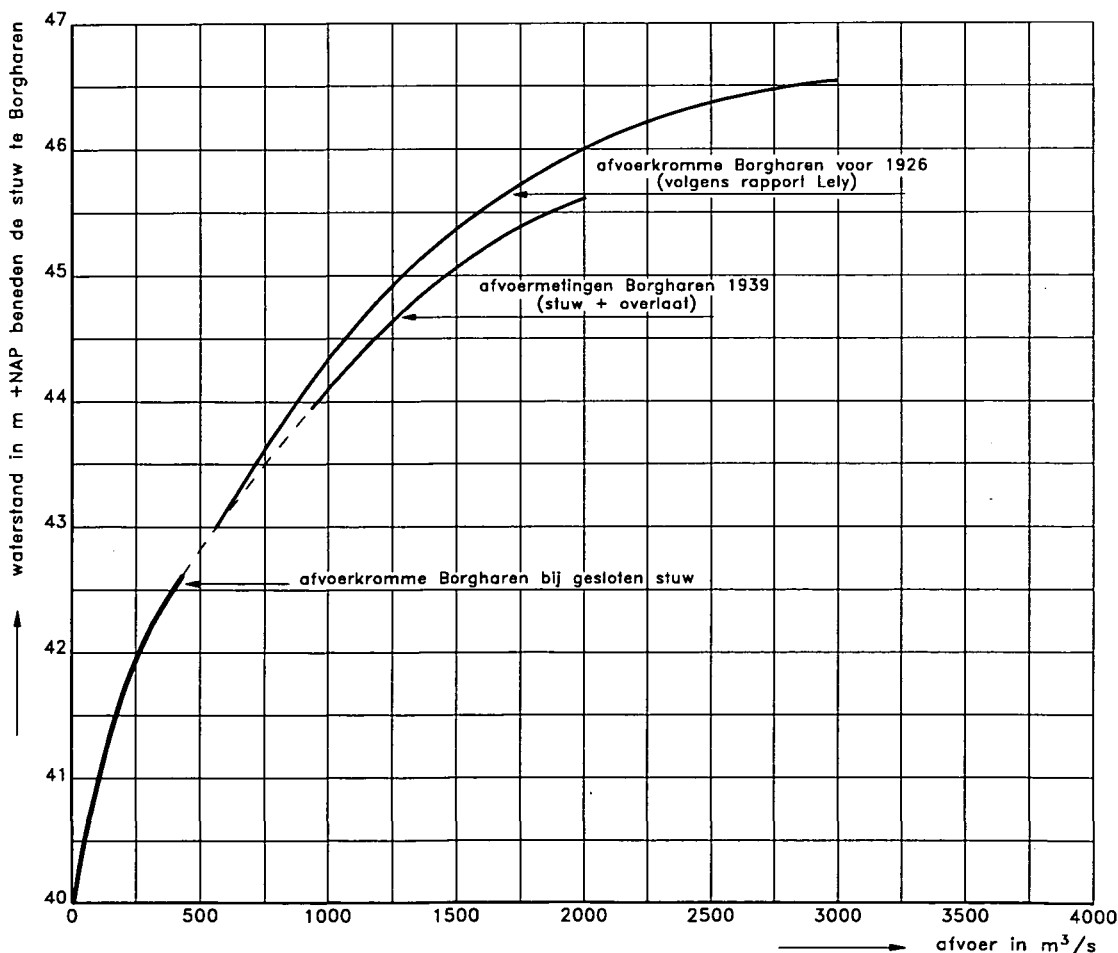


Figuur 3.2 Q-h relaties op basis van stokdrijvermetingen te Maastricht

Periode 1933–1950

In 1931 is de stuw te Borgharen in gebruik gesteld. Voor de periode 1933–1950 is gebruik gemaakt van een afvoerkromme, die het verband weergeeft tussen de waterstand te Visé en de afvoer over de stuw te Borgharen (zie Tabel 3.1: 'Afvoer Borgharen, waterstand Visé, geldig vanaf 1933'). De afvoer te Borgharen werd vastgesteld met behulp van ijkgrafieken (bepaald in het Waterloopkundig Laboratorium, modelonderzoek M100) voor situaties met gesloten stuw, dus voor lage afvoeren tot ca 1.200 m³/s (zie van der Made, 1966). Details omtrent de meetmethodiek worden hier achterweg gelaten, daar wij slechts geïnteresseerd zijn in de betrouwbaarheid van gemeten piekafvoeren. Deze piekafvoeren treden op in situaties met gestreken stuw. Van Leeuwen (1981) meldt, dat bij gestreken stuw ten tijde van een hoogwatergolf, ijsgang of werkzaamheden geen afvoeren in de periode 1932–1950 worden vermeld in de jaarboeken. Als reden wordt opgegeven, dat in dergelijke situaties de methode volgens M100 niet kon worden gebruikt. Echter in deze periode waren er wel enkele Q-h relaties voor Borgharen beschikbaar, maar werden om onduidelijke redenen niet gebruikt. Laatstgenoemde Q-h relaties voor afvoeren bij gestreken stuw (dus voor piekafvoeren!) betreffen:

1. de Q-h relatie van Lely (1926) die is verschoven van Maastricht-Hoofdsluis naar Borgharen-beneden.
2. een Q-h relatie op basis van stokdrijvermetingen in 1937 en 1939 gerelateerd aan de waterstand te Maastricht (zie Figuur 3.2); ook deze relatie is verschoven naar Borgharen-beneden.



Figuur 3.3 Afvoerkrommen Maas voor Borgharen-beneden

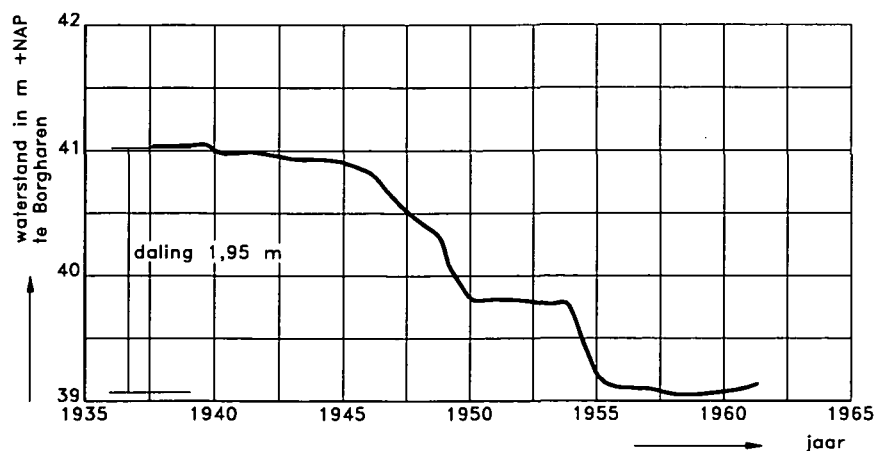
De verschoven Q-h relaties voor Borgharen-beneden zijn weergegeven in Figuur 3.3. Met gebruikmaking van bekende waterstanden te Borgharen-beneden in de overeenkomstige periode kunnen vervolgens afvoeren te Borgharen-beneden worden bepaald. Als voorbeeld wordt verwezen naar Tabel 3.3, waarin waterstanden aan de hoofdpeilschalen gedurende de hoogwaterperiodes in 1924, 1926, 1939 en 1952 (bron: Rapport 'Hoogwaterperiode 1952') worden gegeven. In Tabel 3.2 worden de resultaten voor Maastricht en Borgharen-beneden op grond van de Figuren 3.1, 3.2 en 3.3 samengevat.

Peilschaal	Datum	Waterstand (m+N.A.P)	Q-h kromme	Afvoer (m ³ /s)
Maastricht (Hoofdsluis)	04-11-1924	46,44	Fig. 3.1/3.2	2.030
	01-01-1926	46,92	Fig. 3.1/3.2	3.000
	29-11-1939	46,00	Fig. 3.2	1.915
Borgharen (ben.)	04-11-1924	45,80	Fig. 3.3	1.800
	01-01-1926	46,05 ?	Fig. 3.3	2.050 ?
	29-11-1939	45,54	Fig. 3.3	1.900

Tabel 3.2 Afvoeren te Maastricht Hoofdsluis en Borgharen-beneden

De gegeven waterstand te Borgharen-beneden op 1 januari 1926 lijkt niet juist vanwege de lage afvoer van 2.050 m³/s, die hierbij wordt afgelezen volgens Figuur 3.3. Als dezelfde afvoer van 3.000 m³/s bij Maastricht wordt aangenomen, dan dient volgens Figuur 3.3 de waterstand bij Borgharen ca. 46,50 + NAP te bedragen.

Zoals eerder vermeld wordt voor de periode 1933-1950 gebruik gemaakt van de afvoerkromme, die het verband geeft tussen de waterstand Visé en de afvoer te Borgharen (zie Tabel 3.1). In deze periode was de bodem van de rivierbedding te Visé constant, terwijl in Borgharen een sterke daling optrad als gevolg van grindbaggerwerken. Dit effect is duidelijk zichtbaar in Figuur 3.4, die de daling van de waterstanden te Borgharen weergeeft over het tijdvak 1935-1960 bij een afvoer van 100 m³/s. Deze daling wordt ook bevestigd bij hogere afvoeren, zoals dit aan de hand van de afvoerkrommen in Figuur 3.3 voor het tijdvak 1926-1939 zichtbaar is. Een afvoerkromme voor Borgharen over de beschouwde periode 1933-1950 is dus aan wijzingen onderhevig.



Figuur 3.4 Verloop van de waterstanden te Borgharen-beneden bij middelbare afvoer ma (= 100 m³/s)

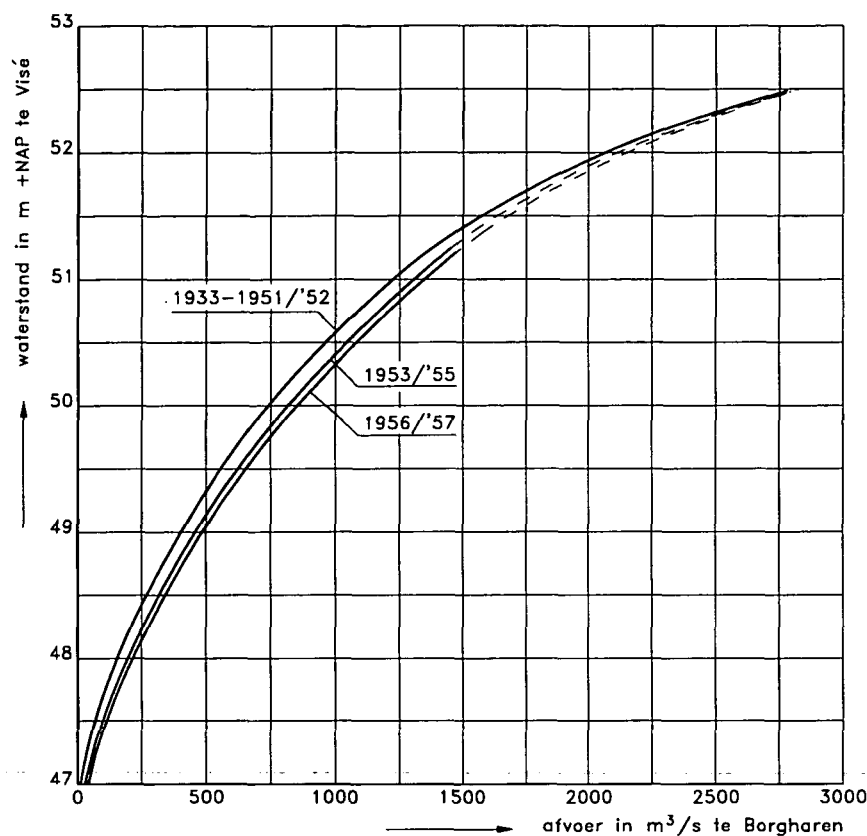
Peilschaal	km - raai	Waterstanden in m + NAP			
		op 4-11-1924	op 1/2-1-1926	op 29-11-1939	op 22/23-12-1952
Visé	0.400	51,85	52,60	52,00	52,00
Eysden	4.475	-	50,74	50,06	49,64
St. Pieter	9.455	48,36	49,16	47,64	47,51
Maastricht (Hoofdsl.)	13.905	46,44 ¹⁾	46,92	46,00	46,03
Borgharen (ben.)	15.460	45,80 (s)	46,05	45,54	45,42
Elsloo	29.405	40,45 (s)	40,80	40,33	40,46
Maasband	34.615			37,32	37,26
	34.652	38,05	38,66		
	(oud)				
Grevenbicht	44.945			32,46	32,57
	44.961	32,64	32,95		
	(oud)				
Maaseijck	52.450	29,52	29,96	29,25	29,12
Maasbracht	64.940N			23,25	23,25
	66.334	23,77	24,25		
	(oud)				
Max. afvoer in m ³ /sec.		1.930	3.000	1.987	2.000 à 2.020
(s) = schatting					
1) Deze waterstand is t.g.v. plaatselijke opstuwing abnormaal hoog. Normaal zou de HW-stand rond 46,30+ zijn geweest.					

Tabel 3.3 Waterstanden aan de hoofdpeilschalen gedurende de hoogwaterperiodes in 1924, 1926, 1939 en 1952.

Bron: Rapport hoogwaterperiode December 1952

Geconcludeerd wordt, dat voor de periode 1933-1950 de afvoeren te Borgharen bepaald werden aan de hand van waterstandsregistraties te Visé. Vervolgens werd ter bepaling van opgetreden afvoeren te Borgharen een afvoerkromme gebruikt (zie Tabel 3.1), die het verband geeft tussen de waterstanden te Visé en de afvoeren te Borgharen. De nauwkeurigheid van deze methode hangt sterk af van de stokdrijvermethode, die werd toegepast om de piekafvoeren bij gestreken stuw te bepalen.

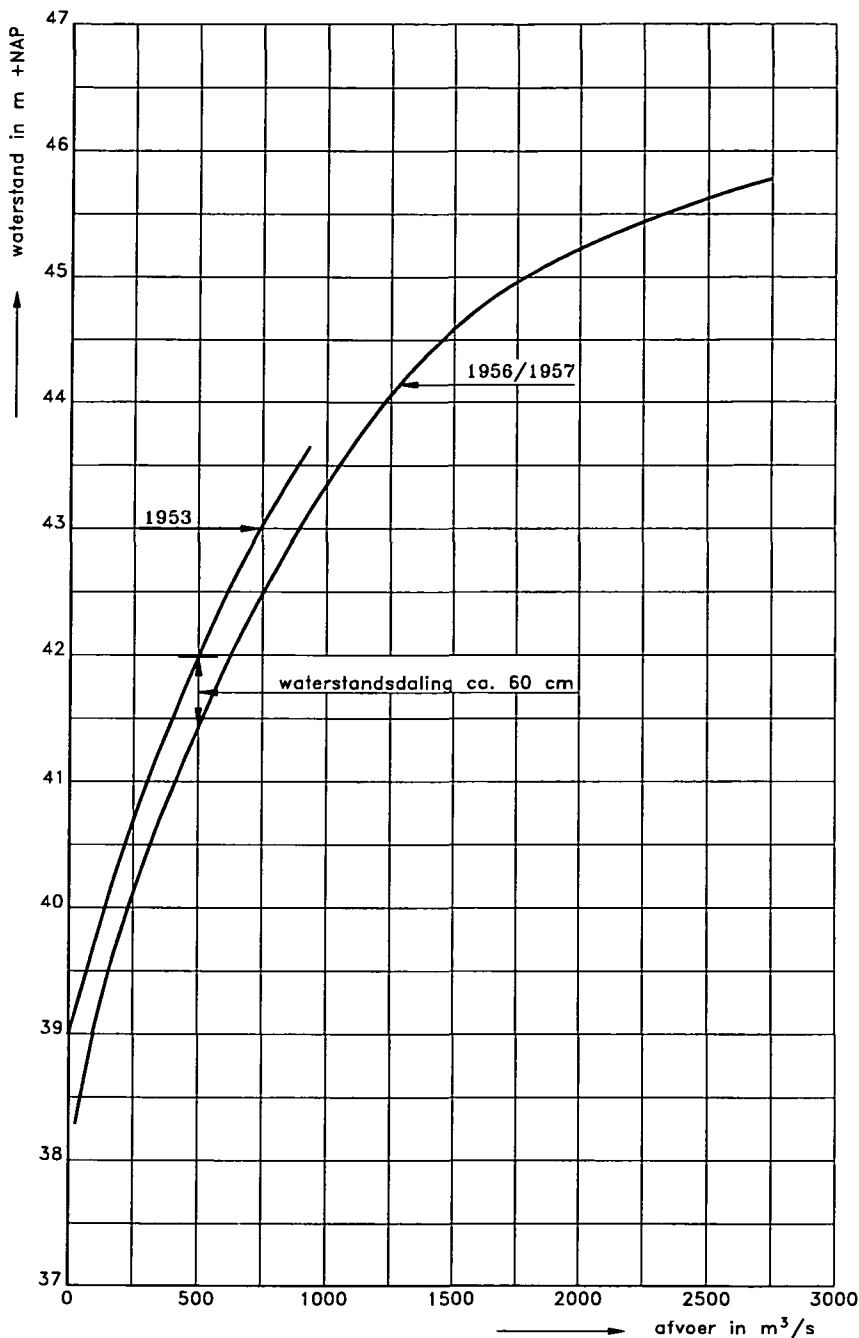
Periode 1951–1970



Figuur 3.5 Afvoerkromme Borgharen t.o.v. waterstanden te Visé van 1951 t/m 1957

Bron: Rijkswaterstaat, 1981

Na 1950 is ook de bodem te Visé gaan dalen, zoals blijkt uit de Q-h relaties voor de jaren 1951 tot 1957 (zie Figuur 3.5: 'Waterstand Visé versus afvoer Borgharen'). Genoemde Q-h relaties zijn gebaseerd op afvoermetingen over de stuw bij Borgharen en gelden dus alleen voor lage afvoeren tot ca. $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. Echter, na 1950 leek de daling van de waterstand benedenstrooms van de stuw te Borgharen tot stilstand te zijn gekomen (zie Figuur 3.4). Dit betekent, dat men na 1953 overgestapt is op de bepaling van de afvoer via een afvoerkromme Borgharen, die het verband tussen de 8-uur afvoer over de stuw en de 8-uur waterstand beneden de stuw weergeeft. Deze kromme moest van tijd tot tijd worden bijgesteld, omdat van 1953 tot ca. 1956 onverwacht weer een sterke waterstandsdaling optrad (zie Figuur 3.4 en Figuur 3.6: 'Afvoerkromme Borgharen, 1956 definitief; 1957 voorlopig'). De gepubliceerde afvoerkrommen vanaf 1956 zijn voor de hogere afvoeren (groter dan ca. $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) bij gestreken stuw bepaald met behulp van Ott-molens. De Figuren 3.7 en 3.8 geven de afvoerkrommen over respectievelijk het tijdvak 1956–1958 en het tijdvak 1958–1962. Daar de waterstandsdaling benedenstrooms van de stuw Borgharen in het begin van de jaren 60 weer tot stilstand gekomen is, zijn er nauwelijks verschillen in de afvoerkrommen volgens de Figuren 3.7 en 3.8.

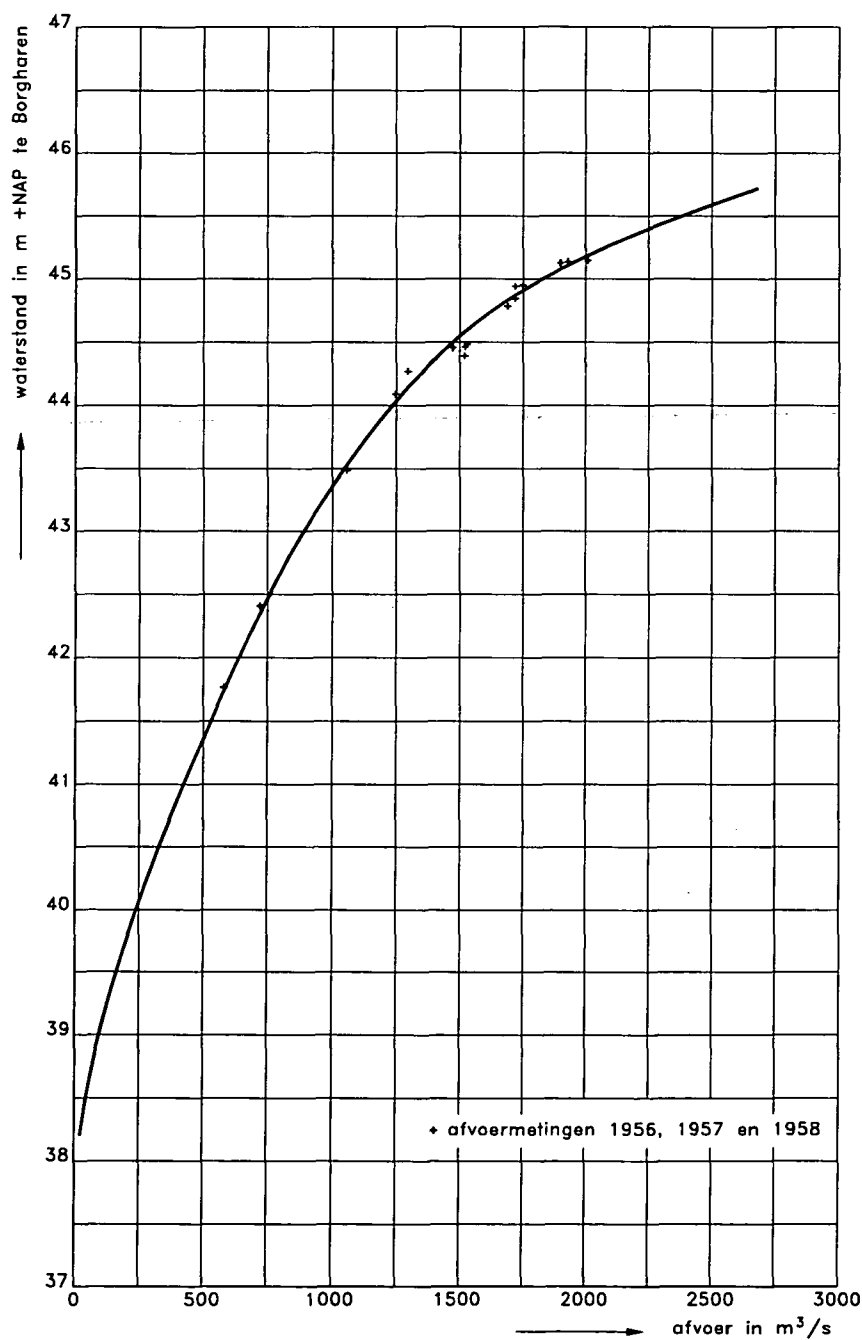


Figuur 3.6 Afvoerkromme Borgharen 1956 definitief, 1957 voorlopig

Bron: Rijkswaterstaat, 1981

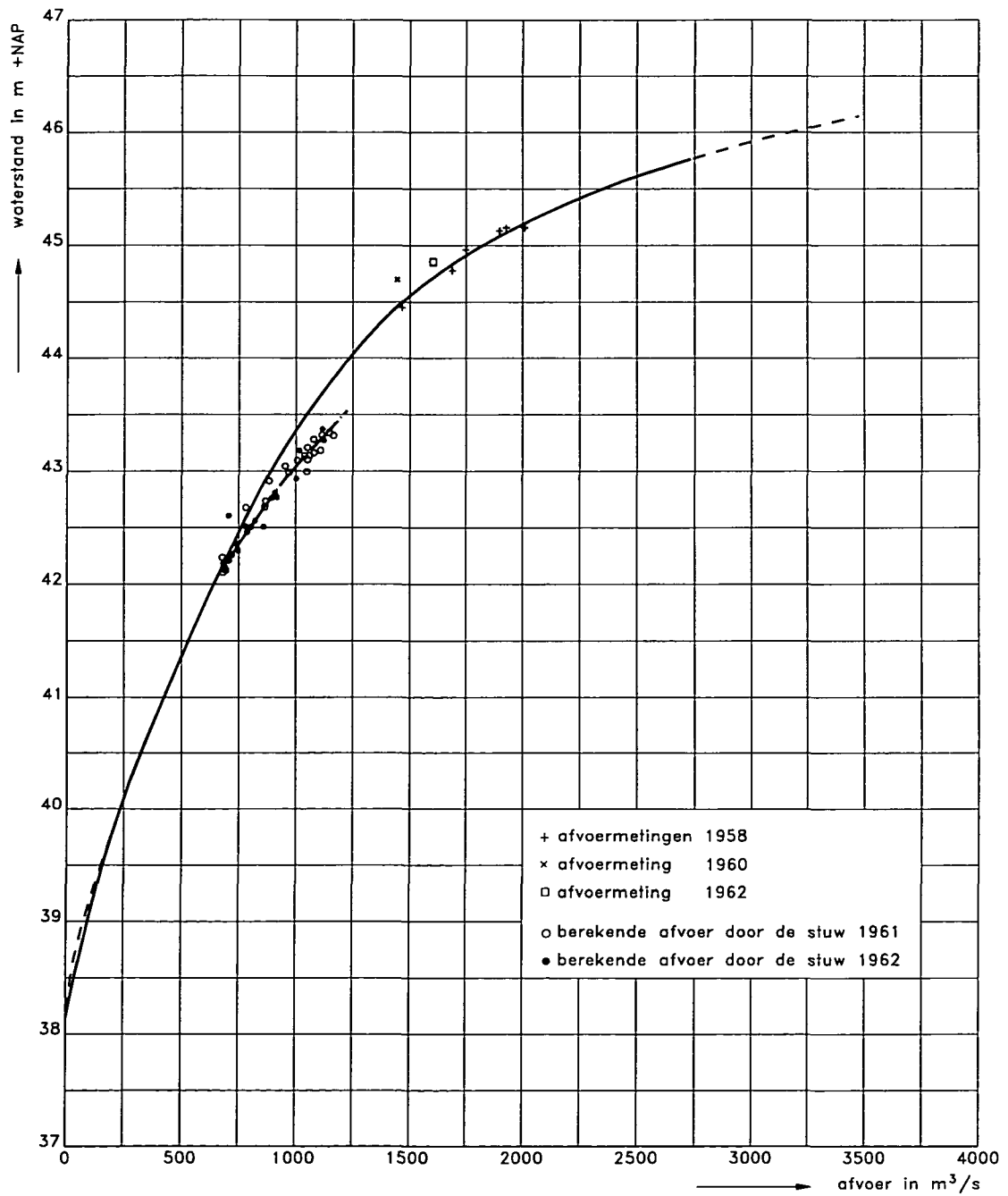
Omdat er steeds moeilijkheden optraden met de afvoerbepaling over de stuw, werden de Ott-molenmetingen na 1962 geïntensiveerd vooral bij afvoeren tussen 700 en 1.200 m³/s (gesloten stuw!). De in september 1966 vastgestelde afvoerkromme Borgharen (zie Figuur 3.9) werd gebruikt tot en met 1970.

Geconcludeerd wordt, dat de gepresenteerde Q-h relaties voor de periode 1950-1956 zijn gebaseerd op 8-uur waterstandsregistraties en stokdrijvermetingen. De Q-h relaties voor de periode 1956 tot en met 1970 zijn gebaseerd op metingen met Ott-molens.



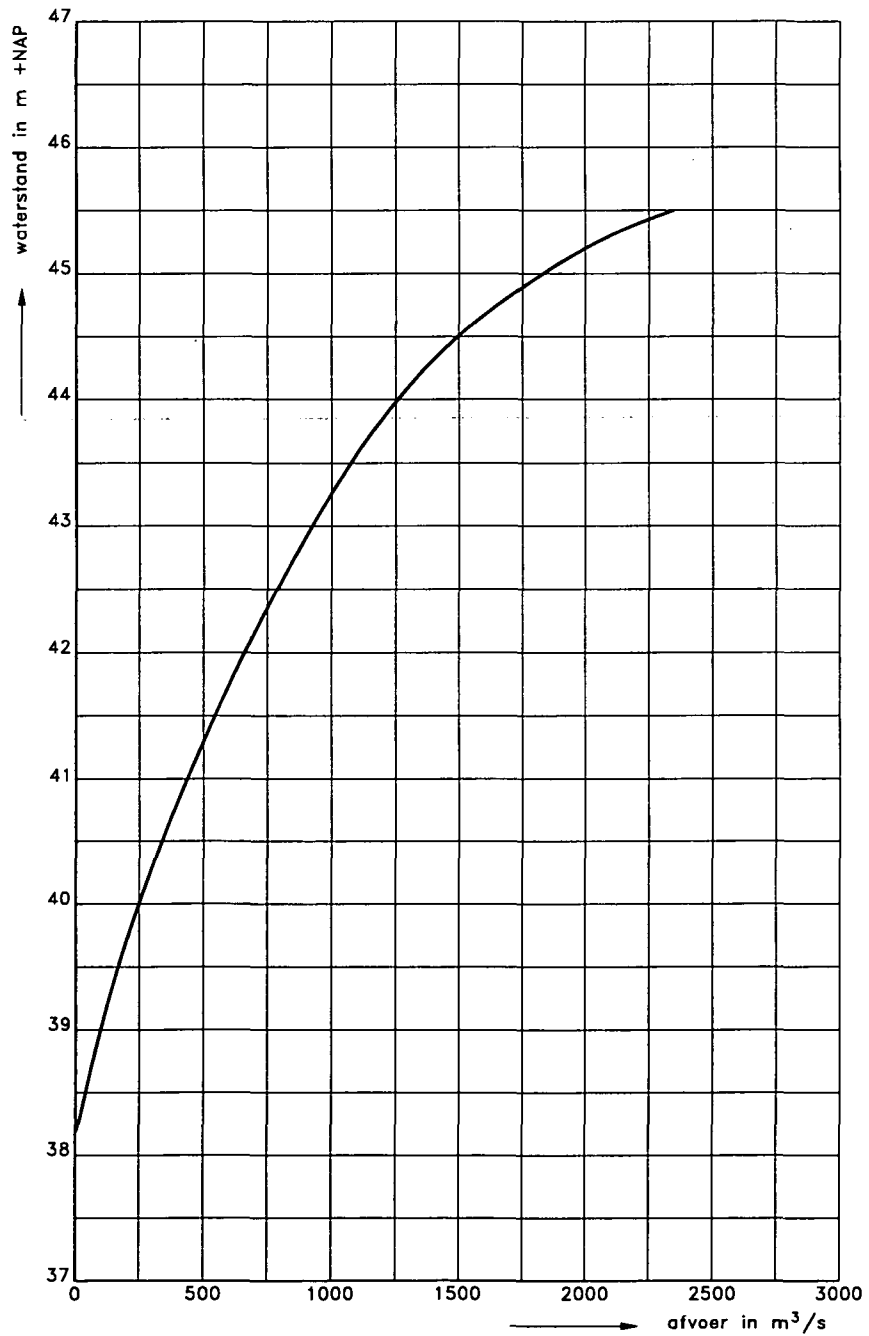
Figuur 3.7 Afvoerkromme Borgharen 1958 definitief, 1959 voorlopig

Bron: Rijkswaterstaat, 1981



Figuur 3.8 Afvoerkromme Borgharen 1958 - 1962

Bron: Rijkswaterstaat, 1981

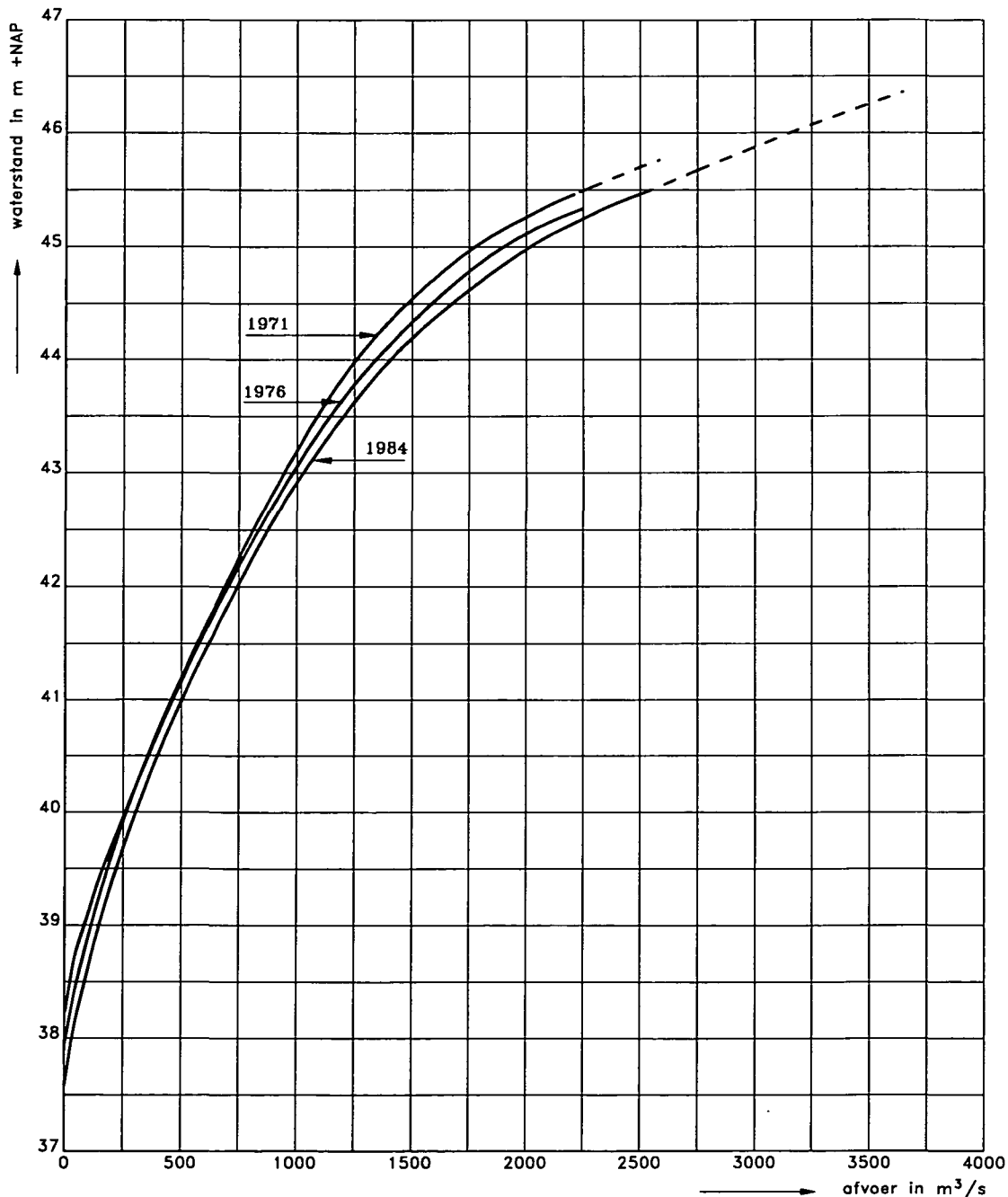


Figuur 3.9 Afvoerkromme Borgharen 1966, afvoermeting 1965

Bron: Rijkswaterstaat, 1981

Periode 1971–1987

De in de jaarboeken 1971 en 1972 voorkomende afvoergegevens van Borgharen zijn 8-uur afvoercijfers ontleend aan de afvoerkromme Borgharen 1971 (zie Figuur 3.10). De afvoercijfers in de jaarboeken 1973 en 1974 zijn bepaald aan de hand van de berekende gemiddelde etmaalwaterstand (uit 4-uurlijkse metingen) en de afvoerkromme 1971. Na het gereedkomen in 1974 van station Borgharen-dorp met registrerende peilschrijver (r.p.s) wordt de gemiddelde etmaalafvoer gerelateerd aan de per etmaal gemeten waterstanden. Deze etmaalafvoer is het gemiddelde van de afvoerwaarden, vastgesteld voor ieder uur van het betrokken etmaal met behulp van de geldende afvoerkromme. In Figuur 3.10 zijn vervolgens de afvoerkromme 1976 (op basis van molenmetingen gedurende 1971–1975) en 1984 gegeven (zie Mulken en

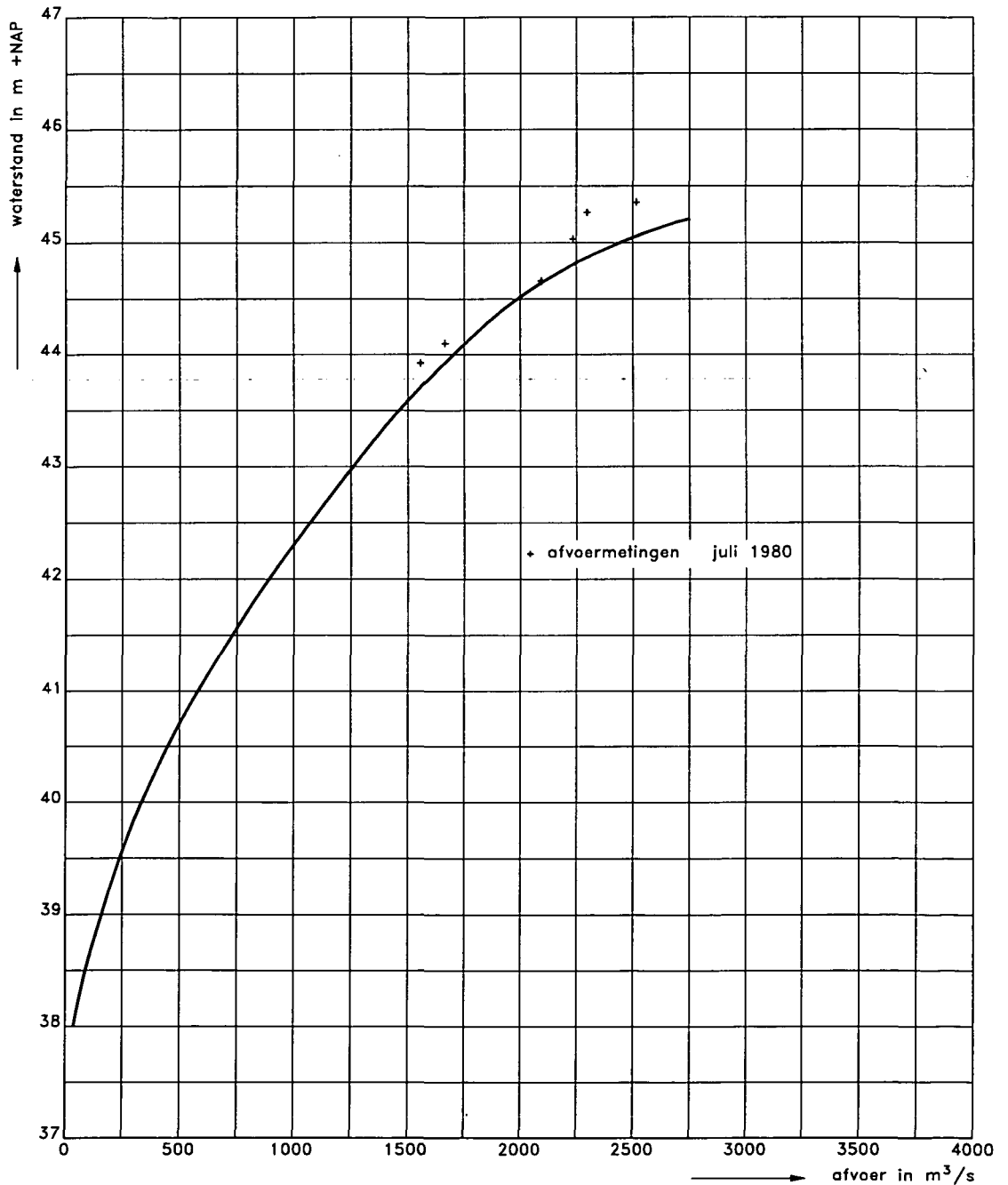


Figuur 3.10 Afvoerkromme Borgharen Dorp 1971, 1976 en 1984

Bron: Basting, 1987

Goppel, 1980 en Bastings, 1987). Uit deze figuur valt te concluderen, dat er sinds 1971 tot aan 1984 sprake is van een waterstandsdeling van 20 à 30 cm.

Opgemerkt wordt, dat de gepresenteerde Q-h relaties voor Borgharen-dorp naar alle waarschijnlijkheid niet voldoen voor zomer-hoogwaters, zoals blijkt uit de verslaggeving van Mulken en Goppel (1980) over het zomer-hoogwater op de Maas in juli 1980. Uit gemeten waterstanden en afvoeren is gebleken, dat de waterstanden niet in overeenstemming zijn geweest met de afvoeren volgens de Q-h relatie van 1976 voor Borgharen-dorp. Figuur 3.11 toont aan, dat de gemeten waterstanden beduidend hoger zijn geweest. Dit wordt onder andere toegeschreven aan de grotere weerstand door begroeiingen van de uiterwaarden.



Figuur 3.11 Afvoerkromme Borgharen Dorp 1976

Bron: Van Mulken en Goppel, 1980

3.3 Conclusies en samenvatting

Op basis van de in paragraaf 3.2 beschreven historie zijn in onderstaande Tabel 3.4 de belangrijkste details t.a.v. afvoermetingen samengevat. De geschatte systematische fout tussen stokdrijvermetingen en molenmetingen is gebaseerd op het rapport 'Vergelijking tussen Ott-molen- en drijvermetingen van RWS, Dir. Bovenrivieren, 1956'. Dit rapport vermeldt, dat er tot 1930 slechts sporadisch met molens is gemeten. Na 1930 winnen de molens het langzamerhand van de drijvers. Geconcludeerd wordt, dat stokdrijvermetingen systematisch tot hogere afvoeren leiden dan afvoeren met molenmetingen. De gepresenteerde cijfers geven aanleiding om de systematische fout tot 1930 te schatten op 7%. Na 1930 is de systematische fout kleiner met een geschatte waarde van 5%.

Periode	Afvoer-waterstand relatie	Waterstandsmeting	Afvoermeting	Geschatte Systematische Fout
1911-1932	Q-h relatie Visé	8-uur waterstand Visé beneden	stuw afvoer metingen Visé	? °)
1917-1926	Q-h relatie (Lely) Maastricht	waterstand te Maastricht Hoofdsluis	stokdrijver metingen	7% te hoog
1926	Verschoven Q-h relatie (Lely) Borgharen	waterstand te Borgharen	stokdrijver metingen	7% te hoog
1933-1952	Afvoer Borgharen versus waterstand Visé	8-uur waterstand Visé-beneden	stokdrijver metingen	5% te hoog
1937/1939	Q-h relatie Maastricht	waterstand te Maastricht Hoofdsluis	stokdrijver metingen	5% te hoog
1937/1939	verschoven Q-h relatie Borgharen	waterstand te Borgharen	stokdrijver metingen	5% te hoog
1953-1956	Q-h relatie Borgharen	8-uur stand te Borgharen	stokdrijver metingen	5% te hoog
1957-1975	diverse Q-h relaties Borgharen	8-uur stand te Borgharen	Ott-molen metingen	- *)
1975-heden	diverse Q-h relaties Borgharen	gemiddelde etmaal standen	Ott-molen metingen	- *)
°) Afvoer te Visé wordt gelijkgesteld aan afvoer te Borgharen				
*) Molens worden geijkt in de sleeptank van het Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation te Wageningen (RWS, 1956)				

Tabel 3.4 Historisch overzicht afvoermetingen Borgharen.

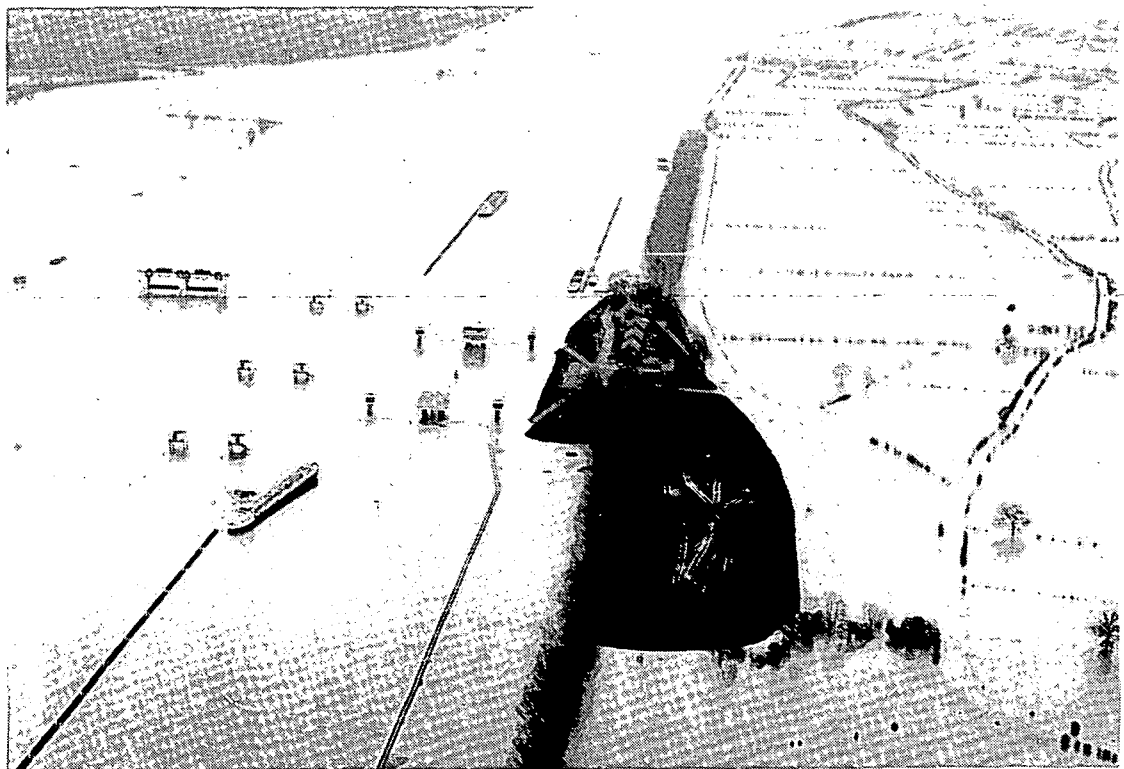
Met betrekking tot de bepaling van de historische afvoeren,

- lijkt een afvoerbepaling uit gemeten waterstanden en de geldende Q-h kromme in de periode 1940-1955 nogal onbetrouwbaar vanwege de sterke bodemdalingen,
- schatten wij de afvoeren uit de periode 1910-1931 7% te hoog,
- voor de periode 1932-1956 op 5% te hoog.
- achten wij de Q-h krommen na 1957 voldoende betrouwbaar.

4 Meteorologische omstandigheden bij extreme afvoeren

4.1 Inleiding

Dit deel van de studie is bedoeld om enig inzicht te verwerven in de relatie tussen meteorologische patronen en piekafvoeren te Borgharen. Hiertoe worden in paragraaf 4.2 de belangrijkste resultaten van de studie van Van der Spek (1985) samengevat. Deze studie betrof de hoge Maas-afvoeren te Borgharen in samenhang met atmosferische circulatietypen. Vervolgens zullen in paragraaf 4.3 enkele bekende meteorologische situaties, zoals die ten tijde van het hoogwater in januari 1926, worden gebruikt ter toetsing van een mogelijk verband tussen piekafvoer en weerspatronen. In paragraaf 4.3. formuleren wij tevens enkele conclusies.



Sluiscomplex Sambeek

4.2 Samenhang tussen piekafvoeren en atmosferische circulatietypen

Het door Van der Spek (1985) uitgevoerde onderzoek is gebaseerd op de afvoeren te Borgharen gedurende de periode 1947–1981. Uit deze periode werden 146 afvoerpieken geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- alle afvoerpieken groter dan of gelijk aan $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$,
- alle afvoerpieken met een afvoerstijging van minstens $400 \text{ m}^3/\text{s}$ in 5 dagen,
- een restgroep van 'belangrijk' ogende afvoerpieken.

Vervolgens is getracht een verband te leggen tussen de geselecteerde afvoerpieken en de desbetreffende weersomstandigheden. Hiertoe werd gebruik gemaakt van het zogenaamde

Grosswetterlage-systeem van Baur (zie Van der Spek, 1985), dat een indeling van 29 circulatietypen (Grosswetterlagen, GWL) omvat. Uit het onderzoek is gebleken, dat slechts 5 van de 29 mogelijke circulatie-typen frequent voorkomen met betrekking tot de geselecteerde afvoerpieken. Deze typen (WZ, WS, SWZ, NWZ en TRM) zijn samengevat in Tabel 4.1.

Circulatie-type (GWL)	Gemiddeld voorkomen per jaar (%)	Neerslag kans	Kans dat GWL optreedt op de afvoerpiekdag alsmede de 5 dagen hiervoor (%)				
			jaar	lente	zomer	herfst	winter
WZ	15,2	zeer groot	35,3	34,9	22,7	28,7	39,3
WS	3,3	zeer groot	11,4	7,3	0,0	14,0	13,9
SWZ	1,6	groot	17,9	6,3	0,0	16,7	6,8
NWZ	4,5	zeer groot	7,7	8,9	9,3	4,0	8,3
TRM	3,9	vrij groot	6,8	5,2	3,0	5,3	8,5
	28,5		69,1	62,6	35,0	68,7	76,8
WZ	<i>Westcirculatie, cyclonaal boven Midden-Europa</i> Depressies en tussenhogen trekken via de Britse-Eilanden, de Noord- en Oostzee naar Oost-Europa. Het centrale lagedrukgebied ligt bij IJsland, het Azorenhoog heeft een uitloper over Spanje naar de Alpen. Er valt langdurig neerslag, afgewisseld door buien opklaringen, en 's zomers treedt frontaal onweer op.						
WS	<i>De Zuidelijke Westcirculatie (cyclonaal)</i> De frontale zone is ver naar het Zuiden verschoven. De depressies trekken over Frankrijk en Zuid-Duitsland naar het Oosten. Het 'sturende' lagedrukgebied ligt ten NW van de Britse Eilanden. In Midden- en West-Europa valt overvloedige regen, in de winter kan boven Noord-Duitsland en Nederland zware sneeuwval voorkomen.						
SWZ	<i>Zuidwestcirculatie, cyclonaal boven Midden-Europa</i> Fronten trekken via Het Kanaal en de Noordzee naar Noord-Rusland. Het 'sturende' lagedrukgebied ligt tussen Ierland en IJsland. Randstoringen kunnen over de Britse Eilanden of de Golf van Biskaje naar het Oosten trekken. De neerslag valt ook in de winter als regen, die dan zeer hevig kan zijn. 's Zomers zijn de neerslaghoeveelheden kleiner.						
NWZ	<i>Noordwestcirculatie, cyclonaal boven Midden-Europa</i> Tussen een hogedrukgebied ten Westen van de Golf van Biskaje en een depressie boven Schotland, de Noorse zee en Scandinavië, trekken actieve fronten over de Britse-Eilanden, via de Noordzee naar ZO- en Oost-Europa. Er valt hevige, deels buiige neerslag, in de winter als sneeuw.						
TRM	<i>Trog boven Midden-Europa</i> De trogsituatie wordt gekenmerkt door zeer lage luchtdruk, ver achter het koufront van een depressie. Ten Noorden van de Oostzee ligt een hogedrukgebied. Fronten trekken over West- en Midden-Europa naar het ZO. De neerslag valt in buien, 's winters als sneeuw. Boven Oost-Europa valt de meeste neerslag.						
Bron: Van der Spek (1985)							

Tabel 4.1 Piekafvoeren en atmosferische circulatietypen

Uit Tabel 4.1 blijkt, dat de circulatietypen WZ, WS, SWZ, NWZ en TRM verantwoordelijk waren voor 69,1% van de piekafvoeren te Borgharen. Deze 5 circulatietypen tezamen zijn in 28,5% van de keren, dat ze optraden, betrokken bij de vorming van een hoogwatergebeurtenis. Ze bezitten hiermee de grootste 'potentiële natheid' van alle 29 circulatietypen en ze treden met name op in de winter, lente en herfst. Voorts wordt opgemerkt, dat de genoemde circulatietypen gekarakteriseerd worden door westwaartse stromingen. Stromingen vanuit het zuidwesten gaan over het algemeen gepaard met een grotere kans op afvoerpieken

dan die vanuit het noordwesten. Dit wordt mede veroorzaakt door het feit dat zuidwestelijke circulaties meelopen met de hoogwatergolf in het Belgische deel van de Maas.

4.3 Toetsing en conclusies

Zoals eerder aangegeven betreft het onderzoek van Van der Spek de periode 1947-1981. De meteorologische omstandigheden ten tijde van de geselecteerde piekafvoeren werden ontleend aan gegevens van het KNMI. Als resultaat van het onderzoek wordt gesteld, dat er een nauwe samenhang bestaat tussen het afvoergedrag van de Maas en het opgetreden circulatietype. Deze stelling wordt in het navolgende getoetst aan enkele hoogwaters, zoals beschreven in de literatuur en vallend buiten de onderzoeksperiode 1947-1981.

Het hoogwater van 1925/1926 is het beste materiaal, dat voor handen is vanwege het extreme karakter van de afvoerpiek en de uitgebreide meteorologische beschrijvingen. In dezen wordt verwezen naar Vereerstraten (1966), die het volgende weerbeeld ten tijde van het hoogwater geeft: 'Een depressie passeert de Britse eilanden, een centrum van hoge luchtdruk met uitlopers naar het Noordoosten bevindt zich boven Spanje: de koele westen- tot zuidwesten winden drijven dikke wolkenlagen naar Frankrijk, België, Zwitserland en Duitsland. De meeste neerslag vindt plaats in het noorden, hetgeen leidt tot overstromingen in het merendeel van het westelijke deel van Duitsland'.

Deze beschrijving vertoont veel overeenkomst met het circulatietype WZ volgens Tabel 4.1 en wordt dan ook als zodanig geïnterpreteerd. Een tijdige weersvoorspelling had vervolgens op grond van de resultaten volgens Tabel 4.1 kunnen leiden tot de conclusie, dat er een afvoerpiek bij Borgharen groter dan $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ of met een debietstijging van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ of meer in 5 dagen zou optreden met een kans van 35,3%. De uiteindelijk opgetreden afvoer van $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ voldoet aan deze conclusie. Echter het verband tussen weersvoorspelling en te verwachten afvoer is te 'grofschalig' om hierop concreet beleid af te stemmen. Daarvoor zou eerst meer verfijnd onderzoek moeten plaatsvinden naar de samenhang tussen piekafvoeren te Borgharen en meteorologische omstandigheden.

Diverse rapporten van Rijkswaterstaat, Directie Limburg betreffen beschrijvingen van hoogwaters in de periode na 1981. Echter, geen enkel rapport bevat een uitgebreide meteorologische beschouwing van het weer tijdens de betreffende piekafvoer. Een zeer summier gegeven verslag betreft het hoogwater van 1984 met een maximale afvoer van $2.550 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen. Het rapport: 'De Maas is uit ...' (RWS, dir. Limburg, 1985) bevat een tweetal figuren, die een overzicht van de regenval over het stroomgebied van de Maas geven in chronologische volgorde ten tijde van de piekafvoer. Hieruit kan worden geconcludeerd, dat er sprake is van een zuidwestelijke stroming. Zéér waarschijnlijk betreft het hier één van de circulatietypen zoals gepresenteerd in Tabel 4.1. De kans, dat een afvoerpiek groter dan $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ of met een debietstijging van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ of meer in 5 dagen optreedt wordt geschat op 6,8 tot 35,3%. Dit resultaat is van toepassing op het betreffende hoogwater van 1984 met een piekafvoer van ca $2550 \text{ m}^3/\text{s}$. Echter, de kansschatting en de grootte van het te verwachten debiet zijn zo 'grofschalig', dat hierop geen hoogwatervoorspelling kan worden gebaseerd.

De eindconclusie luidt dan ook, dat wij beduidend meer onderzoek naar de samenhang tussen piekafvoeren en weersomstandigheden noodzakelijk achten om voor de hydrologische/hydraulische modellering randvoorwaarden te kunnen formuleren voor extreme omstandigheden.

5 Afvoergedrag bij extreem hoge afvoeren

5.1 Inleiding

De Maas is een uitgesproken regenrivier. Het afvoerregime is zeer onregelmatig, omdat de rivier binnen enkele dagen reageert op (grote) neerslag in het stroomgebied. De korte reactietijd wordt onder meer veroorzaakt door de beperkte breedte van het stroomgebied en de relatief geringe grondwaterberging, met name in de Ardennen (zie Berger, 1991).

De grotere afvoeren vinden over het algemeen plaats in de winter en voorjaarsperiode (november–mei). Een onderscheid wordt gemaakt in hoge afvoeren ($1.450 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$) en extreem hoge afvoeren met piekwaarden groter dan $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dit deel van de studie heeft als doel een globaal inzicht te geven in het afvoergedrag van het stroomgebied van de Maas bij extreem hoge afvoeren. In paragraaf 5.2 wordt hiertoe een overzicht van het stroomgebied van de Maas inclusief de toevoer uit de zijrivieren gegeven op basis van bestaande literatuur. Vervolgens wordt in paragraaf 5.3 een en ander samengevat met betrekking tot de looptijd van golven, inundatiegebied, etc., Paragraaf 5.4 geeft een korte beschrijving van mogelijke gevolgen van de Belgische normalizeringswerken voor de Nederlandse Maas. In paragraaf 5.5 formuleren wij tenslotte enkele conclusies.

5.2 Het stroomgebied van de Maas

Het stroomgebied van de Maas kan grofweg in drie stukken worden verdeeld. Een Frans, een Belgisch en een Nederlands deel, zie Figuur 1.1. Elk van deze gebieden heeft een eigen karakter.

a. Het Franse deel.

De grens voor dit deel wordt gelegd bij Chooz. Dit houdt in dat ook een deel van het stroomgebied dat in België ligt bij het Franse deel wordt gerekend, aangezien de Semois in Frankrijk uitmondt.

Het Franse stroomgebied heeft een oppervlakte van 10.750 km^2 . Het gebied is langgerekt en smal, met steile hellingen, zodat de regen vrijwel direct in de Maas terecht komt.

b. Het Belgische deel.

Dit deel beslaat het gebied dat tussen Chooz en Eijsden op de Maas afwatert. Het omvat het grootste deel van de Belgische Ardennen en het gebied van de Sambre. Dit deel van het stroomgebied heeft een oppervlakte van 10.000 km^2 . Het gebied is breed.

Doordat een groot aantal zijrivieren en beken een steil verhang heeft en de bodem rotsachtig is, kan de regen toch betrekkelijk snel de Maas bereiken. In het Belgisch stroomgebied ligt een aantal stuwmeren. Deze hebben op een extreem hoogwater geen invloed, omdat zij vanwege hun functie voor de drinkwatervoorziening gewoonlijk aan het begin van de hoogwaterperiode al gevuld zijn en dus geen extra berging kunnen bieden. Overigens is ook de grootte van deze stuwmeren niet toereikend om een wezenlijke invloed op de hoogwaterafvoer te kunnen hebben.

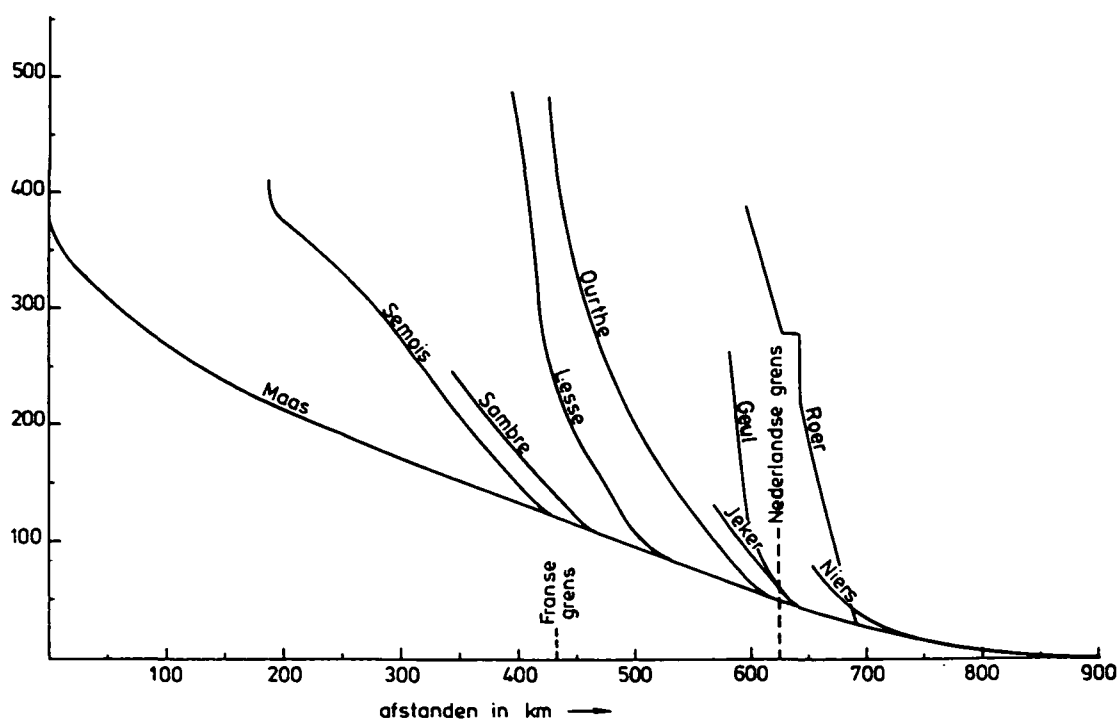
c. *Het Nederlands deel.*

Dit deel bestaat uit het stroomgebied van de Maas van Eijsden tot aan de Noordzee. Door de zijrivieren en door de ligging van de landsgrens valt onder het Nederlandse deel ook een stukje België en een stukje Duitsland. De oppervlakte bedraagt 12.250 km².

Het gebied is betrekkelijk breed en grotendeels vrij vlak. Het laatste deel van de Maas is bedijkt vanaf Boxmeer/Mook.

In de Roer en haar zijrivieren zijn enige stuwmuren gebouwd die mede dienen ter beperking van de hoogwaterafvoer van de Roer.

Het verschillend karakter van het Franse, het Belgische en het Nederlandse deel van het stroomgebied blijkt ook als men het lengteprofiel van de Maas en enkele zijrivieren beschouwt (Figuur 5.1).



Figuur 5.1 Lengteprofiel Maas en enkele zijrivieren

Bron: Rijkswaterstaat, 1985

Het sterke verhang van de zijrivieren in de Ardennen zorgt er voor dat de hier gevallen neerslag snel wordt afgevoerd naar de Maas. De afvoergolf bereikt Nederland binnen een dag.

De afvoer van water verloopt in het Nederlandse deel van de Maas, benedenstrooms van Maastricht, relatief traag, aanvankelijk door de grote breedte van de rivier wanneer deze buiten de zomerbedoevers is getreden, verder benedenstrooms bovendien door het minder steile bodemverhang. De afvoer tijdens hoogwater vindt hier voor een belangrijk deel plaats via het winterbed.

De Roer en de Niers dragen meestal niet veel bij aan de grootte van de topafvoer van de Maas in de benedenloop. Op deze zijrivieren is de afvoer doorgaans alweer aanzienlijk

gedaald tegen de tijd dat het water uit België en Frankrijk de samenvloeiing van de Maas met deze zijrivieren bereikt.

5.3 Normalisatiewerken

In het verleden ondervonden de afwatering en de scheepvaart grote moeilijkheden. Dit kwam vooral door de sterk wisselende afvoeren die kunnen variëren tussen ruwweg 2.000 m³/s in winter en voorjaar tot bijna 0 m³/s in de zomer. Normalisatiewerken worden al lang gebruikt om dergelijke problemen te verminderen.

Voor een uitvoerige, historische beschrijving van de waterbouwkundige werken in het gehele stroomgebied van de Maas wordt verwezen naar Berger (1992). Voor dit verslag wordt volstaan met een beknopt overzicht van de normalisatiewerken in Nederland (zie RWS, 1991).

Problemen met de afwatering werden vroeger opgelost via de Heugense, Roermondse, Beerse, Heerewardense en Bokhovense overlaten. Vooral met het oog op beveiliging tegen overstroming alsmede de eisen voor de scheepvaart zijn in de 19e en 20e eeuw een groot aantal werken uitgevoerd die het oorspronkelijke aanzien van de Maas (meanderende rivier met eilanden, zand- en grindbanken) hebben veranderd. Deze werken kunnen in grote lijnen als volgt worden samengevat:

1. Normalisatie van de Maas (+ 1875).
2. Scheiding tussen Maas en Waal, uitgevoerd tussen 1883 en 1904. Dit omvatte in hoofdlijnen het maken van een dam in de Andelse Maas, het graven van de Bergsche Maas, het normaliseren van de Amer en de aanleg van het Heusdens kanaal.
3. Maaskanalatie tussen Grave en Maasbracht, uitgevoerd tussen 1918 en 1929. De kanalisatie omvatten de bouw van stuwen met schutsluizen te Grave, Sambeek, Belfeld, Roermond en Linne, plaatselijke verdieping, verbreding en afsnijding van bochten, en de aanleg van het Maas-Waalkanaal.
4. Het Julianakanaal (1935) tussen Borgharen en Maasbracht waarmee het verval (circa 23 m) over de 47 kilometer lange, vrijwel onbevaarbare Grensmaas wordt overbrugd en de stuw Borgharen. In 1974 is het Lateraalkanaal tussen Linne en Buggenum in gebruik genomen.
5. Maasverbeteringswerken beneden Grave, die omstreeks 1942 geheel gereed kwamen. Deze omvatten het afsnijden van circa 10 bochten en het uitdiepen en verbreden van de rivier en de aanleg van stuw Lith (1936).
6. Waterbouwkundige werken rond Maastricht waaronder het kanaliseren van de Maas tot Sint Pieter, met verbouwing van de St. Servaas- en de Wilhelminabrug te Maastricht en als sluitstuk de bouw van een extra sluis te Ternaaien (1961).

De verbeteringswerken in de Maas zijn met de uitvoering van de bochtafsnijding bij Boxmeer (1979 -1982) grotendeels voltooid. Ook staan nog steeds een aantal werken op het programma in de sfeer van vernieuwbouw. Dit betreft met name verbeteringen van voorhavens bij sluizen

en bruggen en de bouw van een tweede sluis bij Lith. De lengte van de Maas is met ongeveer 20 kilometer bekort door de afsnijding van vele bochten. De capaciteit van de rivier is nu berekend op waterstanden die eens in de 1.250 jaar voorkomen en waarbij een afvoer van $3.650 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen hoort. Het water kan nu in tijden van grote afvoer zonder al te veel problemen worden afgevoerd. Wel hebben enkele dorpen langs de Maas (zoals Borgharen en Itteren) in een dergelijke situatie nog enige wateroverlast.

De Maas is nu in Nederland bevaarbaar voor schepen tot 2.000 ton met een vaardiepte van 3,0 meter.

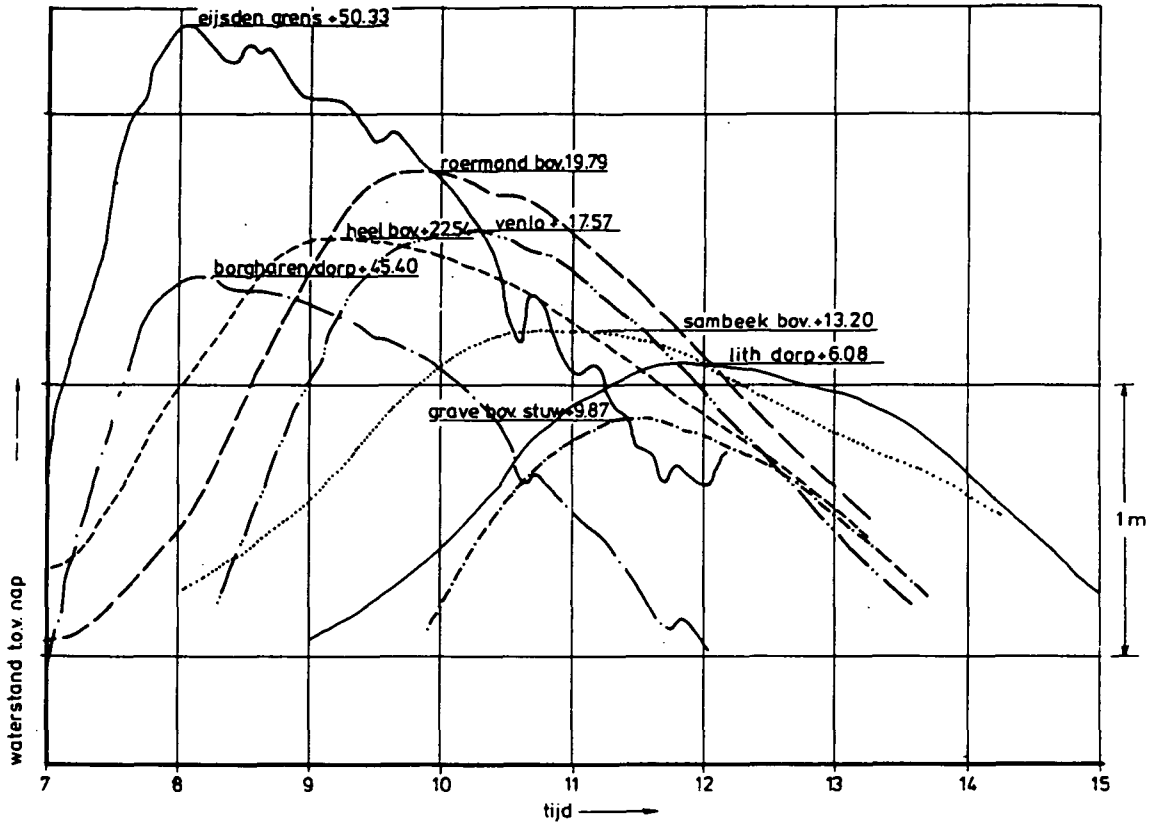
5.4 Hoogwatergolven

Uit de beschrijving van het stroomgebied (zie par. 5.2) blijkt dat de maximale afvoer van de Maas niet overal gelijktijdig optreedt. Er ontstaat een hoogwatergolf, die zich stroomafwaarts voortplant. Ter illustratie is in Figuur 5.2 het waterstandsverloop aan enkele hoofdpeilschalen gegeven voor het hoogwater van februari 1984, waarbij de topafvoer te Borgharen ca. $2.550 \text{ m}^3/\text{s}$ bedroeg. De voortplantingssnelheid van zo'n hoogwatergolf is o.a. afhankelijk van het bodemverhang, van de vorm van het Maasdal (smal en breed) en van de grootte van de topafvoer. Echter, uit registraties van diverse hoogwatergolven (bij vrije afstroming van de rivier) kan worden afgeleid, dat de looptijd van een hoogwatergolf redelijk constant is op het traject Eijsden grens-Lith boven. In Figuur 5.3 zijn de looptijden van diverse hoogwatergolven over de periode 1970-1987 uitgezet tegen de kilometering van de Maas. Uit deze figuur kan worden geconcludeerd, dat de voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf ca. $2,5 \text{ km/uur}$ bedraagt. Dit houdt in, dat de looptijd van een hoogwatergolf van Eijsden grens naar Lith boven de stuw ongeveer 3,5 dag is. Ditzelfde resultaat is in orde van grootte ook van toepassing op de hoogwatergolf van 1926. De looptijdgegevens van deze golf zoals vermeld door Vereerstraten (1966), zijn eveneens in Figuur 5.3 aangegeven.

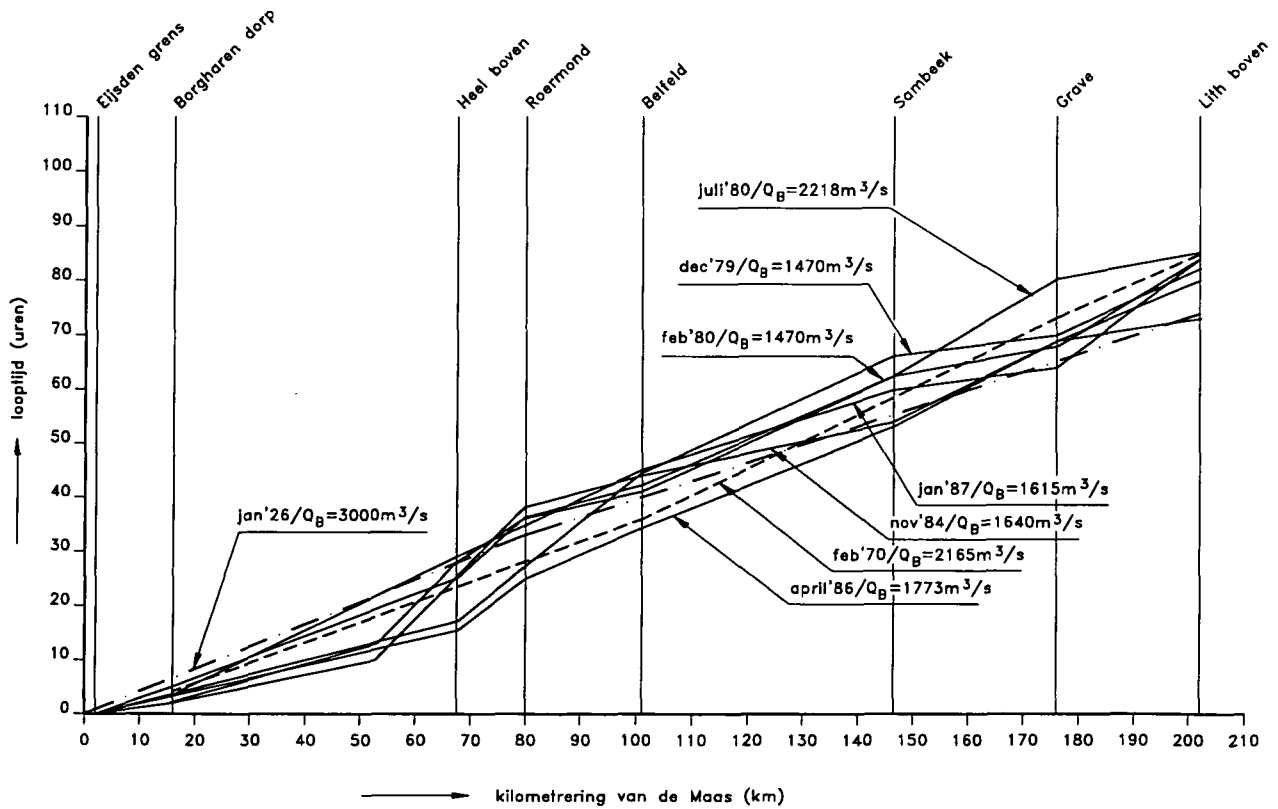
Op grond van Figuur 5.3 wordt geconcludeerd, dat de voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf op het Nederlandse deel van de Maas redelijk constant is en blijkbaar ongevoelig voor de diverse verbeteringswerken (bochtafsnijdingen, afgravingen, etc.) en ruwheidsverschillen (zomer versus winter). Dit laatste blijkt uit de niet significante verschillen in looptijden van het zomer hoogwater in juli 1980 ten opzichte van de overige winter hoogwaters (zie Figuur 5.3).

Voor alle hoogwatergolven geldt dat de piekafvoer te Visé (België) hoger is dan te Borgharen, hetgeen het gevolg is van golfdemping op een traject waar de zijdelingse toestroming gering is. De demping ligt meestal tussen $40-150 \text{ m}^3/\text{s}$. De piekafvoer van 1926 vormt hierop een uitzondering (afvoeren te Visé en Borgharen respectievelijk 2.950 en $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$), zodat het vermoeden bestaat dat deze laatste waarde te hoog is en eerder circa $2.900 \text{ m}^3/\text{s}$ moet zijn. Het effect van deze aanname is beschreven in hoofdstuk 6.4.

De inundaties langs het Nederlandse deel van de Maas worden in sterke mate bepaald door de vorm (spits of stomp) van de binnenkomende hoogwatergolf bij Eijsden en de topvervlakking (golfdemping) als gevolg van de verbeteringswerken na 1926, de grindgaten en de ruwheden van het winterbed of uiterwaarden. Bij afvoeren van meer dan $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ treedt de rivier op veel plaatsen buiten het zomerbed en bij $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ komen sommige dorpen (in het bijzonder Borgharen en Itteren) in problemen (Berger, 1991). Een deel van de afvoer wordt tijdelijk geborgen in de uiterwaard, waardoor de piek van de afvoergolf afneemt



Figuur 5.2 Waterstanden aan enkele hoofdpeilschalen in februari 1984



Figuur 5.3 Looptijden van hoogwaters

(topvervlakking). Na het passeren van de top wordt het tijdelijk geborgen water afgevoerd, waardoor benedenstreams de hoogwatergolf langer duurt. Door dit verschijnsel en door de relatief lage voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf op het Nederlandse deel van de Maas duurt de wateroverlast in de benedenloop meestal langer dan in België. De wateroverlast in België duurt meestal twee tot drie dagen. Daar staat tegenover, dat wateroverlast in de benedenloop minder vaak voorkomt, doordat de hoogte van een spitse hoogwatergolf vrij aanzienlijk afneemt bij voortplanting langs de rivier. Ter illustratie vergelijken wij in Tabel 5.1 enkele hoogwatergolven, namelijk het zomerhoogwater van 1980 en de winter hoogwaters van 1984 en 1993.

plaats	topstanden in m + NAP			verschil in de topwaterstanden van 1984 en 1980 in m (kolom 2 - kolom 3)	verschil in de topwaterstanden van 1993 en 1980 in m (kolom 4 - kolom 3)	verschil in de topwaterstanden van 1993 en 1984
	1984: afvoer 2.550 m ³ /s te Borgharen	1980: afvoer 2.120 m ³ /s te Borgharen	1993 afvoer 2.388 m ³ /s te Borgharen			
Borgharen Dorp	45,35	45,19	(45,36)*	-0,16	-0,01	-
Heel/Linne	22,55	22,33	22,29	0,22	-0,04	-0,26
Roermond	19,81	19,23	19,17	0,58	-0,06	-0,64
Venlo	17,57	16,93	17,28	0,64	0,35	-0,29
Sambeek	13,20	12,84	13,00	0,36	0,16	-0,20
Grave	10,17	9,08	-	1,09	-	-
Lith	6,29	5,36	5,44	0,93	0,08	-0,85
Hedel	4,27	3,29	-	0,98	-	-

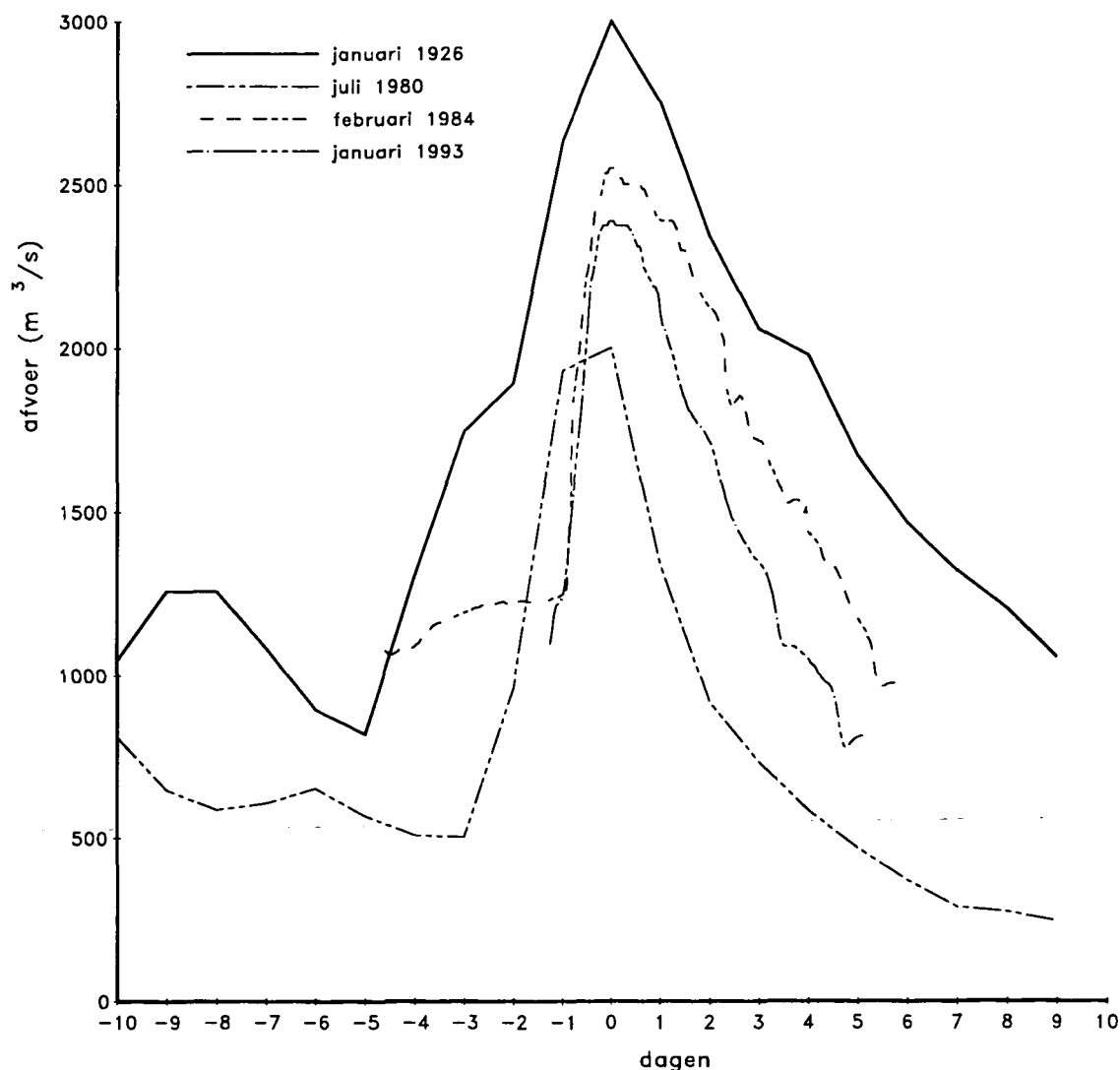
Tabel 5.1 Topstanden bij diverse hoogwaters

Bij nagenoeg gelijke topwaterstanden te Borgharen-Dorp in 1984 en 1993 traden in 1993 benedenstreams veel lagere waterstanden op door het verschil in topvervlakking. Het hoogwater van 1993 was veel spitsier en had een geringer golfvolume dan het hoogwater van 1984. De verschillen tussen de topwaterstanden van het zomerhoogwater (1980) en het hoogwater van 1984 zijn in het benedenstroomse deel van de Maas veel groter ondanks dat de verschillen bij Borgharen niet erg groot zijn. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat:

- de maximale afvoer bij Borgharen in 1980 lager is dan tijdens het hoogwater van 1984; lagere afvoeren geven in beginsel lagere waterstanden,
- de ruwheid van het hoogwaterbed van de rivier in de zomer groter is dan in de winter als gevolg van de aanwezige begroeiing: hierdoor wijken de waterstanden bij Borgharen voor het zomer hoogwater bij een lagere afvoer niet zoveel af van de waterstanden bij een hogere afvoer in de winter,
- het volume van de 1980 golf veel kleiner is dan het volume van de 1984 golf.

In Figuur 5.4 is de spitsheid van de 1980 en 1993 golven duidelijk waarneembaar ten opzichte van de afvoergolf in 1984. Tevens is het hoogwater van 1926 ingetekend.

Voorts wordt naar aanleiding van Tabel 5.1 opgemerkt, dat in 1926 veel hogere waterstanden zijn opgetreden dan in 1984. Weliswaar is er sprake van een zeer hoge afvoer, maar deze zou in de huidige situatie op een relatief kort traject benedenstreams van Borgharen tot lagere waterstanden leiden, doordat de afvoercapaciteit van het zomerbed na 1926 is verruimd door de normalisatiewerken, terwijl tevens diverse ontgrindingen en ontzandingen hebben plaatsgevonden. Daarentegen zijn vooral in de benedenloop van de rivier bochten afgesneden, waardoor daar het effect van de waterstandsdeling deels weer verloren gaat. Er valt zonder nader rekenwerk echter niet aan te geven of 1926 in het bedijkte deel van de Maas thans tot lagere dan wel hogere waterstanden zou leiden.



Figuur 5.4 Afvoergolven te Borgharen

5.5 Gevolgen van veranderingen in het stroomgebied

De inhoud van deze paragraaf berust grotendeels op een oriënterende studie van RWS, Directie Limburg (Bastings, 1988) ter schatting van de gevolgen van de verbeteringswerken op de Belgische Maas. Hiertoe zijn berekeningen met het rekenmodel IMPLIC uitgevoerd voor situaties vóór en na de verbeteringen, welke gericht zijn op zowel de verdieping en verbreding van het zomerbed (voltooiing omstreeks 1990) als de reductie van het aantal stuwen op het riviergedeelte tussen Namen en Lixhe. De resultaten van de berekeningen moeten als voorlopig worden beschouwd, maar geven een schatting van de veranderingen voor de Nederlandse Maas. De berekeningen zijn uitgevoerd met de gegevens van het hoogwater van februari 1984.

Afhankelijk van de schatting van de bergende breedte wordt geconcludeerd dat de topvervlakking bij Eijsden afneemt en dat daardoor de waterstand met 0,1 à 0,3 m stijgt. Het tijdstip van de topstand te Eijsden treedt 0,75 à 1,75 dag eerder op. De vorm van de afvoergolf te Eijsden ondergaat dus een verandering. De golf zal hoger en spitsiger zijn met als gevolg meer hoogwater op de Nederlandse Maas dan zo'n 20 à 30 jaar geleden. De verandering van de

afvoergolf wordt mede beïnvloed door het verhard oppervlak in de Ardennen, dat als gevolg van aanleg van wegen is toegenomen. Dit, tezamen met een gewijzigd landgebruik en ontbossing, heeft een snellere afvoer van de neerslag naar de rivier tot gevolg. Deze aspecten leiden eveneens tot een verhoging van de topafvoer, een korte tijdsperiode tussen neerslag en topafvoer, en een steilere aanloop van de afvoergolf.

De berekeningen van Bastings (RWS, 1988) tonen forse waterstandsverlagingen aan op het Belgische deel van de Maas in de orde van 2 tot 3 m bij de afvoergegevens van februari 1984. Dit beeld wordt bevestigd door berekeningen, uitgevoerd in België met de gegevens van het hoogwater in 1926. In het algemeen kan dus worden geconcludeerd, dat in België de veranderingen in het stroomgebied leiden tot reductie van de wateroverlast, terwijl in Nederland de overlast zal toenemen.

5.6 Conclusies

Op grond van de gevolgen van de veranderingen in het stroomgebied (paragraaf 5.5) en het afvoergedrag van de Maas in Nederland (zie paragraaf 5.4) wordt het volgende geconcludeerd:

- De afvoergolven bij Eijsden zullen gemiddeld spits en hoger zijn dan in het verleden. De waterstandstoename wordt voorlopig geschat op 0,1 à 0,3 m. Dit betekent tevens, dat de maatgevende afvoer voor het Nederlandse deel van de Maas navenant zal stijgen. De afvoertoeename bij Borgharen wordt dan ook geschat op 100 à 350 m³/s op grond van de betrekkinglijn Eijsden-Borgharen en de Q-h kromme 1984 (zie Figuur 3.10).
- De topstanden bij Eijsden zullen gemiddeld eerder optreden dan in het verleden tengevolge van de kortere looptijden op het Belgische deel van de Maas.
- De wateroverlast zal met name in het Nederlands grensgebied in Zuid Limburg toenemen door de hogere waterstanden. De toename van de wateroverlast langs de benedenloop van de Maas zal minder zijn. Dit komt, doordat de hoogte van een spitse hoogwatergolf vrij aanzienlijk afneemt bij zijn voortplanting langs de rivier.
- De voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf op het Nederlandse deel van de Maas is redelijk constant (ca. 2,5 km/uur) en blijkt vrij ongevoelig te zijn voor diverse factoren als: golfvorm (spits/stomp), ruwheden van het winterbed, normaliseringswerken, ontgrindingen, etcetera.

Opgemerkt moet worden, dat bovenstaande conclusies slechts een globaal beeld verschaffen van het afvoergedrag bij extreem hoge afvoeren. De conclusies zijn gebaseerd op wijzigingen in het afvoerverloop voor de hoogwatergolf van 1984, waarbij de veranderingen in de geometrie van de Maas in België voor een deel op schattingen zijn gebaseerd. De geschatte invloed van de afvoerveranderingen te Borgharen is daarom slechts een indicatie dat deze niet kunnen worden verwaarloosd. Omtrent de grootte van de in te voeren correctie tijdens maatgevende afvoercondities is geen nadere informatie bekend. Gelet op de resultaten voor het hoogwater 1984 wordt niet uitgesloten dat de correctie voor de Maasmodernisering bij maatgevende hoogwater substantieel afwijkt van de voor 1984 gegeven schattingen. Indien uit het hydraulisch onderzoek moet worden geconcludeerd dat de correctie voor de maatgevende afvoer belangrijk groter is dan thans wordt aangenomen leidt dit tot relevant hogere MHW-standen. Een meer betrouwbare vaststelling van de invloed van de in België uitgevoerde

moderniseringswerken op de afvoer bij Borgharen achten wij noodzakelijk. Hiervoor zijn historische gegevens van de Maasgeometrie en Maasafvoeren in België nodig. Het gebruik van deze gegevens moet, via een 1D-hydraulisch model, de grootte van de in te voeren correctie op de piekafvoeren nader bepalen.

6 Resultaten frequentie-analyse afvoerreks Maas

6.1 Inleiding

Voor de frequentie-analyse van de hoge afvoeren van de Maas te Borgharen is gebruik gemaakt van de gegevens uit de periode 1910–1993. De officiële meetreeks begint in het jaar 1911, maar uit de publikatie van Vereerstraten (1969, deel 1, p. 104) is een piekafvoer bekend bij Visé van $2.496 \text{ m}^3/\text{s}$ op 28-01-1910. Gezien de hoogte van deze afvoer, die direct in de groep van de vijf hoogste afvoeren van deze eeuw valt, is ervoor gekozen deze piekafvoer mee te nemen in de analyse. Met het oog op de golfdemping tussen Visé en Borgharen is de afvoerwaarde bij Borgharen verlaagd tot $2.400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vereerstraten geeft nog een aantal oudere piekafvoeren in de vorige eeuwen (de jaren 1643, 1740, 1850 en 1880), maar hiervan is de afvoerwaarde zeer onzeker. Daarbij is het meenemen van historische afvoeren buiten de aaneengesloten reeks omstreken. Wel zijn deze gegevens zinvol voor de beoordeling van de herhalingstijd van de piekafvoer van 1926 (zie hoofdstuk 7).

De frequentie-analyse kan worden uitgevoerd voor twee typen series:

1. Jaarmaxima, gebaseerd op het hydrologische jaar;
2. Afvoerpieken, gedefinieerd als alle dagafvoeren die voldoen aan een minimale waarde van $800 \text{ m}^3/\text{s}$ en een zichtduur van 8 dagen.

Het gebruik van partiële series geeft geen zekerheid ten aanzien van onafhankelijkheid van de verschillende pieken in de serie. De onderlinge afhankelijkheid van pieken moet worden voorkomen door het kiezen van een geschikte zichtduur. Als gevolg van de grootte van het stroomgebied en de snelle respons van de rivierafvoer op neerslag zal de afhankelijkheid van opeenvolgende pieken bij een geschikte zichtduur klein zijn. Op grond van deze overwegingen is voor de Maas geen voorkeur uit te spreken voor het gebruik van jaarmaxima of afvoerpieken.

In theorie kan de piekafvoer van januari 1993 pas als jaarmaximum worden meegenomen na afsluiting van het hydrologische jaar in september, maar bij het afsluiten van het winterseizoen kan redelijkerwijs worden aangenomen dat deze afvoer inderdaad de hoogste afvoer zal zijn.

Voor het jaar 1910, waarvan alleen het jaarmaximum bekend is, is de reeks afvoerpieken niet compleet. Het belang van het meenemen van de extreme waarde rechtvaardigt de (waarschijnlijk zeer geringe) fout die hierdoor ontstaat.

De bepaling van de maatgevende afvoer wordt gebaseerd op de gecorrigeerde reeksen afvoeren. Deze keuze is gebaseerd op de literatuurstudie naar de bepaling van de afvoeren (hoofdstuk 3) en de betere aanpassing van de frequentie-lijnen aan de data voor de gecorrigeerde reeksen. Hiervoor zijn van alle analyses de figuren van de extrapolatie met zowel de oorspronkelijke als met de gecorrigeerde waarden gegeven.

De correcties betreffen de verlaging van alle afvoerwaarden vòòr 1957 met percentages zoals aangegeven in hoofdstuk 3.3. Daarbij is aangenomen dat de correctie zoals gegeven voor de periode 1917–1926 (overschatting afvoer met 7%) geldt voor de hele periode van 1910–1931. Voor de periode vanaf 1957 wordt aangenomen dat de metingen correct zijn.

De correctie is gewenst om te compenseren voor de overschatting van de afvoer door het gebruik van stokdrijvers bij de stroomsnelheidsmetingen. Het betreft hier dus een systematische fout in de waarnemingen.

De toegepaste correcties op de oorspronkelijke afvoerwaarden zijn:

1910–1931	: -7%;
1932–1956	: -5%;
1957–heden	: geen correctie.

Voor de jaarmaxima is deze correctie eenvoudig door te voeren. Voor de afvoerpieken is het niet duidelijk tussen welke pieken de grens moet worden gelegd. De grenzen liggen in alle gevallen echter in periodes met relatief lage pieken, zodat het effect van de keuze voor de ligging van de grens geen belangrijke invloed heeft op de uiteindelijke geëxtrapoleerde piekafvoer.

In de gecorrigeerde series is de afvoer van 1926 verlaagd van 3.000 m³/s naar 2.790 m³/s.

Een mogelijk belangrijke correctie op de afvoergegevens zou gebaseerd moeten zijn op het effect van de modernisering van de Maas. In hoofdstuk 5 is aangegeven welke invloed de modernisering waarschijnlijk heeft gehad op de afvoeren van de Maas te Borgharen, maar een kwantificering van dit effect is momenteel slechts globaal mogelijk. Tevens is er waarschijnlijk een effect van veranderingen in de stroomgebieden van de zijrivieren. Dit effect kan momenteel nog niet worden gekwantificeerd.

Door het negeren van de effecten van deze twee ingrepen in de rivier is het mogelijk dat de afvoerreeksen inhomogeen zijn.

Gezien het belang van deze effecten is hiermee bij de conclusies aangaande de maatgevende afvoer in hoofdstuk 6.6 rekening gehouden.

Om de invloed van veranderingen in de afvoerreeks op de extrapolatie te bepalen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze richt zich op het effect van correctie van de series en het effect van veranderingen van de hoogste afvoer (1926). De resultaten zijn weergegeven in hoofdstuk 6.4.

Alle waarden in de tabellen zijn afgerond op 5 m³/s om bij de vergelijking tussen de waarden het effect van afronding zo klein mogelijk te houden. Voor de uiteindelijke bepaling van de maatgevende afvoer wordt de waarde afgerond op 50 m³/s.

6.2 Resultaten analyse met jaarmaxima

Voor de frequentie-analyse met jaarmaxima kan gebruik gemaakt worden van een aantal hiervoor geëigende verdelingen:

- Gumbel Type-I (verder aangeduid met Gumbel verdeling)
- Pearson-III

- Log normale (3-parameter)
- Log Pearson-III

Bij toepassing van deze vier verdelingen blijkt dat de log Pearson-III verdeling minder geschikt is, omdat de aanpassing aan de data slecht is. Deze verdeling is verder niet meer in de analyse betrokken.

De toepassing van de Gumbel verdeling toont een duidelijke discontinuïteit, waardoor de keuze van een ondergrens (Q_0) voor de data wenselijk is. Het is mogelijk dat de inhomogeniteit die zichtbaar is in de lijn wordt veroorzaakt door de overgang van gestuwde naar ongestuwde omstandigheden op de Maas, die plaatsvindt rond een afvoer van circa 1.200 m³/s. Daar echter een waarde van 1.000 m³/s de beste aanpassing van de lijn aan de data oplevert, is deze laatste waarde als ondergrens toegepast. Deze waarde werd eveneens gebruikt bij de frequentie-analyse in het kader van het onderzoek: 'Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen', zie (WL, 1993 a t/m f).

Samenvattend zijn de volgende drie frequentie-verdelingen toegepast op de jaarmaxima van de Maas:

1. Gumbel met ondergrens op 1.000 m³/s (Fig. 6.1 a,b);
2. Log-normale verdeling (3-parameter) (Fig. 6.2 a,b);
3. Pearson-III (Fig. 6.3 a,b).

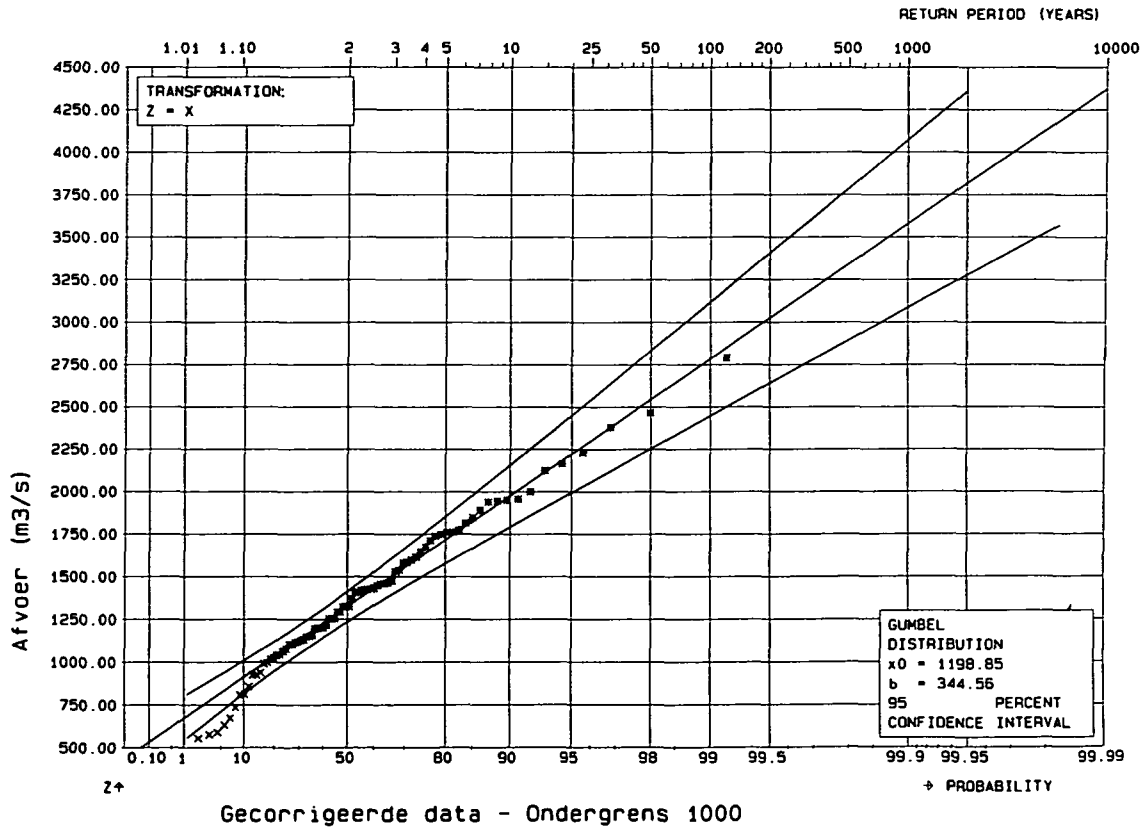
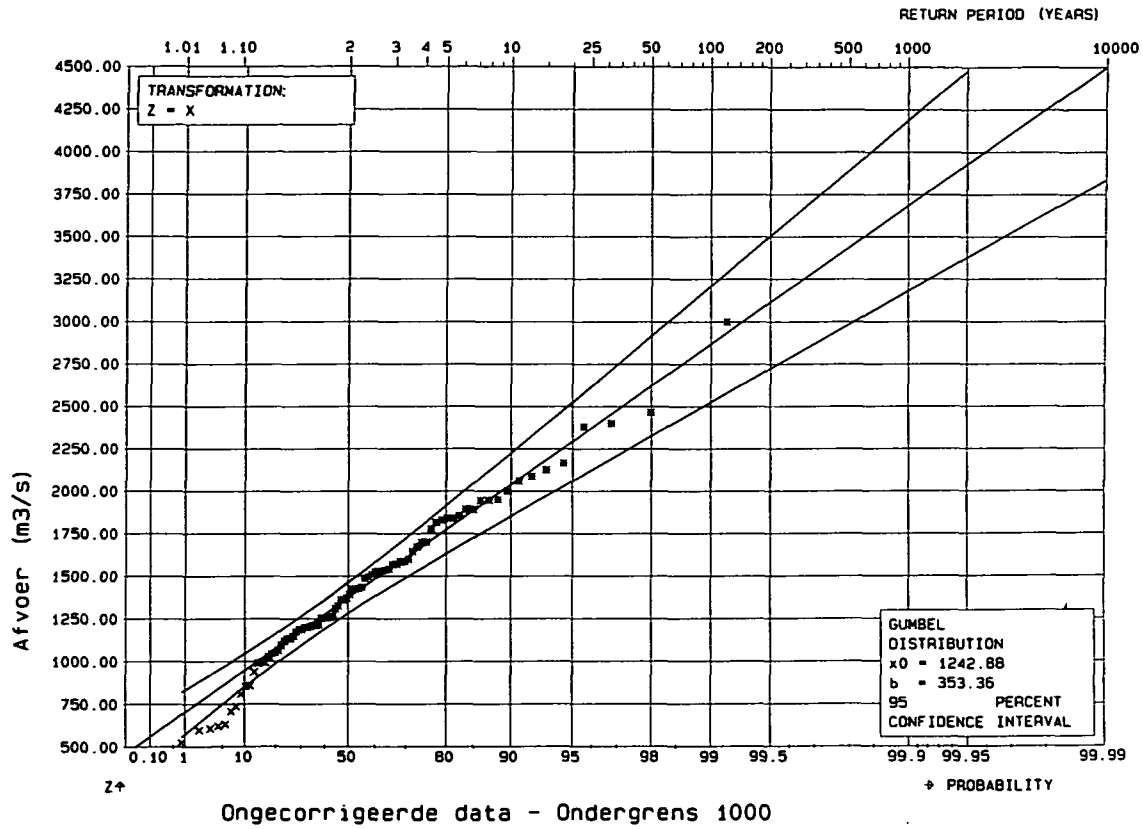
Op deze figuren zijn naast de frequentie-lijn ook de 95% betrouwbaarheidsintervallen aangegeven.

In Tabel 6.1 zijn de waarden gegeven voor verschillende herhalingstijden voor de drie verdelingen met de gecorrigeerde afvoerwaarden.

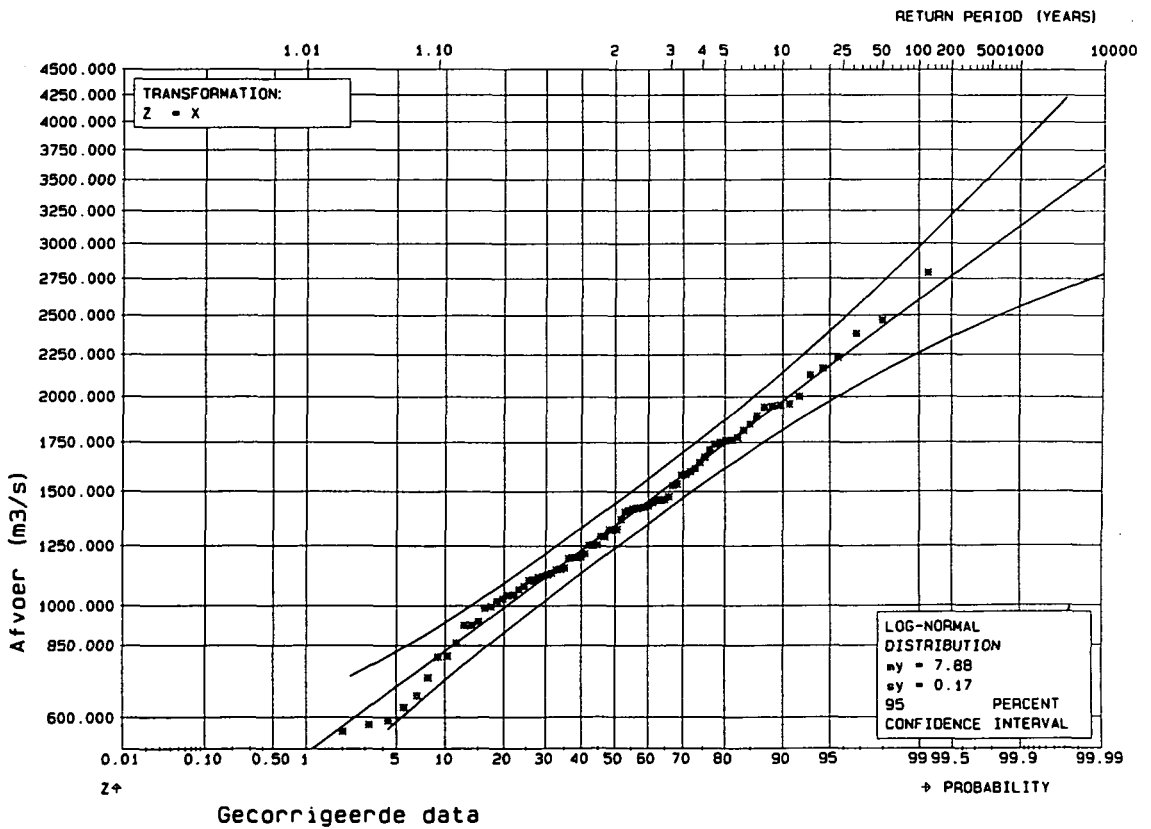
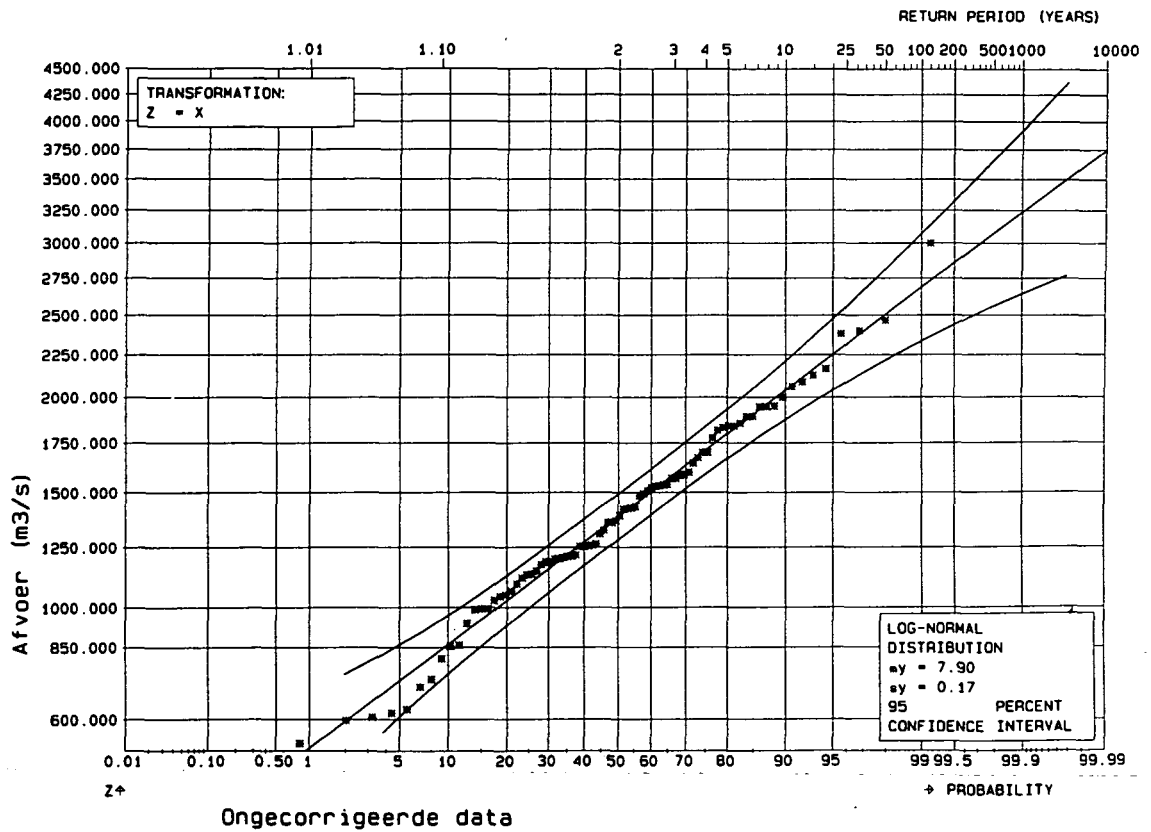
	Gumbel $Q_0=1.000$	Pearson-III	Log-normaal
T			
2	1.325	1.335	1.340
5	1.715	1.740	1.740
10	1.975	1.980	1.975
25	2.300	2.255	2.240
50	2.545	2.440	2.425
100	2.785	2.620	2.600
250	3.100	2.835	2.820
500	3.340	2.995	2.975
1.000	3.580	3.150	3.130
1.250	3.655	3.200	3.180
2.500	3.895	3.345	3.330
5.000	4.135	3.490	3.480
10.000	4.370	3.630	3.625

Tabel 6.1 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen
(Gecorrigeerde data)

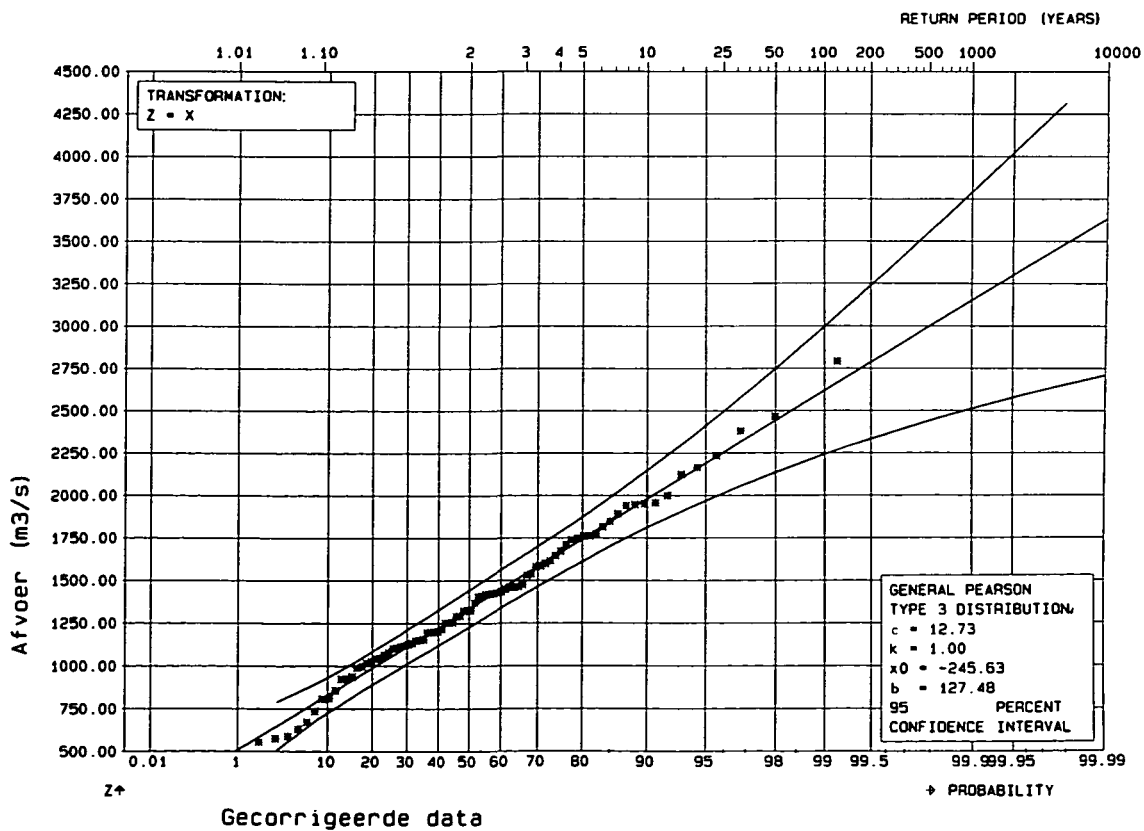
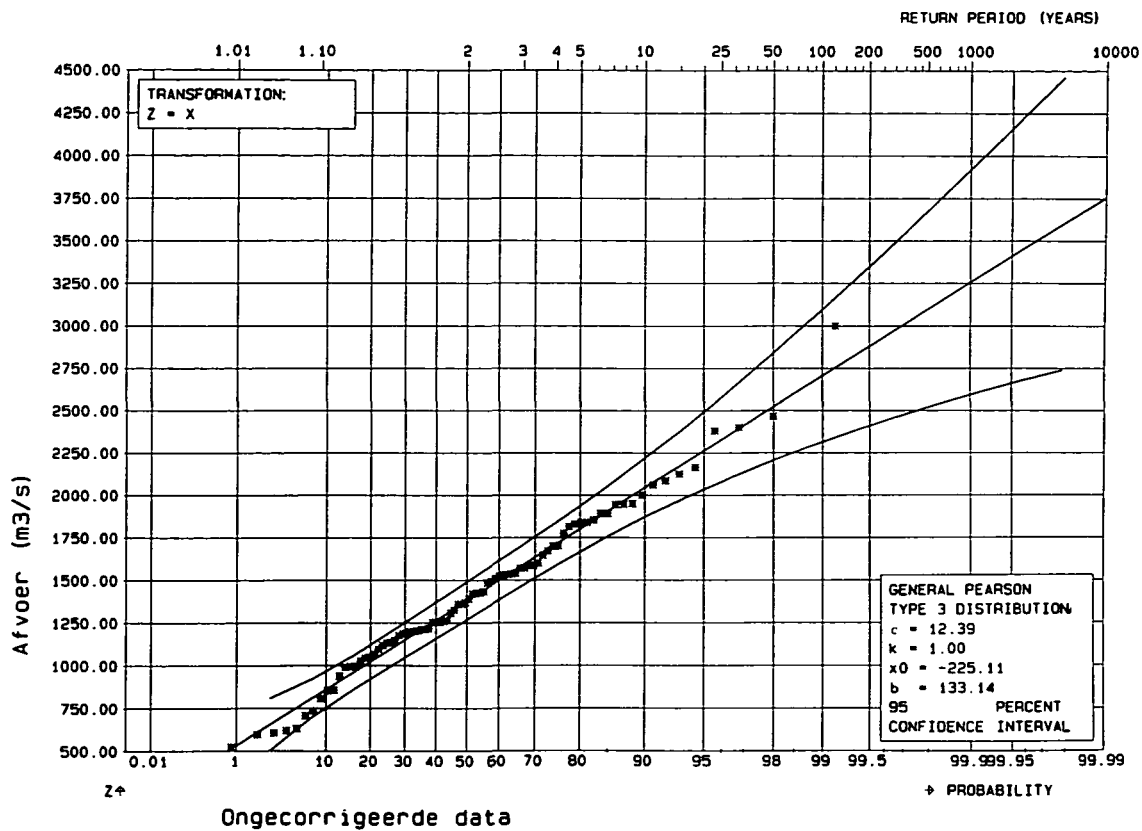
In het algemeen geeft de extrapolatie met de log-normaal (3-parameter) verdeling resultaten die vergelijkbaar zijn met de Pearson-III verdeling. De geëxtrapolerde waarden met de Gumbel verdeling met ondergrens op 1.000 m³/s liggen hoger.



Figuur 6.1 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Gumbel met ondergrens



Figuur 6.2 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Log-normaal



Figuur 6.3 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Pearson-III

6.3 Resultaten analyse met afvoerpieken

Voor de frequentie-analyse van afvoerpieken (geselecteerd op basis van een ondergrens van $800 \text{ m}^3/\text{s}$ en een zichtduur van 8 dagen) kan gebruik gemaakt worden van een algemene Pareto-verdeling en van de exponentiële verdeling. Deze laatste is een bijzonder geval van een algemene Pareto-verdeling.

Voor het toepassen van deze verdelingen moet een correctie worden toegepast om de afvoer voor een bepaalde herhalingstijd te kunnen berekenen. Hiervoor is voor de afvoerpieken waarop de extrapolatie is gebaseerd voor beide verdelingen een zodanige ondergrens gekozen dat er evenveel getallen mee genomen worden als het aantal jaren metingen (82) waarop de totale reeks pieken is gebaseerd. Deze ondergrens ligt bij $1.140 \text{ m}^3/\text{s}$.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.2.

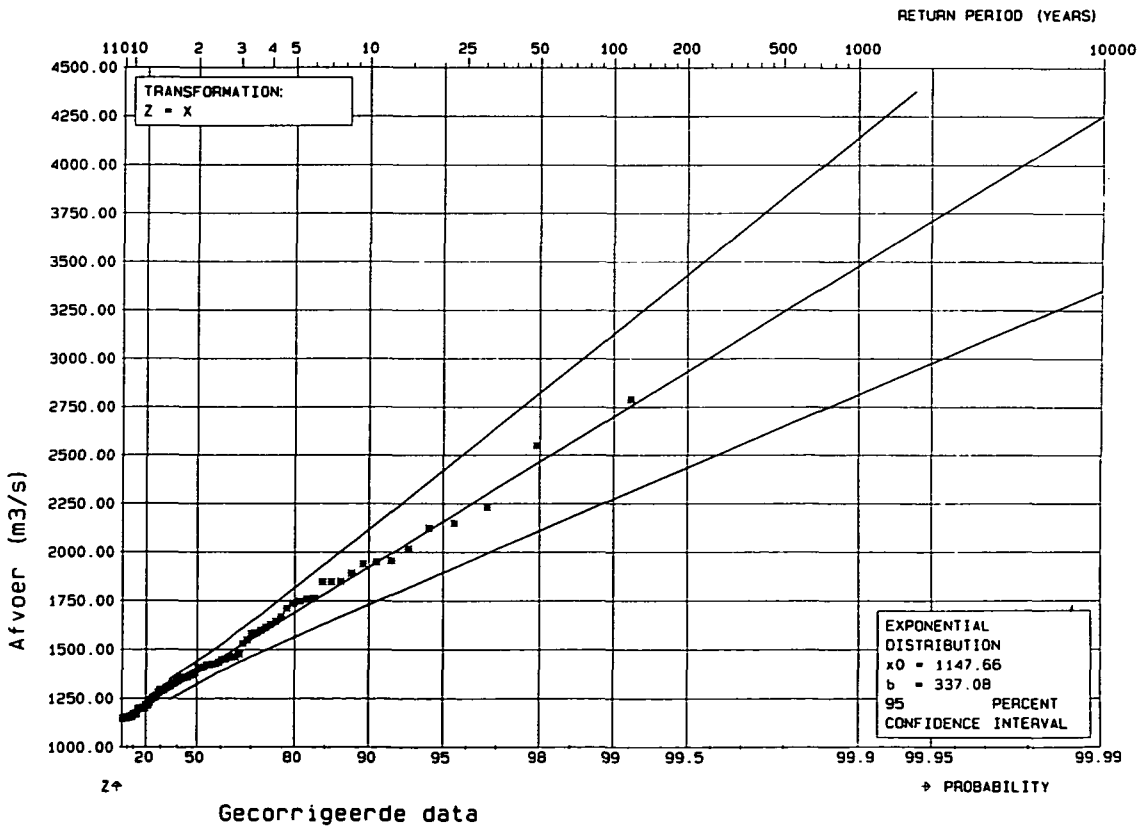
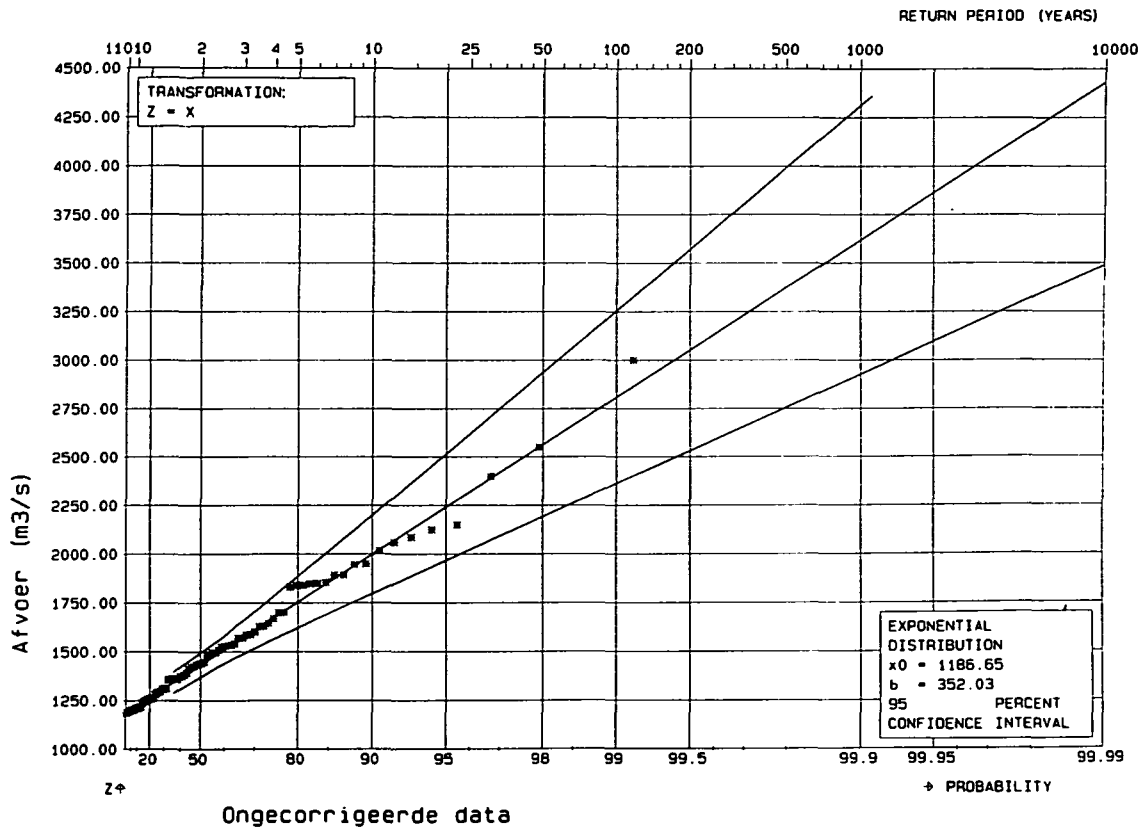
T (jaar)	Exponentieel (m^3/s)	Algemene Pareto (m^3/s)
2	1.380	1.385
5	1.690	1.695
10	1.925	1.925
25	2.235	2.215
50	2.465	2.430
100	2.700	2.635
250	3.010	2.905
500	3.245	3.100
1.000	3.475	3.295
1.250	3.550	3.355
2.500	3.785	3.540
5.000	4.020	3.720
10.000	4.250	3.895

Tabel 6.2 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen

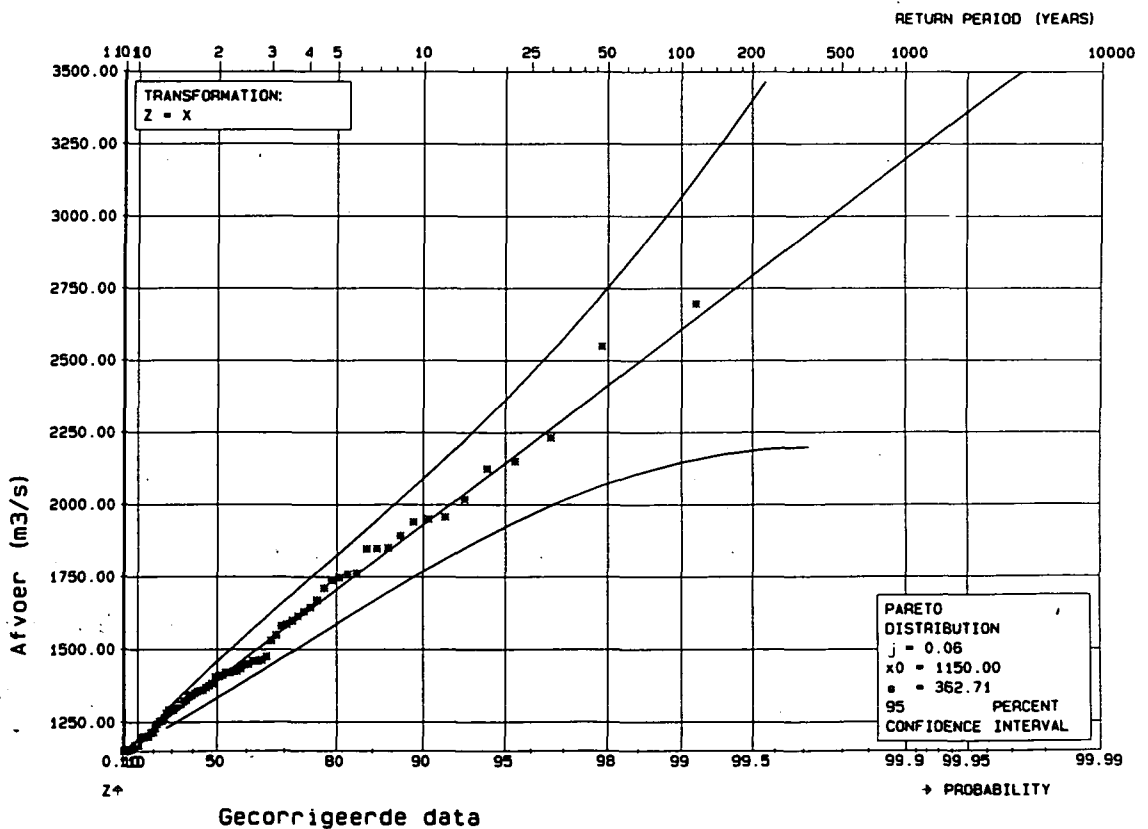
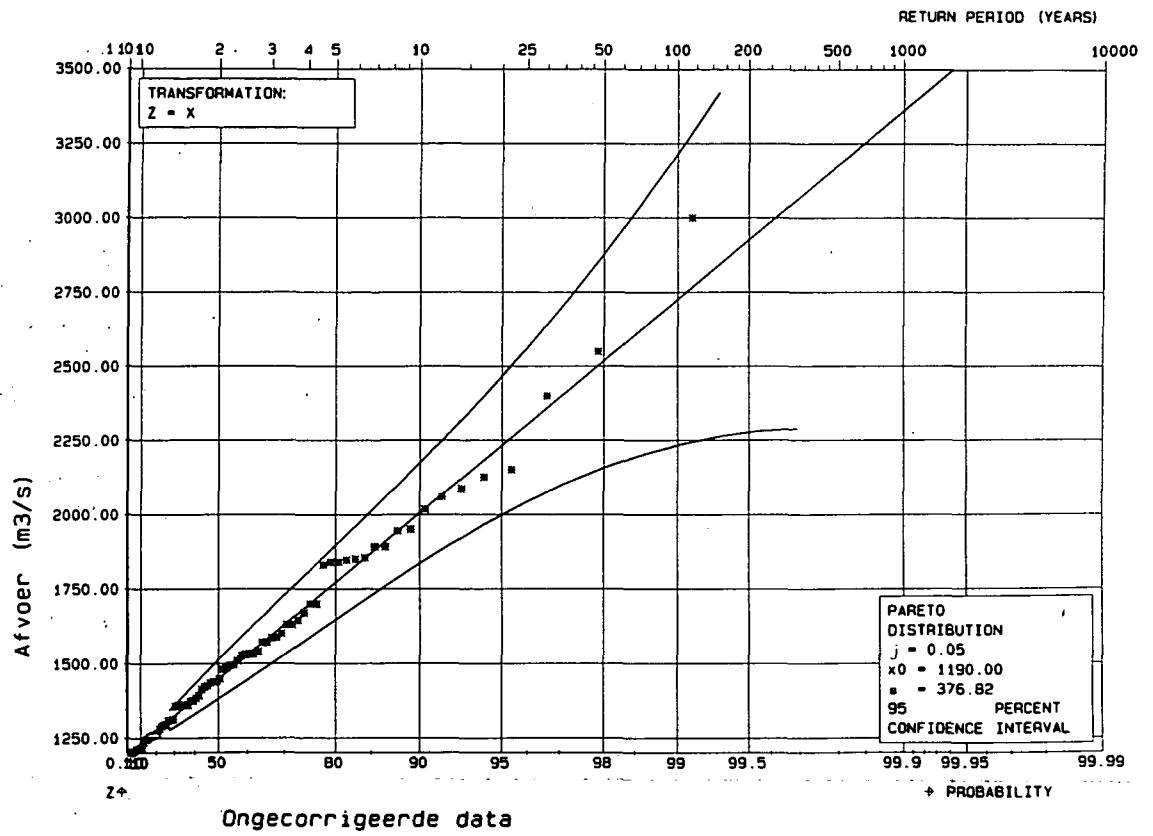
Uit deze extrapolaties blijkt, dat de algemene Pareto verdeling enigszins lagere waarden geeft dan de exponentiële verdeling.

De aanpassing van de frequentielijn aan de data is voor de exponentiële verdeling beter dan voor de algemene Pareto verdeling (vergelijk Fig. 6.4 a,b en Fig. 6.5 a,b). Voor beide verdelingen zijn de betrouwbaarheidsintervallen relatief breed.

Anders dan bij de Rijn, zie WL 1993d, sluit de exponentiële verdeling voor de Maas wel aan bij de gemeten piekafvoeren. Dit kan worden verklaard op grond van het verschil in karakter van de twee stroomgebieden. Het stroomgebied van de Maas is kleiner en het afvoergedrag is eenvoudiger dan dat van de Rijn. De afvoer van de Maas wordt vrijwel alleen door neerslag in de vorm van regen bepaald, terwijl de afvoer van de Rijn tijdens extreme omstandigheden het gevolg is van een combinatie van het smelten van sneeuw en regen. De sneeuw is het resultaat van neerslag in voorafgaande periode(s). De kans op afhankelijkheid in de piekafvoeren bij de Rijn is daarom groter dan bij de Maas, waar de piekafvoeren het gevolg zijn van hevige regenval.



Figuur 6.4 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Exponentieel



Figuur 6.5 Frequentie-analyse Maasafvoeren, Pareto

6.4 Gevoeligheidsanalyse

Voor deze analyse zijn vier soorten gevoeligheden zoals beschreven in hoofdstuk 6.1 meegenomen. De uitkomsten van deze analyse staan in Tabel 6.3:

- Kolom 1: effect van verlaging van het jaarmaximum van 1926 met $200 \text{ m}^3/\text{s}$;
 Kolom 2: effect van verhoging van het jaarmaximum van 1926 met $200 \text{ m}^3/\text{s}$;
 Kolom 3: effect van weglaten van de piekafvoer van 1926 op de oorspronkelijke serie;
 Kolom 4: de gevoeligheid ten opzichte van de gecorrigeerde series voor een combinatie van een aanpassing van de waarde van de hoogste afvoer (verlaagd van 3.000 naar $2.900 \text{ m}^3/\text{s}$, zie hoofdstuk 5.3 met betrekking tot de golfdemping op het traject Visé-Borgharen) en de daarop volgende algemene correctie voor de fout in de afvoermetingen;
 Kolom 5: effect van weglaten van de piekafvoer van 1926 op de gecorrigeerde serie;
 Kolom 6: het effect van de correctie voor de systematische meetfout op de oorspronkelijke afvoerwaarden.

Van de gevoeligheidsanalyses worden alleen de resultaten voor een herhalingsstijd van 1.250 jaar gegeven (Tabel 6.3).

	oorspronkelijk			gecorrigeerd		gecorrigeerd minus oorspronk.
	1926 2.800	1926 3.200	Zonder 1.926	Dubbel correc.	zonder 1.926	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Gumbel $Q_0=1000$	-20	20	-130	-10	-120	-105
Pearson-III	-80	95	-280	-35	-220	-105
Log normale	-95	100	-325	-40	-255	-105
Exponentiële	nvt	nvt	-135	-105	-115	-155
Algemene Pareto	nvt	nvt	-485	-65	-395	-95

Tabel 6.3 Overzicht gevoeligheidsanalyse bij herhalingsstijd van 1.250 jaar (in m^3/s).

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

1. de Gumbel-verdeling is het minst gevoelig voor veranderingen in de data;
2. de gevoeligheid voor veranderingen in de data is voor de Pearson-III en log-normale verdelingen vrijwel gelijk;
3. de algemene Pareto-verdeling is veel gevoeliger voor het weglaten van de hoogste waarde dan voor veranderingen in de data;
4. weglaten van de afvoer van 1926 heeft in het algemeen een groter effect bij de oorspronkelijke reeks dan bij de gecorrigeerde reeks afvoergetallen;
5. algehele correctie van de afvoerreeks geeft voor de frequentie-analyse met de drie verdelingen op de jaarmaxima een vergelijkbaar resultaat.

6.5 Discussie

6.5.1 Keuze van de meest geschikte frequentie-verdeling(en).

Bij de keuze van de meest geschikte frequentie-verdeling voor de bepaling van de maatgevende afvoer spelen een aantal criteria een rol:

1. theoretische geschiktheid van de verdeling voor het type data;
2. visuele beoordeling van de aanpassing van de frequentie-lijn aan de data;
3. gevoeligheid van de verdeling voor wijzigingen in de data.

Ad 1.

Aangaande de theoretische geschiktheid van een verdeling voor een type data (bijv. jaarmaxima versus afvoerpieken) en een bepaalde doelstelling is uitgebreide literatuur voorhanden. Er is geen consensus aangaande een voorkeurs-frequentie-verdeling en in het algemeen kan worden gesteld dat de hier toegepaste verdelingen voor de twee type data als adequaat kunnen worden beschouwd.

Op basis van dit criterium kan geen uitspraak gedaan worden welke verdelingen moeten worden gekozen.

Ad 2.

De aanpassing van de frequentie-lijn aan de data kan visueel worden beoordeeld op basis van de figuren.

Hierbij is het echter van belang te realiseren dat de positie van de data in de figuur is gebaseerd op standaard plot-formules. De invloed van de keuze van een dergelijke formule is het grootst op de meest extreme waarden (b.v. 1926-afvoer). In de standaard figuren wordt de Chegodayev formule toegepast. Andere gebruikelijke formules voor extreme piekafvoeren, zoals de Weibull en Gringorten formules, geven posities die resp. op lagere en hogere waarden liggen. Hierdoor moeten voor een juiste visuele beoordeling ook deze laatste twee plot-formules in de beoordeling worden betrokken.

De frequentie-lijnen van de Gumbel verdeling met ondergrens, de Pearson-III verdeling en de log-normale verdeling geven een betere aanpassing aan de punten voor de gecorrigeerde data dan voor de oorspronkelijke data.

Op basis van de visuele beoordeling van de frequentielijnen zijn de Gumbelverdeling zonder ondergrens en de algemene Pareto verdeling als minder geschikt aangemerkt. Met name voor de eerst genoemde is de afwijking dermate groot, dat deze verdeling verder niet meer in beschouwing is genomen.

Ad 3.

In het algemeen geldt dat een toename in de wijziging in de data (zowel positief als negatief) een evenredige wijziging geeft in de ligging van de frequentie-lijn en de geëxtrapoleerde waarden.

De gevoeligheid van een verdeling voor wijziging in de data moet met voorzichtigheid worden beoordeeld. Het is duidelijk dat 3-parameter verdelingen (zoals Pearson-III, log normaal (3) en algemene Pareto) gevoeliger zijn dan de 2-parameter verdelingen (Gumbel en Exponentiële), maar deze laatste zijn ook minder flexibel in het aanpassen van de frequentie-lijn aan

de data. Een correctie van de data geeft slechts een geringe wijziging in de frequentieverdelingen gebaseerd op jaarmaxima, omdat er slechts enkele extreme afvoeren in deze periode vallen. Dit blijkt ook uit de vergelijkbare invloed van het verlaging van de afvoer van 1926 met 200 m³/s (circa 7%) en de genoemde algemene verlaging van een deel van de data.

Op basis van de gevoeligheidsanalyse wordt de algemene Pareto verdeling als minder geschikt geacht voor de extrapolatie op basis van afvoerpieken bij hogere herhalingstijden, en wordt daarom niet meegenomen bij de bepaling van de maatgevende afvoer.

De uiteindelijke frequentie-analyse wordt uitgevoerd met de volgende verdelingen:

1. Gumbel-verdeling met ondergrens op 1.000 m³/s;
2. Pearson-III verdeling;
3. Log-normale (3-parameter) verdeling;
4. Exponentiële verdeling.

6.5.2 Maatgevende afvoer te Borgharen voor een herhalingstijd van 1.250 jaar.

In Tabel 6.4 is een samenvatting gegeven van de geëxtrapoleerde waarden van de piekafvoer gebaseerd op de vier toegepaste frequentie-verdelingen met gecorrigeerde waarden.

T (jaar)	Gumbel Q0=1000 (m ³ /s)	Pearson-III (m ³ /s)	Lognormale (m ³ /s)	Exponentiële (m ³ /s)	gemiddeld (m ³ /s)
2	1.325	1.335	1.340	1.380	1.345
5	1.715	1.740	1.740	1.690	1.720
10	1.975	1.980	1.975	1.925	1.965
25	2.300	2.255	2.240	2.235	2.260
50	2.545	2.440	2.425	2.465	2.470
100	2.785	2.620	2.600	2.700	2.675
250	3.100	2.835	2.820	3.005	2.940
500	3.340	2.995	2.975	3.245	3.140
1.000	3.580	3.150	3.130	3.475	3.335
1.250	3.655	3.200	3.180	3.550	3.395
2.500	3.895	3.345	3.330	3.785	3.590
5.000	4.135	3.490	3.480	4.020	3.780
10.000	4.370	3.630	3.625	4.250	3.970

Tabel 6.4 Extrapolatie met verschillende frequentie-verdelingen
(Gecorrigeerde data)

Het is mogelijk voor de log-normale en Pearson-III verdelingen een correctie door te voeren op de geëxtrapoleerde waarden voor het verschil tussen de mediaan en het gemiddelde. Het effect van deze correctie is echter gering. Voor de Gumbel-verdeling is het niet mogelijk een dergelijke correctie toe te passen, omdat de methode hiervoor niet bekend is.

Zonder een diepgaande studie van de fysica van het stroomgebied is het verder niet mogelijk aan één van deze verdelingen de voorkeur te geven of betrouwbaarder te achten dan de andere

verdelingen. Voor de maatgevende afvoer is daarom het gemiddelde genomen van de uitkomst van de vier geselecteerde frequentie-verdelingen.

Op basis van het gemiddelde is de maatgevende afvoer voor een herhalingstijd van 1.250 jaar (afgerond op 50 m³/s): 3.400 m³/s.

Er moet echter nog worden gecorrigeerd voor het effect van de modernisering van de Belgische Maas.

Voor de Rijn was een studie voor handen van het effect van modernisering op de Duitse Rijn tot aan Keulen, waar de correctie van de geëxtrapoleerde waarden op kon worden gebaseerd. Voor de Maas is slechts de studie van Bastings (1987, zie hoofdstuk 5) voorhanden, waardoor de schatting van de effecten van modernisering niet meer dan een eerste indicatie kunnen zijn. Nader onderzoek naar de gevolgen van de modernisering van de Maas in België met behulp van een hydraulisch model moet meer zekerheid geven ten aanzien van veranderingen in de afvoeren van de Maas te Borgharen.

Via de studie van Bastings is op basis van de betrekkingsslijn Eijsden-Borgharen een correctie op de waterstand in Borgharen afgeleid van 0,08 – 0,30 m. Dit komt overeen met een afvoer van 100 – 350 m³/s. Met deze correctie komt de maatgevende afvoer voor een herhalingstijd van 1.250 jaar te liggen tussen 3.500 en 3.750 m³/s. Uitgaande van een minimale verhoging van 100 m³/s bij T=2 en een maximale verhoging van 350 m³/s bij T=70.000 is de waarde voor T=1.250 jaar afgeleid uit een log-regressie. Hierdoor wordt voor de maatgevende afvoer bij een herhalingstijd van 1.250 jaar een waarde van 290 m³/s toegevoegd en komt de afvoerwaarde op 3.685 m³/s te liggen.

Om een schatting te kunnen maken van het effect van het gebruik van een gehomogeniseerde serie voor de extrapolaties zijn de oorspronkelijke series jaarmaxima en afvoerpieken (die al wel gecorrigeerd zijn voor de systematische fout in de afvoermetingen) gecorrigeerd met de waarden gebaseerd op de studie van Bastings. Hierbij is uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- de rivierwerken zijn voltooid in 1990;
- correctie wordt toegepast op alle jaarmaxima/afvoerpieken tot 1990;
- de grootte van de correctie-waarde is een functie van de hoogte van de afvoerwaarde. Tussenvallende waarden zijn bepaald met een log-regressie.

Bij deze veronderstellingen is er dus vanuit gegaan dat het effect van modernisering van eenzelfde grootte is over de volledige periode. Daarnaast kon geen rekening worden gehouden met de herkomst van de afvoerpieken, die zeker een rol speelt.

Met deze twee gehomogeniseerde series is opnieuw een extrapolatie uitgevoerd. De resultaten liggen enigszins onder de waarden gevonden volgens de methode gebaseerd op een combinatie van extrapolatie van de oorspronkelijke serie en toevoeging van een correctie-waarde. Bij een herhalingstijd van 1.250 jaar is het verschil circa 30 m³/s.

Gezien de onzekerheid in de hier toegepaste methode van homogenisatie wordt voornamelijk de voorkeur gegeven aan de frequentie-analyse op basis van de oorspronkelijke series.

Het is niet mogelijk om het effect van veranderingen in het afvoergedrag van de zijrivieren mee te nemen.

6.6 Conclusies en aanbevelingen

6.6.1 Conclusies:

1. het is niet mogelijk een algemeen aanvaarde 'beste' verdeling aan te wijzen;
2. de Gumbel-verdeling zonder ondergrens en de algemene Pareto-verdeling zijn niet meegenomen in de uiteindelijke bepaling van de maatgevende afvoer;
3. op basis van extrapolatie met zowel jaarmaxima als afvoerpieken zijn maatgevende afvoeren bepaald voor een aantal standaard herhalingstijden uit het gemiddelde van vier geselecteerde frequentie-verdelingen en de algemene Pareto-verdeling;
4. op basis van enkel de frequentie-analyse is de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen vastgesteld op $3.400 \text{ m}^3/\text{s}$ (afgerond op $50 \text{ m}^3/\text{s}$). Voor de maatgevende afvoer moet circa $300 \text{ m}^3/\text{s}$ worden opgeteld bij de berekende waarde om veranderingen in het dwarsprofiel van het Belgische deel van de Maas te verdisconteren, zodat de uiteindelijke maatgevende afvoer circa $3.700 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt;
Het is niet mogelijk het effect van veranderingen in het afvoergedrag van de zijrivieren in het Belgische deel van de Maas mee te nemen;
5. gezien de resultaten beschreven onder punt 5 en gelet op het feit dat het effect van de modernisering van de Maas in België niet nauwkeurig kan worden geschat wordt voorgesteld de maatgevende afvoer voorlopig te handhaven op $3.650 \text{ m}^3/\text{s}$;
6. Bepaling van de maatgevende afvoer op basis van gehomogeniseerde series levert waarden die iets onder de hierboven gegeven waarden liggen. Bij $T=1.250$ jaar is het verschil circa $30 \text{ m}^3/\text{s}$. De correctie op de afvoerwaarden voor de effecten van modernisering moet echter worden gebaseerd op een hydraulische studie. De huidige benadering kan niet meer zijn dan een eerste indicatie.

6.6.2 Aanbeveling:

Het is noodzakelijk een hydraulische studie uit te voeren naar het effect van de modernisering van de Belgische Maas op de afvoer te Borgharen. Deze studie omvat:

- de correcties op de series afvoeren voor het effect van de modernisering;
- studie van het gedrag van het stroomgebied onder extreme omstandigheden.

7 Herhalingstijd piekafvoer 1926

In Tabel 7.1 is voor de drie geselecteerde frequentie-verdelingen de herhalingstijd gegeven van piekafvoeren van 1.000–4.000 m³/s.

	Gumbel Q ₀ =1000	Pearson-III	Lognormale	Exponentiële
Q (m ³ /s)	T (jaar)	T (jaar)	T (jaar)	T (jaar)
1.000	1,2	1,3	1,3	< 1
1.250	1,7	1,7	1,7	1,4
1.500	3	3	3	2,9
1.750	6	5	5	6
2.000	11	11	11	13
2.250	22	25	26	26
2.500	44	63	68	55
2.750	90	172	190	116
3.000	186	507	561	243
3.250	385	1.586	1.746	511
3.500	795	5.225	5.635	1.073
3.750	1.640	18.020	18.745	2.253
4.000	3.390	64.775	63.790	4.731

Tabel 7.1 Herhalingstijden behorende bij verschillende piekafvoeren

Uit deze tabel blijkt, dat de vier verdelingen vrijwel gelijke herhalingstijden geven voor afvoeren tot circa 2.250 m³/s. Daarboven lopen de waarden ver uiteen, met een twee-deling tussen enerzijds de Pearson-III en de Log-normale verdeling (met extreem hoge waarden) en anderzijds de Gumbel en exponentiële verdelingen (met relatief lage waarden).

Op basis van deze gegevens is ook een inschatting gegeven van de herhalingstijd van de piekafvoer van 1926. Voor deze afvoer is de gecorrigeerde waarde gebruikt (2.790 m³/s). De resultaten zijn:

Gumbel met Q ₀ =1.000 m ³ /s	: 100 jaar
Pearson-III	: 205 jaar
Log-normale	: 225 jaar
Exponentiële	: 130 jaar

De spreiding in de resultaten in Tabel 7.1 is relatief groot. Als aanvullende informatie zijn in Vereerstraten (1969, deel 1, p. 104) de afvoerwaarden gegeven voor de hoogste afvoeren te Visé in de vorige eeuwen (1643, 1740, 1850 en 1880). De oorspronkelijke afvoerwaarden zijn gecorrigeerd op dezelfde wijze als is gedaan voor de serie 1910–1931 (verlaging met 7%). De resultaten zijn:

Datum	Oorspronkelijke afvoerwaarde (m ³ /s)	Gecorrigeerde afvoerwaarde (m ³ /s)
15-01-1643	2.880	2.678
21-12-1740	2.840	2.641
05-01-1850	2.690	2.501
22-12-1880	2.800	2.604

Tabel 7.2 Overzicht extreme afvoeren vòòr 1900

Er zijn echter geen gegevens aangaande de methode van afvoerbepaling voor deze jaren en de getallen zijn uiteraard zeer onzeker. Het is dus ook niet mogelijk vast te stellen of de analyse moet worden gebaseerd op de oorspronkelijke of de gecorrigeerde waarden. Opgemerkt moet worden dat deze getallen gelden voor de lokatie Visé, zodat de afvoerwaarden bij Borgharen circa 50–100 m³/s lager zullen hebben gelegen door de golfdemping.

Deze getallen zijn een aanwijzing dat de herhalingstijd voor de 1926-afvoer waarschijnlijk groter is dan de waarde berekend met de Gumbel-verdeling (100 jaar).

Een meer gefundeerde uitspraak kan niet worden gedaan zonder een studie naar het hydrologische gedrag van het Maas-gebied. Hierbij moeten ook de effecten van de modernisering worden meegenomen.

De herhalingstijd voor de afvoer van 1926 moet dus worden geschat op 100–225 jaar. Van de presentatie van een gemiddelde herhalingstijd is niet afgezien, omdat daarmee een mate van nauwkeurigheid wordt gesuggereerd, die niet kan worden verantwoord.



Wateroverlast bij hoogwater

8 Vorm van het maatgevend hoogwater te Borgharen

8.1 Inleiding

Bij hoogwatergolven die zich door een waterloop voortplanten treedt demping op, dat wil zeggen dat de grootte van de afvoer tijdens de voortplanting van de golf afneemt in de richting van de stroming. De demping van hoogwatergolven is daarbij onder meer afhankelijk van:

- de bergende breedte van de rivier,
- het volume van de hoogwatergolf (grootte van de piekafvoer en de duur),
- het verhang van de rivier en
- de snelheid waarmee de afvoer op een lokatie verandert (verandering van Q als functie van tijd = vorm van de hoogwatergolf).

Om de verandering in de grootte van de afvoer in stroomrichting te bepalen maken we gebruik van een 1-dimensionaal stromingsmodel. Voor de Maas is dit model gebaseerd op het programmapakket ZWENDL. Via de schematisatie is de bergende breedte en het verhang van de rivier vastgelegd. De grootte van de piekafvoer en de vorm van de hoogwatergolf (golfvolume en snelheid van was en val) moeten wij via de randvoorwaarden aan het 1-D model toeleveren.

In dit hoofdstuk geven wij een overzicht van door Rijkswaterstaat in het verleden uitgevoerde studies ter bepaling van de vorm van het hoogwater, zie paragraaf 8.2. In paragraaf 8.3 beschrijven wij de procedure die wij hier volgen om de vorm van het hoogwater te Borgharen vast te stellen.

8.2 Voorgaande studies

Naast uitgebreid onderzoek naar de wijze waarop golfdemping kan worden bepaald, zie onder meer de publikaties van Van der Made (1966a, 1966b, 1967, 1973, en 1982) heeft Rijkswaterstaat in het verleden tevens enkele studies uitgevoerd naar de vorm van hoogwaters, zie Van der Made 1965, Rijkswaterstaat 1966 en 1968 (Nota's 66.9 en 68.3), en Van Dixhoorn 1978 (Notitie 78.J).

De Nota's 66.9 en 68.3 hebben betrekking op de vorm van het hoogwater op de Bovenrijn. De door Van der Made beschreven methode is gebaseerd op de veronderstelling dat de afvoertoppen rechtlijnig-exponentieel zijn verdeeld. Op grond van een frequentie-verdeling maakt hij een schatting van de tijd dat de extreme afvoer een bepaald afvoerniveau overschrijdt (duur van de afvoergolf). Door deze duur voor verschillende afvoerniveaus te bepalen kan een vorm voor de hoogwatergolf worden bepaald. In deze werkwijze wordt echter geen onderscheid gemaakt tussen de vorm tijdens de was en de val van het extreem hoogwater. Er kan daardoor alleen een uitspraak worden gedaan over het totale volume van de golf. Een symmetrisch opgebouwde golf geeft een minder nauwkeurige schatting van de golfdemping dan een golf waarbij rekening is gehouden met de vorm van de golf.

In Van Dixhoorn 1978 (RWS Notitie 78.J), 'Hoogwatermodel Maas; Onderzoek afvoerverloop tijdens hoge afvoergolven te Borgharen' zijn vormen van hoogwatergolven met een piekafvoer van 2.500 m³/s, 3.000 m³/s en 3.500 m³/s bepaald. Hierbij is men als volgt te werk gegaan. Van de waargenomen hoogwaters in de periode 1911 tot 1974 is nagegaan of men te maken heeft met enkelvoudige of meervoudige golven. Het onderscheid is gelegd bij een zichtduur van 6 dagen, dat wil zeggen dat er sprake is van een meervoudige golf als de tijdsduur tussen twee opeenvolgende toppen groter is dan 6 dagen. Voorts is voor elk hoogwater nagegaan hoe groot de basisafvoer zou zijn geweest, indien het in beschouwing zijnde hoogwater niet zou zijn opgetreden. Het afvoerverloop van de hoogwatergolven is hiervoor gecorrigeerd. De verschillende afvoergolven zijn ingedeeld in klassen van 200 m³/s, beginnende bij 800 m³/s. Voor elk hoogwater zijn relatieve afvoerniveaus gedefinieerd. Voor ieder afvoerniveau is de duur van de was en de duur van de val bepaald. Per groep is vervolgens een groepsge-middelde duur en een standaardafwijking bepaald. Voor het extreme hoogwater is hieruit de duur van de was en de val voor de relatieve niveaus geëxtrapoleerd met behulp van relaties, waarbij de t/Q_{top} (t =duur en Q_{top} = piekafvoer-basisafvoer) is uitgezet tegen Q_{top} . Uit de geëxtrapoleerde duren voor was en val is de vorm van het extreme hoogwater bepaald, in dit geval de golven met een afvoer van 2.500 m³/s, 3.000 m³/s en 3.500 m³/s. Voorts zijn de 95% betrouwbaarheidsbanden aangegeven. De aldus bepaalde vormen voor de hoge afvoeren hebben model gestaan voor de vorm van het maatgevend hoogwater van 3.650 m³/s.

De gevolgde procedure heeft als bezwaar dat de duur van de was en de val onafhankelijk van elkaar zijn bepaald. Er bestaat daardoor geen zekerheid of de samengestelde golf een goede representatie is van de te verwachten golf. Een koppeling met een extrapolatie van het volume van de afvoergolf is niet gemaakt.

Voor de extrapolatie van de duur van de was en de val van het hoogwater is gebruik gemaakt van relaties tussen $\log(t/Q_{top})$ en Q_{top} . Er is hierbij sprake van schijnbare correlaties. De met behulp van regressie-analyse bepaalde lijnen vallen vrijwel samen met de lijn waarbij de duur, t , een constante waarde heeft. Dit komt een betrouwbare extrapolatie niet ten goede.

8.3 Beschrijving procedure en resultaten

Voor het voorspellen van de vorm van de maatgevende hoogwatergolf te Borgharen kunnen we verschillende wegen bewandelen. De meest betrouwbare en meest bewerkelijke methode is die waarbij Monte Carlo simulaties worden uitgevoerd met behulp van een hydrologisch/hydraulisch model. Hierbij moeten voor de randvoorwaarden schattingen worden gemaakt van de condities die zullen optreden tijdens de maatgevend geachte afvoeromstandigheden. Door nu een groot aantal simulaties uit te voeren met steeds wisselende condities voor de randvoorwaarden is het mogelijk om inzicht te krijgen in de vorm van het hoogwater. Het tijdsbestek van deze studie liet een dergelijke aanpak niet toe.

Om in een relatief kort tijdsbestek een uitspraak te kunnen doen over de vorm van het maatgevende hoogwater volgen wij hier een andere werkwijze. We gebruiken daarbij de informatie van de sinds 1911 geregistreerde hoogwatergolven met een afvoer groter dan 1.250 m³/s (inclusief het hoogwater van 1993). Onze werkwijze is als volgt:

- i Voor elke hoogwatergolf bepalen we de doorsnijding van de golf met een aantal vooraf gekozen afvoerniveaus. De keuze van de afvoerniveaus is arbitrair.

We zijn geïnteresseerd in het verloop van de waterstanden en afvoeren in het gebied benedenstrooms van Borgharen. In verband met de bepaling van de golfdemping zal het verloop van waterstanden en afvoeren in dit gebied met behulp van een 1D-model worden bepaald. Dit model moet gevoed worden met de maatgevende randvoorwaarde voor de afvoer. In verband met de scheepvaart door het Julianakanaal worden de waterstanden bij Borgharen gestuwd. Deze stuw is tot een afvoer van ca. 1.200 m³/s in bedrijf. Het heeft daarom geen zin om afvoerniveaus te kiezen die kleiner zijn dan de genoemde waarde. Verder is het niet zinvol om een groot aantal afvoerniveaus te kiezen. Voor de onderhavige studie kiezen we in eerste instantie de volgende afvoerniveaus: 1.250, 1.500, 1.750, 2.000, 2.250 en 2.500 m³/s. Later zal blijken dat er voor de laatste twee niveaus te weinig meetgegevens bekend zijn om een verantwoorde extrapolatie uit te voeren.

- ii Voor elke hoogwatergolf bepalen we nu:
- de tijd die verloopt tussen het bereiken van het beschouwde afvoerniveau en het bereiken van de maximale afvoer (duur van de was),
 - de tijd dat de afvoer van de golf hoger is dan het gekozen afvoerniveau (duur van de hele golf), – en
 - het volume van de golf boven het afvoerniveau, dat wil zeggen de som van de dagafvoeren groter dan het gekozen afvoerniveau,
- iii Bovenvermelde grootheden hebben wij uitgezet als functie van de piekafvoer, zie de Figuren 8.1 t/m 8.3. Uit de Figuren 8.1 en 8.2 valt op te maken dat er nogal wat spreiding is in de duur van de was van het hoogwater en de duur van de gehele golf. De spreiding is groter naarmate het gekozen afvoerniveau lager ligt.
- iv Door het grote aantal punten met een relatief lage piekafvoer zal de ligging van de regressiekromme door de punten met een lage piekwaarde meer worden beïnvloed dan door de punten met een hoge piekafvoer. Om hieraan tegemoet te komen worden de piekafvoeren in een aantal klassen (300 m³/s) ingedeeld. Per klasse bepalen we vervolgens een gemiddelde waarde voor de duur van de was van het hoogwater en de gehele duur van het hoogwater. Het resultaat hiervan is weergegeven in de Figuren 8.4 en 8.5. Door de punten van de Figuren 8.4 en 8.5 hebben wij een regressielijn met de volgende algemene vorm gelegd:

$$T(Q_{\text{piekafvoer}}) = A + B * Q_{\text{piekafvoer}}$$

Voor deze gedaante is gekozen, omdat wij op grond van de ligging van de punten in de Figuren 8.4 en 8.5 geen reden zien voor het gebruik van een andere regressielijn.

De navolgende regressie-coëfficiënten zijn gevonden:

Afvoerniveau	Coëfficiënten duur was		Coëfficiënten totale duur	
	A	B	A	B
1.250	-1,031	0,001346	-4,582	0,004888
1.500	-1,971	0,001558	-6,689	0,004950
1.750	-2,913	0,001751	-8,142	0,004915
2.000	-2,505	0,001392	-8,747	0,004650

Tabel 8.1 Coëfficiënten voor de regressielijnen.

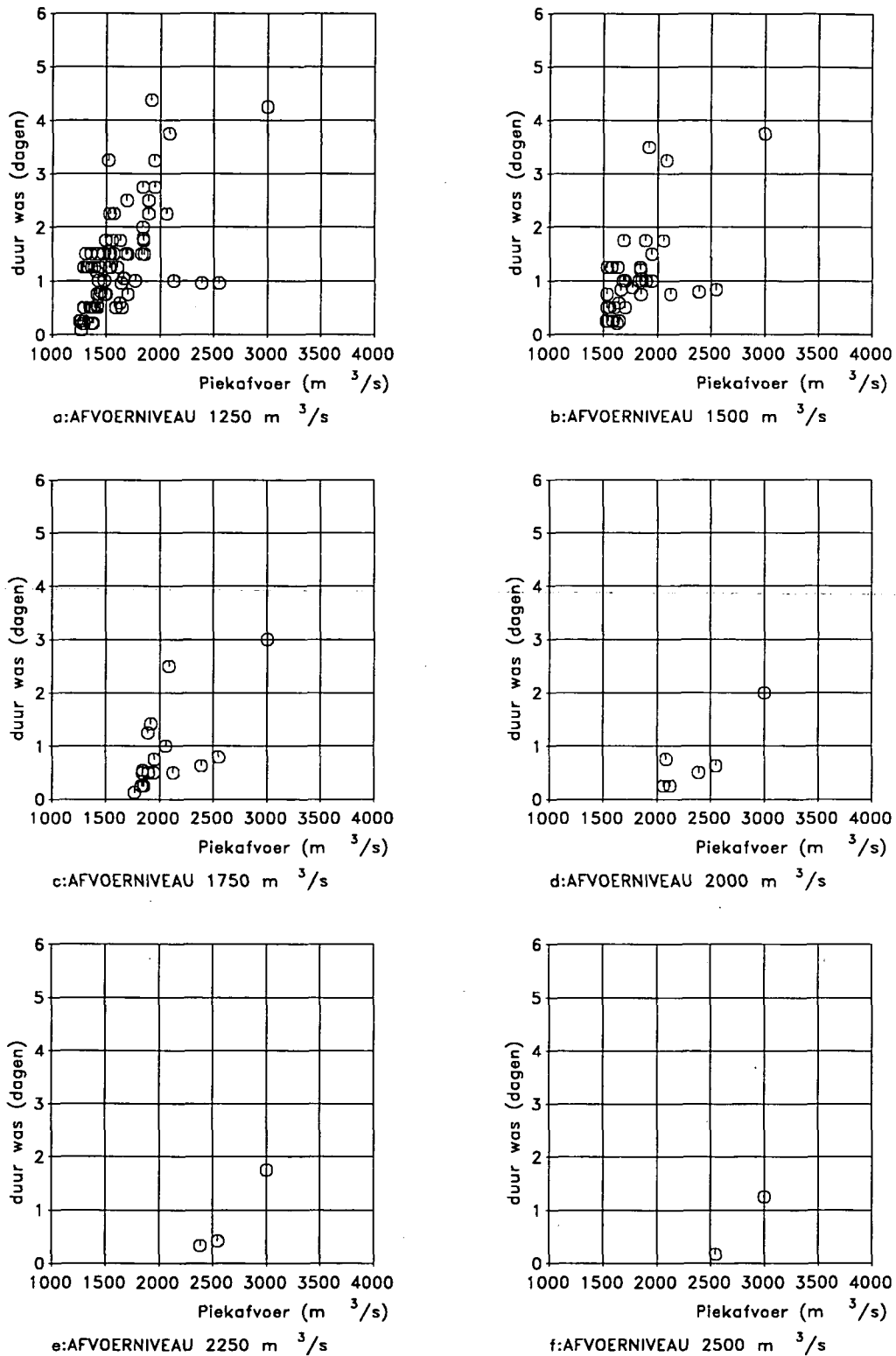
Voor de afvoerniveaus 2.250 en 2.500 m³/s konden we geen regressielijn bepalen in verband met het beperkte aantal hoogwatergolven boven deze niveaus.

- v Ter verificatie van de hier gebruikte methode wordt het afvoervolume van de geëxtrapoleerde golf vergeleken met het volume van de door Van Dixhoorn (1978) bepaalde golf. Van Dixhoorn heeft de vorm van de golf bepaald bij een piekafvoer van onder meer 3.500 m³/s.

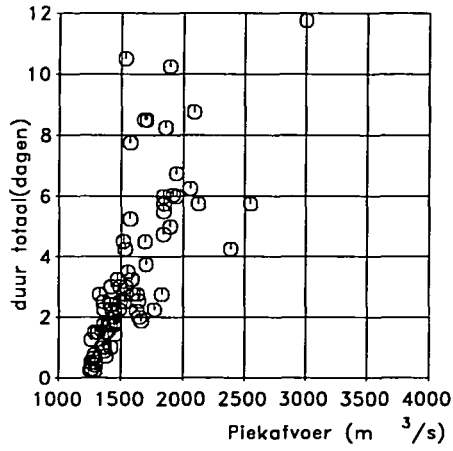
De golfvorm met een piekafvoer van 3.500 m³/s is nu als volgt bepaald. Voor voornoemde piekafvoer wordt de duur van de was en de totale golf bepaald met de in Tabel 8.1 gegeven coëfficiënten. Hiermee liggen de duren vast op het niveau van 1.250, 1.500, 1.700 en 2.000 m³/s. Met betrekking tot de vorm van het hoogwater tijdens de top is op deze wijze geen uitspraak te doen. De beste informatie die wij voor de vorm van de top hebben is de registratie van het hoogwater van 1926, waarbij de afvoer werd geschat op 3.000 m³/s. Voor de vorm van de top van het hoogwater bij extreem hoge afvoeren gaan we hier uit van een geometrische schaling naar de afvoer van 3.500 m³/s. De vorm van de golf moet bij de lagere afvoerniveaus aansluiten bij de geëxtrapoleerde waarden voor de duur van de golf. De uiteindelijke golf is weergegeven in Figuur 8.6. Het volume van de afvoergolf boven de afvoerniveaus is ingetekend in Figuur 8.3 en wijkt niet af van de verwachte waarde.

- vi Op dezelfde wijze hebben wij een extrapolatie uitgevoerd voor de MHW-afvoer van 3.650 m³/s. De vorm van de golf tijdens de top hebben wij weer bepaald uit een geometrische schaling van de in 1926 opgetreden vorm van de top. De geconstrueerde golf is weergegeven in Figuur 8.7. Het volume van de golf boven de afvoerniveaus is weer ingetekend in Figuur 8.3.
- vii Voor het bepalen van de regressielijnen hebben wij voor verschillende afvoerclassen de gemiddelde afvoer, de gemiddelde duur van de was en de gemiddelde totale duur van de hoogwatergolf bepaald voor de verschillende afvoerniveaus. Naast dit gemiddelde kunnen we tevens een schatting geven van de standaardafwijking voor de totale duur en de was van het hoogwater. Dit blijkt echter alleen mogelijk te zijn voor de afvoerniveaus 1.250, 1.500 en 1.750 m³/s. Voor de hogere afvoeren komen in de beschouwde afvoerclassen slechts enkelvoudige gegevens voor (er valt meestal maar één golf in de klasse), zodat we daar geen schatting kunnen geven van de standaardafwijking van de duren. Wij veronderstellen nu voor de MHW-golf van 3.650 m³/s dat de standaardafwijking op de afvoerniveaus 1.250, 1.500 en 1.750 m³/s gelijk is aan

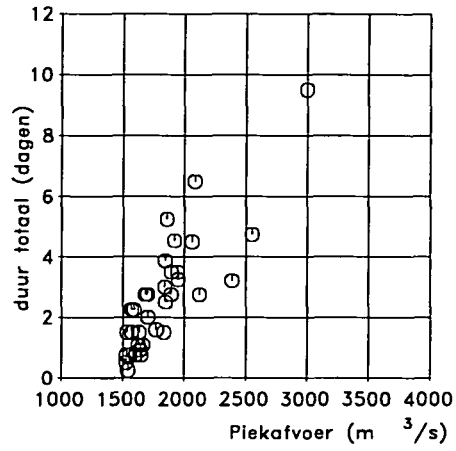
het rekenkundig gemiddelde van de standaardafwijkingen die wij voor het beschouwde afvoerniveau bij de verschillende afvoerclassen hebben berekend op basis van de afvoerregistraties 1911-1993.



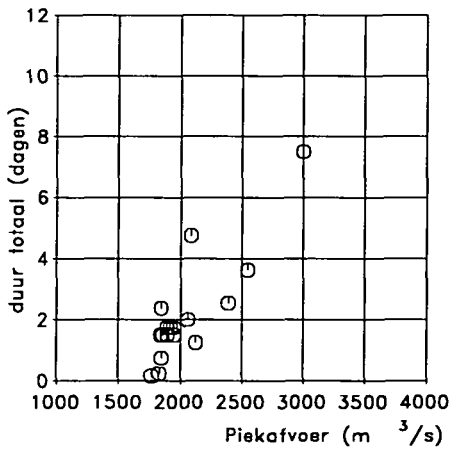
Figuur 8.1 Duur van de was van hoogwaters als functie van de piekafvoer



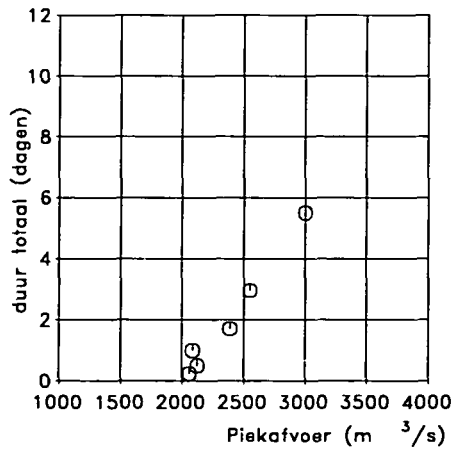
a:AFVOERNIVEAU 1250 m³/s



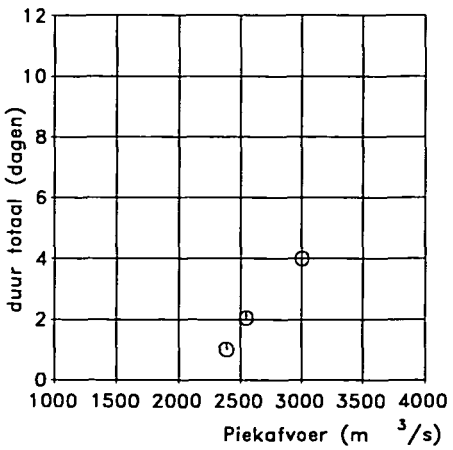
b:AFVOERNIVEAU 1500 m³/s



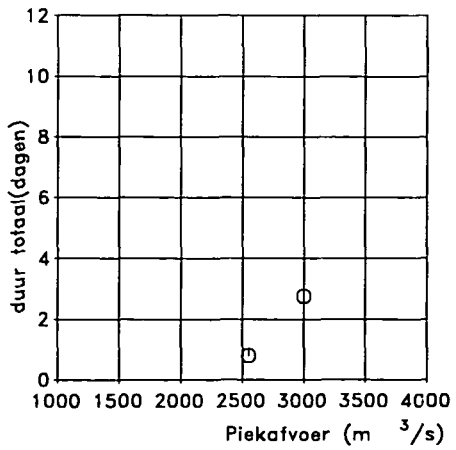
c:AFVOERNIVEAU 1750 m³/s



d:AFVOERNIVEAU 2000 m³/s

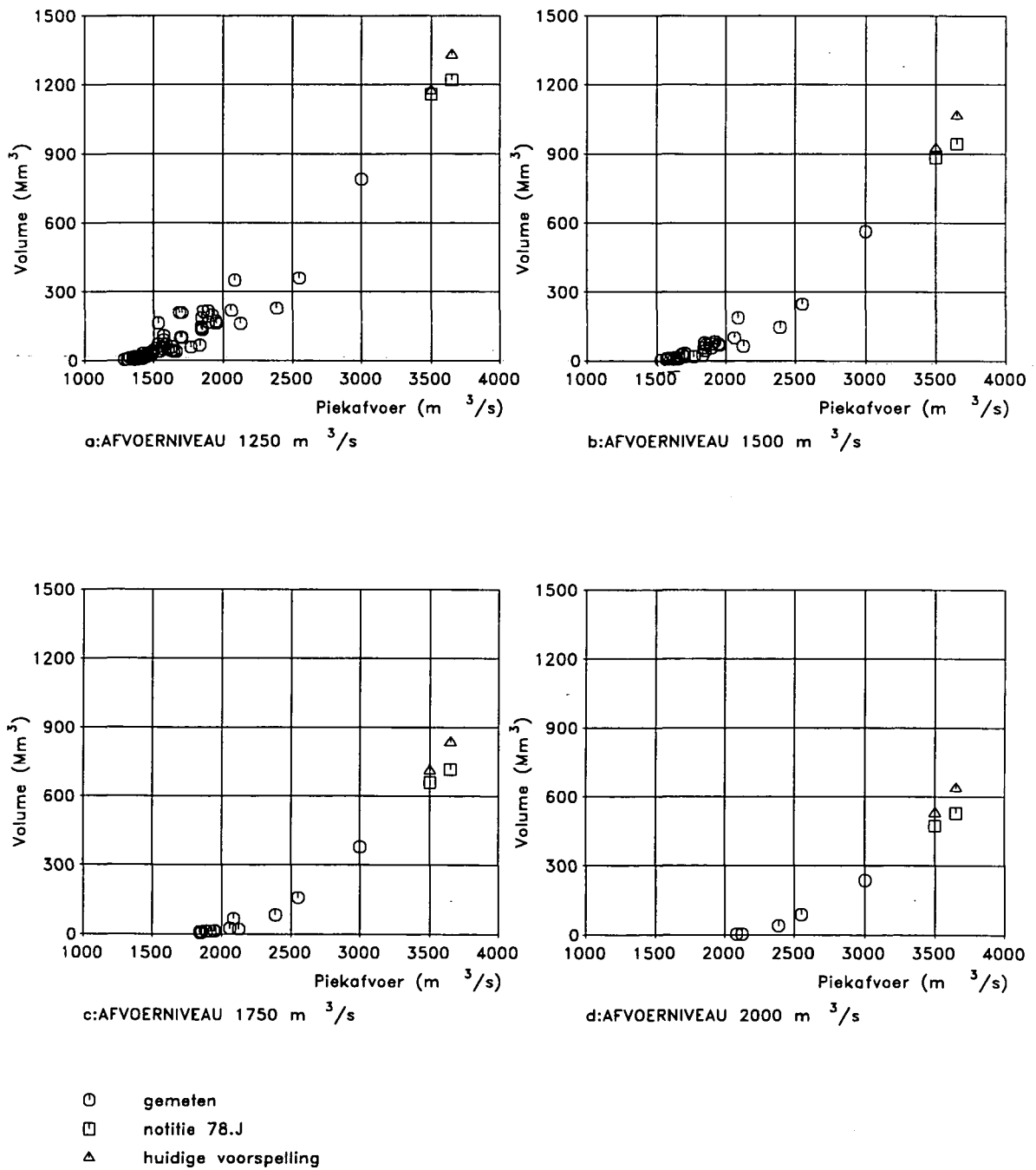


e:AFVOERNIVEAU 2250 m³/s

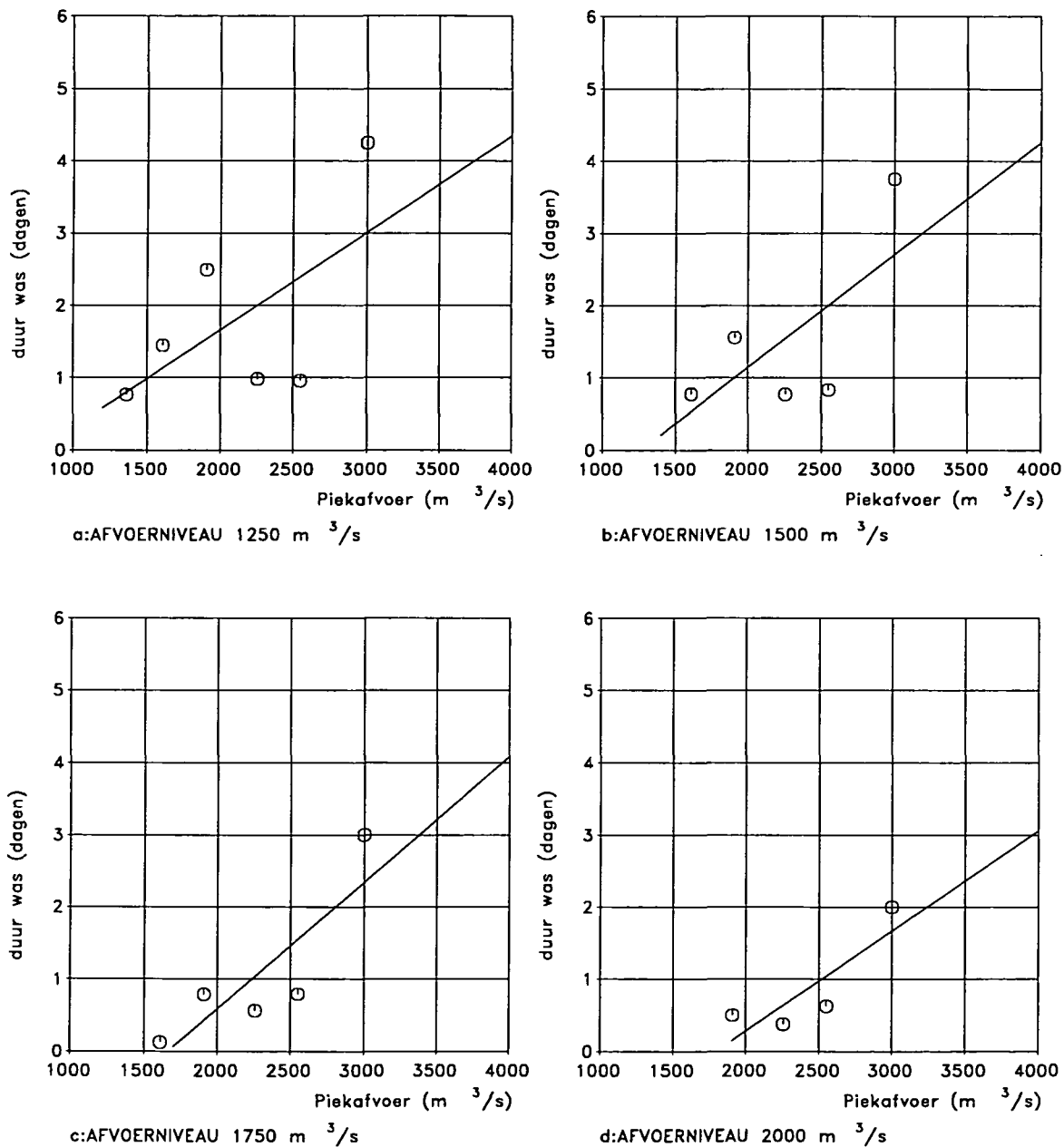


f:AFVOERNIVEAU 2500 m³/s

Figuur 8.2 Totale duur van hoogwaters als functie van piekfvoer

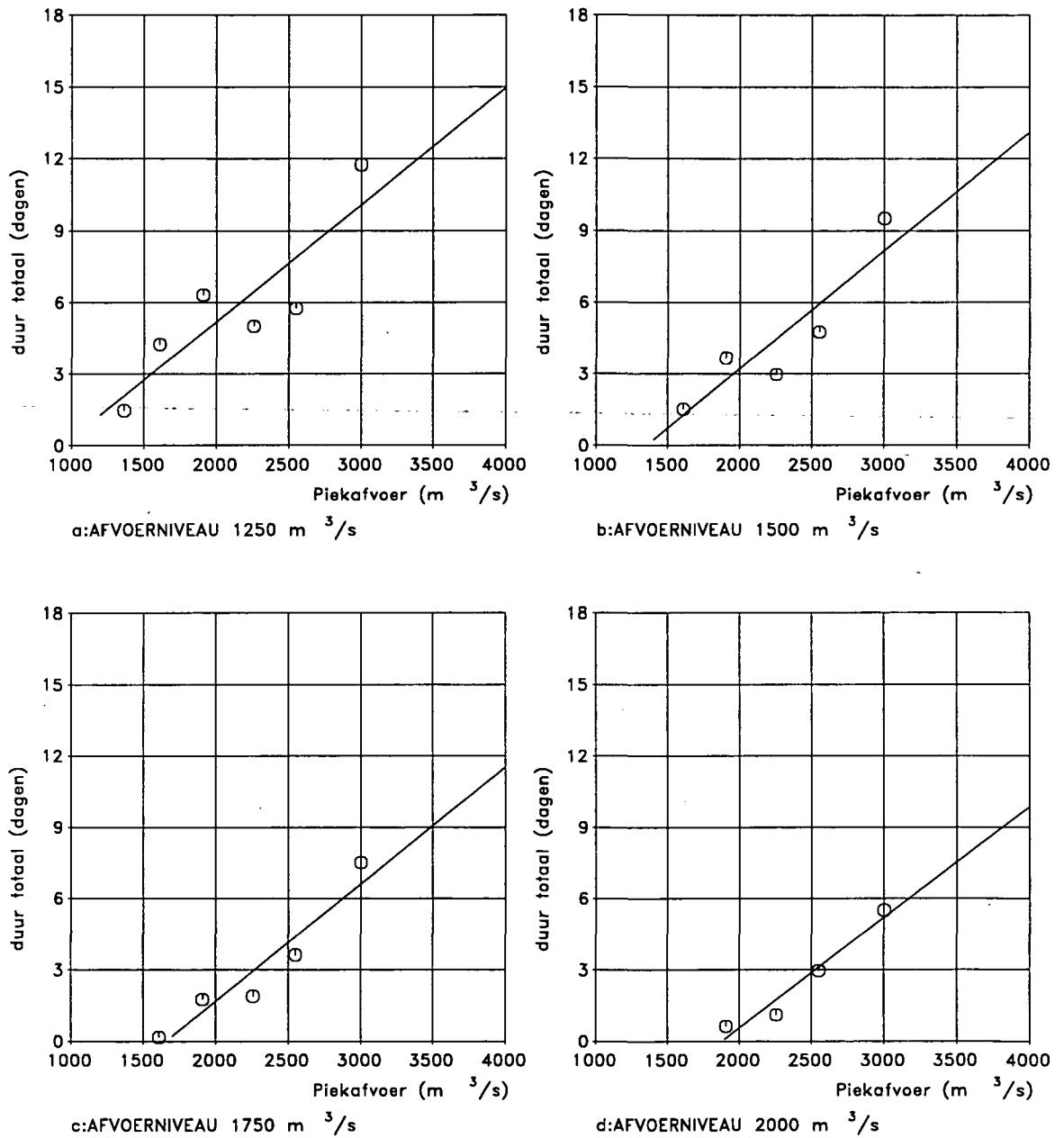


Figuur 8.3 Golfvolume van hoogwaters als functie van de piekafvoer



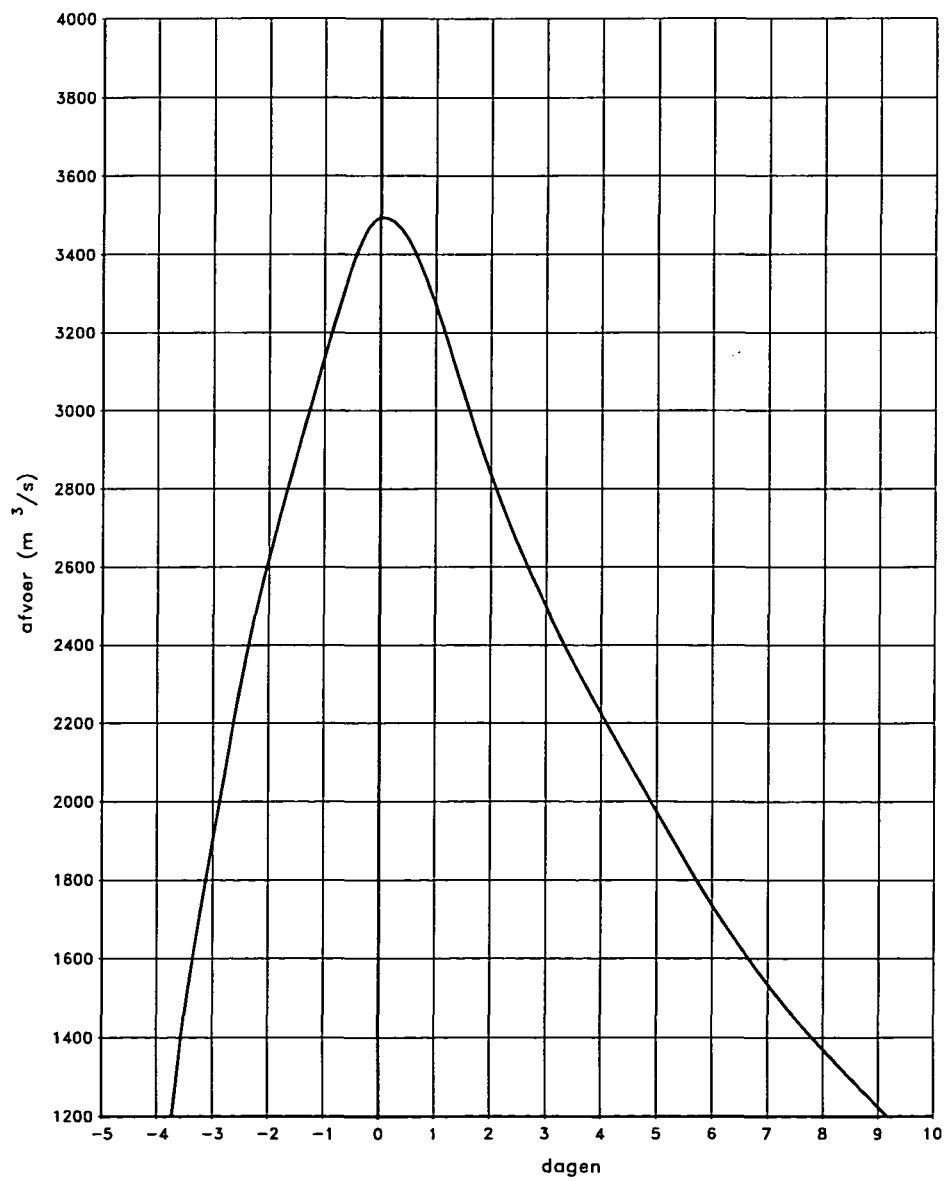
Regressielijn: $duur = A + B \cdot \text{piekafvoer}$
 coëfficiënten zie tabel 8.1

Figuur 8.4 Duur van de was van hoogwaters als functie van gemiddelde piekafvoer (klassen van 300 m³/s)

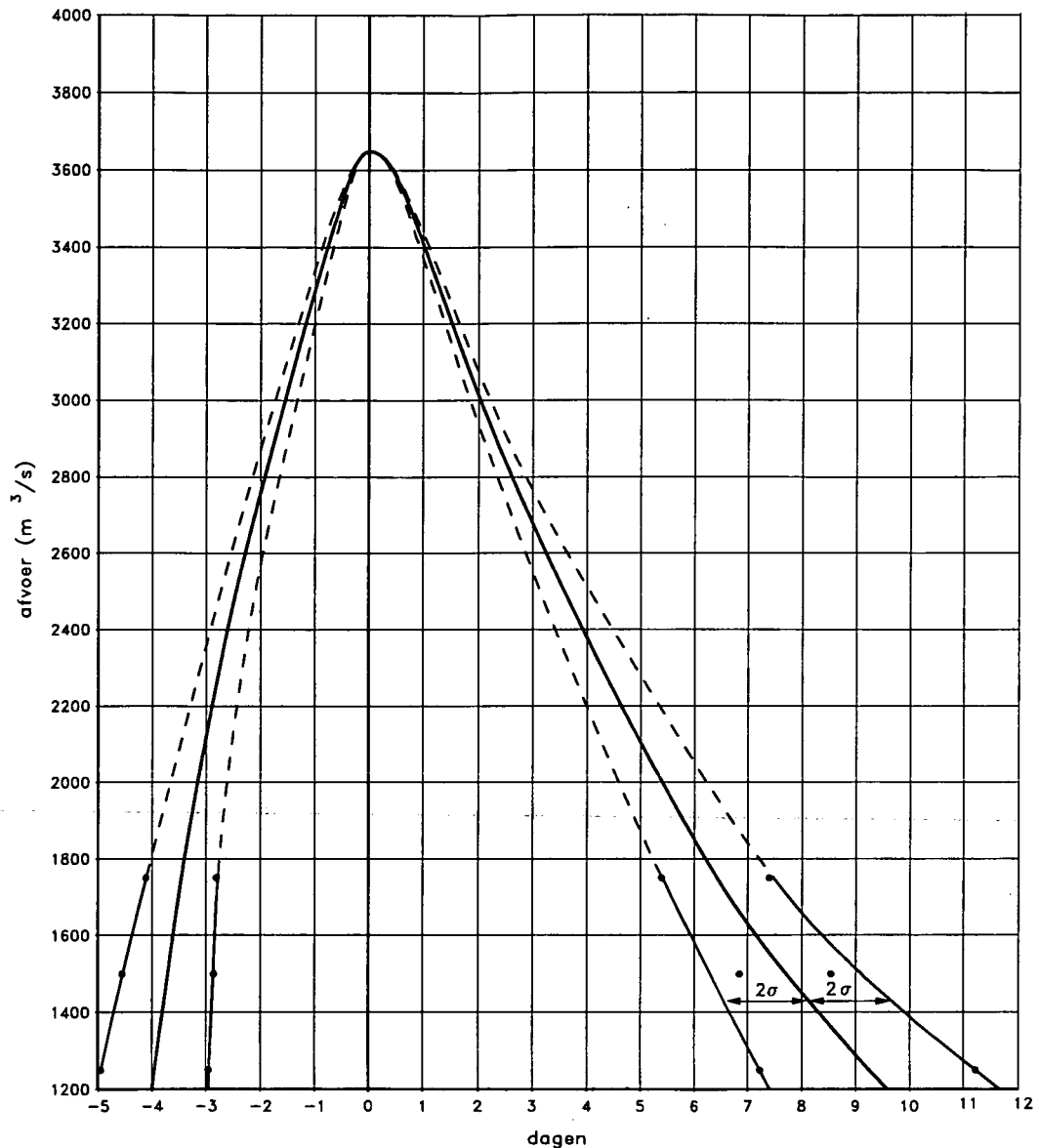


Regressielijn: $duur = A + B \cdot piekafvoer$
 coefficienten zie tabel 8.1

Figuur 8.5 Totale duur van hoogwaters als functie van gemiddelde piekafvoer (klassen van 300 m³/s)



Figuur 8.6 Hoogwatergolf 3.500 m³/s)



Figuur 8.7 Hoogwatergolf 3.6500 m³/s)

In Figuur 8.7 hebben wij een schatting gegeven voor de betrouwbaarheidsband ($+2\sigma$ en -2σ) van het maatgevend hoogwater, waarbij we ervan uitgaan dat de duren normaal zijn verdeeld. Het verloop van de betrouwbaarheidsband aan de basis wordt bepaald door de geschatte ($+2\sigma$)- en (-2σ)-punten, waarbij de waarden tijdens de val voor het afvoerniveau van 1.500 m³/s zijn genegeerd; zij lijken teveel af te wijken.

De top van het hoogwater is op één enkele meting gebaseerd. Het verloop van de betrouwbaarheidsband naar de top van het maatgevend hoogwater moet daarom geschat worden en is onderbroken weergegeven.

In Figuur 8.3 zijn de volumes voor de afvoergolf van 3.500 m³/s en 3.650 m³/s voor de verschillende afvoerniveaus ingetekend. De waarden sluiten goed aan bij de overige punten van de gemeten hoogwaters. In Figuur 8.3 zijn tevens de volumina weergegeven van de vergelijkbare golven, afgeleid uit Van Dixhoorn (1978). Het verschil in golfvolume is niet groot.

9 Bepaling golfdemping

9.1 Golfdemping algemeen

De afvoer in een rivier is zelden constant. Het steeds veranderende neerslagpatroon is daarvan de oorzaak. De afvoer van neerslag vindt in de rivier in golven plaats (afvoergolven). De maximale afvoer van de golven is onder meer afhankelijk, van de neerslag en grootte van het stroomgebied. De afvoer heeft hierdoor een stochastisch karakter, waarop een statistische analyse kan worden toegepast voor het schatten van de afvoer met bijvoorbeeld een herhalingsperiode van 1.250 jaar, zie hoofdstuk 6. Voor de Maas is op deze wijze de Maatgevende afvoer geschat voor Borgharen .

De afvoer in de Maas benedenstrooms van Borgharen (en dus ook de bijbehorende waterstand) hangt af van:

- de maatgevende afvoer te Borgharen,
- de zijdelingse instroming door regenval in het stroomgebied van de Maas benedenstrooms van Borgharen,
- toevoer van water door zijrivieren, zoals de Roer en de Niers, en
- vervorming en demping van de hoogwatergolf bij het voortplanten door de rivier.

Op grond van het fysisch gedrag maken wij onderscheid in vervorming en demping van de golf.

Vervorming

Bij het voortplanten door de rivier treedt bij golfverschijnselen vervorming op, die afhankelijk is van de geometrie van de rivier. De vervorming ontstaat doordat hydraulische parameters, zoals ruwheid, en bergende breedte, een functie zijn van de waterdiepte. Tijdens het passeren van de golf leidt dit tot variërende voortplantingssnelheden, waarbij de snelheid groter is naarmate de waterdiepte groter is. De top van de golf heeft de neiging om het front van de golf in te halen totdat allerlei niet lineaire effecten dit verstoren.

Het effect van de vervorming wordt verder beïnvloed door het feit dat de eerder genoemde hydraulische grootheden ook nog eens in de lengte-richting variëren. Bij het vollopen van de uiterwaarden (als de bergende breedte groter is dan de stroomvoerende breedte wordt tijdelijk water geborgen. Tijdens de val van het hoogwater stroomt het tijdelijk geborgen water weer voor het merendeel terug naar de rivier. Hierdoor neemt in benedenstroomse richting de grootte van de piekafvoer af en de duur van de golf toe.

Demping

Uit het voorgaande kan worden afgeleid dat er geen verandering van vorm (en dus ook geen verandering van de piekafvoer) optreedt als het dwarsprofiel constant is in lengte richting en de hydraulische parameters geen functie zijn van de waterdiepte. Theoretisch kan worden aangetoond dat de maximale afvoer dan toch afneemt (demping). De grootte van de demping is afhankelijk van golfvorm (spitsheid van de top), het bodemverhang en de afvoer. Omdat dit verschijnsel in stroomafwaartse richting altijd tot kleinere piekafvoeren leidt noemen we dit demping.

Het effect van zowel vervorming als demping noemen we hier de golfdemping. De berekening van de golfdemping is niet eenvoudig. We kunnen hiervoor het beste rekenmodellen gebruiken waarmee de waterbeweging in één of twee dimensies wordt opgelost. De keuze voor een 1D- of 2D-model wordt op pragmatische gronden gemaakt.

Een tijdsafhankelijke berekening met de Maatgevende Afvoer voor de Maas met een 2D-model is technisch mogelijk. Het aantal rekenpunten bij 2D-modellen is in vergelijking tot 1D-modellen voor het zelfde gebied veel groter. Voorts moet met kleinere tijdstappen worden gerekend. Hierdoor is het bepalen van de golfdemping met behulp van een 2D-model omslachtig en geven wij de voorkeur aan het gebruik van een 1D-model. Voor de voorspelling van waterstanden zijn 1D-modellen echter minder nauwkeurig dan 2D-modellen, zie paragraaf 9.3. Voor het vaststellen van de MHW-standen past RWS daarom een combinatie van 1D- en 2D-modellen toe.

In paragraaf 9.2 geven wij een beschrijving van het beschikbare 1D-model voor de Maas. In paragraaf 9.3 geven we aan de hand van een recent uitgevoerde calibratie een schatting van de nauwkeurigheid van het 1D-model. In paragraaf 9.4 geven wij een overzicht van de wijze waarop tot op heden de golfdemping door RWS is bepaald. Uit hoofdstuk 6 blijkt dat de maatgevende afvoer gelijk blijft ($Q = 3.650 \text{ m}^3/\text{s}$), maar dat de vorm van het hoogwater verandert, zie hoofdstuk 8. Door de gewijzigde golfvorm kan de golfdemping veranderen. In paragraaf 9.4 zullen wij tevens aangeven op welke wijze bij de bepaling van de nieuwe MHW-standen rekening kunnen houden met een eventuele verandering in de golfdemping als gevolg van de wijziging in de golfvorm.

9.2 Eén-dimensionale modellering

Voor de bepaling van de golfdemping op de Nederlandse Maas gebruikt RWS, Directie Limburg een één-dimensionale waterbewegingsmodel op basis van het programmapakket ZWENDL. De schematisatie voor de Maas van Monsin (België) tot aan Anna Jacominaplaat is recentelijk op verzoek van RWS door Barneveld en Exel (WL 1991) ontleend aan een aantal ZWENDL-schematisaties. WL is daarbij uitgegaan van de volgende schematisaties:

- Lukovac-Barbalic (1989),
- Bos et al (1989),
- Van der Veen (1989) en
- de schematisatie van RWS/RIZA Dordrecht.

Bij de afregeling van het model is gesteld dat de verschillen tussen de gemeten en berekende waterstanden voor de meetstations niet groter mochten zijn dan 0,1 à 0,2 m, terwijl bovendien de looptijden van de hoogwatergolven niet meer dan 20% mochten afwijken van de in de rivier gemeten looptijden.

Voor de ijkingsberekeningen is gebruik gemaakt van de eerste vier hoogwatergolven uit Tabel 9.1. In deze tabel zijn meetgegevens omtrent topwaterstanden en topafvoeren te Borgharen opgenomen.

Jaar	Datum	Topafvoer m ³ /s	Topwaterstand m ⁺ NAP
1984	8 februari	2.502	45,40
1986	1 april	1.773	44,62
1988	17 maart	1.943	44,94
1990	16 februari	1.451	44,06
1991	5 januari	1.843	44,84
1991	23 december	1.660	44,53
1993	13 januari	2.388	45,36

Tabel 9.1 Overzicht gebruikte hoogwaters en de topstand/afvoer te Borgharen

De berekende hoogwatergolven zijn vervolgens op diverse meetlokaties langs de Maas vergeleken met de aldaar geregistreeerde hoogwatergolven. De verschillen tussen gemeten en berekende topwaterstanden zijn opgenomen in Tabel 9.2. Het verschil tussen metingen en berekening voor de meeste meetstations is kleiner dan 0,10 m. De grotere verschillen (> 0,10 m) bij Stevensweert en Lith bovenstreams van de stuw (Lith-boven) worden waarschijnlijk veroorzaakt door onbetrouwbare meetgegevens.

Station	Verschillen in cm			
	1984	1986	1988	1990
Piekafvoer (m ³ /s)	2.502	1.773	1.943	1.451
Borgharen	4	-2	-7	-1
Elsloo	4	-8	-9	19
Grevenbicht	4	-2	-6	8
Stevensweert	15	10	-10	-12
Heel boven	-2	-11	-7	6
Linne beneden	15	1	7	
Roermond boven		0	-3	
Roermond beneden	6		-4	
Heel beneden	3	-5		-9
Neer	8		-7	
Belfeld beneden	9		-9	
Belfeld Tegelen				-1
Venlo haven	9	9	-7	
Well haven	3	8	2	4
Sambeek boven	7	-6	-9	12
Grave beneden			-6	
Megen	2		-5	*
Lith boven	-21	*	19	
Lith dorp	5	*	5	

*: vervalt in verband met stuwinvloeden

Tabel 9.2 Verschil tussen gemeten en berekend topwaterstand

Het in 1991 geijkte model levert goede resultaten op voor de looptijden van de vier hoogwaterperioden (1984, 1986, 1988 en 1990).

9.3 Heralibratie ZWENDL (voorlopig)

Het meest recente hoogwater van januari 1993 had een piekafvoer van $2.388 \text{ m}^3/\text{s}$, was kort van duur; en had een tamelijk spitse vorm, zie Figuur 5.4. Voorspellingen van de waterstanden voor dit hoogwater gaven in het benedenstroomse gebied een overschatting te zien ten opzichte van de opgetreden waterstanden. De overschatting van de waterstanden door het 1D-model is toe te schrijven aan het niet juist weergeven van een vertraagde instroming van berging. De verschillen tussen de voorspelde waterstanden en de werkelijk opgetreden waterstanden waren aanleiding om de calibratie voor het ZWENDL-model van de Maas te herzien. De hercalibratie van het ZWENDL-model was ten tijde van de voorliggende studie nog niet afgerond. Om toch enig inzicht te hebben op de orde van de nauwkeurigheid van de voorspelde waterstanden heeft RWS-RIZA inzage gegeven in het conceptverslag met betrekking tot de lopende hercalibratie; zie Van Essen en Van der Veen (1993). De hier verstrekte gegevens met betrekking tot deze hercalibratie dragen derhalve een (zeer) voorlopig karakter.

De hercalibratie van het ZWENDL-model is in een aantal stappen uitgevoerd. Eerst zijn de ruwheden van het model zodanig afgeregeld dat de met het ZWENDL-model berekende waterstanden langs de Maas voor de Maatgevende Afvoer niet meer dan orde 0,1 m afwijken van de met het 2D-model (WAQUA) bepaalde waterstanden. Bedacht moet worden dat de met WAQUA berekende waterstanden voor de Maatgevende Afvoer een zo goed mogelijke schatting zijn van de waterstanden onder extreme condities. Voor de Maatgevende Afvoer bestaan immers geen gemeten waterstanden. De gevolgde procedure zorgt ervoor dat het 1D-model, binnen zekere nauwkeurigheid, dezelfde waterstanden voorspelt bij de Maatgevende Afvoer.

Voor de maatgevende afvoer geven wij hier de resultaten van twee ZWENDL-berekeningen (T0 en T1). De eerste berekening geeft de resultaten voor de oorspronkelijke schematisatie (T0). De tweede berekening met ZWENDL (T1) geeft de resultaten na aanpassing van het ZWENDL-model weer. De berekende resultaten van T0 en T1 zijn vergeleken met de resultaten uit de WAQUA berekeningen, zie Tabel 9.3. Het aangepaste ZWENDL-model geeft de MHW-standen beter weer.

Vervolgens zijn voor een zevental hoogwaters, waaronder het hoogwater van januari 1993, zie Tabel 9.1, berekeningen uitgevoerd. De verschillen in gemeten en berekende waterstanden voor het hoogwater 1993 waren dermate groot dat wijzigingen in de schematisatie moesten worden aangebracht. De wijzigingen behelzen:

- aanpassen van de hydraulische parameters beneden het niveau van het ter plaatse geldende streefpeil,
- calibratie op hydraulische ruwheden aan de hand van berekeningen voor verschillende hoogwatergolven,
- aanpassing van het geschematiseerde stuwbeheer, waardoor het verschil tussen het stuwbeheer in het model en het werkelijke stuwbeheer zijn weggewerkt, en
- wijziging van de wijze waarop het winterbed instroomt tijdens het hoogwater van 1993, (vertraagde instromingen berging).

De (voorlopige) resultaten van deze berekeningen zijn samengevat in Tabel 9.4. De resultaten van Tabel 9.4 kunnen we vergelijken met de resultaten van de oorspronkelijke situatie, weergegeven in Tabel 9.2.

Uit Tabel 9.4 kan worden afgeleid dat de voorspelde waterstanden voor de hoogwaters na 1988, inclusief die van 1993, beter aansluiten bij het aangepaste model dan de voorspelde waterstanden voor de hoogwaters vóór 1988. (Het hoogwater van 1990 wordt buiten beschouwing gelaten, omdat de grootte van de afvoer betrekkelijk laag is, namelijk $1.451 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij deze afvoer is de Maas net buiten zijn oevers getreden.)

In het kader van het Monitoring Systeem Waterhoogten (MSW) is door RWS in 1988 een groot aantal peilschalen vervangen door automatische peilschrijvers. De frequentie waarmee de waterstanden worden gemeten is daarbij opgevoerd van eens per 2 à 4 uur naar eens per uur. (De meetfrequentie is niet voor alle stations gelijk.) Voor het hoogwater 1993 is de waterstand op de belangrijkste stations elke tien minuten gemeten.

Op grond van de toegenomen meetfrequentie wordt het moment van de maximale waterstand sindsdien beter vastgelegd, hetgeen reden is om meer waarde te hechten aan de modelresultaten voor de hoogwaters na 1988.

Uit Tabel 9.4 leiden wij af dat de nauwkeurigheid van de voorspelde waterstanden voor de belangrijkste stations (MSW-stations) in orde van grootte 0,1 m bedraagt. Voor een beperkt aantal lokaties is het verschil tussen gemeten en berekende waterstanden groter, namelijk orde 0,2 m.

Voor lokaties tussen de peilstations moet met een grotere onnauwkeurigheid rekening worden gehouden. Wij achten lokaal verschillen tussen berekend en gemeten verhang van orde 5% mogelijk. Bij een verhang van 0,4 m/km kan de waterstand hierdoor na 5 km 0,1 m extra afwijken.

Op grond van het bovenstaande verwachten wij daarom dat met een 1D-model waterstanden kunnen worden voorspeld met in het algemeen een nauwkeurigheid van orde 0,1 m à 0,3 m. Een nauwkeuriger voorspelling van de MHW-standen kan in het algemeen worden verkregen met behulp van 2D-modellering (WAQUA), waarbij de schematisatie meer op fysieke kenmerken is gebaseerd dan bij de 1D-modellering mogelijk is, zie RWS 1986 a t/m c en RWS 1989 a en b.

Knoop nr.	MHW WAQUA (m ³ /s)	T0 ZWENDL (m ³ /s)	T1 ZWENDL (m ³ /s)	MHW- T0 (m ³ /s)	MHW- T1 (m ³ /s)
20	4.630	4.619	4.620	11	10
29	4.105	4.105	4.104	0	1
37	3.301	3.340	3.301	-39	0
44	2.540	2.535	2.535	5	5
48	2.335	2.335	2.335	0	0
57	2.160	2.124	2.159	36	1
65	1.982	1.968	1.979	14	3
74	1.608	1.605	1.603	3	5
78	1.480	1.472	1.483	8	-3
79	1.460	1.443	1.461	17	-1
379	1.456	1.437	1.457	19	-1
407	1.453	1.433	1.452	20	1
81	1.452	1.430	1.450	22	2
82	1.448	1.429	1.447	19	1
83	1.435	1.417	1.433	18	2
84	1.401	1.396	1.399	5	2
85	1.378	1.382	1.376	-4	2
86	1.363	1.372	1.364	-9	-1
87	1.350	1.343	1.346	7	4
88	1.319	1.304	1.319	15	0
89	1.290	1.281	1.291	9	-1
90	1.209	1.203	1.213	6	-4
91	1.166	1.143	1.170	23	-4
408	1.156	1.131	1.162	25	-6
93	1.154	1.127	1.153	27	1
94	1.150	1.123	1.148	27	2
95	1.109	1.086	1.107	23	2
96	1.068	1.057	1.067	11	1
97	1.015	1.002	1.013	13	2
98	973	949	970	24	3
99	947	922	944	25	3
100	922	899	918	23	4
101	864	843	864	21	0
102	830	809	830	21	0
103	813	795	814	18	-1
409	805	784	799	21	6
311	798	783	798	15	0
312	776	765	779	11	-3
313	735	702	730	33	5
314	694	678	693	16	1
315	640	633	641	7	-1
316	580	577	581	3	-1
319	500	509	505	-9	-5
320	449	451	449	-2	0

Tabel 9.3 Heralibratie ZWENDL m.b.v. Maatgevend Hoogwater (voorlopig!)

Station	Verschillen in cm						
	1984	1986	1988	1990	1991J	1991D	1993
Piekafvoer (m ³ /s)	2.502	1.773	1.943	1.451	1.843	1.660	2.388
Borgharen	-3	-10	3	-12 *	1 *	-2 *	1 *
Elsloo	12	14	15	-7	-4 *	8 *	-9 *
Grevenbicht	27	16	31	-2	10 *	4 *	-1 *
Stevensweert	-26	-35	-3	-8	-9 *	-6 *	-3 *
Heel boven	10	13	13	-6	6 *	-3 *	-2 *
Linne beneden	-37	-19	-28	4	-3		
Roermond boven		1	3	16	3		-6
Roermond beneden	-5		-12	-38	-46		-24
Heel beneden	-14	-14	-4	-3	-3	6	-7
Belfeld boven	-23	-36	-15	-33	-18	-18	
Belfeld beneden	-14	-33	-6	-13	-14 *	-8 *	-9 *
Venlo	-9	-26	-3				-2
Well	-10	-18	-3	-12	-4 *	-8 *	-7 *
Sambeek boven	-3	-5	1	-23	-4	-8	-2
Sambeek beneden	-2	-14	-6	-16	-13 *	-1 *	-7 *
Grave boven	-7	5	-7	5	-12	18	
Grave beneden			6	14	-3 *	21 *	-5 *
Megen	-3	23	15	-4	-2 *	16 *	-3 *
Lith boven	-8	21	11	-5	2 *	3 *	-11 *
Lith dorp	-10	20	10	-4	2 *	-3 *	-13 *

* MSW- station, meetfrequentie: eens per 10 minuten

Tabel 9.4 Verschil tussen gemeten en berekende topwaterstand na hercalibratie

9.4 Golfdemping

Om de golfdemping voor de Maas te bepalen moet in principe de waterbeweging in de hele rivier worden bepaald voor de maatgevend geachte golfvorm, zie hoofdstuk 8. Het is momenteel nog niet praktisch om hiervoor 2D-modellen te gebruiken met de maatgevende golf vorm als randvoorwaarde. Het aantal rekenpunten en de voor de simulatie benodigde rekestijd laten dit nog niet toe. Voor de Maas is in het verleden de golfdemping als volgt bepaald, zie (Mulken 1983):

- a Met een 1D-model (destijds op basis van IMPLIC, de voorloper van ZWENDL) is voor verschillende afvoergolven de grootte van de afvoer berekend in de Maas zonder rekening te houden met de zijdelingse toestroming. De zijdelingse toestroming, samen met de afvoeren van de Roer en de Niers worden later verrekend, via de stappen beschreven onder de punten b...e.
- b Bij de overschrijdingsfrequentie van de afvoergolf te Borgharen is de grootte van de topafvoer van de Roer en de Niers geschat.
- c De grootte van de zijdelingse toestroming tussen Borgharen en Roermond is gerelateerd aan de grootte van de piekafvoer van de Roer en de verhouding van de stroomgebieden van de Maas tussen Borgharen en Roermond en dat van de Roer. De toestroming is gelijkmatig verdeeld tussen Borgharen en Roermond.

- d Op dezelfde wijze is de grootte van de zijdelingse toestroming tussen Roermond en Lith gerelateerd aan de grootte van de piekafvoer van de Niers en de verhouding van de stroomgebieden van de Maas tussen Roermond en Lith en dat van de Niers. Ook voor de verdeling van de zijdelingse invoer tussen Roermond en Gennep (de samenvloeiing van Maas en Niers) en tussen Gennep en Lith is een gelijkmatige verdeling aangenomen.
- e De onder a berekende afvoeren zijn verhoogd met de onder b...d bepaalde zijdelingse toestromingen en de afvoeren van de Roer en de Niers. Voor elke lokatie langs de rivier is nu een afvoer met bijbehorende frequentie van voorkomen bekend.
- f Op grond van de onder e berekende afvoeren wordt nu voor het WAQUA-model de grootte van de afvoer bepaald, die als randvoorwaarde moet dienen voor de berekening van het 2D-model. Uit praktische overwegingen is de Maas voor het 2D-model in een aantal stukken verdeeld. De grootte van de afvoer in de verschillende WAQUA-modellen is niet voor alle modellen gelijk omdat de golfdemping niet constant is in lengterichting. De waterstanden die op deze wijze zijn berekend worden aangemerkt als MHW-standen, inclusief golfdemping.

De hier toegepaste methode leidt tot een veilige definitie van de MHW-standen. Op grond van de navolgende overwegingen is de grootte van de golfdemping licht onderschat:

- Het dynamisch gedrag van waterstanden en afvoeren tijdens een afvoergolf leidt tot hysteresis in de QH-kromme. Het moment waarop de afvoer maximaal is en het moment waarop de waterstand maximaal is valt doorgaans niet samen. De maximale waterstand treedt lokaal op bij een afvoer die iets kleiner is dan de maximale afvoer. Het gebruik van de maximale afvoer als randvoorwaarde voor WAQUA leidt daardoor tot een geringe overschatting van de maximale waterstanden.
- Met het optreden van demping van de afvoergolven van de Roer en de Niers wordt benedenstrooms van Roermond, c.q. Gennep geen rekening gehouden.
- In de beschouwingen wordt ervan uitgegaan dat de maximale afvoer van de Roer, de Niers en de Maas samenvallen.

De gevolgde procedure heeft als voordeel dat voor elk riviertraject resultaten beschikbaar zijn voor MHW-condities. Voor het beoordelen van voorstellen voor het uitvoeren van werken in de rivier en eventueel daarmee samenhangende maatregelen ter compensatie is steeds een standaard aanwezig.

Om aan het bezwaar van het eerstgenoemde punt tegemoet te komen kan de navolgende procedure worden gevolgd:

- a Bepaal de Maatgevende Afvoer ($Q = 3.650 \text{ m}^3/\text{s}$). Bereken met het 2D-model (WAQUA) de MHW-standen langs de Maas uitgaande van constante randvoorwaarden (permanentie). We houden hierbij nog geen rekening met de vorm van de golf.
- b Calibreer het 1D-model aan de hand van opgetreden hoogwaters. Voor de opgetreden hoogwaters moeten zowel de waterstanden als de golfdemping goed worden weergegeven. Hiermee leggen we de hydraulische ruwheid van het 1D-model vast. De hier bedoelde calibratie is inmiddels uitgevoerd.

- c Ga na wat de hydraulische ruwheid moet zijn van het 1D-model voor de Maatgevende Afvoer opdat binnen zekere grenzen dezelfde waterstanden worden verkregen als het 2D-model, beschreven onder a. Indien de waterstanden tijdens opgetreden hoogwaters (tijdsafhankelijke gebeurtenissen, zie b) én voor de permanente Maatgevende Afvoer goed worden weergegeven, mogen we ook een goede weergave van de golfdemping verwachten bij de tijdsafhankelijk Maatgevende Afvoer.
- d Bereken het verschil in maximale waterstanden met het 1D-model op basis van de Maatgevende Afvoer onder permanente omstandigheden en met in acht name van de vorm van de golf.
- e De MHW-standen zijn nu te bepalen door de met het WAQUA-model onder permanente omstandigheden berekende waarden te verminderen met het onder d berekende verschil.

Op grond van de hier uitgevoerde studie, zie paragraaf 6.6, wijzigt de grootte van de Maatgevende Afvoer te Borgharen niet. De vorm van de golf is daarentegen wel veranderd, waardoor in principe de golfdemping verandert. Alleen als de verandering van golfvorm tot aanmerkelijke verschillen (meer dan 0,05 m) in waterstanden leidt is een aanpassing van de bestaande MHW-standen nodig.

Met behulp van het beschikbare 1D-model (ZWENDL) is het mogelijk om snel inzicht te krijgen in:

- i het verschil in reductie van de MHW-standen als gevolg van golfdemping bij de door RWS toegepaste procedure, via een reductie in afvoer, en de hier voorgestelde procedure, via een directe correctie op de waterstanden.
- ii de invloed van het verschil in vorm van de Maatgevende Afvoer op de aan te brengen correctie voor golfdemping.

De navolgende berekeningen zijn hiervoor nodig:

- 1 Bereken met het 1D-model de waterstanden en afvoeren voor de Maatgevende Afvoer te Borgharen bij permanente stromingscondities, inclusief de zijdelingse toestroming.
- 2 Bereken met het 1D-model de waterstanden en de afvoeren voor de Maatgevende Afvoer met de oude vorm (Van Dixhoorn-golf, tijdsafhankelijk), inclusief zijdelingse toestroming.
- 3 Bereken met het 1D-model de waterstanden en de afvoeren voor de Maatgevende Afvoer met de hier voorgestelde vorm (tijdsafhankelijk), inclusief de zijdelingse afvoer.

ad i

Het verschil in afvoeren van de berekeningen 1 en 2 geeft de grootte van de golfdemping voor de oude golfvorm. De lokaal berekende afvoer kan worden vergeleken met de bij WAQUA opgelegde randvoorwaarde. Naar verwachting zijn de verschillen klein. De golfdemping in m^3/s kan via de QH-relatie worden omgerekend naar een reductie van de waterstanden. Dit verschil in waterstanden kan nu worden vergeleken met het verschil in waterstanden van de berekeningen 1 en 2. Op grond van deze vergelijking ontstaat inzicht in het verschil in procedure voor de bepaling van de invloed van de golfdemping op de MHW-standen.

ad ii

Vergelijking van de berekende afvoeren en waterstanden van berekening 2 met die van berekening 3 geeft informatie over de invloed van de golfvorm. Als er in de berekende waterstanden aanmerkelijke verschillen worden gevonden is aanpassing van de MHW-standen nodig. De aanpassing bestaat uit het corrigeren van de huidige MHW-standen met het verschil in waterstanden uit de onder 2 en 3 bedoelde berekeningen.

Zoals hierboven beschreven, is wellicht een correctie op de bestaande MHW-standen nodig op basis van een gewijzigde berekeningsprocedure, zie i, en op basis van een andere vorm van de maatgevende afvoergolf, zie ii. Als het gezamenlijke effect meer bedraagt dan de toegepaste afronding voor de MHW-standen (0,05 m) is aanpassing van de bestaande MHW-waarden nodig. Hierbij moet de correctie worden aangebracht op de met WAQUA berekende waterstanden. De gebruikelijke afronding op 0,05 m moet na het aanbrengen van de correctie worden toegepast.

Literatuur

- Barneveld H.J. en P.M.F. Exel, 1991: Een-dimensionaal waterbewegingsmodel (ZWENDL) voor de Maas. Waterloopkundig Laboratorium, verslag Q1303.
- Bastings, A., 1987: Betrekkingslijnen voor de Maas, Toestand 1981.0 Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afd. ANW.
- Berger, H.E.J., 1992: Flow forecasting for the river Meuse Proefschrift, Technische Universiteit Delft.
- Bos, O.J., G.H. Slaghuis en J. Wiers 1989: Hoogwatervoorspelling voor de Maas, deel 1 Voorstudie, deel 2 Hoofdstudie en deel 3 Bijlagen, Rijkswaterstaat, DBW/RIZA, Lelystad; werkdocument nr. 89.134X en 89.135X, Chr. Hogeschool Windesheim, sector Techniek, Zwolle A.P. nr: C.90.1.09.
- Dixhoorn, K. van, 1978: Hoogwatermodel Maas; Onderzoek afvoerloop tijdens hoge afvoergolven te Borgharen. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Notitie 78.J.
- Essen J.A.F. van en R. van der Veen, 1993: CONCEPT: Heralibratie ZWENDL voor de Maas, Afvoeren Eijsden groter dan 1.200 m³/s. Rijkswaterstaat RIZA, werkdocument 93.037X.
- Leeuwen van, J., 1981: Overzicht afvoerbepaling te Borgharen c.q. Maastricht (1851-1980) Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Afd. Maas.
- Lely, C.W., 1926: De verbetering van de Maas voor groote afvoeren 's-Gravenhage, Algemene Landsdrukkerij.
- Lukovac-Barbalic S. 1989: Data assessment and modelling approach for the river Meuse between Ampsin-Neuville and Borgharen, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft.
- Made, J.W. van der, 1965: Hoogwatergolven op de Maas Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Hdyrometrische afdeling, 's-Gravenhage.
- Made, J.W. van der, 1966: Hoogwatervoorspelling van de Maas te Borgharen Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging Afdeling Hydrometric, 's-Gravenhage
- Made, J.W. van der, 1966a: Topvervlakking van hoogwatergolven op een rivier, Deel A, Theoretische beschouwingen. Rijkswaterstaat, directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Hydrometrische Afdeling.
- Made, J.W. van der, 1966b: Topvervlakking van hoogwatergolven op een rivier, Deel B, Toepassing op de Maas. Rijkswaterstaat, directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Hydrometrische Afdeling.
- Made, J.W. van der, 1967: Looptijden hoogwatergolven op de Maas. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Afdeling Hydrometrie, rapport nr. 161.
- Made, J.W. van der, 1973: Bepaling van de afname der topafvoer van hoogwatergolf over een lang riviertraject. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Dienst voor de Waterhuishouding, Operationele Afdeling, nota WH-73-7.
- Made, J.W. van der, 1973: Kwantitatieve analyse van rivierafvoeren. Rijkswaterstaat, Hoofddirectie van de Waterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, 39.
- Mulken, F.A. van en Goppel, J.M., 1980, Hoogwater op de Maas in juli 1980 Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Afd. Maas.
- Mulken, F. van, 1983: Afvoeroverschrijdingsfrequenties van de Maas benedenstrooms van Borgharen. Correcties n.a.v. de geijkte IMPLIC-schematisatie. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Afdeling Maas, nota 83.1, Project 18.503.00.
- Veen, R. van der, 1989: Operationalisering van ZWENDL voor de Maas, Rijkswaterstaat, DBW/RIZA; Nota 89.001.
- Rijkswaterstaat, 1956: Vergelijking tussen molen- en drijfvermetingen, Nota 60.22 Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afd. Studiedienst.
- Rijkswaterstaat, 1956: Hoogwaterperiode December 1952 RWS, Dir. Limburg, Maastricht.
- Rijkswaterstaat, 1966: Extreem hoge afvoeren. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, Nota 66.9
- Rijkswaterstaat, 1968: Vorm van de maatgevende hoogwatergolf op de Bovenrijn te Lobith. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, Nota 68.3
- Rijkswaterstaat: Hoogwater op de Maas in feb. '70, dec. '79 en feb. '80, juli '80 (3 rapp.) RWS, Dir. Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Afd. Maas, Maastricht.
- Rijkswaterstaat, 1982: Hoogwater rivier de Maas juli 1980 RWS, Dir. Limburg, Maastricht
- Rijkswaterstaat: Hoogwater op de Maas nov. '84, april '86, jan. '87, jan. '91 (4 rapp.) RWS, Dir. Limburg, Maastricht
- Rijkswaterstaat, 1985: De Maas is uit ... (hoogwater 1984) RWS, Dir. Limburg, Maastricht
- Rijkswaterstaat, 1986a: Hoogwaterberekeningen voor de Maas op het traject Linne-Eysden met het tweedimensionale WAQUA-model. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afdeling ANW.
- Rijkswaterstaat, 1986b: Hoogwaterberekeningen voor de Maas op het traject Venlo-Linne met het tweedimensionale WAQUA-model. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afdeling ANW.
- Rijkswaterstaat, 1986c: De maatgevend hoogwaterstanden langs de Maas van Lith tot Boxmeer. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afdeling ANW.

- Rijkswaterstaat, 1988: Eerste schatting van de gevolgen van de normalisering van de Belgische Maas RWS, Dir. Limburg, Maastricht.
- Rijkswaterstaat, 1989a; Hoogwaterberekeningen voor de Maas op het traject Venlo-Gennep met het tweedimensionale WAQUA-model. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afdeling ANW, nota AN38.
- Rijkswaterstaat, 1989b; Samenvatting van de hoogwaterberekeningen voor de Maas met het tweedimensionale WAQUA-model. Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Afdeling ANW.
- Rijkswaterstaat, 1991: De Maas; Verleden, heden en toekomst RWS, RIZA, Hoofdafd. Watersystemen, afd. Rivieren Nota nr. 91.052, Lelystad.
- Van der Spek, T.R., 1985: Hoge Maas-afvoer te Borgharen, in samenhang met atmosferische circulatietypen, Working Paper No. 2 Free University, Institute of Earth Science, Dept. of Hydrogeology and Geographical Hydrology, Amsterdam.
- Vereerstraten, J., 1966: Les aspects géographiques d'une crue mémorable de la Meuse (Hiver 1925-1926) Revue Belge de Géographie, 90^e Année, Bruxelles.
- Vereerstraten, J. (1969): 'Le bassin de la Meuse. Etude de géographie hydrologique'. Dissertation Université Libre de Bruxelles (Tome I - VI);
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993a: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Samenvattingen, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993b: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Eindrapport, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993c: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Veiligheid tegen overstromingen, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993d: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Maatgevende belastingen, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993e: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Constructief ontwerp, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.
- Waterloopkundig Laboratorium & EAC-RAND, 1993f: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking; Functies, waarden en procedures, Waterloopkundig Laboratorium & European American Center for Policy Analysis.

Colofon

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Hoofdkantoor:
Rotterdamseweg 185, Delft
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon: (015) 56 93 53
telefax: (015) 61 96 74

Locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon: (05274) 29 22
telefax: (05274) 35 73

EAC/RAND

European-American Center for Policy Analysis
p/a TU Delft
Stevinweg 1
2628 CN Delft
telefoon: (015) 785411
telefax: (015) 781788

GRONDMECHANICA DELFT

Stieltjesweg 2
postbus 69
2600 AB Delft
telefoon: (015) 693 500
telefax: (015) 610 821

b.v. bureau sme

Canisiussingel 26
postbus 256
6500 AG Nijmegen
telefoon: (080) 22 39 38
telefax: (080) 24 19 71

Hamhuis + van Nieuwenhuijze + Sijmons

Laan van Chartroise 168
postbus 10156
3505 AC Utrecht
telefoon: (030) 445757
telefax: (030) 446677

Informatie over het onderzoek is te verkrijgen bij:

Voorlichting Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Plesmanweg 1-6
2597 JG Den Haag
telefoon: (070) 3517120 / 3517710
telefax: (070) 3516868