

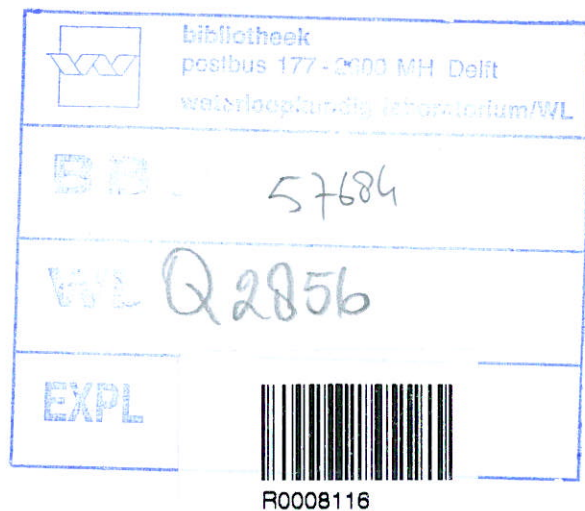
Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat RIZA

Overstromingsberekeningen in het kader van HIS-NL

eindrapport

december 2000

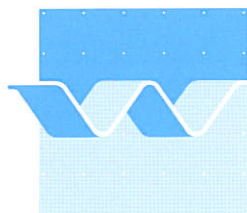


Overstromingsberekeningen in het kader van HIS-NL

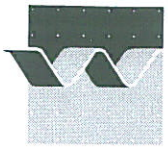
J.I. Crebas, K.V. Heynert

eindrapport

december 2000



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: DG Rijkswaterstaat RIZA

TITEL: Overstromingsberekeningen in het kader van HIS-NL

SAMENVATTING:

In het kader van het onderzoek Ruimte voor Rijntakken is al een aanzet gegeven voor het opnemen van zogenaamde retentiegebieden als structureel onderdeel van het hoogwaterbeschermingssysteem. Hierbij was het uitgangspunt dat deze berging ingezet zou worden om binnen maatgevende omstandigheden - afvoeren bij Lobith tot een herhalingstijd tot 1250 jaar - de vereiste veiligheid tegen overstromen te kunnen garanderen. In het kader van het project HIS-NL - nationaal Hoogwater Informatie Systeem - is het echter gewenst om ook voor boven-maatgevende afvoeren bij Lobith vast te stellen welke bergingscapaciteit in het riviereengebied nodig is om calamiteiten te voorkomen. De polders die ingezet worden bij calamiteiten worden noodoverloopgebieden genoemd.

De bepaling van de benodigde capaciteit aan noodoverloopgebied is uitgevoerd door met behulp van het Rijntakkenmodel uit het IVR-DSS afvoergolven te simuleren met piekafvoeren van 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s en verschillende golfvormen. De geografische invulling van de noodoverloopgebieden is op een schematische wijze gebeurd.

In het onderzoek is in eerste instantie aandacht besteed aan het totaal benodigde oppervlak aan noodoverloopgebied langs de Rijntakken. Vervolgens heeft een nadere geografische invulling van het benodigde oppervlak en hydraulische toetsing plaatsgevonden. Tenslotte is de invloed van de locatie van een noodoverloopgebied op haar effectiviteit onderzocht.

REFERENTIES: offerte ZWS4627/Q2856/lj gedateerd 9 oktober 2000
opdrachtbon 37281 / WSH gedateerd 18 oktober 2000

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
01	J. Crebas & K. Heynert	16 november 2000	1e concept	J. Dijkman	
02	J. Crebas & K. Heynert	24 november 2000	2e concept	J. Dijkman	
03	J. Crebas & K. Heynert	5 december 2000	definitief	J. Dijkman	E. van Beek
PROJECTNUMMER: Q2856					
TREFWOORDEN: noodoverloopgebieden, retentie, HIS-NL					
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF				

Inhoud

	Samenvatting	1
1	Inleiding	1-1
2	Doelstelling	2-1
3	Uitgangspunten	3-1
4	Schatting benodigd oppervlak noodberging.....	4-1
4.1	Afvoercapaciteit referentiesituatie	4-1
4.2	Globaal benodigd bergingsoppervlak	4-3
4.3	Conclusies.....	4-7
5	Geografische invulling van noodberging	5-1
5.1	Compartimentering van dijkringen.....	5-1
5.2	Schematisatie van noodoverloopgebieden.....	5-3
5.3	Resultaten modelsimulaties	5-3
5.3.1	Afvoergolven met piekafvoer 16.000 m ³ /s	5-4
5.3.2	Afvoergolven met piekafvoer 17.000 m ³ /s	5-7
5.3.3	afvoergolven met piekafvoer 18.000 m ³ /s	5-12
5.4	Aanvullende informatie	5-18
5.5	Conclusies.....	5-19
6	Invloed locatie noodoverloop langs een rivier	6-1
	Referenties	Lit.-1

Bijlagen

A000	Overzicht maatregelen in referentie.....	A-1
B000	Alternatieve methode golfvormbepaling.....	B-1

Samenvatting

In het kader van het onderzoek Ruimte voor Rijntakken is al een aanzet gegeven voor het opnemen van zogenaamde retentiegebieden als structureel onderdeel van het hoogwaterbeschermingssysteem. Hierbij was echter het uitgangspunt dat deze berging ingezet zou worden om binnen maatgevende omstandigheden - afvoeren bij Lobith tot een herhalingsjijd tot 1250 jaar - de vereiste veiligheid tegen overstromen te kunnen garanderen. In het kader van het project HIS-NL - nationaal Hoogwater Informatie Systeem - is het echter gewenst om ook voor boven-maatgevende afvoeren bij Lobith vast te stellen welke bergingscapaciteit in het rivierengebied nodig is om calamiteiten te voorkomen. De polders die ingezet worden bij calamiteiten worden noodoverloopgebieden genoemd.

De bepaling van de benodigde capaciteit aan noodoverloopgebied is uitgevoerd door met behulp van het Rijntakkenmodel uit het IVR-DSS afvoergolven te simuleren met piekafvoeren van 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s en verschillende golfvormen. De geografische invulling van de noodoverloopgebieden is op een schematische wijze gebeurd.

In het onderzoek is in eerste instantie aandacht besteed aan het totaal benodigde oppervlak aan noodoverloopgebied langs de Rijntakken. Vervolgens heeft een nadere geografische invulling van het benodigde oppervlak en hydraulische toetsing plaatsgevonden. Tenslotte is de invloed van de locatie van een noodoverloopgebied op haar effectiviteit onderzocht.

Globaal benodigd oppervlak

Uitgaande van een *gemiddelde* afvoergolf met een piekafvoer van 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s zijn langs de Rijntakken in totaal globaal geschat respectievelijk 1.600, 6.100 en 12.600 ha aan noodoverloopgebied nodig om ongecontroleerde overstroming te voorkomen. Uitgaande van de alternatieve bepaling van de berging zijn de benodigde oppervlakken ongeveer 15 % groter.

Nadere geografische invulling

Op van een nadere geografische invulling het totaal benodigde oppervlak aan noodoverloopgebied en modelsimulaties voor verschillende afvoergolven, kunnen verder de volgende conclusies getrokken worden:

- alle onderzochte golfvormen met een piekafvoer van 16.000 m³/s kunnen worden opgevangen door inzet van het Rijnstrangengebied. Het benodigde ruimtebeslag is derhalve 3.154 ha. De inundatiediepte is afhankelijk van de vorm van de afvoergolf en varieert tussen 1,8 en 3,1 m.
- voor golven met een piekafvoer van 17.000 m³/s moeten naast het Rijnstrangengebied ook de dijkkring Ooij en Millingen en - voor brede golven - het compartiment Betuwe Oost. Het ruimtebeslag is derhalve 7.529 tot 14.029 ha met een inundatiediepte wederom afhankelijk van de vorm van de golf variërend tussen gemiddeld 2,4 en 3,7 m.

- bij een piekhoogte van 18.000 m³/s en een brede golfvorm is aanvullend nog de inzet van de IJssel Weiden nodig. Betuwe Oost wordt in alle gevallen ingezet. Het ruimtebeslag is derhalve 14.029 tot 18.404 ha met een gemiddelde inundatiediepte tussen 3,1 en 4,0 m

Langs de riviertrajecten bovenstrooms van de noodoverloopgebieden moeten voor de afvoergolven met piekafvoeren van 17.000 en 18.000 m³/s additionele maatregelen genomen worden om te voorkomen dat de maatgevende afvoer overschreden wordt. Om ook brede golven (75 % kwantiel) zonder calamiteiten met de noodoverloopgebieden af te toppen, moet de afvoercapaciteit van de Bovenrijn verhoogd worden naar 16.250 m³/s. Bij brede golven met piekafvoeren van 18.000 m³/s bij Lobith zal de afvoercapaciteit van de Bovenrijn 18.000 m³/s moeten zijn.

Bovengenoemde oppervlakken zijn relatief groot omdat aangenomen is dat een noodoverloopgebied bij inzet in zijn geheel zal onderstromen. Afhankelijk van de optredende afvoergolf zal de inundatiediepte echter variëren. Om het ruimtebeslag te beperken is verdere optimalisatie van de inrichting van de noodoverloopgebieden nodig. Verdere compartimentering kan de gemiddelde inundatiediepte vergroten en het ruimtebeslag verkleinen.

De debieten waarmee de noodoverloopgebieden volstromen kunnen tijdelijk heel hoog zijn (tot > 2.000 m³/s). Door optimalisatie van de regeling van de inlaten, kunnen de instroomdebieten binnen zekere grenzen beperkt kunnen worden. Hetzelfde geldt voor de afvoerpieken die optreden na het sluiten van noodoverloopgebieden. Hierbij kan gedacht worden aan beter anticiperen op de verwachte afvoer bij Lobith (hoogwatervoorspelling) en op basis daarvan het eerder inzetten van noodoverloopgebieden. Inzet van meerdere noodoverloopgebieden tegelijkertijd kan afvlakkend werken. Daarnaast moet ook bijvoorbeeld door middel van gestuurde doorstroming door noodoverloopgebieden (stromende berging).

De onderzochte noodoverloopgebieden corresponderen voor een deel met de gebieden die voorzien zijn als onderdeel van het reguliere hoogwaterbeschermingssysteem langs de Rijntakken. Het Rijnstrangengebied en de Ooijpolder zijn namelijk ook nadrukkelijk in beeld als retentiegebied. Indien zij onderdeel gaan uitmaken van het systeem dat de veiligheid langs de Rijntakken moet garanderen tot een maatgevende afvoer bij Lobith met een herhalingsperiode van 1250 jaar, zullen alternatieve gebieden geselecteerd moeten worden als noodoverloopgebied.

Locatie langs riviertak

De effectiviteit van een noodoverloopgebied wordt sterk beïnvloed door de locatie in een riviertak. Hoe verder stroomafwaarts een gebied is gesitueerd des te groter zal de noodzaak van aanvullende hoogwaterbeschermingsmaatregelen zijn zowel bovenstrooms van de inlaat als langs andere riviertakken. Bij een situering op relatief korte afstand benedenstrooms van een splitsingspunt zullen door herverdeling van de afvoer over beide riviertakken waterstandsverlagende effecten te zien zijn.

I Inleiding

De waterkeringen langs de grote rivieren worden geacht waterstanden te kunnen keren tot het niveau van de maatgevende afvoer, thans 15.000 m³/s te Lobith. Deze afvoer heeft een kans van optreden van 1/1250 per jaar. Hoewel een kleine kans resteert op het falen van de hoogwaterbescherming, is het toch van belang onder boven-maatgevende afvoersomstandigheden een eventuele onvermijdelijke overstroming op een gecontroleerde wijze te laten plaatsvinden. De aard van het hydrologisch systeem laat dit ook toe aangezien hoogwatergolven enige dagen vooruit voorspeld kunnen worden met een redelijke hoge nauwkeurigheid. Het principe van gecontroleerde overstroming van - delen van - dijkringen om onder zeer extreme omstandigheden schade en risico's te beheersen is in de vierde Nota Waterhuishouding aan de orde gesteld. In lijn hiermee moeten in de in voorbereiding zijnde vijfde Nota Ruimtelijke Ordening gebieden worden aangewezen die onderdeel kunnen gaan vormen van het systeem van noodberging.

In het kader van het onderzoek Ruimte voor Rijntakken is al een aanzet gegeven voor het opnemen van zogenaamde retentiegebieden als structureel onderdeel van het hoogwaterbeschermingssysteem. Hierbij was echter het uitgangspunt dat deze berging ingezet zou worden om binnen maatgevende omstandigheden - afvoeren bij Lobith tot een herhalingsstijd tot 1250 jaar - de vereiste veiligheid tegen overstromen te kunnen garanderen. In het kader van het project HIS-NL - nationaal Hoogwater Informatie Systeem - is het echter gewenst om ook voor boven-maatgevende afvoeren bij Lobith vast te stellen welke bergingscapaciteit in het rivierengebied nodig is om calamiteiten te voorkomen.

Op 9 oktober 2000 heeft WL | Delft Hydraulics per brief met kenmerk ZWS4627/Q2856/lj offerte uitgebracht voor het uitvoeren van een studie naar de inzet van noodoverloopgebieden in het kader van HIS-NL. RIZA heeft WL vervolgens per bon met kenmerk 37281 / WSH gedateerd op 18 oktober 2000 opdracht verleend.

Het onderzoek is vanuit de RIZA begeleid door Robert Slomp van de afdeling Hydrodynamica en Veiligheid (WSH). Johan Crebas en Karel Heynert hebben het project uitgevoerd namens WL, waarbij laatstgenoemde als projectleider optrad. De kwaliteitscontrole was in handen van Jos Dijkman.

leeswijzer

Voor u ligt het concept eindrapport van het onderzoek. In Hoofdstukken 2 en 3 van dit rapport worden de doelstelling en de uitgangspunten van het onderzoek besproken. Vervolgens wordt in Hoofdstuk 4 het globaal benodigde oppervlak voor noodoverloopgebieden bepaald. In Hoofdstuk 5 wordt een geografische invulling gegeven aan de benodigde berging en de effecten hiervan tijdens hoogwatergolven in beeld gebracht. Tenslotte is in Hoofdstuk 6 onderzocht in welke mate de locatie van een noodoverloopgebied de effectiviteit beïnvloed.

2 Doelstelling

Het onderzoek heeft de volgende doelstellingen:

- het maken van een globale inschatting van het benodigde oppervlak dat in het Rijntakkengebied nodig is om door middel van gecontroleerde overstroming benedenstroomse gebieden te beschermen tegen overstroming bij afvoergolven van 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s bij Lobith;
- het geven van een nadere detaillering en geografisch invulling van de benodigde inundatiecapaciteit zodanig dat de noodoverloopgebieden het meeste effect hebben en derhalve het ruimtegebruik wordt geminimaliseerd; en
- het aangeven van de invloed van de locatie van een noodoverloopgebied langs een riviertak op het effect van gecontroleerd overstromen.

3 Uitgangspunten

De uitgangspunten van het onderzoek worden in het onderstaande kort besproken.

Instrumentarium

In het onderzoek is gebruik gemaakt van het RvR-instrumentarium - het IVR-DSS - dat in het kader van het project Integrale Verkenning Rijntakken is ontwikkeld en verder is uitgebreid in het project Ruimte voor Rijntakken (zie RVR-rapport 99.09, augustus 1999).

Voor de zijdelingse toestroming van de Oude IJssel en de Twentekanalen is - in lijn met de aanpak in het RvR-project (zie RVR-rapport 99.03) - de maximum afvoer als constante waarde opgelegd, waarmee een “worst case” wordt doorgerekend en voorbij gegaan kan worden aan het al of niet samenvallen van de piekafvoeren in de hoofd- en zijrivieren.

Referentiesituatie

De noodzaak en effectiviteit van noodoverloopgebieden wordt onderzocht uitgaande van een situatie waarin maatregelen die in de komende drie jaar naar verwachting gerealiseerd zullen zijn. Dit betreft de volgende maatregelen:

- reeds uitgevoerde inrichtingsplannen (zijn al verwerkt in het SOBEK Rijntakkenmodel dat door RIZA-WSR is gemaakt en is gebruikt in het RvR-project);
- de INTERREG-projecten (zie RVR-rapport 99.05 & Bijlage A);
- verwijderen van in RvR beschouwde hydraulische knelpunten die zowel effectief als haalbaar geacht worden: knelpunten “Set 1” in de RvR terminologie (zie RVR-rapport 99.05 & Bijlage A); en
- de verruiming van de Waalbocht bij Nijmegen op de wijze zoals op dit moment ook voor Directie Oost-Nederland wordt onderzocht (zie onder andere rapport “Rivierkundige berekeningen Quick Scan Nijmegen”).

Niet voor alle bovengenoemde maatregelen geldt dat de uitvoering binnen enkele jaren mag worden verwacht. Voor verwijdering van een aantal hydraulische knelpunten en de verruiming van de bocht bij Nijmegen - zoals op dit moment actueel is - is de uitvoeringstermijn nog onzeker.

Maatregelen die naar verwachting pas op langere termijn gerealiseerd kunnen worden - zoals zomerbedverlaging, kribverlaging, verlaging en inrichting van uiterwaarden en grootschalige dijkverlegging - zijn niet in de uitgangssituatie van het onderzoek meegenomen. Maatregelen die nog in andere kaders onderwerp van onderzoek zijn - zoals de bypass bij Kampen en een regelbare overlaat bij Pannerden - zijn eveneens niet meegenomen.

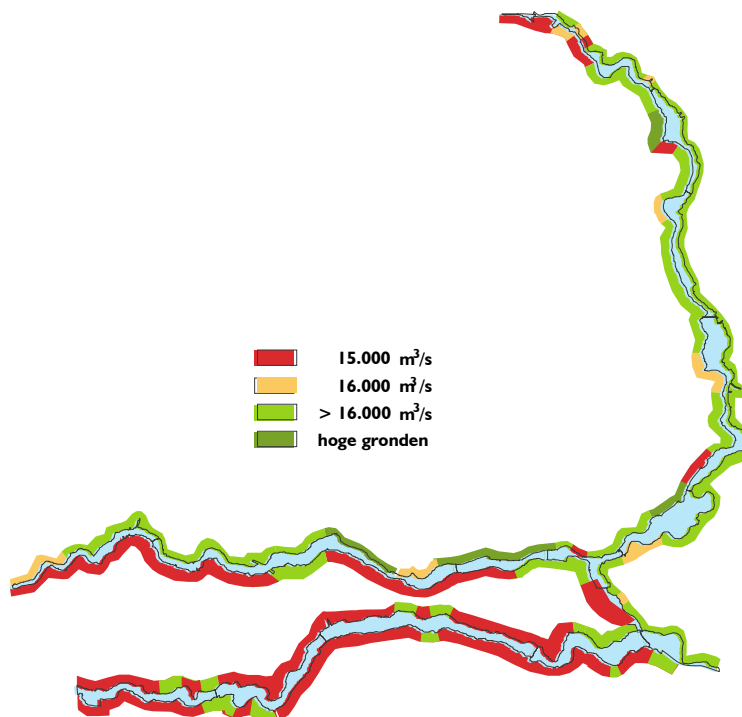
Door bovengenoemde maatregelen in het model te schematiseren is de afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop veranderd. In dit onderzoek wordt deze afvoerverdeling niet - zoals in de ontwikkelde inrichtingsalternatieven van RvR wel is gebeurd (zie RVR-rapporten 99.03 en 99.05) - met additionele maatregelen gecorrigeerd.

Vergelijkingsbasis en toetsingscriterium

De gehanteerde vergelijkingsbasis is gelijk aan die in het project Ruimte voor Rijntakken gehanteerde als uitgangspunt is gekozen. Deze is bepaald op basis van een permanentieberekening met $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith - zonder feitelijk rekening te houden met de actuele dijkhoogten langs de riviertakken. Deze vergelijkingsbasis komt in grote lijnen overeen met de huidige MHW's, maar is niet hetzelfde. De referentiehoogte uit het Randvoorwaardenboek 1996 zijn bepaald met WAQUA op basis van een bodemopname uit 1990.

Een inrichtingsalternatief voldoet wanneer onder een gesimuleerde hoogwatergolf de maximale waterstanden overall langs de Rijntakken - bovenstrooms van het overgangsgebied - niet hoger dan de vergelijkingsbasis zijn.

De feitelijke dijkhoogtes zijn hoger dan de MHW's. Dijken worden met een overhoogte aangelegd die tenminste voldoende is om klink, golfploop en effecten van bochtstroming te kunnen opvangen.



Figuur 3.1 Maximale afvoer van Rijn bij Lobith waarop de dijken zijn ontworpen (ref. Silva et al., 2000)

Schematisatie van noodoverloopgebieden

In het onderzoek wordt bij de afbakening van noodoverloopgebieden vooralsnog geen onderscheid gemaakt tussen onbewoonde en bewoonde gebieden, behalve waar dit reeds gebeurd is zoals het Rijnstrangengebied. Dit betekent dat de bepaling van de bergingscapaciteit van dijkkringen rechtstreeks kan gebeuren zonder rekening te houden met het landgebruik. Noodoverloopgebieden worden geïnundeerd tot hun maximale diepte. Er wordt in dit stadium niet nagegaan of een andere wijze van inunderen beter is.

De inlaat van de inundatiepolders wordt op een eenvoudige wijze geschematiseerd zonder rekening te houden met een eventuele praktische bovengrens aan de inlaat dimensies. De inlaat is geschematiseerd als een vaste overlaat die wordt geactiveerd door het openen van de schuif. Er is bij de regeling van de inlaat als uitgangspunt gehanteerd dat een noodoverloopgebied moet worden afgekoppeld wanneer de maximaal toelaatbare waterstanden in het gebied nog net niet overschreden zijn. Als maximaal toelaatbare waterstand in het noodoverloopgebied is de vergelijkingsbasis in de rivier - de MHW - ter hoogte van het benedenstroomse einde van het gebied. Op deze wijze wordt ongewenste overstroming van aangrenzende dijkkringen op schematische wijze voorkomen.

Per dijkkring die als potentieel inundatiegebied onderzocht zal worden, moet de lokatie van de inlaat zodanig bepaald worden dat deze zo ver mogelijk bovenstrooms ligt. Daarnaast is rekening gehouden worden met het achterliggende maaiveldhoogte en concentraties van bebouwing ter plaatse.

Begrenzing van onderzoek

In de studie wordt de uitsluitend gekeken naar de veiligheid van het bovenrivierengebied. In het overgangs- en benedenrivierengebied wordt de veiligheid tegen overstromen onder andere bepaald door combinaties van benedenstroomse opzet (door wind en getij) en bovenstroomse afvoer. Dit vraagt een uitgebreidere beschouwing dan in het huidige onderzoek is toegepast.

Het onderzoek naar het optimaal inzetten van noodoverloopgebieden kan een zeer breed terrein bestrijken. Het onderzoek is derhalve nadrukkelijk begrensd. Hieronder is aangegeven welke aspecten in ieder geval geen onderwerp van onderzoek zijn geweest:

- de optimalisatie van het ontwerp van de inlaatwerken van de inundatiegebieden
- effecten van hoogwaters in de Maas
- inschatting van schade en slachtoffers als gevolg van inundatie van dijkkringen
- vaststelling van stromingspatronen binnen de inundatiepolders
- optimale geografische keuze van noodoverloopgebieden; dit onderzoek heet zich gericht zich op de concepten en niet op de precieze geografische invulling

4 Schatting benodigd oppervlak noodberging

Het globaal benodigde bergingsoppervlak is vastgesteld voor standaard afvoergolven met een piekafvoer van respectievelijk 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s. Hierbij zijn vier golfvormen beschouwd: de *gemiddelde* afvoergolf en golfvormen waarvan de breedte met een kans 25, 75 en 99,5% onderschreden wordt (25, 75 en 99,5 % kwantiel). De golfvormen zijn met de door HKV ontwikkelde golfvormgenerator bepaald en nadrukkelijk niet gecorrigeerd op een eventueel onnatuurlijk verloop (zie bv. golfvorm 99,5 % kwantiel in Figuur 4.4).

Het 99,5% kwantiel is toegevoegd om ook een idee te geven van het benodigde bergingsoppervlak om piekafvoeren met een bijna 100% zekerheid te kunnen bergen. Het benodigde inundatiegebied is in deze fase nog niet geografisch ingevuld, maar is als totaal voor het gehele onderzoeksgebied bepaald.

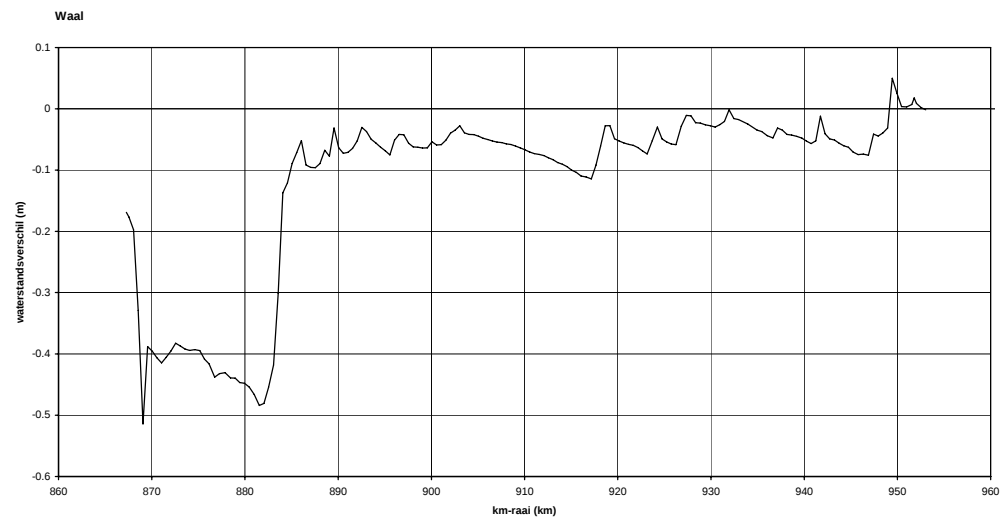
Opgemerkt moet worden dat de gemiddelde golfvorm niet overeenkomt met de 50 % kwantiel golfvorm. Dit is een logisch gevolg van de aanname dat de breedte van een golf in een bepaald afvoerinterval log-normaal verdeeld is. De betrouwbaarheidsintervallen die de golfvormgenerator berekent, zijn gebaseerd op deze aanname.

De globale vaststelling is in een aantal stappen uitgevoerd

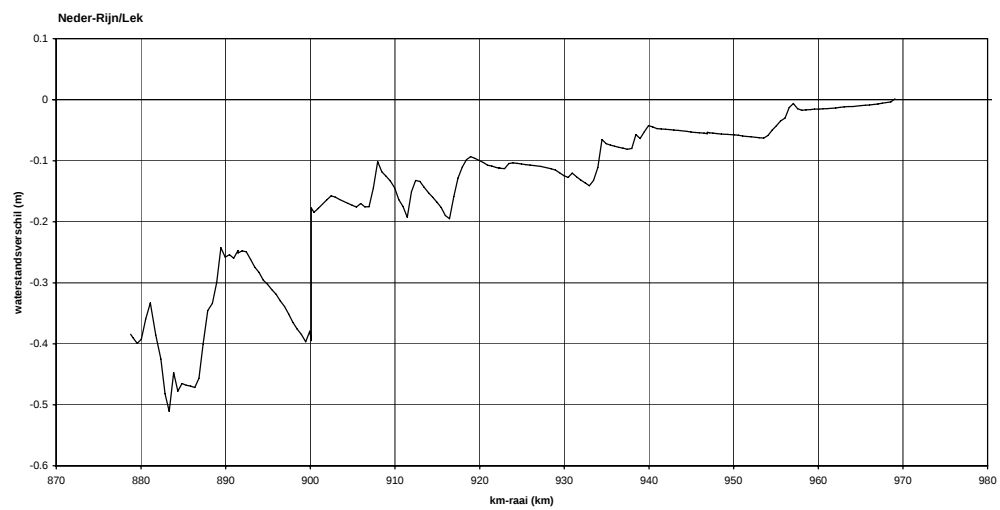
4.1 Afvoercapaciteit referentiesituatie

Uitgaande van het toetsingscriterium beschreven in Hoofdstuk 3 is de afvoercapaciteit van de referentiesituatie bepaald op basis van standaard afvoergolven.

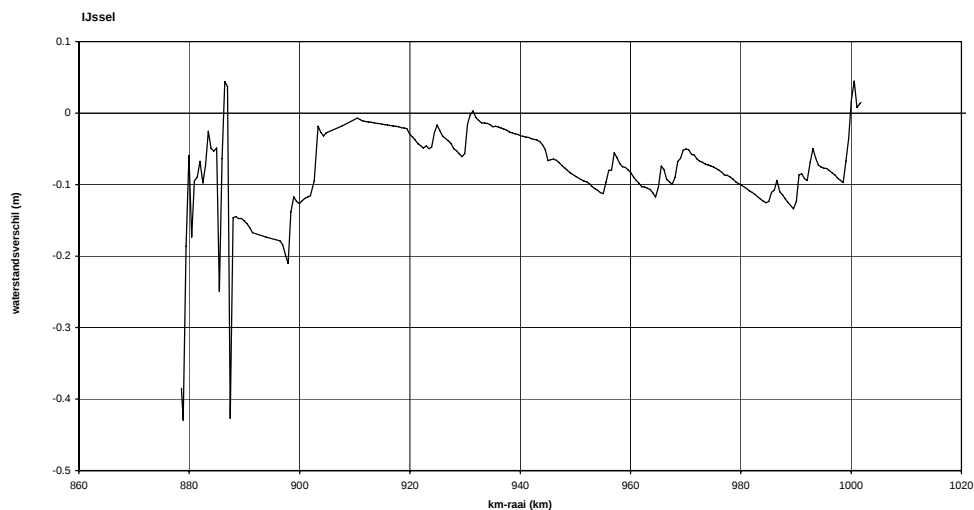
Itererend is voor de standaard golfvorm (bij Lobith) bepaald dat bij een piekafvoer van ongeveer 15.250 m³/s nog net aan het toetsingscriterium voldaan wordt: de huidige MHW's worden nergens in het onderzoeksgebied overschreden. Deze piekafvoer van 15.250 m³/s is dus de "afvoercapaciteit" van de referentiesituatie. In Figuren 4.1 t/m 4.3 is voor de Rijntakken het verschil tussen de maximum opgetreden waterstanden in de afvoercapaciteitsberekening en de waterstandsresultaten van de permanentieberekening met 15.000 m³/s weergegeven.



Figuur 4.1 Waterstandsverschil op de Waal bij een inkomende piekafvoer van $9.816 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 4.2 Waterstandsverschil op de Nederrijn/Lek bij een inkomende piekafvoer van $3.146 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 4.3 Waterstandsverschil op de IJssel bij een inkomende piekafvoer van $2.266 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2 Globaal benodigd bergingsoppervlak

Het globaal benodigde bergingsoppervlak wordt in eerste instantie bepaald door uit te gaan van de standaard afvoergolven die met de golfgenerator zijn bepaald. Vervolgens wordt de analyse nogmaals uitgevoerd op basis van de alternatieve methode beschreven in Bijlage B.

werkwijze bij analyse op basis van standaard afvoergolven

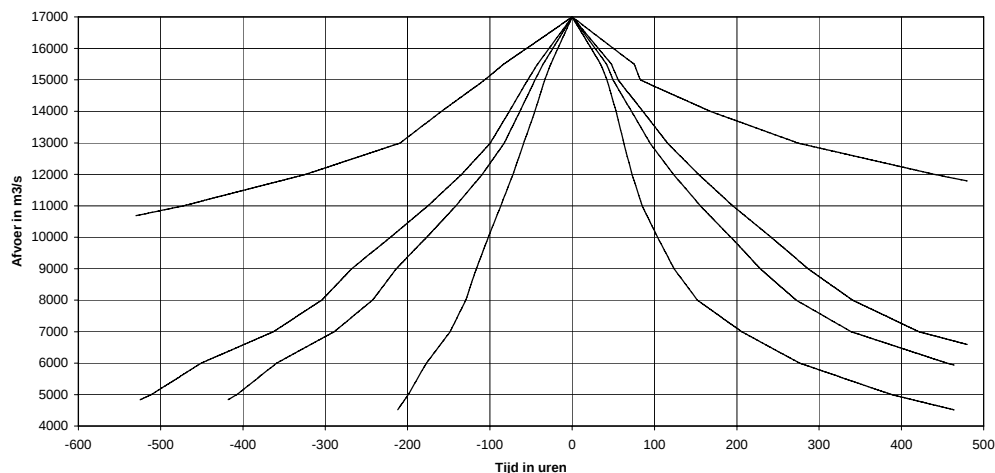
In deze fase van het onderzoek is op een relatief schematische wijze het benodigde oppervlak vastgesteld door het volume te bepalen van de te beschouwen 12 afvoergolven boven de afvoercapaciteit van $15.250 \text{ m}^3/\text{s}$ van de referentiesituatie. Het globaal benodigde bergingsoppervlak is vastgesteld voor standaard afvoergolven met een piekafvoer van respectievelijk 16.000 , 17.000 en $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Zoals bij aanvang van dit hoofdstuk gesteld is, zijn hierbij vier golfvormen beschouwd. In Figuur 4.4 wordt de gemiddelde golfvorm met een piekhoogte van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith weergegeven. Daarnaast zijn ook de 25, 75 en 99,5 % kwantiel golfvormen weergegeven voor deze piekafvoer. De golfvormen zijn bepaald met de golfvormgenerator.

Vervolgens is met behulp van de bergingscapaciteit van de verschillende noodoverloopgebieden vastgesteld welk totaal oppervlak gereserveerd moet worden. Hierbij is een vaste volgorde van inzet bepaald met als leidraad dat een bovenstrooms gebied eerst zal worden ingezet.

In Tabel 4.1 zijn de te onderzoeken noodoverloopgebieden weergegeven met hun oppervlaktes en bergingscapaciteit. De oppervlaktes en gemiddelde maaiveldhoogtes zijn met ArcView bepaald op basis van een 500 bij 500 m grid. De gebruikte bestanden zijn aangeleverd door de opdrachtgever en afkomstig van de Meetkundige Dienst en Dienst Weg- en Waterbouw. Bij de bepaling van het maximale inundatieniveau is uitgegaan van de referentiewaterstand die globaal genomen halverwege het noodoverloopgebied in de rivier

optreedt. Impliciet betekent dit dat uitgegaan is van compartimentering van de dijkkring en/of een inzet van de gebiedende als stromende berging.

Figuur 4.5 toont de ligging van de noodoverloopgebieden.

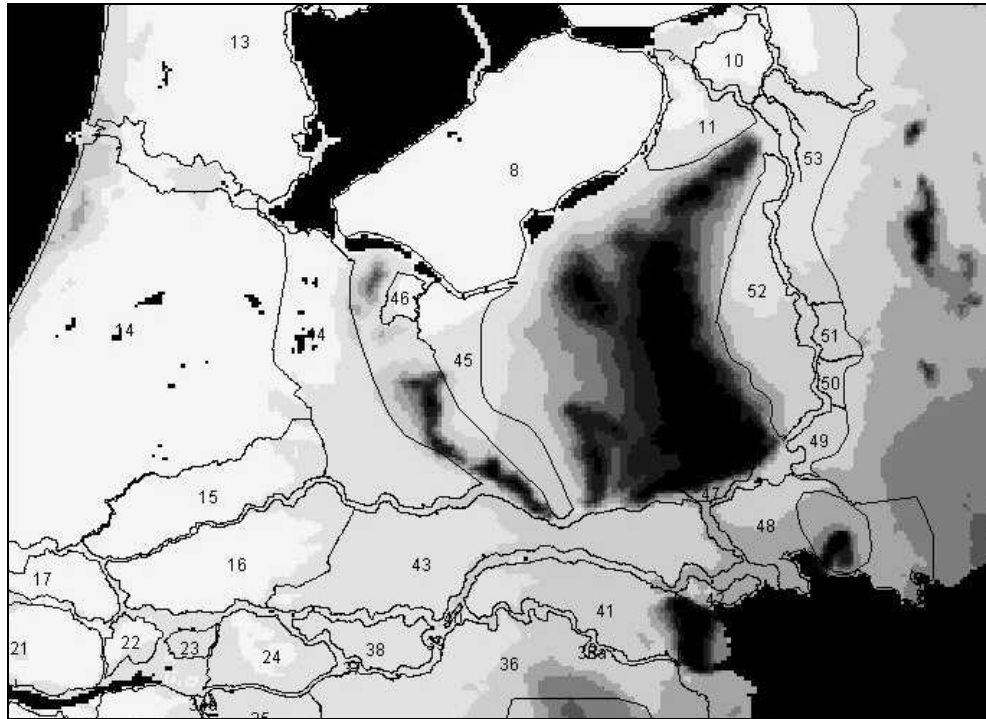


Figuur 4.4 Golfvormen met een kans van voorkomen van respectievelijk 25, 50, 75 en 99.5% voor een piekafvoer van 17.000 m³/s bij Lobith

Tabel 4.1 Potentiële noodoverloopgebieden

dijkkring		oppervlak (ha)	gemidd. maaiveld- hoogte (m+NAP)	riviertak	referentie hoogte ¹		gemidd. inundatie diepte (m)	berging (M m³)
nr	naam				niveau (m+NAP)	op raai (km)		
42	Ooij en Millingen	3.375	12,46	Waal	15,93	875	3,47	117
48	Rijn en IJssel	28.525	12,84	Bovenrijn	17,61	862	4,77	1.361
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	62.950	4,86	Waal	11,5	913	6,64	4.180
41	Land van Maas en Waal	28.750	8,30	Waal	12,31	903	4,01	1.153
49	IJsselland	5.100	8,60	IJssel	10,38	912	1,78	91
38	Bommelerwaard	10.775	2,39	Waal	8,09	936	5,70	614
45	Gelderse Vallei	22.400	3,40	Nederrijn/ Lek	6,24 ²	904	2,84	1.398
44	Kromme Rijn	62.925	1,31	Nederrijn/ Lek	4,70 ³	929	3,39	4.336

¹ ongeveer halverwege een noodoverloopgebied; ² mede rekeninghoudend met een 1/1250 jaar maatgevende waterstand bij Eemmondig uit onderzoek (WL, 2000); ³ uitgaande van een bij benadering zelfde referentiehoogte aan het benedenstroomse einde van de dijkkring



Figuur 4.5 Ligging van de te onderzoeken noodoverloopgebieden

Resultaten op basis van standaard afvoergolven

De benodigde oppervlaktes aan noodberging zijn vervolgens bepaald door het volume van de afvoergolf boven de in paragraaf 4.1 bepaalde capaciteit van de referentiesituatie te delen door het gewogen gemiddelde van de inundatiediepte in de noodoverloopgebieden. Dit gemiddelde inundatiediepte is 4,58 m. De resultaten van deze analyse zijn in Tabel 4.2 weergegeven.

Tabel 4.2 Te bergen volume en benodigd oppervlak voor een aantal piekafvoeren en verschillende golfvormen

piekafvoer (m ³ /s)	golfvorm (% kwantiel)	te bergen volume (M m ³)	benodigd polderoppervlak (ha)
16.000	25	53	1.157
	gemiddeld	75	1.638
	75	91	1.987
	99,5	199	4.345
17.000	25	223	4.868
	gemiddeld	281	6.135
	75	328	7.162
	99,5	577	12.598
18.000	25	465	10.153
	gemiddeld	578	12.620
	75	666	14.542
	99,5	1123	24.520

De boven geschetste benadering is vrij grof maar ook snel en efficiënt. De totaal benodigde berging aan de “bovenkant” van het systeem is bepaald. Hiermee wordt bewust in eerste instantie voorbij gegaan aan aspecten als de invloed van de afvoerdeling, uitdemping van golven langs de Rijntakken en verschillen in het actuele beschermingsniveau. Gezien het feit dat in de tweede fase van het onderzoek verder geoptimaliseerd wordt op basis van geografische locatie is de voorgestelde benadering in dit stadium voldoende.

Werkwijze bij analyse op basis van alternatieve golfvorm bepaling

In het voorgaande is uitgegaan van standaard afvoergolven afgeleid met de golfvormgenerator. Het resultaat van deze methode is getoetst aan de uitkomsten van een analyse waarbij gebruik gemaakt wordt van alle bij Lobith gemeten afvoergolven boven 8.000 m³/s. De voor deze analyse gebruikte methode kan ook in dit onderzoek rechtstreeks worden toegepast wanneer de afvoercapaciteit van de uitgangssituatie bepaald is. De methode wordt in essentie beschreven in de *concept* notitie “Retentie Rijnstrangen; verkenning effecten retentie”, als Bijlage B is bijgevoegd.

Door de golfvormgenerator wordt op basis van gemeten afvoergolven per afvoerbereik een kansverdeling afgeleid van de duren waarvoor dit afvoerbereik gedurende een afvoergolf niet wordt overschreden. Een ontwerpafvoergolf wordt vervolgens door de golfvormgenerator samengesteld uit een reeks van duren met een bepaalde kans van overschrijden. Een 75 % kwantiel afvoergolf wordt bijvoorbeeld samengesteld uit de duren per afvoerbereik bij met een kans van 75 % overschreden worden. Als gevolg hiervan kunnen de afvoergolven hun “natuurlijk” verloop verliezen. In de alternatieve methode voor de bepaling van de golfvorm wordt de “natuurlijke” golfvorm behouden.

In de concept notitie “Retentie Rijnstrangen; verkenning effecten retentie” is, in sectie 2.3, de volgende relatie afgeleid voor volumina van afvoergolven:

$$m(V/Q_{\max}) = 1143.5 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 2354.1 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 1210.3$$

$$s(V/Q_{\max}) = 205 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 421.56 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 216.6$$

met:

$Q_{\max}$	= piekafvoer (m ³ /s)
Q	= drempelwaarde (m ³ /s)
V	= volume afvoer boven de drempelwaarde (10 ³ m ³)
m	= gemiddelde van $V/Q_{\max}$ (10 ³ s)
s	= standaarddeviatie van $V/Q_{\max}$ (10 ³ s)

Met: $Q_{\max} = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q = 15.250 \text{ m}^3/\text{s}$ volgt voor $m(V/Q_{\max}) = 5.358 \text{ s}$ en $s(V/Q_{\max}) = 1.032 \text{ s}$, zodat een afvoergolf met een piekwaarde van 16.000 m³/s boven het niveau van 15.250 m³/s een gemiddeld volume heeft van $5.358 \times 16.000 = 86$ miljoen m³ met een standaardafwijking van $1.032 \times 16.000 = 16,5$ miljoen m³. Voor een gemiddelde golf met een piekafvoer van 16.000 m³/s is derhalve een bergingscapaciteit van 86 miljoen m³ benodigd om deze af te kunnen toppen tot 15.250 m³/s.

Behalve de benodigde berging voor de gemiddelde golfvorm kan ook de benodigde berging voor bredere golven berekend worden. Stel bijvoorbeeld dat als criterium geldt dat 75% van de golven met een piekwaarde van 16.000 m³/s geborgen moeten worden. Uitgaande van de normale verdeling is het 75%-percentiel gelijk aan het gemiddelde plus $0,67^1 \times$ de standaarddeviatie ($= m + 0,67 \times s$). Dit betekent dat 75% van de afvoergolven met een piekwaarde van 16.000 m³/s boven het niveau van 15.250 m³/s een volume heeft, dat kleiner is dan $(5.358 + 0,67 \times 1.032) \times 16.000 = 97$ miljoen m³. Om 75% van de golven met een piekafvoer van 16.000 m³/s af te kunnen toppen tot 15.250 m³/s is derhalve een bergingscapaciteit van 97 miljoen m³ benodigd.

Resultaten op basis van alternatieve golfvorm

Analoog kan voor verschillende waarden van $Q_{\max}$ en Q de benodigde bergingscapaciteit berekend worden voor verschillende veiligheidscriteria.

De resultaten van de analyse zijn in Tabel 4.3 weergegeven. Opgemerkt wordt dat aangezien in deze alternatieve benaderingswijze is aangenomen dat de breedte van een afvoergolf voor een bepaald afvoerbereik normaal verdeeld is, in dit geval geldt dat de gemiddelde en de 50 % kwantiel golfvorm overeenkomen.

Tabel 4.3 Te bergen volume en benodigd oppervlak voor een aantal piekafvoeren en verschillende golfvormen

piekafvoer (m ³ /s)	golfvorm (% kwantiel)	te bergen volume (alt. meth.) (M m ³)	benodigd polderoppervlak (ha)
16.000	25	75	1.638
	50 (=gemiddeld)	86	1.878
	75	97	2.118
	99,5	128	2.795
17.000	25	280	6.114
	50 (=gemiddeld)	318	6.943
	75	357	7.795
	99,5	467	10.197
18.000	25	580	12.664
	50 (=gemiddeld)	660	14.410
	75	740	16.157
	99,5	965	21.070

4.3 Conclusies

Aan de conclusies liggen met name de Tabellen 4.2 en 4.3 ten grondslag. Uitgaande van een gemiddelde afvoergolf met een piekafvoer van 16.000, 17.000 en 18.000 m³/s zijn globaal geschat respectievelijk 1.638, 6.135 en 12.620 ha aan bergend oppervlak nodig in noodoverlooptgebieden om ongecontroleerde overstrooming te voorkomen. Uitgaande van de alternatieve bepaling van de berging zijn de benodigde oppervlakken ongeveer 15 % groter.

¹ Dit is de waarde die bij een standaardnormale verdeling een onderschrijdingskans van 75 % heeft

Meer in termen van gebieden gesproken kan gesteld worden, dat door inzet van...

- het Rijnstrangengebied (ongeveer 150 miljoen m³),
- de dijkkring Ooij en Millingen (117 miljoen m³) en
- 8 % van de dijkkring Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard (330 miljoen m³)

bij een gemiddelde afvoergolf met een piekafvoer van 18.000 m³/s ongecontroleerde overstroming voorkomen kan worden. Met bijna 100 % zekerheid kan gesteld worden dat door inzet van 21 % van laatstgenoemde dijkkring alle afvoergolven met een piekafvoer van 18.000 m³/s geborgen kunnen worden.

Tenslotte kan geconcludeerd worden dat de vorm van de afvoergolven - en dus het in de tijd afgevoerde volume - bepalend is voor de benodigde berging in noodoverloopgebieden. Hoe nauwkeuriger deze vorm bepaald kan worden voor ontwerpcondities, hoe preciezer de benodigde bergingscapaciteit bepaald kan worden.

5 Geografische invulling van noodberging

In de tweede fase van het onderzoek wordt de globale bepaling van de benodigde bergingscapaciteit nader gedetailleerd en geoptimaliseerd.

De optimalisatie van de benodigde berging is in een aantal stappen uitgevoerd.

5.1 Compartimentering van dijkringen

Een aantal van de gebieden vermeld in Tabel 4.1 is gecompartmenteerd. Daarbij is rekening gehouden met de heersende ideeën rondom het aanwijzen van noodoverloopgebieden. Het Rijnstrangengebied (binnen dijkkring 48) is daarom als apart compartiment geïdentificeerd.

In Tabel 5.1 zijn de compartimenten weergegeven.

Tabel 5.1 Potentiële noodoverloopgebieden en hun compartimentering

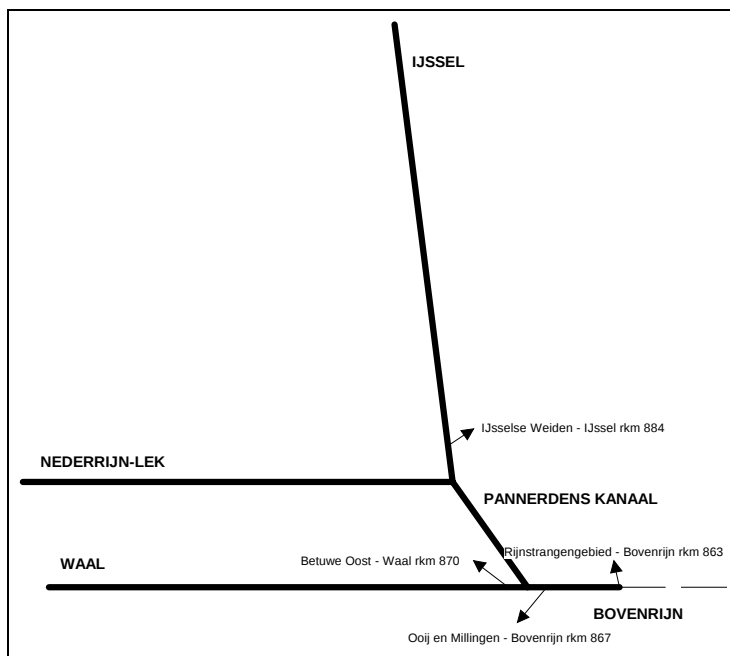
dijkkring		oppervlak (ha)	gemidd. maaiveld- hoogte (m+NAP)	riviertak	referentie hoogte ¹		gemidd. inundatie diepte (m)	berging (M m ³)
nr	naam				niveau (m+NAP)	op raai (km)		
42	Ooij en Millingen	3.375	11,10	Waal	15,4	882	4,30	145
48	Rijn en IJssel	28.525	12,84	IJssel	11,2	899	-	-
	<i>Rijnstrangen</i>	3.154	12,80	Pan.Kan	16,1	873	3,30	104
	<i>Ijsselse Weiden</i>	4.375	9,45	IJssel	11,2	901	1,75	77
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	62.950	4,86	Waal	5,3	953	0,44	278
	<i>Betuwe-Oost</i>	6.500	9,88	Waal	15,4	882	5,52	359
	<i>Betuwe-Midden</i>	7.600	8,58	Waal	13,6	893	5,02	382
	<i>Betuwe-West</i>	6.975	7,24	Waal	12	906	4,76	332
	<i>Betuwe</i>	21.075	8,54	Waal	12	906	3,46	729
41	Land van Maas en Waal	28.750	8,30	Waal	10,6	920	2,30	662
	<i>Land van Maas en Waal-Oost</i>	10.625	8,06	Waal	13,5	893	5,44	578

¹ aan benedenstroomse einde van noodoverloopgebied

Hieronder is puntsgewijs aangegeven op welke wijze compartimentering in dit onderzoek heeft plaatsgevonden:

- Binnen dijkkring 48 wordt - naast het Rijnstrangengebied - een gebied ten noorden van de A12 gecompartmenteerd ("IJssel Weiden"). Dit gebied zal vooral effect hebben op de IJssel.
- Dijkkring 42, Ooij en Millingen, wordt niet in compartimenten opgedeeld ondanks het feit dat Ooijpolder nadrukkelijker in de aandacht staat als noodoverloopgebied. Het eerst inzetten van de Ooijpolder en vervolgens het meer bovenstroomse gelegen gebied bij Millingen is uit puur hydraulisch oogpunt minder logisch.
- Dijkkring 43 is in vier compartimenten verdeeld:
 - Betuwe-West tussen de N233 en de A50,
 - Betuwe-Midden tussen de A50 en de A52, en
 - Betuwe-Oost ten oosten van de A52
 Het gebied ten westen van de N233 (Kesteren-Ochten) is het vierde compartiment maar zal niet als noodoverloopgebied nodig zijn.
- Dijkkring 41, het Land van Maas en Waal, wordt in twee compartimenten verdeeld waarvan alleen het deel ten oosten van de A50 gebruikt als noodoverloopgebied.

In de onderstaande figuur is de locatie van de noodgebieden schematisch weergegeven.



Figuur 5.1 Schematische weergave locatie noodoverloopgebieden

Voor de compartimenten zijn de oppervlaktes en gemiddelde maaiveldhoogtes bepaald met ArcView op basis van een 500 bij 500 m grid. De waarde voor Rijnstrangen is overgenomen uit het rapport RVR-99.04. De waarde zoals weergegeven in Tabel 4.1 voor Ooij en Millingen is aangepast op basis van aflezingen van de topografische kaart.

Bij de nadere detaillering is voor het bepalen van de gemiddelde inundatiediepte uitgegaan van de benedenstroomse referentiewaterstand in de rivier bij een compartiment. Het water loopt immers naar het laagste punt alwaar de dijk het eerst zal overlopen. Dit resulteert in een kleinere maximum inundatievolume, vooral in langgerekte gebieden zoals de Betuwe en de Tieler- en Culemborgerwaard (zie Tabel 5.1).

5.2 Schematisatie van noodoverloopgebieden

De waarden uit Tabel 5.1 zijn gebruikt in de schematisatie van de noodoverloopgebieden. De gebieden zijn in SOBEK geschematiseerd als “retentiebekken”, door middel van de maaiveldhoogte en het gebiedsoppervlak, en met hun meest bovenstroomse locatie gekoppeld aan de betreffende riviertak in het SOBEK-Rijntakkenmodel.

De inlaat is als “RWS”-kunstwerk geschematiseerd, met een vaste drempel op MHW (ter plaatse van de inlaat) minus 1 meter en een beweegbare schuif. De schuif wordt zolang mogelijk gestuurd op het benedenstrooms gewenste maximale debiet. Deze maximale afvoeren zijn bepaald uitgaande van de capaciteit van de referentiesituatie - een afvoer van 15.250 m³/s bij Lobith - en de afvoerverdeling zoals berekend bij de huidige maatgevende afvoer bij Lobith van 15.000 m³/s (zie RVR-99.05). De stuurwaarden voor regeling van de inlaten zijn in de Bovenrijn, Waal, IJssel en Nederrijn zijn dan respectievelijk 15.250, 9.700, 3.194 en 2.342 m³/s.

Als het maximum niveau in het gebied is bereikt wordt de schuif tijdafhankelijk gesloten. Het moment van sluiten wordt bepaald op basis van een voorgaande berekening. Dit maximum niveau is het MHW-niveau aan benedenstroomse zijde van een noodoverloopgebied. De breedte van een inlaat varieert van 500 tot 1500 m.

Tijdens het uitvoeren van de berekeningen bleek het van cruciaal belang dat het openen van de schuif van het meer benedenstroomse gebied goed is afgestemd op het sluiten van de schuif meer bovenstrooms. Indien de één wordt geopend op het moment dat de ander wordt gesloten zal zich een golf door het systeem verplaatsen die tijdelijk hogere waterstanden veroorzaakt dan nodig. Er loopt een translatiegolf door het systeem. Het goed regelen en onderling afstemmen van de inlaten is een relatief bewerkelijke exercitie.

5.3 Resultaten modelsimulaties

De resultaten van de modelsimulaties worden in deze paragraaf gepresenteerd. In Tabel 5.2 zijn de berekeningsresultaten, te weten de geborgen hoeveelheden water in de gedefinieerde noodoverloopgebieden, weergegeven voor de verschillende piekafvoeren en golfvormen.

Tabel 5.2 Te realiseren en gerealiseerde (model) berging in noodoverloopgebieden

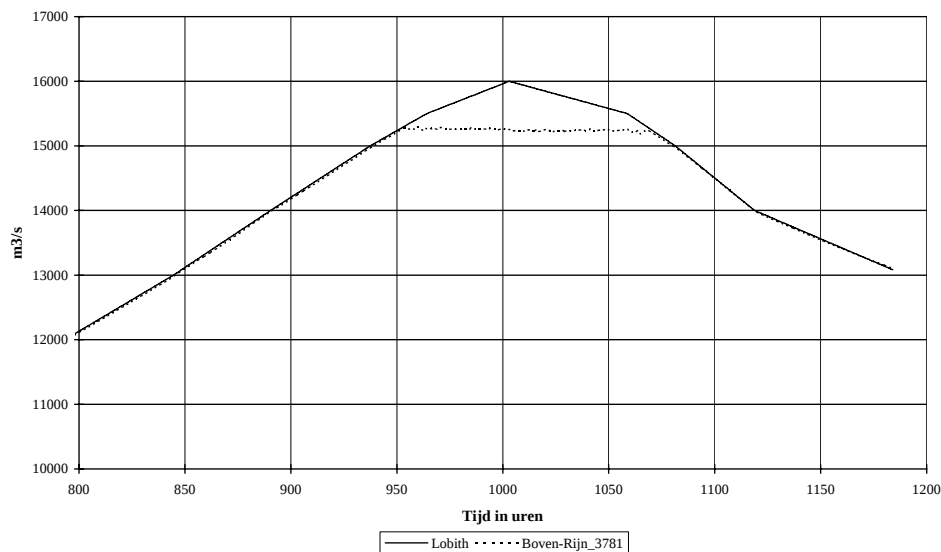
schatting benodigde noodberging...				gerealiseerde noodberging (model)...					
piek afvoer	golfvorm	te bergen volume	benodigd polder oppervlak	Rijn-strangen	Ooij en Millingen	Betuwe Oost	IJsselse Weiden	Neder-rijn	Totaal
(m ³ /s)	(% kwnt)	(M m ³)	(ha)	(M m ³)	(M m ³)	(M m ³)	(M m ³)	(M m ³)	(M m ³)
16.000	25	53	1.157	56	0	0	0	0	56
	gemiddeld	75	1.638	81	0	0	0	0	81
	75	91	1.987	98	0	0	0	0	98
17.000	25	223	4.868	123	96	0	0	0	219
	gemiddeld	281	6.135	123	157	0	0	0	280
	75	328	7.162	124	145	68	0	0	337
18.000	25	465	10.153	120	145	162	3 ¹	6 ¹	436
	gemiddeld	578	12.620	126	146	281	4 ¹	6 ¹	563
	75	666	14.542	132	149	357	20	12 ¹	670

¹ bepaald op basis van berekende afvoeren in resp. IJssel en Nederrijn (zonder beïnvloeding)

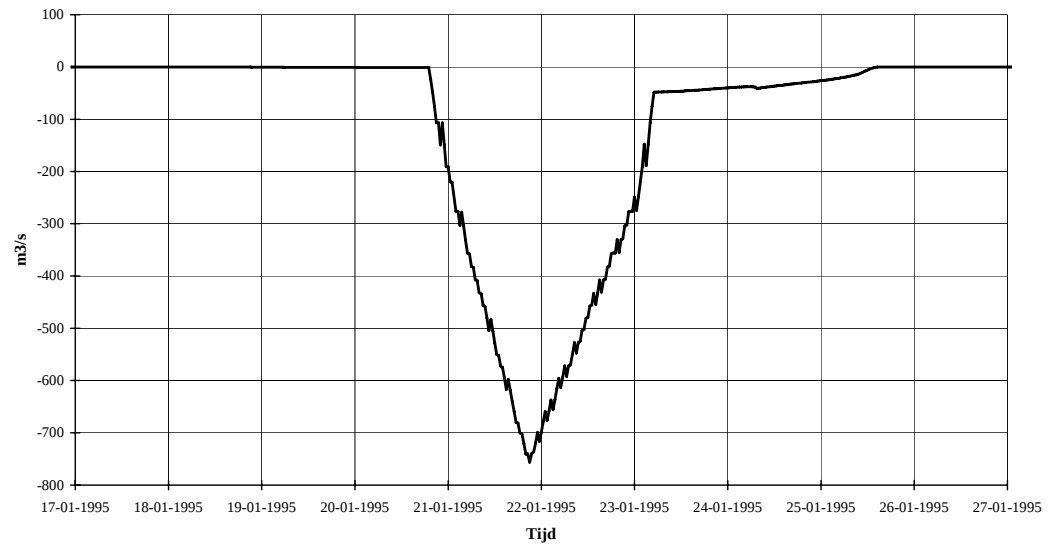
5.3.1 Afvoergolven met piekafvoer 16.000 m³/s

Het Rijnstrangengebied biedt voor alle onderzochte golfvormen met een piekafvoer van 16.000 m³/s voldoende bergingscapaciteit. In Figuur 5.2 is goed te zien hoe de top van de afvoergolf door een op het benedenstroomse debiet gestuurde inlaat wordt afgetopt boven de capaciteit van de referentiesituatie (15.250 m³/s). De lijnen in de grafiek laten de afvoer boven en benedenstroomse van de inlaat zien.

Het maximale debiet over de inlaat is 750 m³/s. Het inlaatdebiet geeft een wat onrustig beeld door kleine verstoringen die in het systeem ontstaan door het regelen van de inlaat; dit mag in werkelijkheid ook verwacht worden.

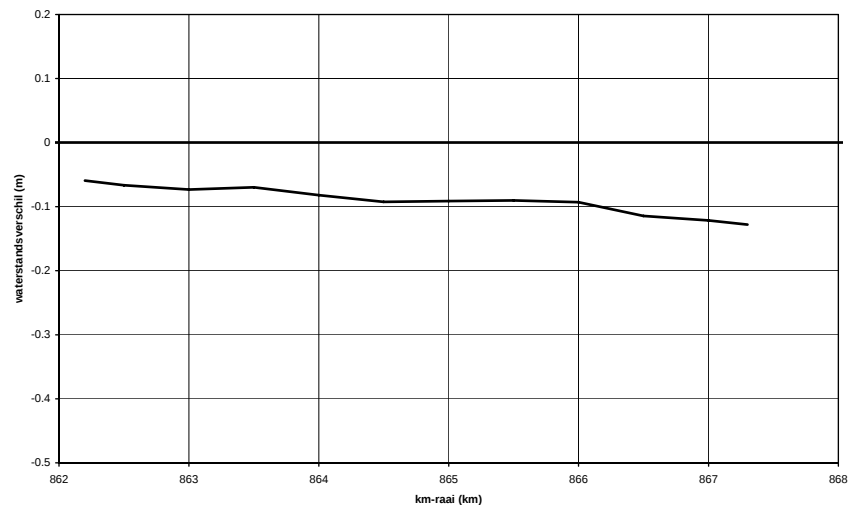


Figuur 5.2 Effect noodoverloopgebied Rijnstrangen. Debietverloop Bovenrijn bij piekafvoer van 16.000 m³/s en 75% kwantiel golfvorm

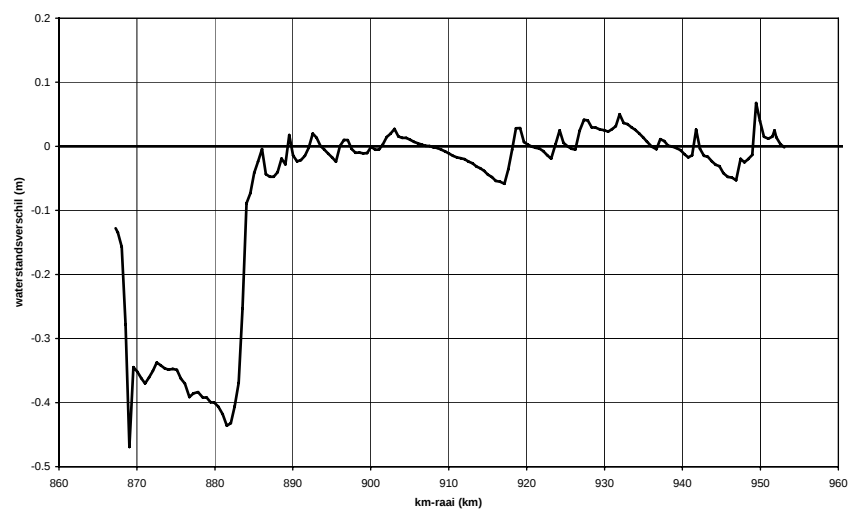


Figuur 5.3 Afvoerloop naar noodoverloopgebied Rijnstrangen. Bij piekafvoer van 16.000 m³/s en 75% kwantiel golfvorm

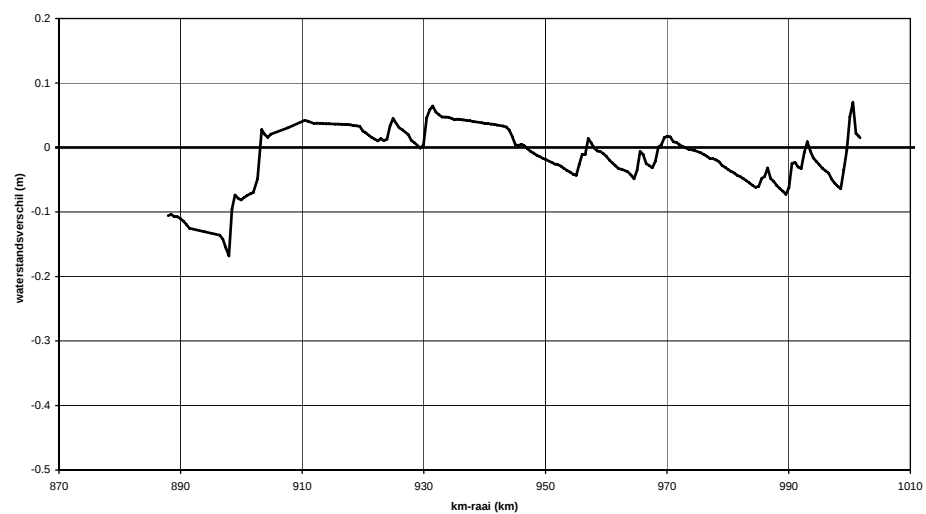
In Figuren 5.4 t/m 5.7 zijn de maximale waterstanden in de Bovenrijn, Waal, Nederrijn en IJssel vergeleken met de MHW's. Zichtbaar is dat voor Waal, Nederrijn en IJssel overal binnen een marge van ongeveer 5 cm aan het toetsingscriterium voldaan wordt. In Figuur 5.4 voor de Bovenrijn is de invloed van de inzet van het Rijnstrangengebied niet zichtbaar omdat het gebied zich aan de bovenrand van de schematisatie bevindt.



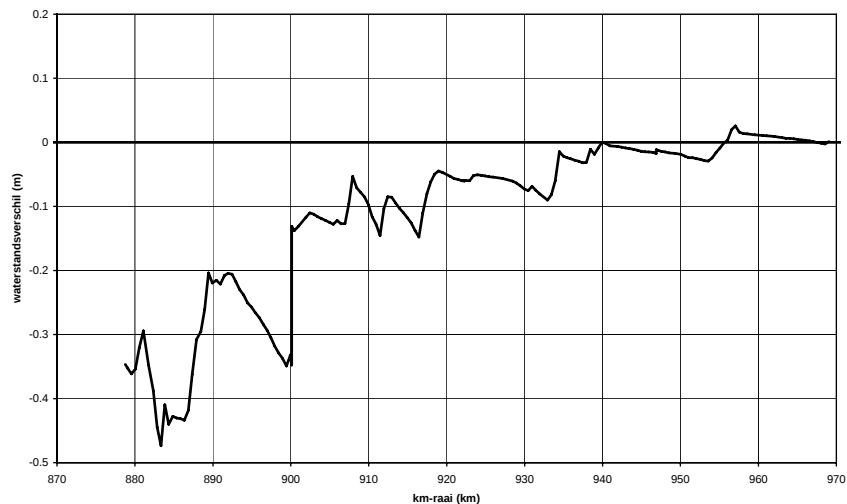
Figuur 5.4 Waterstandsverschil Bovenrijn, 16.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.5 Waterstandsverschil op de Waal, piekafvoer 16.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.6 Waterstandsverschil op de IJssel, piekafvoer 16.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.7 Waterstandsverschil op de Nederrijn/Lek, piekafvoer 16.000 m³/s, gemiddelde golfvorm

5.3.2 Afvoergolven met piekafvoer 17.000 m³/s

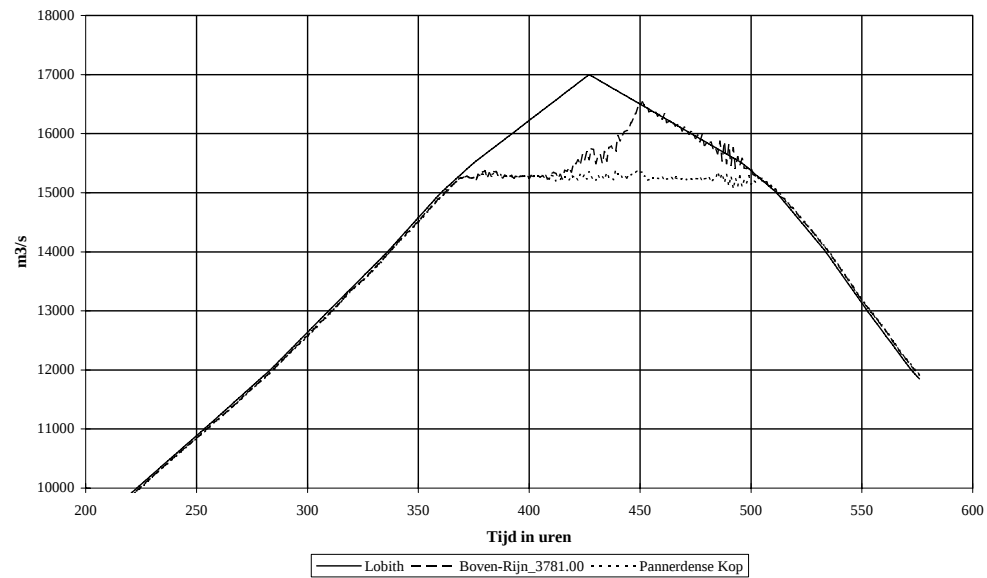
Voor het opvangen van een golf met een piekafvoer van 17.000 m³/s moet naast het Rijnstrangengebied, de dijkkring Ooij en Millingen worden ingezet. Bij een brede - 75 % kwantiel golfvorm - is zelfs het compartiment Betuwe Oost nodig.

In de Figuren 5.8 t/m 5.13 worden per golfvorm steeds in een tweetal figuren de afvoeren op verschillende lokaties in de rivier en over de inlaten van de noodoverloopgebieden gepresenteerd. Het aftoppen van de afvoergolf is steeds goed zichtbaar evenals het verschijnsel dat de afvoer op een bepaalde lokatie in de rivier sterk oploopt wanneer het bovenstrooms gelegen noodoverloopgebied vol is. Het laatstgenoemde verschijnsel is sterker naarmate de afvoergolf breder is. Bij een 25 % kwantiel golfvorm loopt de maximale afvoer benedenstrooms van het Rijnstrangengebied uiteindelijk op tot ongeveer 16.500 m³/s terwijl bij een 75 % kwantiel golfvorm uiteindelijk geen verlaging van de maximale piekafvoer plaatsvindt: de maximale afvoer blijft 17.000 m³/s.

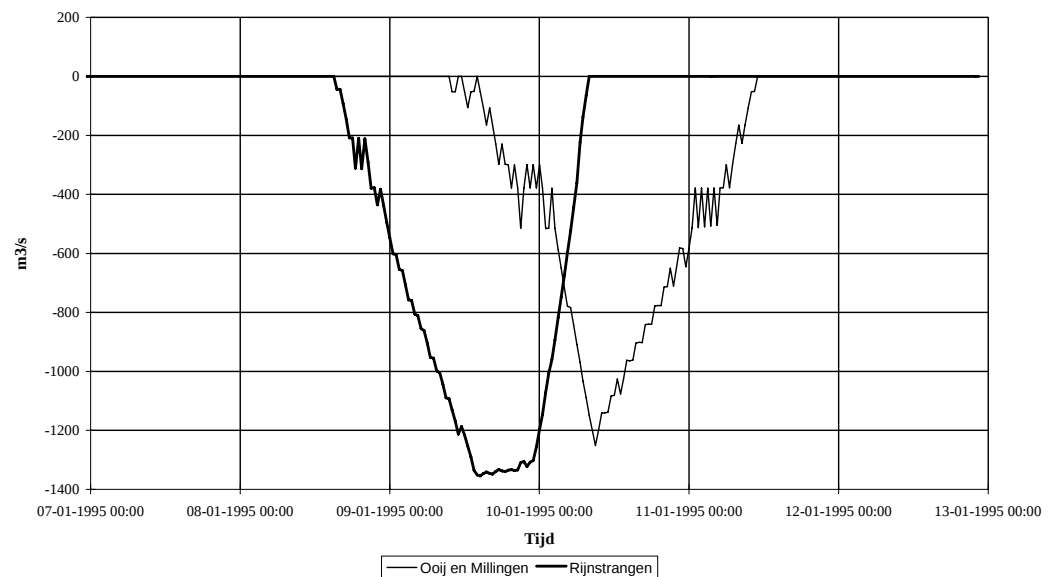
Uit de inlaatdebieten van de noodoverloopgebieden blijkt dat door het na elkaar inzetten van de gebieden hoge piekafvoeren kunnen optreden bij het inlaten. Het maximale inlaatdebiet voor de dijkkring Ooij en Millingen bedraagt meer dan 2.500 m³/s bij een brede golfvorm. Voor de Betuwe Oost loopt dit op tot 2.100 m³/s.

Gesteld kan worden dat door optimalisatie van de regeling van de inlaten, de instroomdebieten binnen zekere grenzen beperkt kunnen worden. Hetzelfde geldt voor de afvoerpieken die optreden na het sluiten van noodoverloopgebieden. Hierbij kan gedacht worden aan beter anticiperen op de verwachte afvoer bij Lobith (hoogwatervoorspelling) en op basis daarvan het eerder inzetten van noodoverloopgebieden. Inzet van meerdere noodoverloopgebieden tegelijkertijd kan afvlakkend werken. Daarnaast moet ook

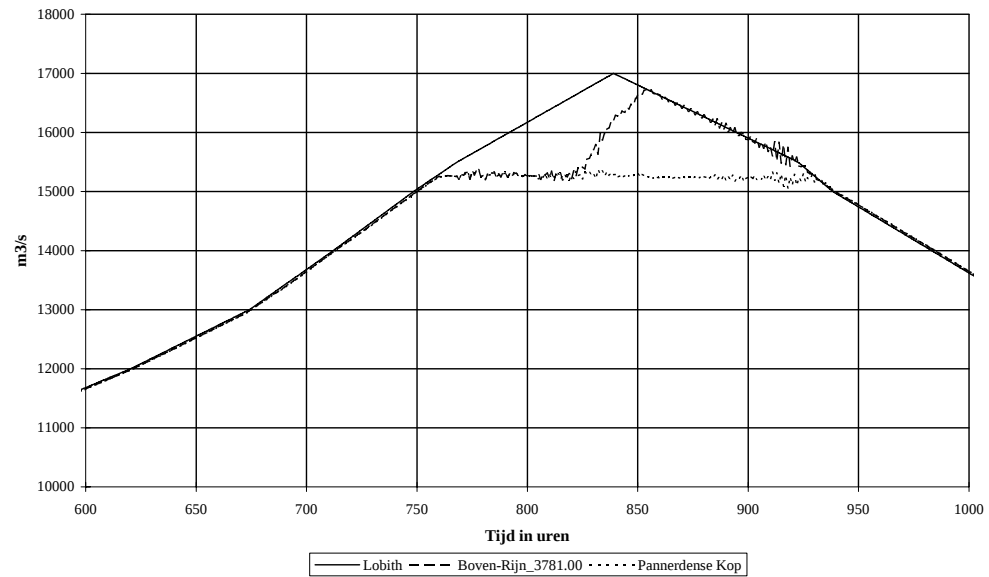
bijvoorbeeld door middel van gestuurde doorstroming door noodoverloopgebieden (stromende berging)



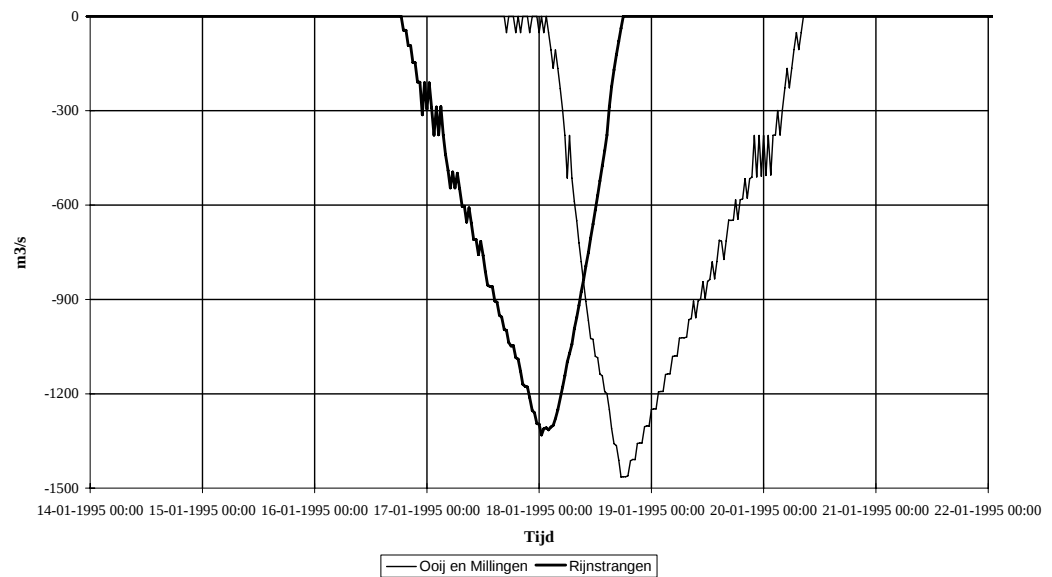
Figuur 5.8 Effect noodoverloopgebied Rijnstrangen en Ooij en Millingen. Debietverloop Bovenrijn bij piekafvoer van 17.000 m³/s en 25% kwantiel golfvorm



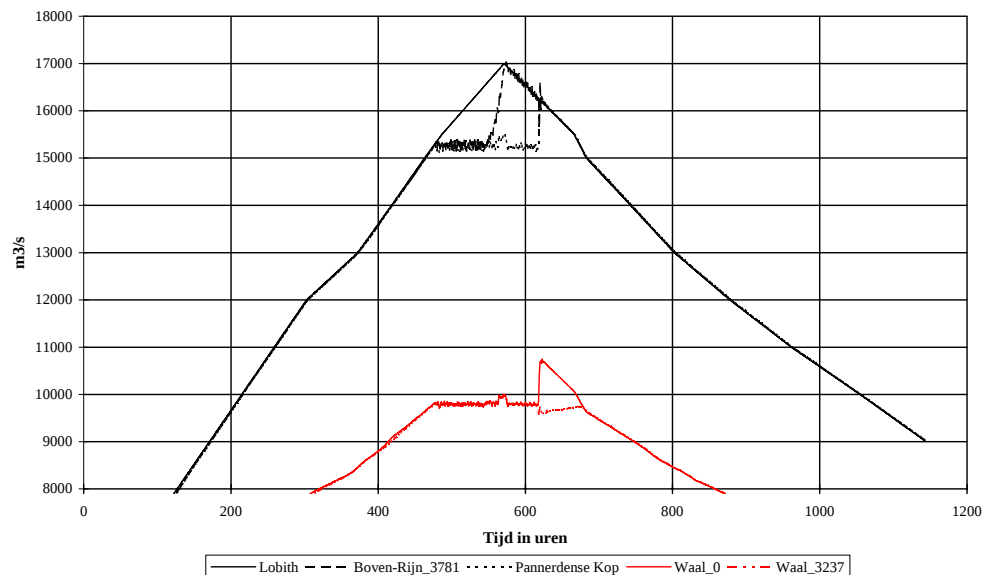
Figuur 5.9 Afvoeroverloop naar noodoverloopgebieden Rijnstrangen (Tolkamer) en Ooij en Millingen (Millingen) bij een piekafvoer van 17.000 m³/s en 25% kwantiel golfvorm



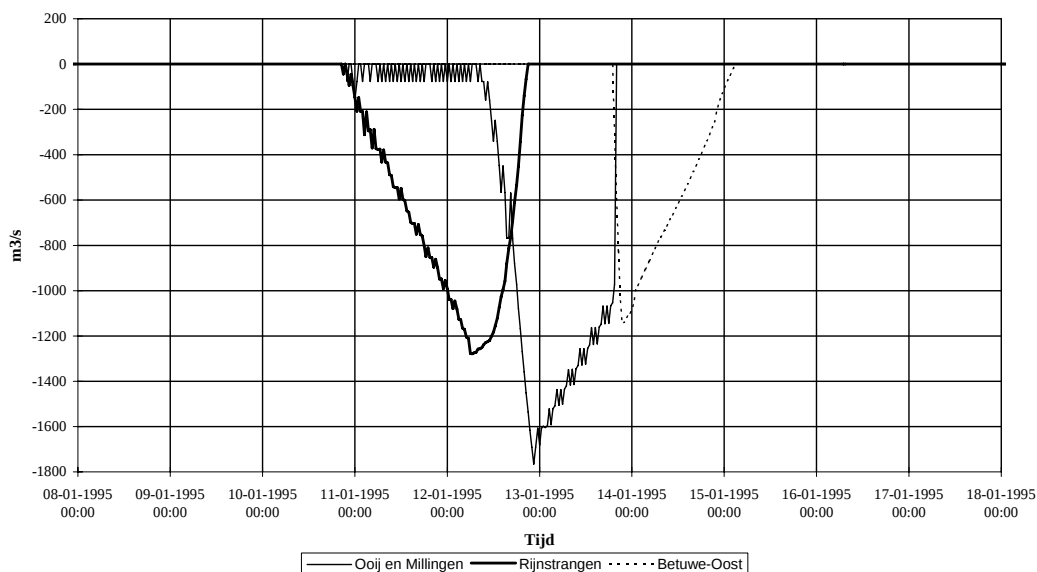
Figuur 5.10 Effect noodoverloopgebieden Rijnstrangen en Ooij en Millingen. Debietverloop Bovenrijn bij piekafvoer van 17.000 m³/s en gemiddelde golfvorm



Figuur 5.11 Afvoerverloop naar noodoverloopgebieden Rijnstrangen (Tolkamer) en Ooij en Millingen (Millingen) bij een piekafvoer van 17.000 m³/s en gemiddelde golfvorm



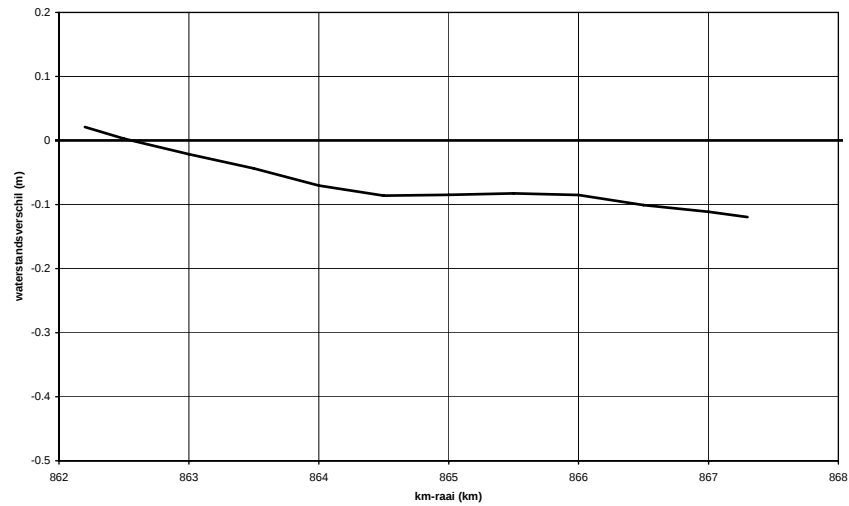
Figuur 5.12 Effect noodoverloopgebieden Rijnstrangen, Ooij en Millingen en Betuwe-Oost. Debietverloop Bovenrijn en Waal bij piekafvoer van 17.000 m³/s en 75% kwantiel golfvorm



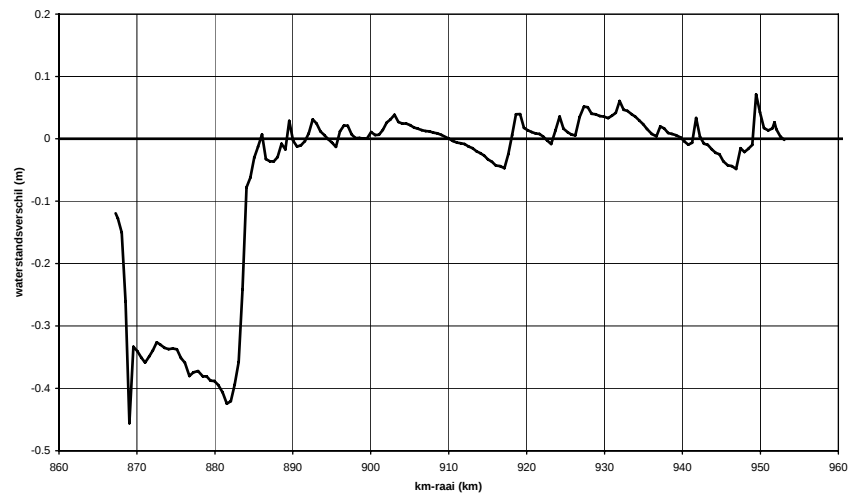
Figuur 5.13 Afvoerverloop naar noodoverloopgebieden Rijnstrangen (Tolkamer), Ooij en Millingen (Millingen) en Betuwe-Oost (Gendt) bij een piekafvoer van 17.000 m³/s en 75% kwantiel golfvorm

In Figures 5.14 t/m 5.17 zijn de maximale waterstanden in de Bovenrijn, Waal, Nederrijn en IJssel vergeleken met de MHW's. Zichtbaar is dat wederom voor Waal, Nederrijn en IJssel overall binnen een marge van ongeveer 5 cm aan het toetsingscriterium voldaan wordt. In Figuur 5.14 voor de Bovenrijn kan de invloed van de inzet van de dijkkring Ooij en

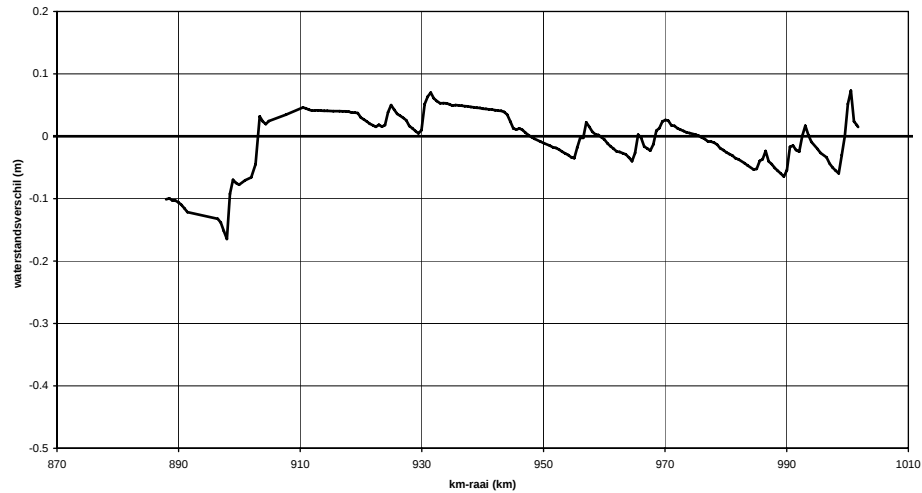
Millingen (km 866,5-867,0) herkend worden aan de sterke toename van het verhang bovenstrooms van de inlaat.



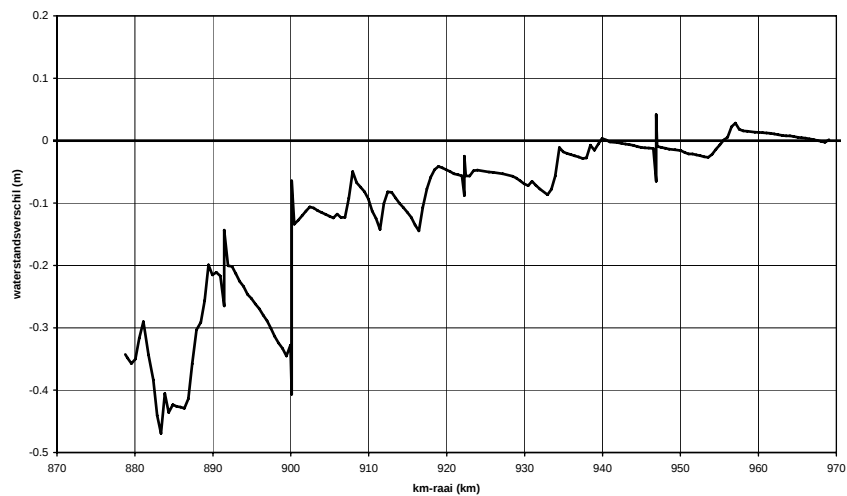
Figuur 5.14 Waterstandsverschil Bovenrijn, 17.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.15 Waterstandsverschil op de Waal, piekafvoer 17.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.16 Waterstandsverschil op de IJssel, piekafvoer 17.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.17 Waterstandsverschil op de Nederrijn/Lek, piekafvoer 17.000 m³/s, gemiddelde golfvorm

5.3.3 afvoergolven met piekafvoer 18.000 m³/s

Voor het opvangen van een golf met een piekafvoer van 18.000 m³/s zijn, naast het Rijnstrangengebied en de dijkkring Ooij en Millingen, ook het compartiment Betuwe Oost en - voor een brede afvoergolf - de IJsselse Weiden nodig.

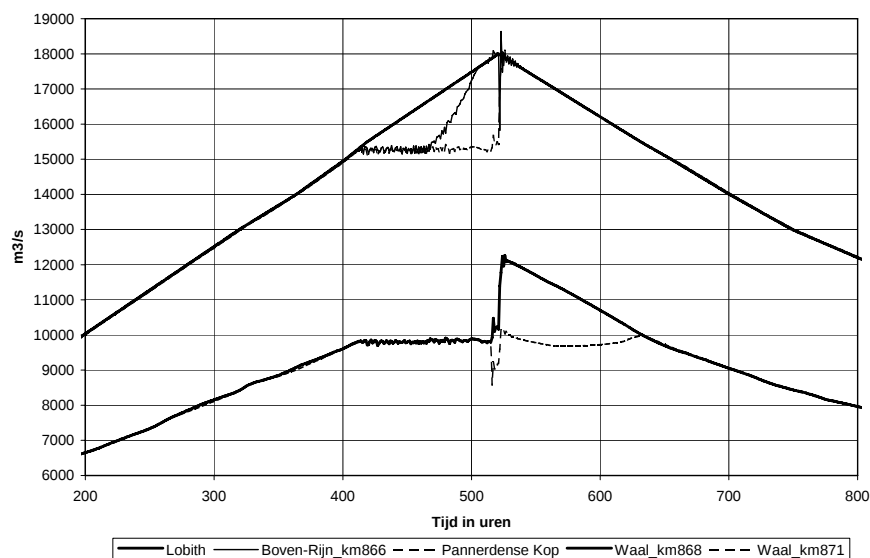
In de Figuren 5.18 t/m 5.21 worden voor de gemiddelde en de brede golfvorm steeds de afvoeren op verschillende lokaties in de rivier en over de inlaten van de noodoverloopgebieden gepresenteerd. Het aftoppen van de afvoergolf is steeds goed

zichtbaar evenals het verschijnsel dat de afvoer op een bepaalde lokatie in de rivier sterk oploopt wanneer het bovenstrooms gelegen noodoverloopgebied vol is. Verder benedenstrooms zorgen andere noodoverloopgebieden dan weer voor verdere aftopping. Benedenstrooms van de Betuwe Oost en de IJsselse Weiden kan piekafvoer tot onder de capaciteit van de riviertakken gereduceerd worden.

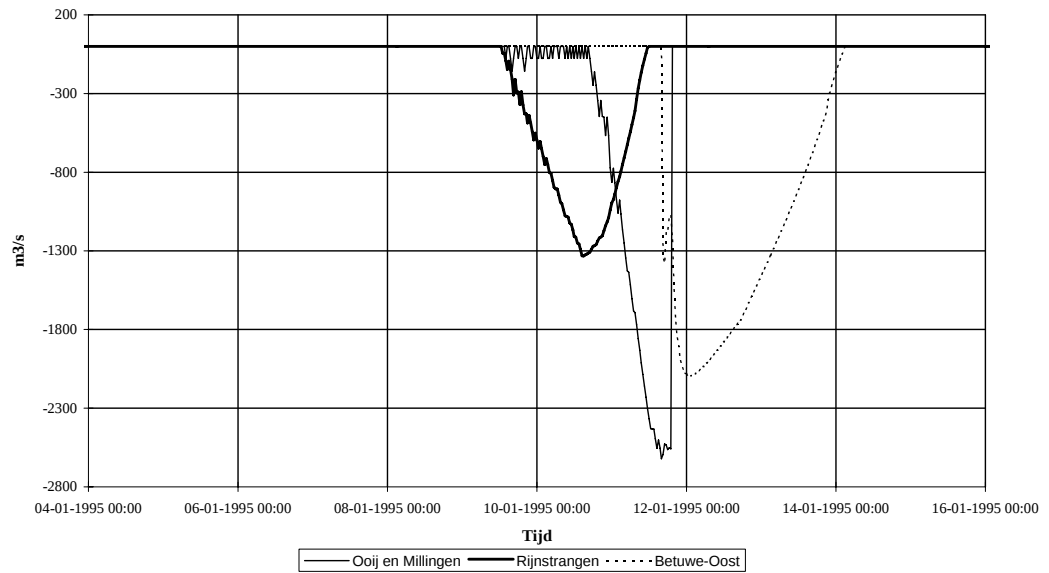
Alleen voor het geval, piekafvoer is $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$, 75% kwantiel golfvorm, is er in het model een noodoverloopgebied ingericht langs de IJssel. Van het beschikbare volume van dit gebied (77 M m^3) is ca. een kwart nodig (20 M m^3) om de nood op de IJssel te lenigen. Hoewel er voor dit geval geen noodoverloopgebied is ingericht langs de Nederrijn, blijkt uit de modelresultaten dat er ca. 12 M m^3 moet worden geborgen om op het referentiedebiet te komen.

Ook voor de gevallen, piekafvoer is $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 25% kwantiel en gemiddelde golfvorm, zullen (kleine) noodoverloopgebieden langs de IJssel en de Nederrijn nodig zijn om op het referentiedebiet uit te komen (zie Tabel 5.2; in de resultaten van deze twee gevallen komt de beïnvloeding door de inrichting van noodoverloopgebieden in beide riviertakken niet tot uiting).

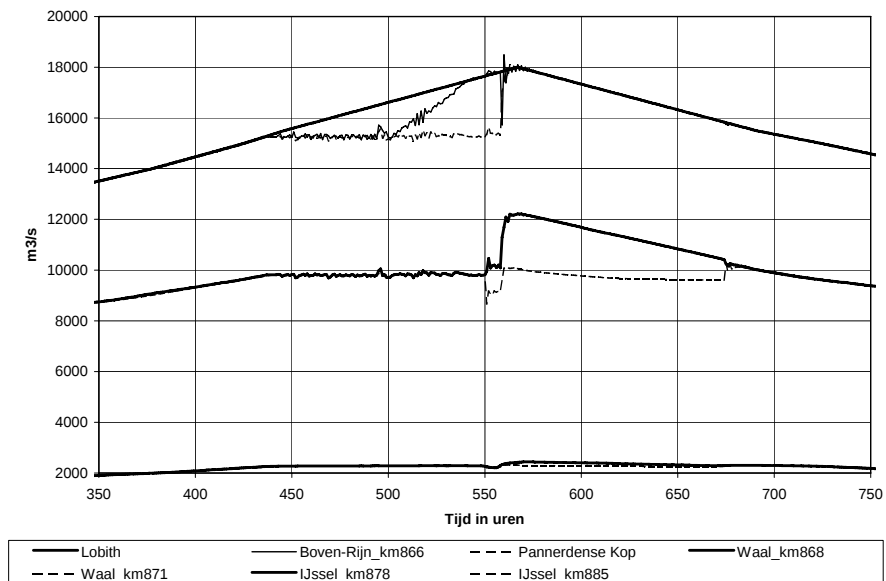
De figuren met de inlaatdebieten vertonen vergelijkbare patronen als in de vorige paragraaf besproken zijn.



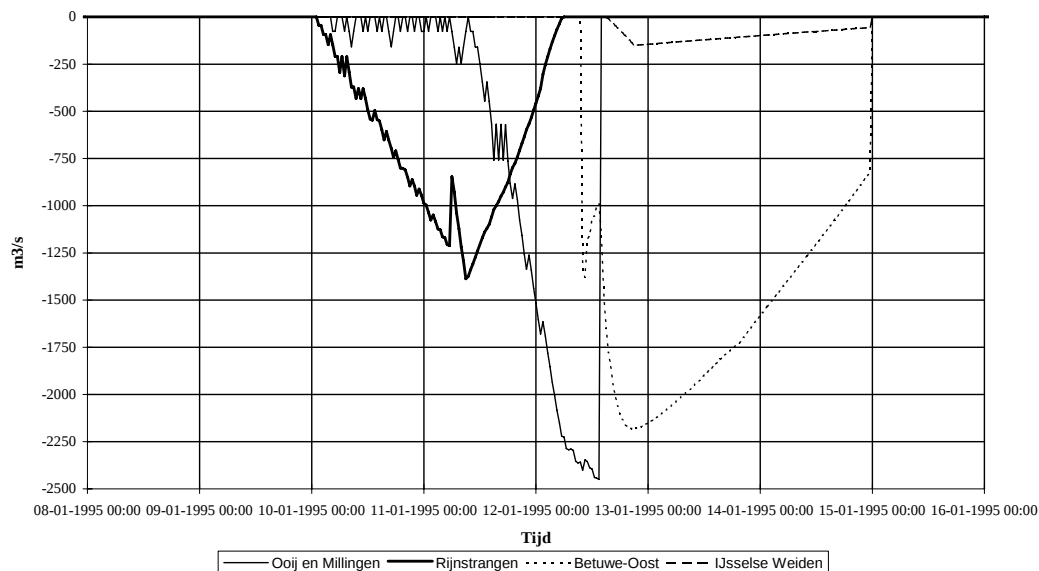
Figuur 5.18 Effect noodoverloopgebieden Rijnstrangen, Ooij en Millingen en Betuwe-Oost. Debietverloop Bovenrijn en Waal bij piekafvoer van $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en gemiddelde golfvorm



Figuur 5.19 Afvoerterloop naar noodoverloopgebieden Rijnstrangen (Tolkamer), Ooij en Millingen (Millingen) en Betuwe-Oost (Gendt) bij een piekafvoer van 18.000 m³/s en gemiddelde golfvorm



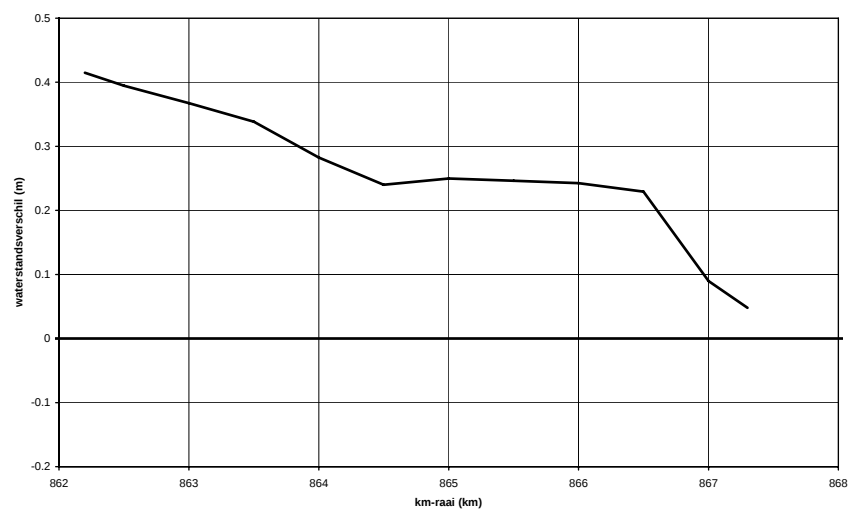
Figuur 5.20 Effect noodoverloopgebieden Rijnstrangen, Ooij en Millingen, Betuwe-Oost en IJsselse Weiden. Debietverloop Bovenrijn, Waal en IJssel bij een piekafvoer van 18.000 m³/s en een 75% kwantiel golfvorm



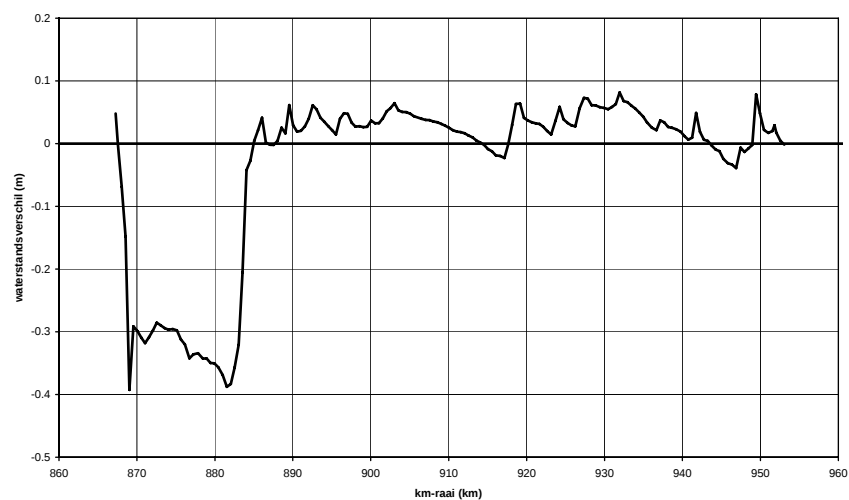
Figuur 5.21 Afvoerterloop naar noodoverlooptgebieden Rijnstrangen (Tolkamer), Ooij en Millingen (Millingen), Betuwe-Oost (Gendt) en IJsselse Weiden (Angerlo) bij een piekafvoer van 18.000 m³/s en een 75% kwantiel golfvorm

In Figures 5.22 t/m 5.25 zijn de maximale waterstanden in de Bovenrijn, Waal, Nederrijn en IJssel vergeleken met de MHW's. Zichtbaar is dat wederom voor de Waal en de Nederrijn overal binnen een marge van 5-10 cm aan het toetsingscriterium voldaan wordt. De maximale waterstanden langs de IJssel zijn bijna 15 cm hoger dan gewenst; dit is het gevolg van een kortdurende afvoerpiek die ontstaat als gevolg van het regelen van de inlaten. Door een optimalisatie van de regeling kan de maximale waterstand verlaagd worden zonder verdere inzet van extra noodoverlooptgebieden.

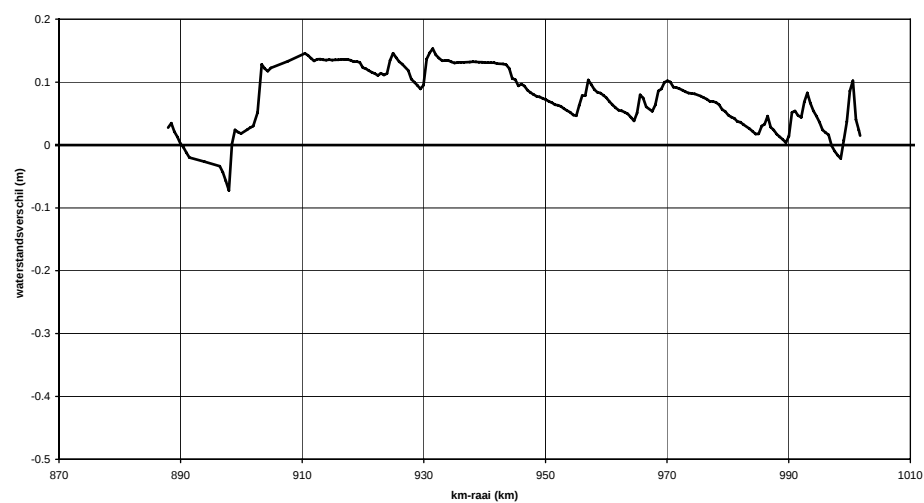
Dat het Rijnstrangengebied en de dijkkring Ooij en Millingen op een gegeven moment vol zijn, is goed zichtbaar in Figures 5.22 en 5.23. Vanaf het bovenstroomse einde van de Waal - de locatie van de inlaat van Betuwe Oost - neemt het verhang sterk toe als gevolg van de hoge piekafvoeren. De aftopping werkt alleen volledig benedenstrooms van deze lokatie. In de IJssel bovenstrooms van de IJsselse Weiden en langs het Pannerdens Kanaal is voor de brede afvoergolf een soortgelijk verschijnsel zichtbaar.



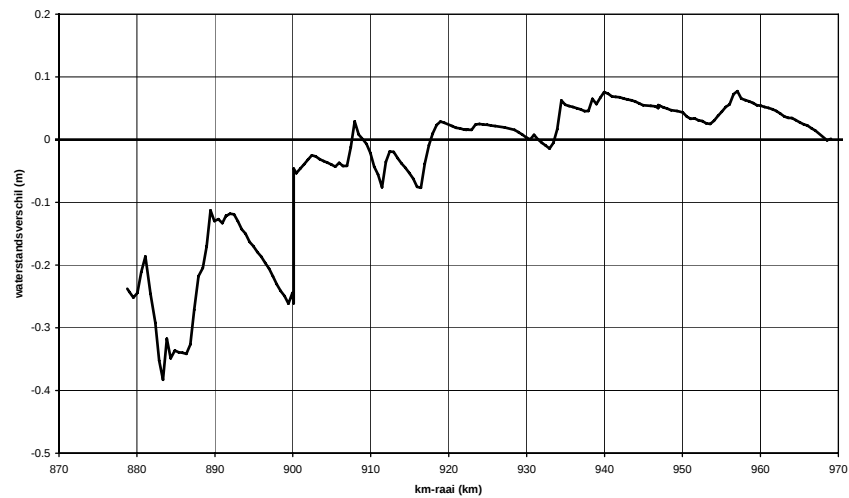
Figuur 5.22 Waterstandsverschil Bovenrijn, 18.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.23. Waterstandsverschil op de Waal, piekafvoer 18.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.24 Waterstandsverschil op de IJssel, piekafvoer 18.000 m³/s, gemiddelde golfvorm



Figuur 5.25 Waterstandsverschil op de Nederrijn/Lek, piekafvoer 18.000 m³/s, gemiddelde golfvorm

5.4 Aanvullende informatie

In de onderstaande tabellen is voor de simulaties die in de voorgaande paragrafen zijn besproken aanvullende informatie gegeven over:

- de afvoerverdeling over de Rijntakken
- de overlaatbreedtes

In Tabel 5.3 is de maximale afvoeren in de Rijntakken tijdens de verschillende afvoergolven weergegeven bij inzet van de noodoverloopgebieden. De gepresenteerde debieten zijn dus afkomstige uit instationaire berekeningen.

Tabel 5.3 Afvoerverdeling per afvoergolf met inzet noodoverloopgebieden

	15250	16000			17000	18000				
	gemid.	25%	gemid	75%	25%	gemid.	75%	25%	gemid.	75%
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Waal	9816	9870	9834	9850	9914	9885	10742	11818	12263	12218
Pannerdens Kanaal	5,15	5460	5455	5455	5465	5470	5585	5895	5871	5879
Nederrijn/Lek	3146	3180	3175	3175	3180	3180	3214	3305	3313	3319
IJssel	2266	2285	2285	2285	2285	2285	2313	2410	2416	2440

De overlaatbreedtes die in de verschillende simulaties is toegepast zijn weergegeven in de onderstaande Tabel 5.4. De breedtes zijn niet geoptimaliseerd.

Tabel 5.4 Overlaatbreedtes (in meter) per golfvorm

	15250 gemid.	16000			17000			18000		
		25%	gemid.	75%	25%	gemid.	75%	25%	gemid.	75%
Rijnstrangen	-	500	500	500	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ooij en Millingen	-	-	-	-	1000	1000	1500	1500	1500	1500
Betuwe Oost	-	-	-	-	-	-	1000	1000	1500	1500
IJsselse Weiden	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1000

5.5 Conclusies

Langs de riviertrajecten bovenstrooms van de noodoverloopgebieden moeten voor de afvoergolven met piekafvoeren van 17.000 en 18.000 m³/s additionele maatregelen genomen worden om te voorkomen dat de maatgevende afvoer overschreden wordt. Om ook brede golven (75 % kwantiel) zonder calamiteiten met de noodoverloopgebieden af te toppen, moet de afvoercapaciteit van de Bovenrijn verhoogd worden naar 16.250 m³/s. Bij brede golven met piekafvoeren van 18.000 m³/s bij Lobith zal de afvoercapaciteit van de Bovenrijn 18.000 m³/s moeten zijn.

Uit het onderzoek kunnen verder de volgende conclusies getrokken worden:

- alle onderzochte golfvormen met een piekafvoer van 16.000 m³/s kunnen worden opgevangen door inzet van het Rijnstrangengebied. Het benodigde ruimtebeslag is derhalve 3.154 ha. De inundatiediepte is afhankelijk van de vorm van de afvoergolf en varieert tussen 1,8 en 3,1 m.
- voor golven met een piekafvoer van 17.000 m³/s moeten naast het Rijnstrangengebied ook de dijkkring Ooij en Millingen en - voor brede golven - het compartiment Betuwe Oost. Het ruimtebeslag is derhalve 7.529 tot 14.029 ha met een inundatiediepte wederom afhankelijk van de vorm van de golf variërend tussen gemiddeld 2,4 en 3,7 m.
- bij een piekhoogte van 18.000 m³/s en een brede golfvorm is aanvullend nog de inzet van de IJssel Weiden nodig. Betuwe Oost wordt in alle gevallen ingezet. Het ruimtebeslag is derhalve 14.029 tot 18.404 ha met een gemiddelde inundatiediepte tussen 3,1 en 4,0 m

Bovengenoemde oppervlakken zijn relatief groot omdat aangenomen is dat een noodoverloopgebied bij inzet in zijn geheel zal onderstromen. Afhankelijk van de optredende afvoergolf zal de inundatiediepte echter variëren. Om het ruimtebeslag te beperken is verdere optimalisatie van de inrichting van de noodoverloopgebieden nodig. Verdere compartimentering kan de gemiddelde inundatiediepte vergroten en het ruimtebeslag verkleinen.

De debieten waarmee de noodoverloopgebieden volstromen kunnen tijdelijk heel hoog zijn (tot > 2.000 m³/s). Door optimalisatie van de regeling van de inlaten, kunnen de instroomdebieten binnen zekere grenzen beperkt kunnen worden. Hetzelfde geldt voor de afvoerpieken die optreden na het sluiten van noodoverloopgebieden. Hierbij kan gedacht worden aan beter anticiperen op de verwachte afvoer bij Lobith (hoogwatervoorspelling) en op basis daarvan het eerder inzetten van noodoverloopgebieden.

Inzet van meerdere noodoverloopgebieden tegelijkertijd kan afvlakkend werken. Daarnaast moet ook bijvoorbeeld door middel van gestuurde doorstroming door noodoverloopgebieden (stromende berging).

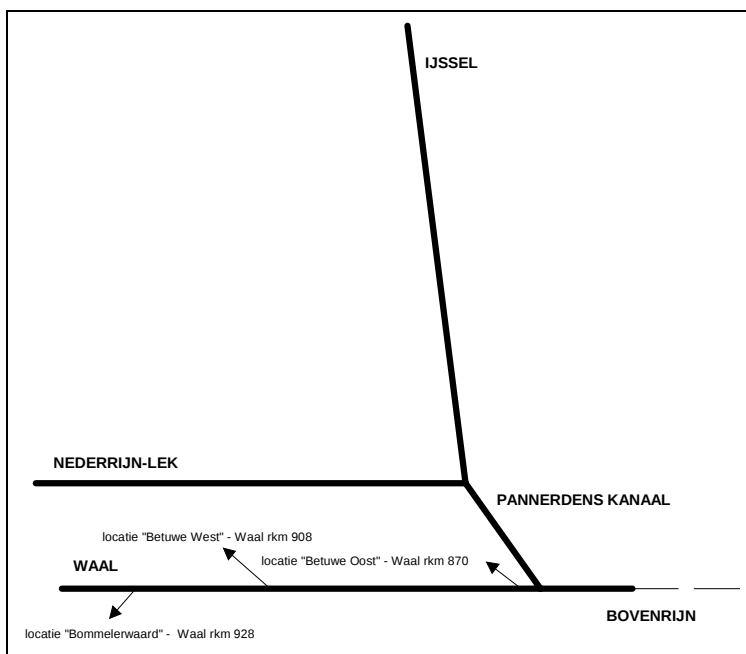
De noodoverloopgebieden die in de voorgaande paragrafen onderzocht zijn, corresponderen voor een deel met de gebieden die voorzien zijn als onderdeel van het reguliere hoogwaterbeschermingssysteem langs de Rijntakken. Het Rijnstrangengebied en de Ooijpolder zijn namelijk ook nadrukkelijk in beeld als retentiegebied. Indien zij onderdeel gaan uitmaken van het systeem dat de veiligheid langs de Rijntakken moet garanderen tot een maatgevende afvoer bij Lobith met een herhalingstijd van 1250 jaar, zullen alternatieve gebieden geselecteerd moeten worden als noodoverloopgebied.

6 Invloed locatie noodoverloop langs een rivier

De invloed van de locatie van een noodoverloopgebied langs een riviertak op het effect van gecontroleerd overstromen is onderzocht in een drietal modelsimulaties. Als randvoorwaarde bij Lobith is daartoe een gemiddelde afvoergolf met een piekafvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ opgelegd.

Als noodoverloopgebied is een fictief bekken genomen met een oppervlak van 6.500 ha. Dit bekken is achtereenvolgens op drie verschillende locaties langs de Waal gesitueerd (zie Figuur 6.1):

- direct benedenstrooms van de Pannerdense Kop (km 870)
- ongeveer 38 km stroomafwaarts van de splitsing ter hoogte van Ochten (km 908), overeenkomend met de locatie van het compartiment Betuwe West;
- ongeveer 58 km stroomafwaarts van de splitsing (km 928), overeenkomend met de locatie van het compartiment Bommelerwaard.

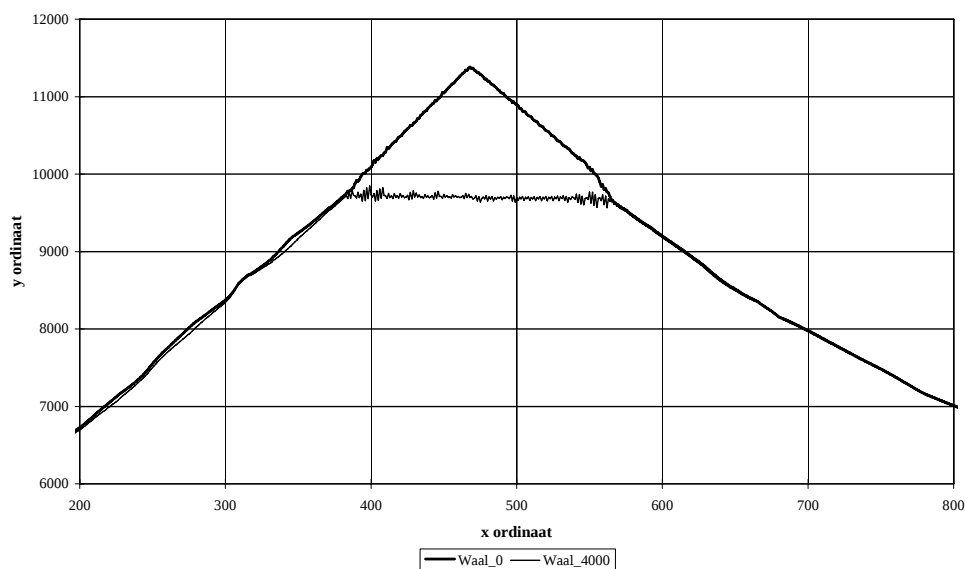


Figuur 6.1 Schematische weergave locatie noodoverloopgebieden

De overlaathoogte is analoog aan de overige simulaties gesteld op de vergelijkingsbasis minus 1 meter en de overlaatbreedte is in alle gevallen 1500 m. De regeling van de overlaat gebeurt op dezelfde wijze als eerder in Hoofdstuk 5 is aangegeven. De gemiddelde maaiveldhoogte is voor alle noodoverloopgebieden gelijk gehouden en zodanig gekozen dat steeds sprake is van een vrije overlaat.

De capaciteit van de geschematiseerde noodoverloopgebieden is op deze wijze voldoende groot om de afvoercapaciteit van de Waal benedenstrooms van de inlaat - ongeveer $9.700 \text{ m}^3/\text{s}$ - niet te overschrijden.

Figuur 6.2 laat zien dat de afvoergolf door het noodoverloopgebied ter plaatse van het compartiment Betuwe Oost op de gewenste wijze wordt afgetopt.

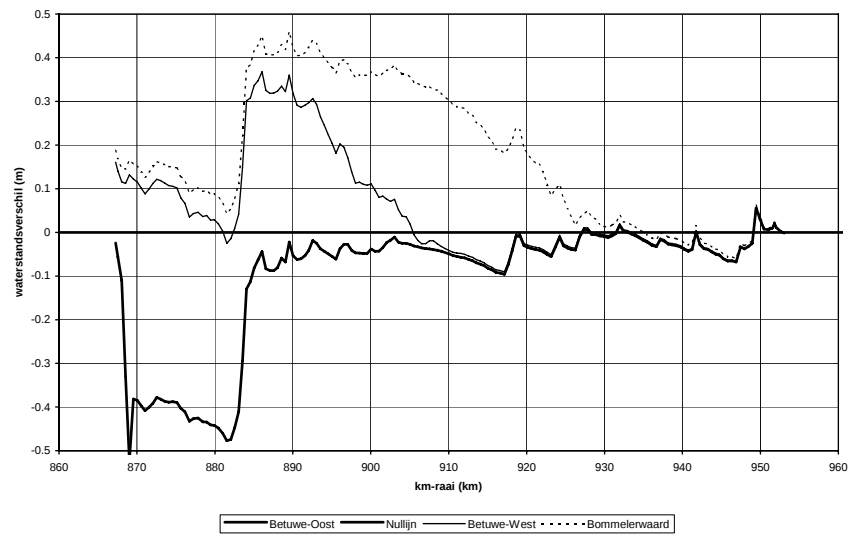


Figuur 6.2 Afvoerverloop van de Waal boven- en benedenstrooms van het noodoverloopgebied Betuwe-Oost

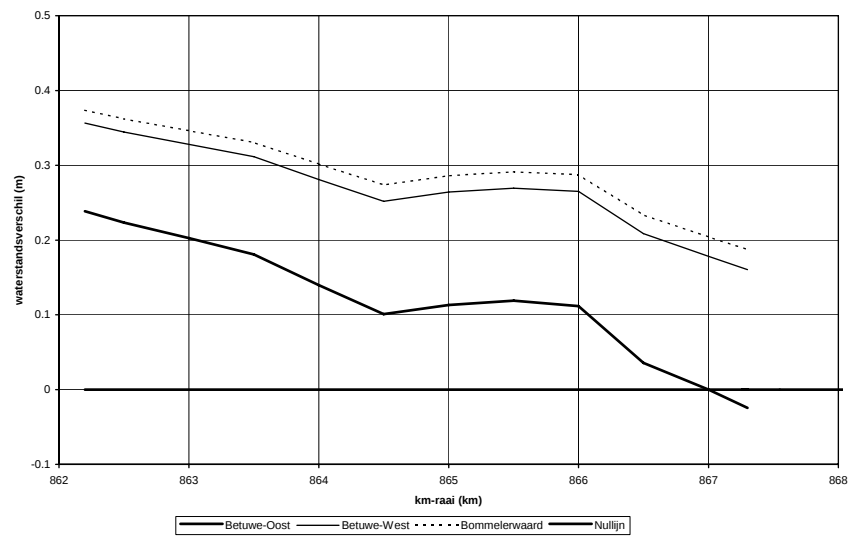
Voor de Waal is in Figuur 6.3 het waterstandsverschil ten opzichte van de vergelijkingsbasis weergegeven voor de drie berekeningen. Wanneer het noodoverloopgebied zich vrijwel aan het begin van de Waal bevindt (Betuwe-Oost), wordt er in de gehele riviertak aan het toetsingscriterium voldaan. Bij verder stroomsafwaarts gesitueerde noodoverloopgebieden zullen langs het riviertraject bovenstrooms van de inlaat additionele maatregelen genomen moeten worden om te voorkomen dat overschrijding van de vergelijkingsbasis plaats vindt.

In Figuren 6.4 t/m 6.6 zijn de maximale waterstanden ten opzichte van de vergelijkingsbasis weergegeven voor de overige riviertakken. Zichtbaar is dat een noodoverloopgebied langs de Waal met de gekozen capaciteit niet voldoende is om aan het toetsingscriterium in de overige riviertakken te voldoen met uitzondering van het bovenstroomse deel van de Nederrijn tot Wageningen en het Pannerdense Kanaal.

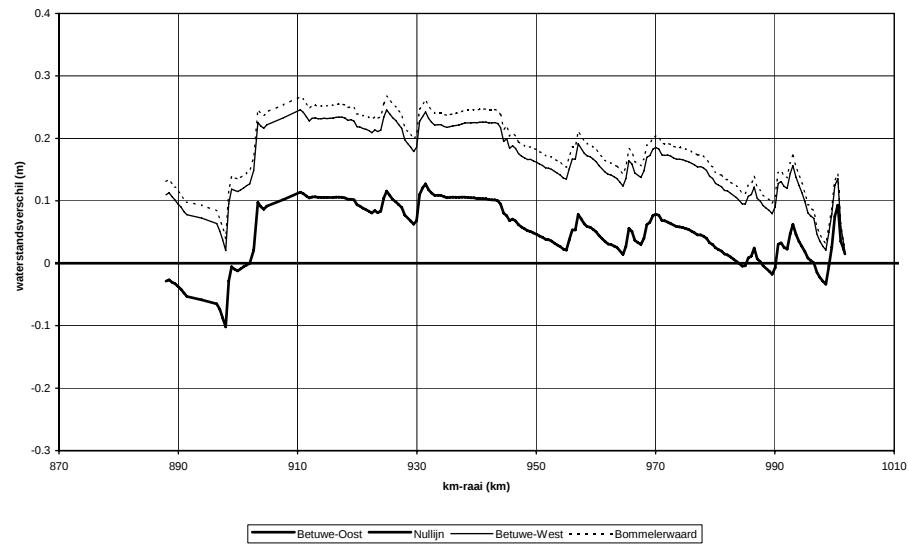
Een ander belangrijk aspect is de invloed van een situering ten opzichte van het splitsingspunt Pannerdense Kop. Situering ter plaatse van het compartiment Betuwe Oost heeft een duidelijke invloed op de afvoerverdeling op het splitsingspunt. De maximale afvoer richting Waal is groter dan wanneer de een noodoverloopgebied verder benedenstroomse aangetakt wordt. Een noodoverloopgebied op relatief korte afstand benedenstrooms van een splitsingspunt heeft derhalve een waterstandsverlagend effect in beide takken.



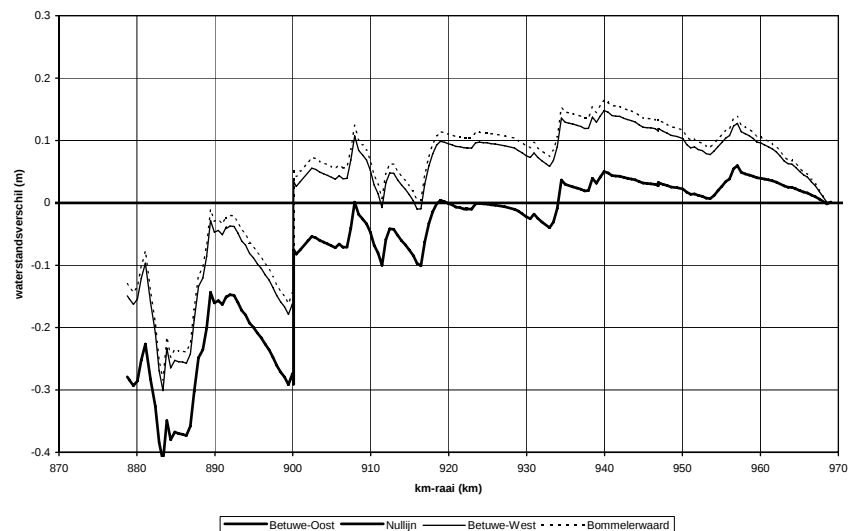
Figuur 6.3 Waterstandsverschil op de Waal voor 3 situaties



Figuur 6.4 Waterstandsverschil op de Boven-Rijn voor 3 situaties



Figuur 6.5 Waterstandsverschil op de IJssel voor 3 situaties



Figuur 6.6 Waterstandsverschil op de Nederrijn/Lek voor 3 situaties

Tenslotte moet nog geconcludeerd worden dat het volume dat in de drie noodoverloopgebieden geborgen wordt afneemt naarmate het gebied verder benedenstrooms wordt gelegd. Dit is het gevolg van het afvlakken van de afvoergolf. De naar het noodoverloopgebied afgevoerde volumina bedragen respectievelijk 294, 248 en 236 M m³. Deze conclusie is echter niet algemeen geldig en wordt mede bepaald door de riviergeometrie.

Referenties

- RIZA & WL | Delft Hydraulics, augustus 1999. Structuur onderzoek, Ruimte voor Rijntakken, RVR-rapport 99.03.
- RIZA & WL | Delft Hydraulics, augustus 1999. Resultaten hydraulische screening van maatregelen, Ruimte voor Rijntakken, RVR-rapport 99.04.
- RIZA & WL | Delft Hydraulics, augustus 1999. Samenstelling en hydraulische analyse van inrichtingsalternatieven, Ruimte voor Rijntakken, RVR-rapport 99.05.
- RIZA & WL | Delft Hydraulics, augustus 1999. Beknopte gebruikershandleiding RvR-instrumentarium, Ruimte voor Rijntakken, Rapport 99.09.
- RWS Bouwdienst, juni 1999. Ruimte voor de Rijntakken, Verkenning Retentiebekkens, RVR-rapport 99.035.
- HKV, september 1999. Golfvormgenerator: Applicatie Standaard Afvoergolven Maas en Rijn. PR279.10.
- WL | Delft Hydraulics, 2000. Hoogwaterstanden op de Eem, Project H3658. Een benadering. DWW, Rijkswaterstaat.
- WL | Delft Hydraulics, 2000. Rivierkundige berekeningen Quick Scan Nijmegen, Project Q2733, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland.
- Silva, W., Klijn, F. en Dijkman, J., 2000. Ruimte voor Rijntakken, Water het onderzoek ons heeft geleerd. Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland, Rijkswaterstaat RIZA, WL | Delft Hydraulics.

BIJLAGEN

A Overzicht maatregelen in referentie

Tabel A1 Overzicht van alle in het model opgenomen maatregelen

code	van km-raai	tot km-raai	tak	oever	oever	omschrijving	haalbaarheid
800	927		W		R	steenfabriek in bocht (Heesselt)	1
1001	936.4	937.2	W	L		voormalige. steenfabriek (Gameren)	1
1502	872	873.5	W		R	kade benedenstrooms Hulhuizen	1
1801	888.5		W	L		kade	1
1803	888.5		W		R	kade (Valburg)	1
1900	889.5		W	L		steenfabriek	2
2202	901.5	902	W		R	steenfabriek	1
2800	917.5	919.5	W		R	vernuwing (Ophemert)	2
3201	941.5		W		R	steenfabriek (Herwijnen)	1
3501	869		W			hoogwatervrij terrein benedenstrooms Millingen	1
3600	900		W	L		steenfabriek	2
3900	931		W		R	steenfabriek (Opijnen)	2
4703	873.5		PK		R	bekading de Keel	1
4801	883	883.5	NR	L		bekading haven	2
4900	887.5		NR	L	R	landhoofd spoorbrug Oosterbeek	1
5000	900.2		NR	L	R	veerstoeplexkesveer	1
5200	912		NR	L		steenfabriek	1
5301	917		NR		R	steenfabriek (Elst)/machinistenschool	1
5603	939.5		NR	L		spoorbrug	2
6301	891.5		NR	L	R	weg naar sluis Driel	1
6702	901	902	NR	L		kaden, bebouwing (Wageningen)	1
7002	906		NR	L	R	veerstoeplex Opheusden	1
7800	923.5		NR	L		bebouwing Maurik	1
8001	930.9		NR		R	steenfabriek	1
8101	933.5		NR	L		vernuwing	2
8103	933.5		NR	L	R	veerstoeplex	2
8700	880		NR		R	kade Koningspleij, Arnhem	1
10301	885	886	IJ		R	kade	1
10305	885	886	IJ	L		kade	1
10602	903		IJ	L		bebouwing	2
10900	924		IJ		R	vernuwing (Bronsbergen)	2
11202	882.9	883	IJ		R	bebouwing	1
11203	882.9	883	IJ		R	kaden	1
11500	891	892.5	IJ	L		kade (Weertsdijk)	1
11901	956.9		IJ	L	R	veerstoeplex (Welsum)	1
12000	965.5	966	IJ	L	R	vernuwing (Wijhe)	1
12501	990.8		IJ		R	kaden	1
12600	880.9		IJ	L		landhoofd brug	2
12701	881.5		IJ		R	havenkade	1
13601	969		IJ		R	kade	1
14100	984		IJ	L		kade (Zalk)	1
14201	985.1		IJ	L		veerstoeplex, bosjes (Zalk)	1
14300	986	987	IJ	L		kaden	1
20501	897.2	880.2	IJ		R	Grootschalige dijkverlegging Hondsbroeksche Pleij	
30204	885.3	886.5	W		R	dijkverlegging Hof van Holland	1
30205	888.2	888.8	W		R	dijkverlegging Oosterhout	1
30206	891	893.5	W		R	dijkverlegging Loenensche Buitenpolder	1
30207	895.8	897.1	W	L		dijkverlegging Winssen	1
30208	895.8	897.4	W		R	dijkverlegging Dodewaard	1
30212	923.7	924.8	W		R	dijkverlegging Heesselt	1
30213	947.3	948.6	W	L		dijkverlegging Leuvense veld	1
30214	948.4	950.3	W	L		dijkverlegging Beneden Waarden	1

code	van km-raai	tot km-raai	tak	oever	oever	omschrijving	haalbaarheid
30401	880.2	881.7	NR	L		dijkverlegging Malburgse veerweg	1
30402	888.1	890.8	NR	L		dijkverlegging Ringdijk-oost	1
30403	907.1	908.3	NR	L		dijkverlegging Marsdijk	1
30405	938.2	938.9	NR	L		dijkverlegging Beusichemse dijk	1
30406	954	957.7	NR		R	dijkverlegging Lopik	1
30407	969.3	970.7	NR		R	dijkverlegging Schoonhoven	1
30505	930.2	932.9	IJ	L		dijkverlegging Rammelwaard	1
30506	969.2	970.7	IJ	L		dijkverlegging Werven	1
30508	992.3	994.3	IJ		R	dijkverlegging IJsselmuiden	1
30509	999	1001.5	IJ	L		dijkverlegging Kampen	1
R7311	886.2	890.3	NL		R	Uiterwaardplan	
R8861	886.5	889.9	NL		R	Uiterwaardplan	
W0821	871.4	878.2	W		R	Uiterwaardplan	
W8411	950	952.2	W	L		Uiterwaardplan	

Bijlage B
Alternatieve methode
golfvormbepaling

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Basisgegevens	2-1
3	Golfduren en golfvolumes	3-1
3.1	Golfduren	3-1
3.2	Golfvolume	3-3
4	Referenties	4-1

I Inleiding

In deze bijlage wordt de alternatieve methode voor de golfvormbepaling toegelicht.

2 Basisgegevens

Gebruik is gemaakt van alle Rijnafoeren bij Lobith met een piekwaarde groter dan 8.000 m³/s uit het bestand 'invoer Rijn.csv', waarop gecorrigeerde afvoergolven voorkomen uit de periodes aangegeven in Tabel 2-1. Deze reeks beslaat de periode 1901-1995. De reeks is aangevuld met de afvoergolf van 1998 uit het bestand 'QLobith0199.xls', die eveneens aan het criterium piekwaarde groter dan 8.000 m³/s voldoet. Controle van afvoerwaarden geeft aan dat de afvoeren zijn genomen uit het DONAR-bestand. Het betreft afvoeren berekend uit waterstanden met een waterstands-afvoerrelatie. Voor de periode 01/01/1901-31/12/1988 zijn de afvoeren afgeleid uit 8.00-uurs waterstanden; daarna betreft het daggemiddelde (0-23 uur) debieten.

Tabel 2-1 Geanalyseerde afvoergolven van de Rijn bij Lobith

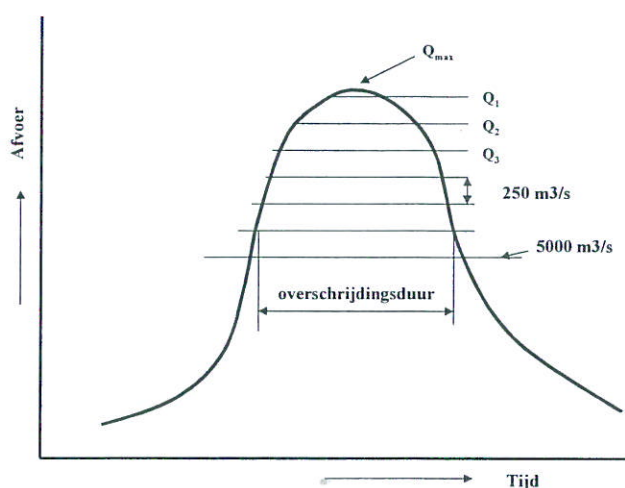
Periode	Piek	Qmax (m ³ /s)	Periode	Piek	Qmax (m ³ /s)
22/11/1919-21/01/1920	02/01/1920	10.000	02/12/1954-14/03/1955	21/01/1955	9.510
09/01/1920-24/02/1920	18/01/1920	11.365	06/02/1958-20/04/1958	01/03/1958	9.120
01/11/1924-23/11/1924	07/11/1924	9.300	26/01/1970-30/03/1970	27/02/1970	9.850
22/12/1925-22/01/1926	04/01/1926	12.280	24/01/1980-20/03/1980	09/02/1980	8.811
23/09/1930-31/12/1930	27/11/1930	9.075	27/02/1983-27/05/1983	15/04/1983	9.323
10/10/1939-12/01/1940	03/12/1939	8.610	23/05/1983-19/07/1983	31/05/1983	9.707
07/03/1942-01/05/1942	23/03/1942	8.475	26/12/1983-15/03/1984	11/02/1984	8.697
07/11/1944-14/01/1945	30/11/1944	8.295	06/03/1988-27/07/1988	30/03/1988	10.274
02/02/1945-20/03/1945	17/02/1945	8.585	12/12/1993-20/02/1994	25/12/1993	10.940
02/02/1946-13/04/1946	12/02/1946	9.140	29/12/1994-12/05/1995	31/01/1995	11.885
24/12/1947-01/03/1948	04/01/1948	9.785	30/10/1998-13/11/1998	04/11/1998	9.413

Uit Tabel 2-1 blijkt dat de afvoerpieken van alle geanalyseerde hoogwatergolven tussen 1 november en 15 april zijn opgetreden met uitzondering van de tweede afvoerpiek in 1983. Hieruit valt af te leiden dat de verzadigde bodemcondities in de winter voorwaarde zijn voor extreme afvoeren. Analyses (RIZA en WL, 2000) tonen aan dat de genese van afvoergolven echter sterk kan verschillen.

3 Golfduren en golfvolumes

3.1 Golfduren

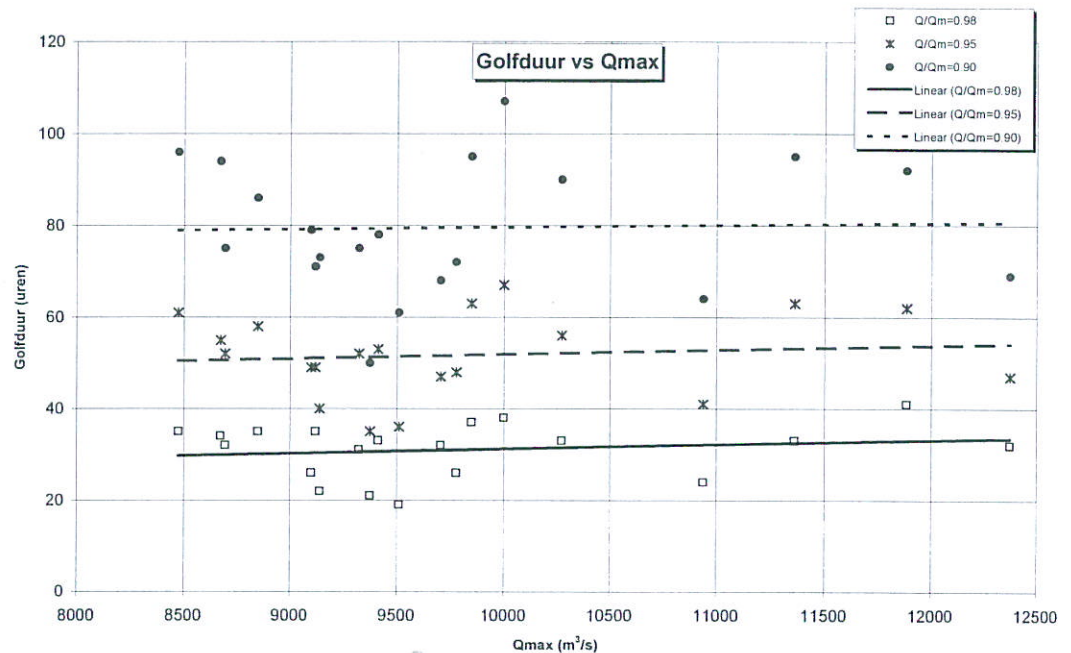
Overschrijdingsduren van de 22 afvoergolven zijn bepaald vanaf 5.000 m³/s met intervallen van 250 m³/s tot aan het golfmaximum, zie Figuur 3-1. De golfduren zijn vervolgens grafisch weergegeven als functie van $Q/Q_{\max}$. Voor vaste waarden van $Q/Q_{\max}$ (van 0,70 tot 0,99) zijn voor elke golf de overschrijdingsduren uit de grafieken afgelezen.



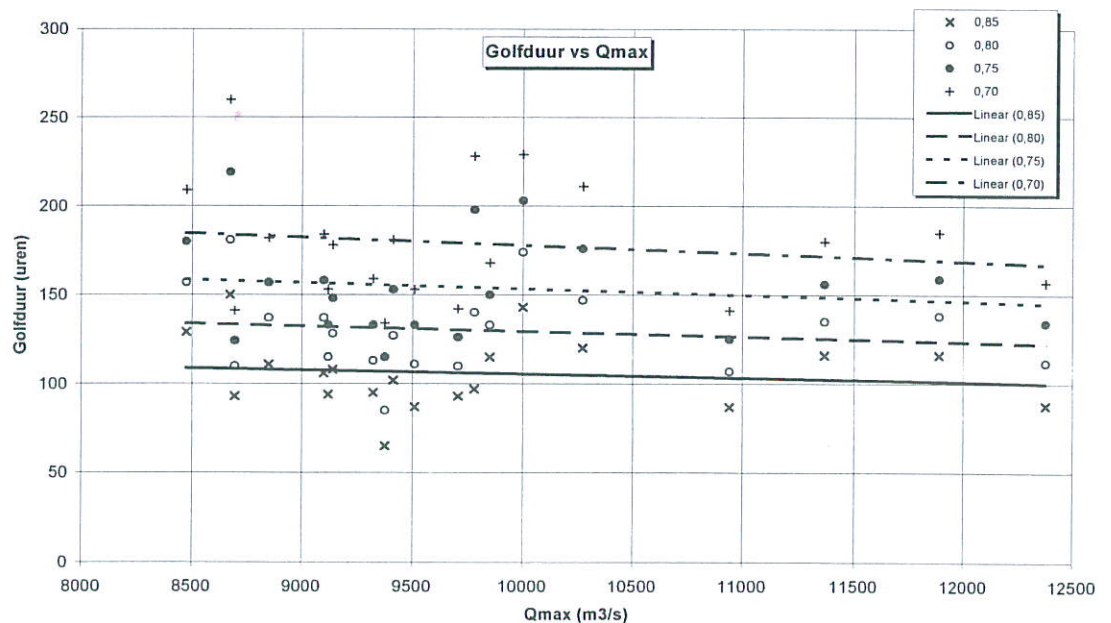
Figuur 3-1 Schets van gevolgde procedure voor bepaling van de overschrijdingsduur

Eerder is aangenomen dat de golfvorm onafhankelijk is van de piekwaarde; de golfduren zijn daardoor uit te drukken als functie van $Q/Q_{\max}$ (zie Sieben, 1998, 1999). Deze aanname is geverifieerd. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3-2 en Figuur 3-3. Hierin is voor verschillende waarden van $Q/Q_{\max}$ de golfduur als functie van $Q_{\max}$ aangegeven. De analyse toont aan dat de golfduur voor een vaste waarde van $Q/Q_{\max}$ inderdaad onafhankelijk is van $Q_{\max}$. Dit houdt in dat opschaling van afvoergolven althans voor afvoerwaarden $Q/Q_{\max} > 0,7$ geoorloofd is afgezien van mogelijke hydraulische beperkingen bij het opschalen van een afvoerniveau van 12.000 naar circa 16.000 m³/s, samenhangend met de genese van afvoergolven op de Rijn. In de figuren zijn de resultaten van de hoogwatergolven van 1944 en 1945 niet verwerkt daar zij sterk afwijken van het gedrag van de overige 20 hoogwatergolven. Daar zij tot de laagste piekafvoeren behoren zijn de hoogwaters verder niet in de analyses meegenomen, anders dan dat het effect van de twee golven op de statistiek van de golfduur is aangegeven. Het verdient aanbeveling de genese van deze hoogwatergolven in relatie tot de rest nader te onderzoeken.

De gemiddelde golfduur als functie van $Q/Q_{\max}$ en de 5% en 95% betrouwbaarheidsbanden van de golfduur zijn weergegeven in Figuur 3-4 tot en met Figuur 3-7, waarbij onderscheid is gemaakt tussen series met en zonder de hoogwatergolven van 1944 en 1945. Bij het bepalen van de betrouwbaarheidsbanden is een Student-verdeling aangenomen voor een bepaald afvoerniveau. Het effect van het wel of niet meenemen van de 1944 en 1945 hoogwaters wordt duidelijk zichtbaar bij een vergelijking tussen Figuur 3-6 en Figuur 3-7. Vooral voor lagere waarden van $Q/Q_{\max}$ wordt de spreiding groter door de genoemde hoogwaters.



Figuur 3-2 Golfduur als functie van $Q_{\max}$ voor diverse relatieve afvoerniveau's ($Q/Q_{\max}$)



Figuur 3-3 Golfduur als functie van $Q_{\max}$ voor diverse relatieve afvoerniveau's ($Q/Q_{\max}$)

Aangetoond kan worden dat het gepresenteerde verloop (met en zonder inachtnaam van de hoogwaters van 1944 en 1945) nogal afwijkt van de krommes die gepresenteerd zijn in (Sieben, 1998 en 1999); met name nabij de top is de golfduur groter dan eerder is aangenomen. Dit heeft consequenties voor golfdempingsberekeningen en bepaling van golfvolumina in de afvoerpiek, indien deze worden afgeleid door integratie van golfduur naar afvoerniveau.

3.2 Golfvolume

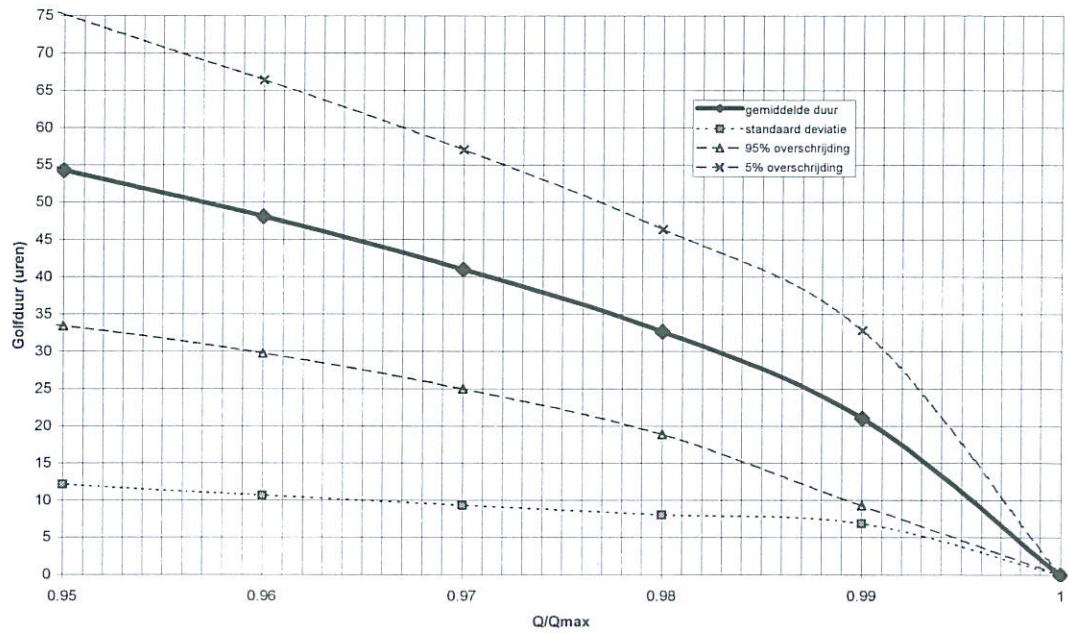
Analoog aan de procedure voor de golfduurbepaling is per golf voor afvoerintervallen van 250 m³/s het golfvolume in de top van de afvoergolf bepaald.

$$V_n = \frac{2}{3} T_1 (Q_{\max} - Q_1) + \sum_{i=2}^n \frac{(T_{i-1} + T_i)}{2} \times 250 \quad (3.1)$$

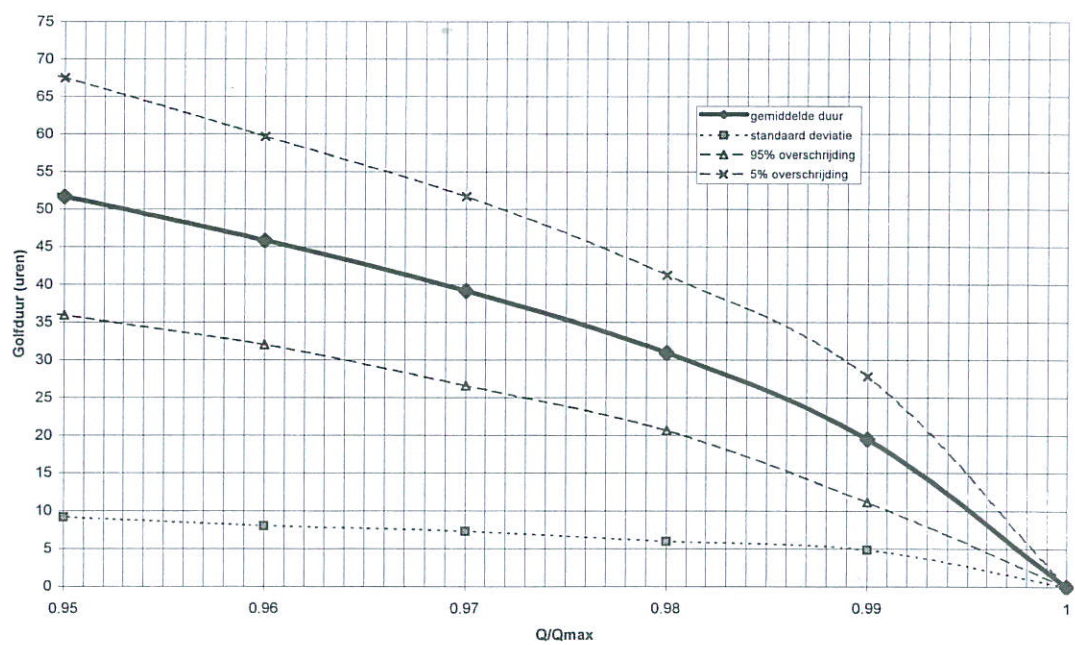
met: V_n = golfvolume bij interval n, gerekend vanaf de top van de afvoergolf;
 T_i = tijdsduur de afvoer zich boven drempelwaarde i bevindt; en
 Q_1 = afvoer bij het eerste 250-interval onder de afvoerpiek, zie Figuur 3-1.

Bij de volumebepaling is voor de top een parabolisch verloop aangenomen.

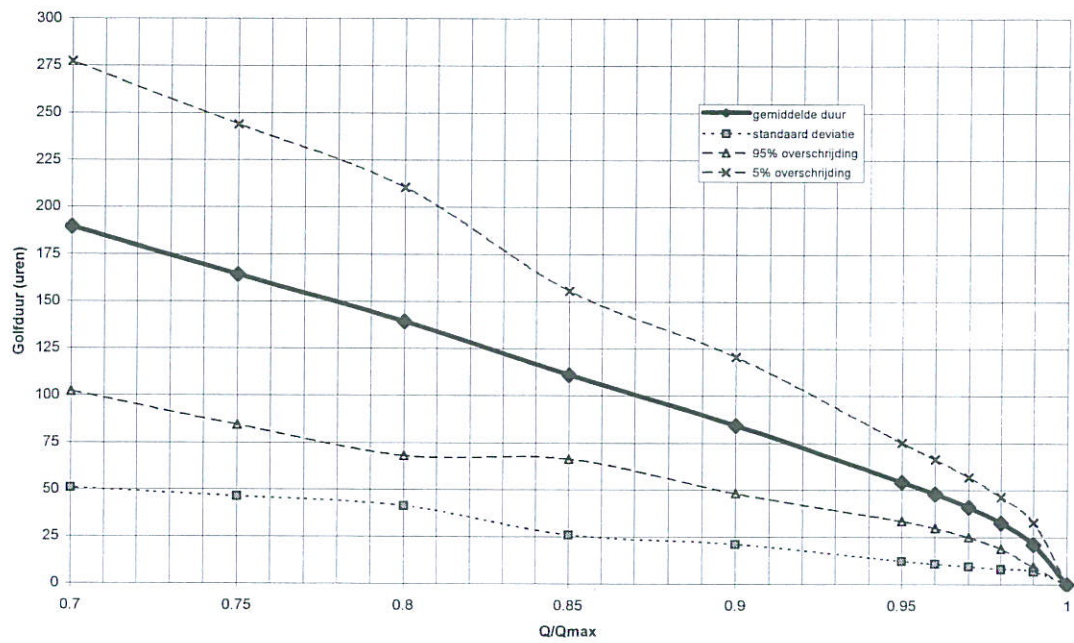
Omdat de golfduur enkel een functie is van $Q/Q_{\max}$, zoals eerder is aangetoond, volgt dat $V/Q_{\max}$ ook enkel een functie van $Q/Q_{\max}$ zal zijn en niet varieert met $Q_{\max}$. Dit wordt volledig bevestigd door Figuur 3-8. Zoals voorheen zijn in deze figuur de hoogwatergolven van 1944 en 1945 niet meegenomen. Worden deze twee wel meegenomen dan lijkt $V/Q_{\max}$ licht af te nemen bij toenemende $Q_{\max}$, voor lagere waarden van $Q/Q_{\max}$, zie Figuur 3-9.



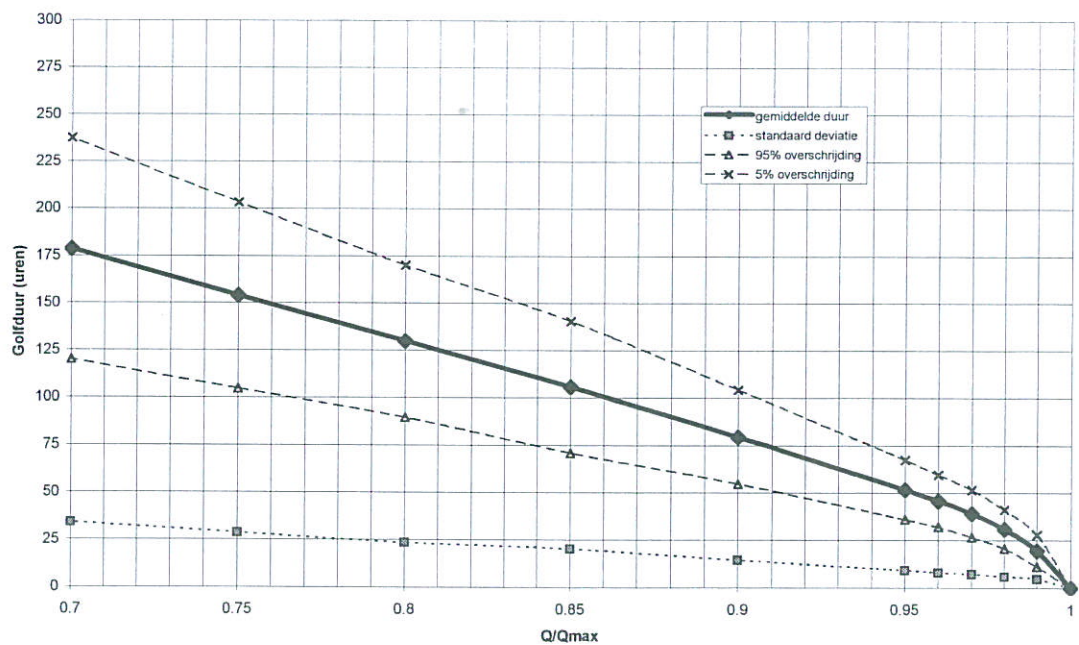
Figuur 3-4 Golfduurstatistieken voor $0,95 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,99$ met hoogwatergolven 1944 en 1945



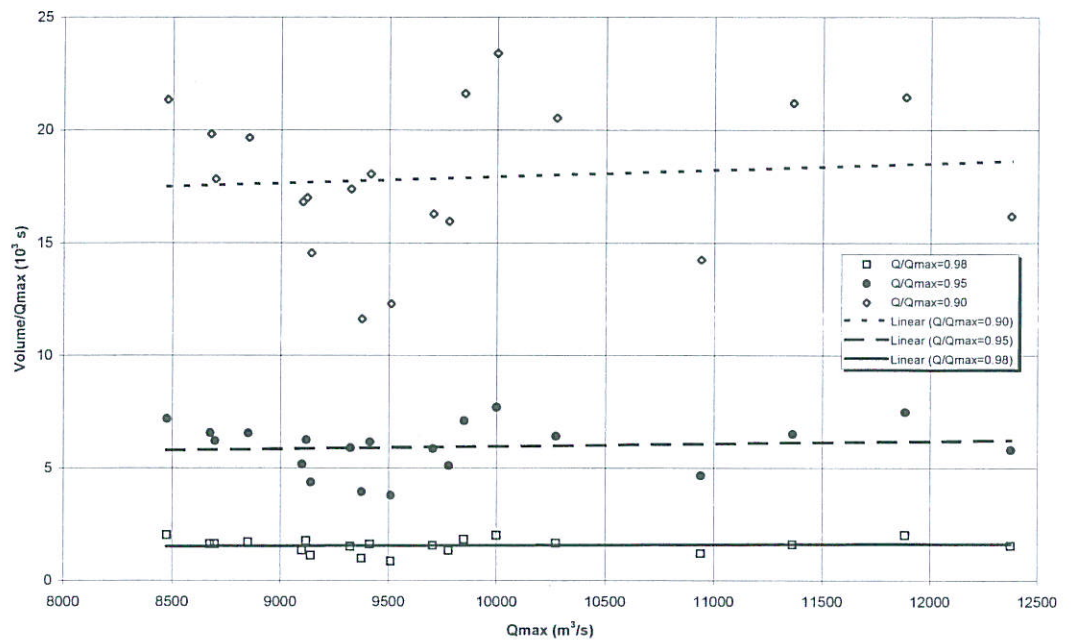
Figuur 3-5 Golfduurstatistieken voor $0,95 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,99$ zonder hoogwatergolven 1944 en 1945



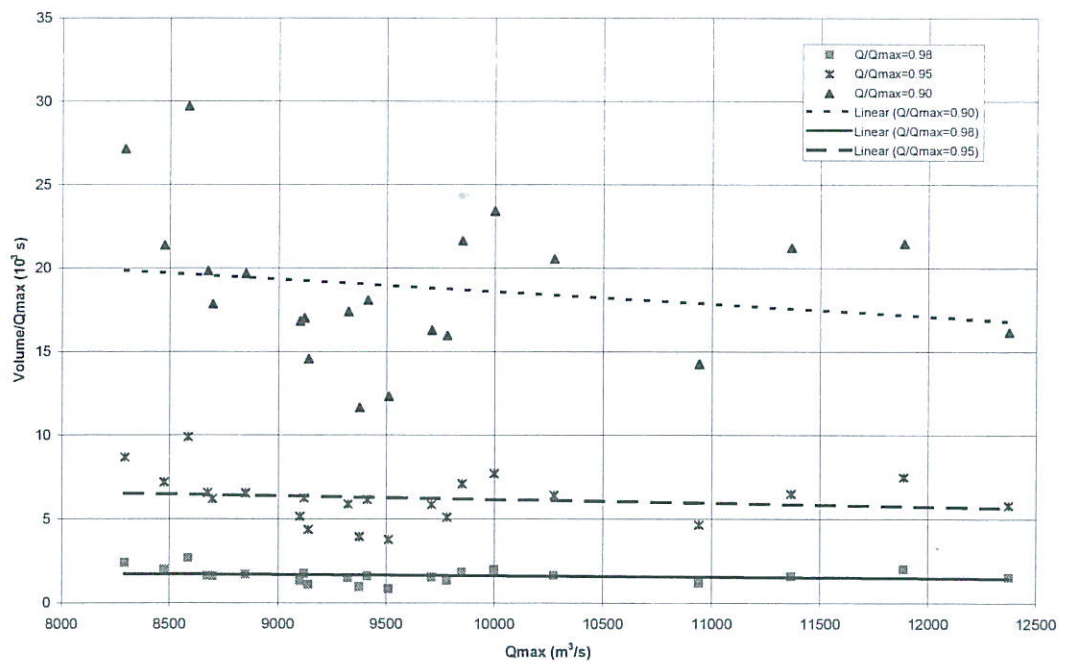
Figuur 3-6 Golfduurstatistieken voor $0,70 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,99$ met hoogwatergolven 1944 en 1945



Figuur 3-7 Golfduurstatistieken voor $0,70 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,99$ zonder hoogwatergolven 1944 en 1945

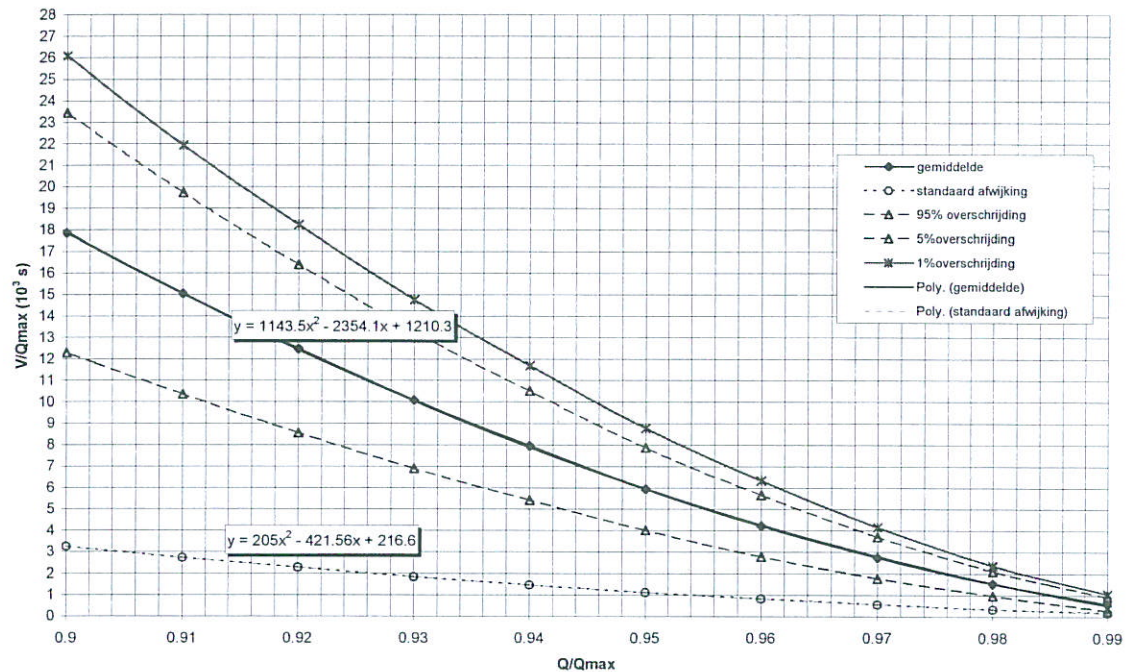


Figuur 3-8 Golfvolume/ $Q_{\max}$ als functie van de piekafvoer voor diverse afvoerniveau's



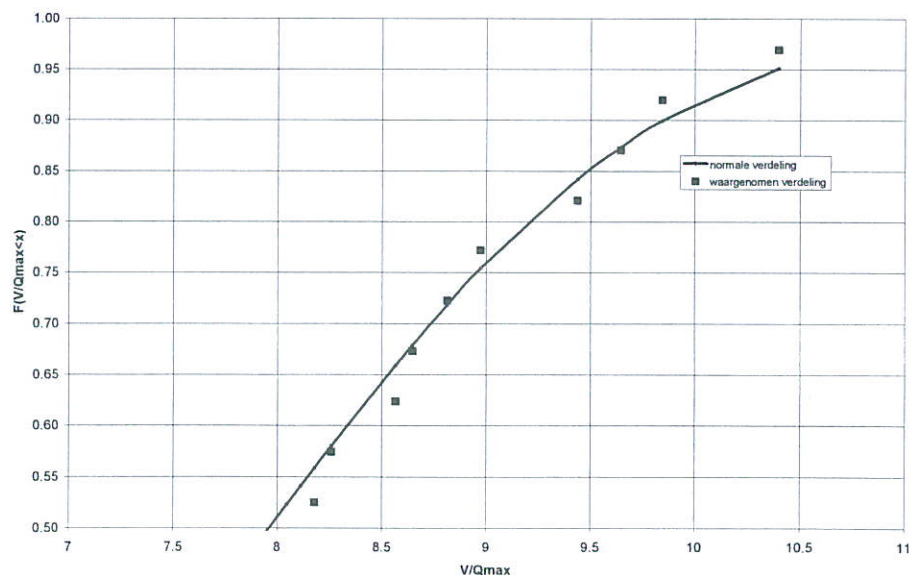
Figuur 3-9 Golfvolume/ $Q_{\max}$ als functie van de piekafvoer voor diverse afvoerniveau's (inclusief hoogwaters van 1944 en 1945)

Op basis van de berekende golfvolumina zijn statistieken gemaakt van $V/Q_{\max}$ voor verschillende afvoerniveaus $Q/Q_{\max}$. Voor elk afvoerniveau is aangenomen dat de verdeling van $V/Q_{\max}$ rond het gemiddelde normaal is die gezien de beperkte omvang van de dataset benaderd wordt met een Student verdeling, met $20 - 1 = 19$ vrijheidsgraden. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3-10, voor $Q/Q_{\max}$ groter dan 0,9.

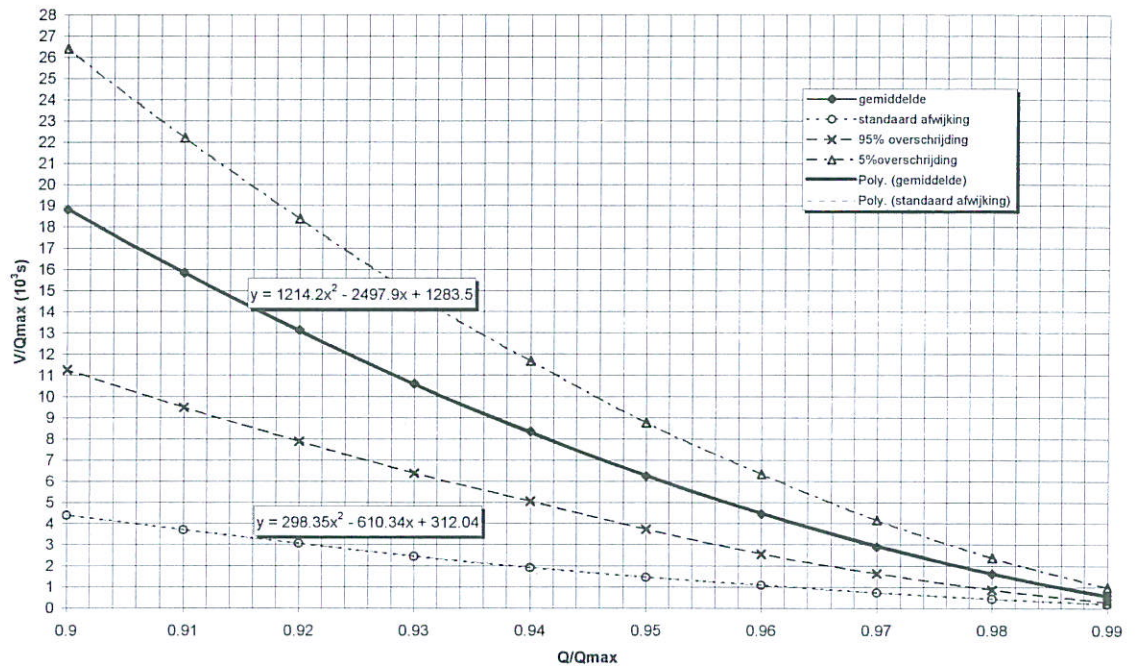


Figuur 3-10 Golfvolume/ $Q_{\max}$ als functie van $Q/Q_{\max}$ (1944 en 1945 hoogwaters niet meegenomen)

De aanname van een normale verdeling rond het gemiddelde blijkt goed te voldoen, zie Figuur 3-11.



Figuur 3-11 Vergelijking tussen waargenomen en normale verdeling voor $V/Q_{\max}$ bij $Q/Q_{\max} = 0,94$



Figuur 3-12 Golfvolume/ $Q_{\max}$ als functie van $Q/Q_{\max}$ (inclusief 1944 en 1945 hoogwaters)

Analoog aan Figuur 3-10 is in Figuur 3-12 het golfvolume/ $Q_{\max}$ weergegeven als functie van $Q/Q_{\max}$ waarbij de hoogwaters van 1944 en 1945 wel zijn meegenomen.

De golfvolume statistieken voor $Q/Q_{\max} \geq 0,9$ zijn samen te vatten in de volgende uitdrukkingen voor gemiddelde en standaardafwijking:

1. Zonder de hoogwaters van 1944 en 1945:

$$m(V/Q) = 1143.5 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 2354.1 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 1210.3 \quad (2)$$

$$s(V/Q) = 205 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 421.56 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 216.6 \quad (3)$$

2. Met de hoogwaters van 1944 en 1945:

$$m(V/Q) = 1214 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 2497.9 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 1283.5 \quad (4)$$

$$s(V/Q) = 298.35 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 - 610.34 \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) + 312.04 \quad (5)$$

met: $m(V/Q_{\max})$ = gemiddelde in 10^3 s indien V in m^3 en $Q_{\max}$ in m^3/s worden uitgedrukt;

$s(V/Q_{\max})$ = standaardafwijking met eenzelfde dimensie als $m(V/Q_{\max})$

Er wordt op gewezen dat in het voorgaande bij de bepaling van de volumestatistieken is uitgegaan van berekende volumes van individuele golven en niet van volumina afgeleid uit golfduur statistieken. De laatste procedure is in beginsel onjuist. Immers golfduren van opeenvolgende relatieve afvoerniveau's horen niet bij elkaar.

4 Referenties

- HKV, 1999a. Klopstra, D. en Vrisou van Eck, N.: Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Maas bij Borgharen; HKV in opdracht van WL | Delft Hydraulics en Rijkswaterstaat.
- HKV, 1999b. Klopstra, D. en Duits, M. T.: Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Rijn bij Lobith; HKV in opdracht van WL | Delft Hydraulics en Rijkswaterstaat.
- HKV 1999c. Klopstra, D.: Applicatie standaard afvoergolven Maas en Rijn; HKV in opdracht van Rijkswaterstaat.
- RIZA, 1999: De maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith; Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001, versie 20 November 1999.
- RIZA en WL, 2000. Silva, W. en Dijkman, J.P.M.: Maatregelen in het stroomgebied van de Rijn; Een verkenning van mogelijkheden en effecten op hoogwaterstanden in Nederland.
- Silva, W. and Dijkman, J. P. M., 2000: Maatregelen in het stroomgebied van de Rijn. Een verkenning van mogelijkheden en effecten op hoogwaterstanden in Nederland. RIZA-werkdocument.
- WL, 1999. Diermanse, F.: Onderzoek 1/1250 jaar afvoer bij Lobith; Representativiteit meetreeks, verdelingsfuncties en statistische extrapolatie. WL | Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Delft, December 1999.



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

