

# Evacuatie en inzet van noodoverloopgebieden bij onzekere hoogwatervoorspellingen

Invloed op overschrijdingskansen langs de Rijntakken

*Auteur*

Daniëlle Noordam

*Afstudeercommissie*

Dr. ir. C. Marjolein Dohmen-Janssen (Universiteit Twente)

Prof. dr. Suzanne J.M.H. Hulscher (Universiteit Twente)

Dr. ir. Matthijs Kok (HKV LJN IN WATER)

Dr. ir. Jan W. Stijnen (HKV LJN IN WATER)



**Universiteit Twente**  
*de ondernemende universiteit*



## Voorwoord

Voor u ligt het rapport "Evacuatie en inzet van noodoverloopgebieden bij onzekere hoogwatervoorspellingen, invloed op overschrijdingskansen langs de Rijntakken". Dit rapport vormt mijn afronding van de opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente (UT), afstudeerrichting Waterbeheer. Het afstudeeronderzoek heb ik uitgevoerd bij HKV LIJN IN WATER in Lelystad van juli 2003 tot januari 2004.

Bij deze wil ik graag de leden van de afstudeercommissie Jan Stijnen (HKV LIJN IN WATER), Marjolein Dohmen-Janssen (Universiteit Twente), Matthijs Kok (HKV LIJN IN WATER) en Suzanne Hulscher (Universiteit Twente) bedanken voor de goede en prettige begeleiding. Mijn dank gaat ook uit naar mijn collega's bij HKV LIJN IN WATER en in het bijzonder Matthijs Duits, Fred Havinga en Jan van Noortwijk voor hun betrokkenheid en adviezen.

De heren Belz (BfG), Buiteveld (RIZA) en Koolwijk (RWS-DON) wil ik graag bedanken voor het beschikbaar stellen van de data.

Tot slot wil ik iedereen, die ik hier niet bij naam heb genoemd, bedanken voor hun bijdrage aan dit rapport.

Januari 2004,

Daniëlle Noordam



## Samenvatting

Nederland is door waterkeringen (dijken, duinen en kunstwerken) beschermd tegen hoogwater. Er kunnen zich extreme omstandigheden voordoen waarbij het hoogwaterbeschermingssysteem faalt en er een overstroming optreedt. In dergelijke situaties geeft het kabinet "er de voorkeur aan om een eventuele overstroming zo gecontroleerd mogelijk te laten verlopen". De Commissie Noodoverloopgebieden heeft, in opdracht van het kabinet, onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van gecontroleerd overstromen. De conclusie van dat onderzoek is dat noodoverloopgebieden nuttig en noodzakelijk zijn en dat ze goed passen in het hoogwaterbeschermingssysteem. De resultaten van dat onderzoek zijn onder andere gebaseerd op berekeningen, waarin is uitgegaan van optimale inzet van de noodoverloopgebieden. Hierbij is geen rekening gehouden met onzekere hoogwatervoorspellingen. Uit eerdere onderzoeken is naar voren gekomen dat het meenemen van onzekerheden de positieve effecten van noodoverloopgebieden op de veiligheid van Nederland verkleint.

In het huidige onderzoek wordt expliciet rekening gehouden met de beslissingen over evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied bij onzekere hoogwatervoorspellingen. Het doel is het bepalen van de effectiviteit van een noodoverloopgebied bij Lobith en de invloed van de onzekere hoogwatervoorspellingen daarop. Dit wordt gedaan door inzicht te krijgen in de overschrijdingskansen benedenstrooms van het inlaatwerk, rekening houdend met de beslissingscriteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied. De effectiviteit van een noodoverloopgebied is gedefinieerd als het quotiënt van de overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied en de overschrijdingskans met noodoverloopgebied. Een overschrijdingskans is de kans dat de waterstand de dijkhoogte overschrijdt. De onderzochte noodoverloopgebieden zijn Rijnstrangen en de Ooijpolder (beiden nabij Lobith), gebieden die door de Commissie Noodoverloopgebieden zijn aanbevolen als noodoverloopgebieden voor de Rijn. De overschrijdingskansen, die een maat zijn voor de veiligheid, worden berekend voor een aantal onderzoekslocaties benedenstrooms van het noodoverloopgebied. Hierbij is de aandacht gericht op de Nederlandse Rijntakken in het bovenrivierengebied.

In de Wet op de Waterkering wordt gesteld dat het Bovenrivierengebied beschermd moet zijn tegen afvoeren met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1/1250. De jaarlijkse overschrijdingskans voor het mechanisme overloop zonder onzekerheden is daarom gelijk aan 1/1250. In de situatie zonder onzekerheden leidt gebruik van een noodoverloopgebied tot een jaarlijkse overschrijdingskans van ongeveer 1/4000, wat een effectiviteit van 3.2 oplevert. Deze resultaten komen overeen met de berekeningen van de Commissie Noodoverloopgebieden.

De twee onzekerheidsbronnen die in dit onderzoek zijn meegenomen zijn i) de onzekerheid in de afvoervoorspelling voor Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach (Duitsland) en ii) de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen voor de onderzoekslocaties langs de Rijntakken bij gegeven piekafvoer bij Lobith. In de situatie zonder noodoverloopgebied leidt het meenemen van de onzekere afvoer- en waterstandsvoorspellingen tot jaarlijkse overschrijdingskansen die bij de onderzoekslocaties variëren van ongeveer 1/2250 tot 1/1150.

De criteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied worden gebaseerd op de Duursche Waarden, de locatie die zonder noodoverloopgebied de grootste overschrijdingskans heeft. Op basis van de piekafvoer bij Andernach wordt besloten over evacuatie van het noodoverloopgebied. Voor het evacuatiecriterium is gekozen voor een conditionele over-

schrijdingskans bij de Duursche Waarden van 0.2 (zonder noodoverloopgebied) bij gegeven piekafvoer bij Andernach. Dit betekent dat bij een piekafvoer bij Andernach groter dan of gelijk aan  $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$  de evacuatie van het noodoverloopgebied in gang wordt gezet. Als de afvoergolf (ongeveer twee dagen later) bij Lobith aan is gekomen, wordt op basis van het inzetcriterium besloten of het gebied wordt ingezet. Het gekozen inzetcriterium is een conditionele overschrijdingskans bij de Duursche Waarden van 0.2 (zonder noodoverloopgebied) bij gegeven piekafvoer bij Lobith. Zodra de piekafvoer bij Lobith de  $15.500 \text{ m}^3/\text{s}$  overschrijdt, wordt het gebied ingezet. Als het noodoverloopgebied niet geëvacueerd is, kan het (in het huidige onderzoek) niet worden ingezet. In de situatie dat het noodoverloopgebied wordt gebruikt, bedragen de jaarlijkse overschrijdingskansen ongeveer 1/2900 tot 1/1300. De effectiviteit van het noodoverloopgebied wordt dan 1.1 tot 1.4. Bij gegeven evacuatie van het noodoverloopgebied, is de kans op daadwerkelijke inzet gelijk aan 60%.

In dit onderzoek is het minimale evacuatiecriterium een conditionele overschrijdingskans van 0.1. De hoogste waarde van de effectiviteit bij de Duursche Waarden wordt dan bereikt bij evacuatie- en inzetcriteria van conditionele overschrijdingskansen van 0.1, waarbij het noodoverloopgebied wordt geëvacueerd bij een afvoer van  $13.400 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Andernach en wordt ingezet bij een piekafvoer van  $15.100 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. De waarde van de effectiviteit bedraagt dan 1.2 voor Lobith, Amerongen en de Duursche Waarden en 1.3 voor Millingen en Tiel. De kans op inzet bij gegeven evacuatie bedraagt dan 50%.

Uit het onderzoek komt naar voren dat het meenemen van de onzekere hoogwatervoorspellingen en de beslissingscriteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied leidt tot een lage waarde van de effectiviteit van het noodoverloopgebied. De overschrijdingskansen met noodoverloopgebied zijn maximaal 1.3 maal kleiner dan zonder noodoverloopgebied. Daarnaast blijkt dat de effectiviteit van het noodoverloopgebied lager is dan de berekende effectiviteit waar het advies van de Commissie Noodoverloopgebieden op is gebaseerd. In toekomstige onderzoeken naar overschrijdingskansen en noodoverloopgebieden is het daarom belangrijk om rekening te houden met de hiervoor beschreven onzekere hoogwatervoorspellingen en de criteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied.

Om een uitspraak te kunnen doen over of noodoverloopgebieden een goede maatregel zijn om Nederland te beschermen tegen ongecontroleerde overstromingen, is het noodzakelijk om de effecten van onzekere hoogwatervoorspellingen en beslissingen over evacuatie en inzet mee te nemen in kostenbatenanalyses. Op basis van uitkomsten daarvan, en in vergelijking met resultaten van andere hoogwaterbeschermingsmaatregelen, kan worden onderzocht in welke mate noodoverloopgebieden passen in het hoogwaterbeschermingssysteem.

## Summary

The Netherlands are protected against floods by flood defences such as dikes and dunes. In extreme conditions, when the flood defence system fails, a flood may occur. In that case, the Dutch Government prefers a controlled inundation to an uncontrolled inundation. The Committee Emergency Flood Storage Areas (emergency reservoirs) has investigated the possibilities of controlled inundation. The Committee concluded that emergency reservoirs are useful and necessary as a part of the Dutch flood defence system. This conclusion is based (among others) on calculations in which uncertainties are not incorporated and optimal use of the emergency reservoir is assumed. Other research has shown that the positive effects of emergency reservoirs decrease when uncertainties are taken into account.

In the present research decisions about evacuation and deployment of the emergency reservoir, based on uncertain high water predictions, are taken into account. The aim of the research is to determine the efficiency of emergency reservoirs if uncertain high water predictions and the decisions about evacuation and deployment are incorporated in the analysis. The efficiency of an emergency reservoir is defined as the exceedance probability (exceedance probability) without an emergency reservoir divided by the exceedance probability with an emergency reservoir. The exceedance probability is the yearly probability that the water level exceeds the dike height. The studied emergency reservoirs are Rijnstrangen and Ooijpolder, two areas near Lobith, assigned by the Committee Emergency Flood Storage Areas to serve as emergency reservoirs along the river Rhine. The exceedance probabilities, which determine the safety against flooding, are calculated for five locations along the Dutch Rhine branches.

The Act of Flood Defences states that the eastern part of The Netherlands should be protected against high waters with a yearly exceedance frequency of 1/1250. In the situation without uncertainties, use of the emergency reservoir leads to an exceedance probability of approximately 1/4000, which yields an efficiency of 3.2. These results are in accordance with the results of the Committee Emergency Flood Storage Areas.

The two sources of uncertainty that are incorporated in the present research are i) the uncertainty in the discharge predictions at Lobith for a given peak discharge at Andernach (Germany) and ii) the uncertainty in the water level predictions along the Rhine branches for a given peak discharge at Lobith. In the situation without the emergency reservoir, taking into account these uncertainties leads to yearly exceedance probabilities of 1/2250 to 1/1150.

The decisions about evacuation and employment are based on the location Duursche Waarden, which has the highest exceedance probability without emergency reservoir. The decision about evacuation of the emergency reservoir is taken when the peak of the discharge is at Andernach. The evacuation criterion is a conditional exceedance probability at the Duursche Waarden of 0.2 for a given peak discharge at Andernach (because without an emergency reservoir, the Duursche Waarden has the highest exceedance probability). This means that the emergency reservoir will be evacuated when the discharge exceeds 14.000 m<sup>3</sup>/s at Andernach. When the peak of the discharge reaches Lobith (approximately two days later) the decision about deployment of the reservoir is taken. When the reservoir is not evacuated it cannot be deployed (in the current research). The criterion for use of the emergency reservoir is a conditional exceedance probability at the Duursche Waarden of 0.2

for a given peak discharge at Lobith. This means that as soon as the discharge exceeds 15.500 m<sup>3</sup>/s at Lobith, the emergency reservoir is deployed. The yearly exceedance probabilities vary between 1/2900 and 1/1300. The efficiency of the emergency reservoir has values varying from 1.1 to 1.4. The probability of deploying the emergency reservoir after it is evacuated equals 60%.

The minimum evacuation criterion in this research equals an exceedance probability of 0.1. Criteria for evacuation and deployment of the emergency reservoir for a conditional exceedance probability of 0.1 yield the highest value of efficiency for the Duursche Waarden. In that case, the reservoir is evacuated when the discharge reaches 13.400 m<sup>3</sup>/s and is deployed when the discharge at Lobith exceeds 15.100 m<sup>3</sup>/s. This yields an efficiency which varies from 1.2 to 1.3. When the emergency reservoir is evacuated, the probability of deployment equals 50%.

The present research shows that taking into account the uncertain high water predictions and the criteria for evacuation and deployment of the emergency reservoir leads to small values of efficiency. It is also shown that the calculated efficiency is smaller than the efficiency on which the conclusion of the Committee Emergency Flood Storage Areas is based. For future research on emergency reservoirs and exceedance probabilities it is important to incorporate the uncertain high water predictions and the criteria for evacuation and deployment of the emergency reservoir.

To determine whether emergency reservoirs are a good measure to prevent the Netherlands from floods, it is necessary to perform cost-benefit analyses in which the uncertain high water predictions and the criteria for evacuation and deployment of the emergency reservoir are incorporated. Based on the results of cost-benefit analyses, in combination with analyses of other measures, it can be determined whether emergency reservoirs fit in the Dutch flood defence system.



# Inhoud

<b>Lijst van tabellen .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lijst van figuren .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lijst van kaders.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Doelstelling en onderzoeksvraag.....	2
1.3 Leeswijzer.....	4
<b>2 Noodoverloopgebieden .....</b>	<b>5</b>
2.1 Rivier de Rijn.....	5
2.2 Hoogwaterbescherming in Nederland .....	6
2.3 Voorgaand onderzoek naar noodoverloopgebieden .....	9
2.4 Onzekerheden bij noodoverloopgebieden .....	10
2.5 Toekomstbeeld evacuatie en inzet van noodoverloopgebied .....	10
<b>3 Methode van het onderzoek .....</b>	<b>13</b>
3.1 Inleiding .....	13
3.2 Beperkte beslisboom evacuatie en inzet noodoverloopgebied .....	13
3.3 Schematisatie noodoverloopgebied .....	14
3.4 Onderzoekslocaties .....	15
3.5 Onzekere hoogwatervoorspellingen.....	17
3.6 Effectiviteit van noodoverloopgebied.....	18
3.7 Werklijn bij Andernach.....	19
3.8 Afvoergolf .....	21
<b>4 Overschrijdingskansen zonder onzekerheden .....</b>	<b>23</b>
4.1 Overschrijdingskansen volgens Commissie Noodoverloopgebieden .....	23
4.2 Evacuatie- en inzetcriterium.....	23
4.3 Overschrijdingskansen zonder extra hoogte.....	24
4.4 Overschrijdingskansen met extra hoogte .....	26
<b>5 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoervoorspelling .....</b>	<b>31</b>
5.1 Conditionele kansen bij gegeven piekafvoer Andernach .....	31
5.2 Evacuatie- en inzetcriterium.....	33
5.3 Overschrijdingskansen .....	33
<b>6 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoer- en waterstandsvoorspelling ....</b>	<b>37</b>
6.1 Waterstandsvoorspellingen Rijntakken.....	37
6.2 Conditionele kans bij gegeven piekafvoer Andernach.....	38
6.3 Evacuatie- en inzetcriterium.....	39
6.4 Overschrijdingskansen .....	40
6.5 Voorwaardelijke kansen .....	42

<b>7</b>	<b>Gevoeligheidsanalyses</b> .....	<b>45</b>
7.1	Evacuatie- en inzetcriterium .....	45
7.2	Golfvorm .....	48
<b>8</b>	<b>Resultaten samengevat</b> .....	<b>51</b>
8.1	Zonder extra hoogte.....	51
8.2	Met extra hoogte.....	51
<b>9</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>55</b>
9.1	Uitgangspunten .....	55
9.2	Mechanisme overloop .....	55
9.3	Betrekkinglijnen en qh-relaties .....	56
9.4	Onzekere hoogwatervoorspellingen .....	56
9.5	Evacuatie- en inzetcriterium .....	56
9.6	Dijkhoogte .....	57
9.7	Overig.....	57
<b>10</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>59</b>
10.1	Conclusies.....	59
10.2	Aanbevelingen .....	60
<b>11</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>63</b>
	<b>Bijlage A: Onzekerheden</b> .....	<b>69</b>
	<b>Bijlage B: Verband tussen piekafvoer Andernach en Lobith</b> .....	<b>77</b>
	<b>Bijlage C: De werklijn bij Andernach</b> .....	<b>81</b>
	<b>Bijlage D: Onzekerheid waterstandsvoorspelling</b> .....	<b>83</b>
	<b>Lijst van notaties en symbolen</b> .....	<b>85</b>
	<b>Index</b> .....	<b>87</b>

## Lijst van tabellen

Tabel 3-1	Gegevens van onderzoekslocaties, r = rechteroever, l = linkeroever.....	16
Tabel 4-1	Overschrijdingskansen zonder onzekerheden .....	27
Tabel 5-1	Deelkansen voor de situatie met noodoverloopgebied .....	35
Tabel 5-2	Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoervoorspelling.....	35
Tabel 6-1	Onzekerheden in de waterstanden volgens Stijnen et al. [2002] en metingen 2003 .....	37
Tabel 6-2	Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoer- en waterstandsvoorspelling .....	42
Tabel 7-1	Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Lobith voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria.....	45
Tabel 7-2	Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Millingen voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria.....	46
Tabel 7-3	Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Tiel voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria.....	46
Tabel 7-4	Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Amerongen voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria .....	46
Tabel 7-5	Overschrijdingskansen en effectiviteit bij de Duursche Waarden voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria .....	47
Tabel 7-6	Kansen op inzet en geen inzet bij gegeven evacuatie voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria .....	47
Tabel 7-7	Overschrijdingskansen bij verschillende golfvormen .....	48
Tabel 8-1	Resultaten algemeen, zonder extra hoogte .....	51
Tabel 8-2	Resultaten locatie Lobith .....	51
Tabel 8-3	Resultaten locatie Millingen.....	51
Tabel 8-4	Resultaten locatie Tiel .....	52
Tabel 8-5	Resultaten locatie Amerongen .....	52
Tabel 8-6	Resultaten locatie Duursche Waarden.....	52
Tabel D-1	Voorspelde en gemeten waterstanden Lobith .....	83
Tabel D-2	Voorspelde en gemeten waterstanden Millingen (gebruikt Nijmegen).....	83
Tabel D-3	Voorspelde en gemeten waterstanden Tiel .....	83
Tabel D-4	Voorspelde en gemeten waterstanden Amerongen .....	84
Tabel D-5	Voorspelde en gemeten waterstanden Duursche Waarden (gebruikt Olst).....	84



## Lijst van figuren

Figuur 1-1	Opzet onderzoek met tussen haakjes de hoofdstuknummers.....	4
Figuur 2-1	Stroomgebied van de Rijn [KNMI, 2003].....	5
Figuur 2-2	Schematisatie dijk met toetspeil, waakhogte en overhoogte [TAW, 1985].....	7
Figuur 2-3	Faalwijzen bij dijken [TAW, 2000] .....	7
Figuur 2-4	Beslisboom bij evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied .....	11
Figuur 3-1	Vereenvoudigde beslisboom bij evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied.....	14
Figuur 3-2	Geografische ligging Rijnstrangen en Ooijpolder [HKV <u>LIJN IN WATER</u> en WL Delft Hydraulics, 2003].....	14
Figuur 3-3	Geografische ligging van onderzoekslocaties [Stijnen et al., 2002] .....	15
Figuur 3-4	Relaties tussen afvoer bij Lobith en waterstanden bij verschillende onderzoekslocaties [Stijnen et al., 2002], getallen geven steilheid weer boven 16.000 m <sup>3</sup> /s in cm/m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> .....	16
Figuur 3-5	Onzekere hoogwatervoorspellingen .....	17
Figuur 3-6	Werklijn bij Andernach .....	20
Figuur 4-1	Qh-relatie bij Tiel, met en zonder noodoverloopgebied .....	24
Figuur 4-2	Effect van een noodoverloopgebied op afvoergolven met verschillende piekafvoeren bij Andernach.....	25
Figuur 4-3	Verband tussen waterstanden boven toetspeil, afvoeren en overschrijdingsfrequenties.....	28
Figuur 4-4	Qh-relaties zonder en met noodoverloopgebied bij Tiel en Amerongen, met extra hoogte .....	29
Figuur 5-1	Conditionele kans bij Lobith met en zonder noodoverloopgebied bij gegeven piekafvoer bij Andernach .....	32
Figuur 6-1	Onzekere waterstand bij Tiel bij golf met piekafvoer 15.000 m <sup>3</sup> /s bij Lobith opgedeeld in stapjes van 12 uur .....	38
Figuur 6-2	Conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden, zonder noodoverloopgebied met extra hoogte .....	40
Figuur 6-3	Conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden zonder en met noodoverloopgebied .....	41
Figuur 7-1	Afvoergolven met 5% en 95% golfvorm zonder en met noodoverloopgebied, inlaat noodoverloopgebied bij 16.000 m <sup>3</sup> /s .....	49
Figuur A-1	Bronnen van onzekerheden naar Kok et al. [2002]. .....	69
Figuur A-2	Verschillende golfvormen bij een piekafvoer van 16.000 m <sup>3</sup> /s [Stijnen et al., 2002] .....	73
Figuur B-1	Betrekkinglijnen met en zonder onzekere afvoervoorspelling.....	79



## Lijst van kaders

Kader 1-1	Citaat uit brief dd. 8 oktober 2002 van TAW aan staatssecretarissen van Verkeer en Waterstaat en van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksaangelegenheden.....	2
Kader 2-1	Wat betekent een jaarlijkse kans van voorkomen? [Stijnen et al., 2002], [Silva et al., 2000].....	6
Kader 2-2	Verskil tussen overschrijdingskans, overbelastingskans en overstromingskans.....	8
Kader 2-3	Definities van een noodoverloopgebied.....	8
Kader 4-1	Voorbeeld bepalen overschrijdingskans Commissie Noodoverloopgebieden [Heynert, 2002].....	23





# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De laatste jaren doen zich in Nederland op het gebied van waterbeheer belangrijke ontwikkelingen voor. Er wordt onder andere verwacht dat de hoge rivierafvoeren van de grote rivieren zullen toenemen en dat de zeespiegel versneld zal stijgen. In de toekomst kunnen deze verwachte ontwikkelingen grote consequenties hebben voor de veiligheid van het laaggelegen Nederland [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000]. Door waterkeringen is Nederland beschermd tegen de meeste hoogwaters, maar er kan zich een afvoer voordoen waar de waterkeringen niet op berekend zijn. In *Anders omgaan met water – Waterbeleid in de 21e eeuw* [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000] komt naar voren dat het kabinet er in die situaties “de voorkeur aan geeft om een eventuele overstroming zo gecontroleerd mogelijk te laten verlopen”. Het kabinet is van mening dat een ongecontroleerde overstroming schadelijker is dan een overstroming die kan worden gecontroleerd [Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van Koninkrijksaangelegenheden, 2004]. In zogenaamde noodoverloopgebieden (calamiteitengebieden) wordt het water dan tijdelijk opgeslagen om een ongecontroleerde overstroming te voorkomen.

Er is de afgelopen tijd onderzoek gedaan naar de mogelijkheid tot gecontroleerd overstromen. In 2002 heeft Commissie Noodoverloopgebieden (onder voorzitterschap van de heer Luteijn) daar op verzoek van het kabinet advies over uitgebracht. De algemene conclusie van het advies is dat noodoverloopgebieden nuttig en noodzakelijk zijn en dat ze goed passen binnen een rampenbestrijdingsstrategie [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. De commissie heeft voor de Rijn en de Maas een aantal gebieden aanbevolen, die ingezet kunnen worden als noodoverloopgebied. Het kabinet heeft besloten om deze gebieden te “reserveren”. Dit betekent dat grote VINEX-wijken of omvangrijke industriële ontwikkelingen niet worden toegestaan [Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van Koninkrijksaangelegenheden, 2004].

In de onderzoeken waar het advies van de Commissie Noodoverloopgebieden op is gebaseerd, is alleen rekening gehouden met de onzekerheid in de golfvorm. In werkelijkheid zijn zowel de voorspelde afmetingen van de afvoergolf (vorm en piek) als de voorspelde waterstanden onzeker. Deze onzekere hoogwatervoorspellingen hebben invloed op de effecten van noodoverloopgebieden.

Twee processen die van belang zijn bij het gebruik van noodoverloopgebieden zijn de evacuatie en de daadwerkelijke inzet van het gebied. De besluiten voor deze processen moeten onder andere worden genomen op basis van onzekere hoogwatervoorspellingen. In een brief (dd. 8 oktober 2002) van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) aan de staatssecretarissen van Verkeer en Waterstaat en van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksaangelegenheden wordt gesteld dat het noodzakelijk is om meer onderzoek uit te voeren voordat er daadwerkelijk tot een besluit tot aanwijzing en inrichting van noodoverloopgebieden gekomen wordt [TAW, 2002]. Een onderdeel van dit aanvullende onderzoek is gericht op de vraag wat er (technisch) nodig is voor het feitelijk besluit tot een gecontroleerde overstroming. In Kader 1-1 is een deel uit die brief geciteerd.

Van een gecontroleerde overstroming in een noodoverloopgebied is sprake op het moment dat een overstroming elders onvermijdelijk zal gaan worden.

Een eerste vraag die hierbij rijst is hoe deze onvermijdelijkheid geconstateerd gaat worden. Een tweede vraag is hoe zeker het op dat moment en onder de dan gegeven omstandigheden is dat de gecontroleerde overstroming in het noodoverloopgebied (met als gevolg een benedenstroomse waterstandsaling) ook werkelijk de ongecontroleerde overstroming zal voorkomen.

*Kader 1-1 Citaat uit brief dd. 8 oktober 2002 van TAW aan staatssecretarissen van Verkeer en Waterstaat en van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksaangelegenheden*

## 1.2 Doelstelling en onderzoeksvraag

### 1.2.1 Doelstelling

Het doel op lange termijn op het gebied van noodoverloopgebieden is het bepalen of noodoverloopgebieden passen binnen het Nederlandse hoogwaterbeschermingssysteem. Dit kan worden gedaan door het uitvoeren van kostenbatenanalyses voor zowel de maatregel noodoverloopgebieden als voor andere maatregelen (bijvoorbeeld dijkverhoging). Hierbij moet, naast de kosten en de baten, ook rekening worden gehouden met de maatschappelijke gevolgen die het gebruik van noodoverloopgebieden met zich meebrengt.

In dit onderzoek gaan we niet in op de kosten en de baten van noodoverloopgebieden. We verdiepen ons in de kansen op een hogere waterstand dan de dijkhoogte (overschrijdingskans) in de situatie zonder en met noodoverloopgebied, waarmee we de (rivierkundige) effectiviteit van het noodoverloopgebied kunnen bepalen. Deze kansen en de effectiviteit vormen een deel van het totale onderzoek naar de maatregel noodoverloopgebieden. De volgende doelstelling is geformuleerd.

*Het doel van het huidige onderzoek is het bepalen van de effectiviteit van een noodoverloopgebied bij Lobith en de invloed van de onzekere hoogwatervoorspellingen daarop. Dit wordt gedaan door inzicht te krijgen in de overschrijdingskansen benedenstrooms van het inlaatwerk, rekening houdend met de beslissingscriteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied.*

De begrippen in de doelstelling en in onderzoeksvraag (in volgende paragraaf) worden toegelicht in paragraaf 1.2.3.

### 1.2.2 Onderzoeksvraag

Aan de hand van de in de vorige paragrafen beschreven achtergrond van het onderzoek en de doelstelling, wordt de volgende onderzoeksvraag geformuleerd.

*Welke invloed hebben de beslissingscriteria voor evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied, in relatie met onzekere hoogwatervoorspellingen, op de overschrijdingskansen langs de Nederlandse Rijntakken en de effectiviteit van het noodoverloopgebied?*

De volgende kernvragen zijn van belang bij het beantwoorden van de onderzoeksvraag.

1. *Wat zijn onzekere hoogwatervoorspellingen en waardoor worden ze veroorzaakt?*
2. *Welke beslissingscriteria worden gehanteerd voor het evacueren en inzetten van een noodoverloopgebied?*

3. *Wat zijn de overschrijdingskansen langs de Nederlandse Rijntakken met gebruik van een noodoverloopgebied wanneer rekening wordt gehouden met het evacuatie- en inzet-criterium bij onzekere hoogwatervoorspellingen?*
4. *Wat is de effectiviteit van het noodoverloopgebied wanneer rekening wordt gehouden met het evacuatie- en inzetcriterium bij onzekere hoogwatervoorspellingen?*

### 1.2.3 Kernbegrippen

#### Noodoverloopgebied

Een noodoverloopgebied is een (deel van een) dijkkringgebied dat wordt geïnundeerd in extreme hoogwatersituaties teneinde een overstroming elders te voorkomen. Een dijkkringgebied is een gebied dat is omringd door primaire waterkeringen of hoge gronden. In dit onderzoek rekenen we met een dijkvakbenadering. Een dijkvak is een deel van het dijkkringgebied, met ongeveer dezelfde kenmerken op het gebied van hoogwaterbescherming (bijvoorbeeld de dijkhoogte). Elke onderzoekslocatie representeert een dijkvak.

#### Lobith

We rekenen met één noodoverloopgebied nabij Lobith. Dit gebied is een schematisatie van Rijnstrangen en de Ooijpolder, de twee gebieden die door het kabinet worden gereserveerd om eventueel te fungeren als noodoverloopgebied. Deze gebieden zijn weergegeven in Figuur 3-2 op pagina 14.

#### Overschrijdingskansen

De effectiviteit van het noodoverloopgebied is afhankelijk van de overschrijdingskansen. Deze overschrijdingskansen worden bepaald voor het faalmechanisme overloop. In dat geval is er sprake van overschrijding indien de waterstand hoger is dan de dijkhoogte. De dijkhoogte is gelijk aan het toetspeil. Later in het onderzoek wordt de aangenomen extra hoogte (voor de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen) meegenomen in de dijkhoogte. We nemen aan dat deze extra hoogte waterkerend is. De overschrijdingskansen worden bepaald op verschillende onderzoekslocaties benedenstrooms van het inlaatwerk, waarbij de veiligheid van een onderzoekslocatie wordt beschreven door de overschrijdingskans. Het inlaatwerk is de plaats langs de rivier waar het water het noodoverloopgebied instroomt.

#### Effectiviteit

De effectiviteit van een noodoverloopgebied is in dit onderzoek gedefinieerd als de overschrijdingskans zonder inzet van het noodoverloopgebied gedeeld door de overschrijdingskans met inzet van het noodoverloopgebied. Bij het bepalen van deze (rivierkundige) effectiviteit wordt geen rekening gehouden met kosten en baten. De waarde van de effectiviteit kan volgens deze definitie variëren tussen bijna 0 en oneindig. De waarden van de effectiviteit worden bepaald voor een vijftal onderzoekslocaties langs de Rijntakken.

#### Evacuatiecriterium

Het besluit of het noodoverloopgebied geëvacueerd wordt of niet en wanneer dit moet gebeuren wordt genomen op basis van conditionele overschrijdingskansen. Voor evacuatie is deze conditionele overschrijdingskans de overschrijdingskans bij een onderzoekslocatie bij een gegeven piekafvoer bij Andernach (Duitsland, zie paragraaf 2.5.1).

## Inzetcriterium

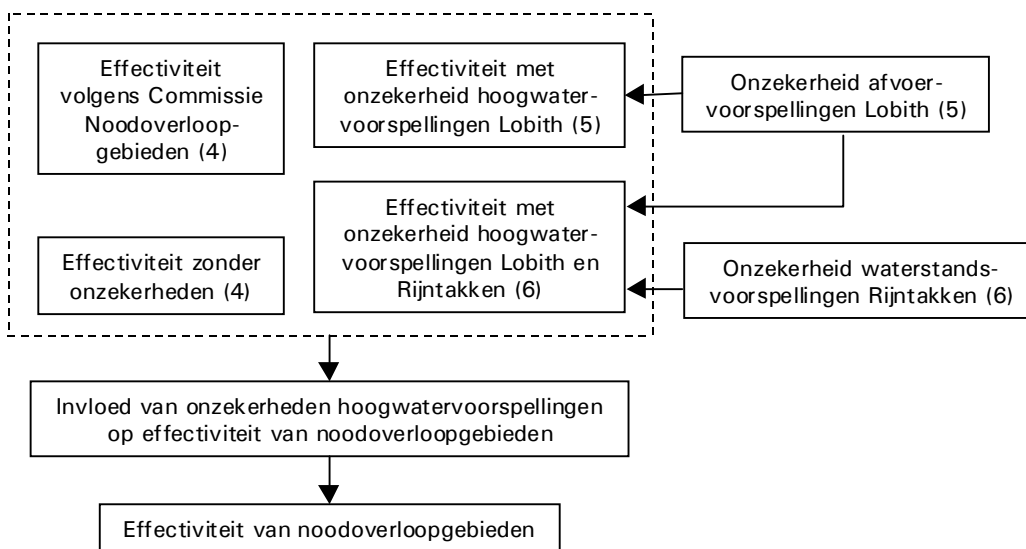
De beslissing of het noodoverloopgebied ingezet wordt, wordt gebaseerd op de conditionele overschrijdingskansen bij de onderzoekslocaties (bij gegeven piekafvoer bij Lobith). Het noodoverloopgebied kan alleen worden ingezet als het geëvacueerd is.

## Onzekere hoogwatervoorspellingen

Er worden twee onzekerheidsbronnen meegenomen die samen de onzekerheid in de hoogwatervoorspellingen representeren. De eerste bron van onzekerheid wordt gevormd door de afvoervoorspellingen bij Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach. De tweede bron van onzekerheid komt voort uit de waterstandsvoorspellingen voor de onderzoekslocaties langs de Rijntakken bij gegeven piekafvoer bij Lobith.

## 1.3 Leeswijzer

Na de inleiding in dit hoofdstuk, volgt in hoofdstuk 2 een beschrijving van de hoogwaterbescherming in Nederland en de rol van noodoverloopgebieden hierbinnen. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de methode van het onderzoek gepresenteerd. In Figuur 1-1 is de aanpak van het onderzoek schematisch weergegeven. De getallen tussen haakjes geven het hoofdstuk aan waarin het betreffende deel naar voren komt. De laatste twee blokken in de figuur zijn algemene onderdelen en komen niet specifiek in één hoofdstuk aan de orde.



Figuur 1-1 Opzet onderzoek met tussen haakjes de hoofdstuknummers

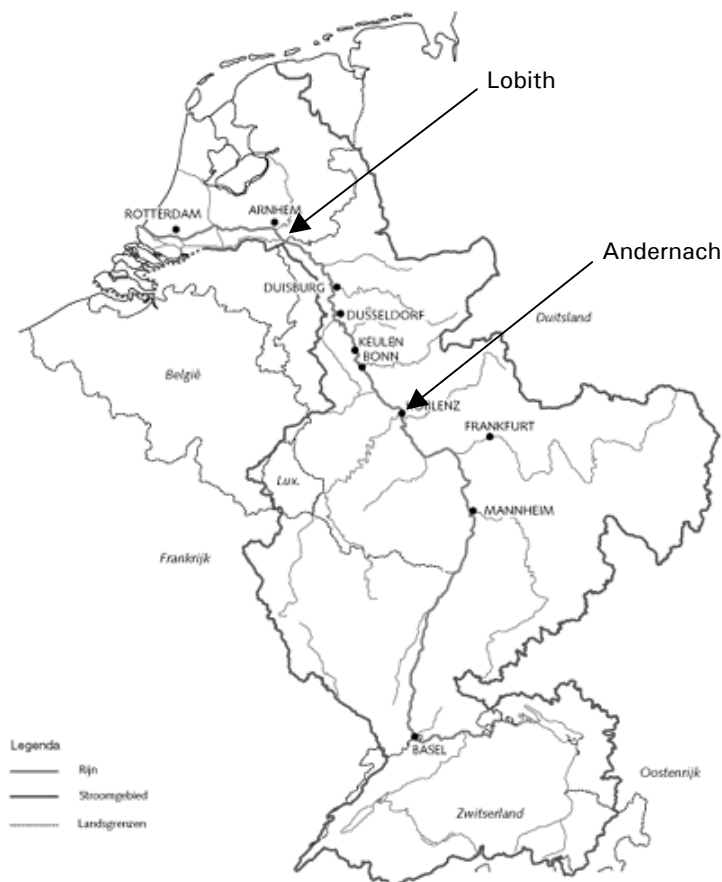
In hoofdstuk 4 wordt eerst ingegaan op de effectiviteit van noodoverloopgebieden volgens de Commissie Noodoverloopgebieden. Vervolgens wordt in dat hoofdstuk, aan de hand van de methode in het huidige onderzoek, de effectiviteit van het noodoverloopgebied bepaald zonder onzekerheden. Dit levert ongeveer hetzelfde resultaat op als dat van de Commissie Noodoverloopgebieden. In hoofdstuk 5 wordt de onzekerheid in de afvoervoorspelling voor Lobith toegevoegd en in hoofdstuk 6 wordt ook de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen voor de verschillende onderzoekslocaties langs de Rijntakken meegenomen. In hoofdstuk 7 wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor het evacuatie- en inzetcriterium en de golfvorm. De resultaten worden samenvattend gepresenteerd in hoofdstuk 8. Vervolgens is in hoofdstuk 9 de discussie van belangrijke uitgangspunten te vinden en in hoofdstuk 10 worden de conclusies en aanbevelingen beschreven. Op pagina 85 is de lijst met symbolen en notaties weergegeven.

## 2 Noodoverloopgebieden

### 2.1 Rivier de Rijn

#### 2.1.1 Stroomgebied van de Rijn

De Rijn, met de bron in Zwitserland en de monding in de Noordzee en het IJsselmeer in Nederland, heeft een lengte van 1320 km. De Rijn stroomt door Zwitserland, Frankrijk, Duitsland en Nederland, waarbij een hoogteverschil van ruim 2000 m wordt overbrugd. Het stroomgebied van de rivier heeft een oppervlakte van 185.000 km<sup>2</sup> en strekt zich uit over negen landen (Zwitserland, Oostenrijk, Lichtenstein, Italië, Frankrijk, Duitsland, België, Luxemburg en Nederland). Het stroomgebied van de Rijn is weergegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Stroomgebied van de Rijn [KNMI, 2003]

#### 2.1.2 Rijntakken in Nederland

Het stroomgebied van de Rijn in Nederland heeft een oppervlak van 20.000 km<sup>2</sup>. De Rijn komt Nederland binnen bij Lobith, wordt dan de Bovenrijn genoemd en legt vanaf daar een afstand af van 170 km tot de Noordzee. De Pannerdensch Kop is het eerste splitsingspunt van de Bovenrijn, waar de Rijn zich splitst in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. De Waal gaat bij Woudrichem over in de Boven Merwede. Het Pannerdensch Kanaal splitst zich bij Westervoort in de Nederrijn en de IJssel. De naam van de Nederrijn verandert bij Wijk bij Duurstede in de Lek. De IJssel stroomt via het Keteldiep en het Ketelmeer in het IJsselmeer. Het deel van het

Rijntakkensysteem in Nederland dat van belang is voor dit onderzoek is weergegeven in Figuur 3-3 op pagina 15.

De gemiddelde afvoer van de Rijn bij Lobith bedraagt 2220 m<sup>3</sup>/s. Bij gemiddelde afvoeren stroomt 2/3 deel van de Rijnafvoer naar de Waal en 1/3 deel naar het Pannerdensch Kanaal. Daar vandaan stroomt 2/9 deel naar Nederrijn en het resterende deel (1/9) komt in de IJssel [Van der Linden, 2002], [Wikipedia, 2003]. De hoogst gemeten afvoer trad op in 1926, toen een afvoer van 12.600 m<sup>3</sup>/s bij Lobith zich voordeed. Bij hoge afvoeren gaat gemiddeld 65% van de afvoer die bij Lobith Nederland binnenkomt via de Waal, 20% via de Nederrijn en de overige 15% stroomt door de IJssel [Silva et al., 2000].

## 2.2 Hoogwaterbescherming in Nederland

### 2.2.1 Wet op de waterkering

In Nederland is hoogwater in rivieren een normaal verschijnsel, in de winter staan vaak de uiterwaarden onder water. Door deze uiterwaarden, de dijken en andere waterkeringen langs de rivieren ontstaan er meestal geen problemen wanneer hoogwater optreedt. In Nederland is het bovenrivierengebied (waar bij hoge afvoeren geen invloed van de zee merkbaar is) van de Rijn beschermd tegen hoogwaters die gemiddeld een jaarlijkse kans van voorkomen hebben van 1/1250 (zie Kader 2-1). Voor overige gebieden worden kleinere jaarlijkse kansen gehanteerd, van 1/2000 tot 1/10.000. Deze kansen zijn lager omdat bijvoorbeeld de economische waarde van dat gebied groter is of omdat de beschikbare reactietijd korter is. De kansen zijn opgenomen in de Wet op de Waterkering. Voor het bovenrivierengebied hoort bij een jaarlijkse kans van voorkomen een bepaalde rivierafvoer, die de maatgevende afvoer wordt genoemd. De waterstanden die optreden bij deze afvoeren worden de toetspeilen genoemd (voorheen MHW, maatgevende hoogwaterstanden). In het kabinetsstandpunt *Ruimte voor de Rivier* wordt gesteld dat minimaal 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith uiterlijk in 2015 moet kunnen worden afgevoerd bij de in de Wet op de Waterkering opgenomen kansen [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000]. De maatgevende afvoer is dan 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

Een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/1250 wordt ook wel geformuleerd als een kans van 0.08% per jaar of een kans van eenmaal per 1250 jaar. Dit zijn verschillende manieren om dezelfde kans uit te drukken.

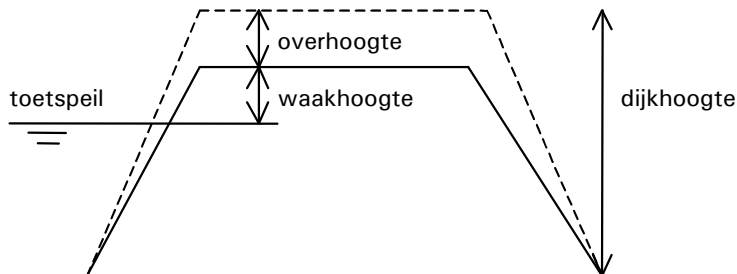
Eenmaal per 1250 jaar betekent niet dat een overstroming maar eens per 1250 jaar kan voorkomen of dat het na een overstroming 1250 jaar duurt voordat het weer gebeurt. Het betekent dat een overstroming *gemiddeld* eenmaal per 1250 jaar optreedt. Verder kan de uitdrukking van eenmaal per 1250 jaar tot een ander misverstand leiden. Omdat de fysisch-geografische situatie langs de rivieren en het klimaat steeds wijzigen, is er nooit 1250 jaar lang dezelfde situatie aanwezig. Ontwerpen op een toestand van (gemiddeld) eenmaal per 1250 jaar is daarom niet mogelijk. We kunnen niet 1250 jaar vooruit kijken, maar houden rekening met een gebeurtenis die in de huidige situatie een kans van optreden heeft van 1/1250 per jaar.

*Kader 2-1 Wat betekent een jaarlijkse kans van voorkomen? [Stijnen et al., 2002], [Silva et al., 2000]*

### 2.2.2 Dijken

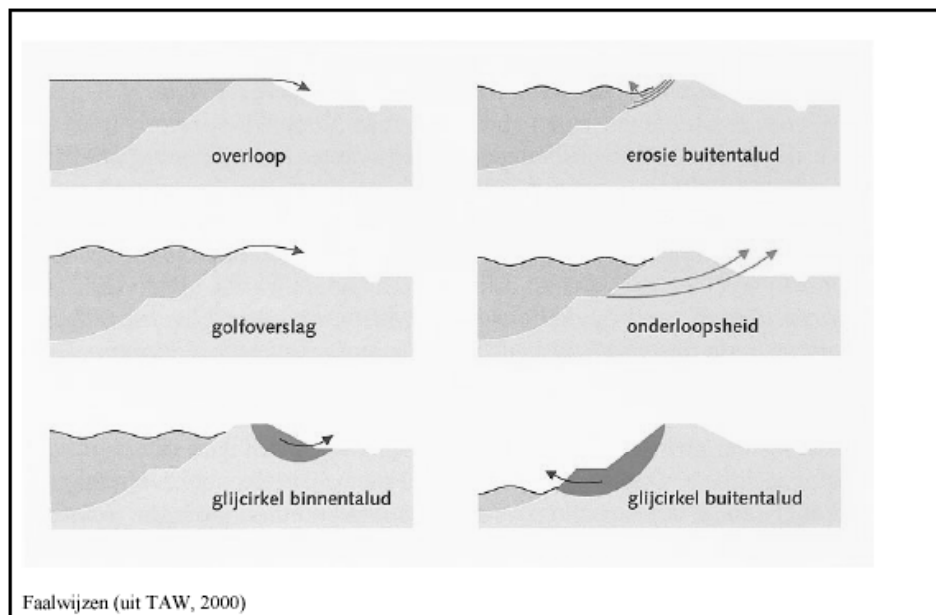
Als de waterstand hoger is dan het toetspeil betekent dat niet meteen dat er een overstroming optreedt. In werkelijkheid zijn de dijken namelijk hoger dan het toetspeil, er zijn extra veiligheidsmarges ingebouwd. In Figuur 2-2 is de schematische dwarsdoorsnede van een dijk weergegeven. De waakhogte van de dijk dient voor factoren als golfoverslag en onzekerheid

in de waterstand en bedraagt minstens een halve meter. Indien de te verwachten golfloop daar aanleiding toe geeft, moet de minimale waakhogte zoveel hoger worden genomen als nodig is om de golfoverslag voldoende te beperken [TAW, 1985]. Met de eventuele zetting van het dijklichaam wordt rekening gehouden door een overhoogte aan te brengen [TAW, 1985]. Omdat na de mogelijke zetting de overhoogte is verdwenen, wordt deze in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2-2 Schematisatie dijk met toetspeil, waakhogte en overhoogte [TAW, 1985]

Dijken kunnen op verschillende manieren falen. In Figuur 2-3 zijn de verschillende faalwijzen weergegeven. De zes verschillende faalwijzen zijn onder te brengen in twee groepen. De eerste groep heeft te maken met de *hoogte van de dijk*. In deze groep horen de mechanismen overloop en golfoverslag. De overige mechanismen zijn opgenomen in de groep *stabiliteit*.



Faalwijzen (uit TAW, 2000)

Figuur 2-3 Faalwijzen bij dijken [TAW, 2000]

Overloop en golfoverslag worden vaak samen als één faalwijze beschouwd, die te maken heeft met de hoogte van de dijk. De faalwijze onderloopsheid bestaat uit twee deelprocessen: opbarsten en piping. Eerst wordt de grond onder de dijk weggespoeld en door de druk van het water barst de afsluitende laag (opbarsten). Vervolgens kunnen “pijpen” ontstaan waardoor de grond wegspoelt. De erosie van het buitentalud bestaat uit twee delen: de beschadiging van de bekleding en de erosie van het dijklichaam. Deze faalwijze heeft te maken met de microstabiliteit van de dijk. De glijcirkels in het binnentalud in combinatie met opdrijven (niet in de figuur weergegeven) vallen in de groep afschuiven, die te maken heeft met macrostabiliteit [Vrouwenvelder et al., 2001]. De glijcirkel in het buitentalud kan optreden bij laagwater, in dit onderzoek besteden we daar geen aandacht aan.

Er bestaan verschillende termen over het ongewenst functioneren van een dijk. Deze termen hebben veel met elkaar te maken, maar hebben allemaal een andere betekenis. In Kader 2-2 worden deze termen besproken. In dit onderzoek rekenen we met *overschrijdingskansen*. Bij overloop geldt dat er sprake is van overschrijding indien de waterstand hoger is dan de kruin van de dijk.

De overschrijdingskans van een waterstand is de kans dat een bepaalde waterstand bereikt of overschreden wordt [TAW, 2000].

De overbelastingskans is de kans dat een *dijkvak* overbelast raakt doordat de belasting groter is dan de sterkte [Stijnen et al., 2002]. Deze kans kan voor één of voor meerdere faalwijzen worden bepaald.

De overstromingskans is de kans dat een *dijkkringgebied* overstroomt, doordat de waterkering rondom dat gebied (de dijkkring) op één of meerdere plaatsen faalt [TAW, 2000] door één of meerdere faalwijzen.

*Kader 2-2    Verschil tussen overschrijdingskansen, overbelastingskansen en overstromingskansen*

Overstromingen in Nederland kunnen ook plaatsvinden doordat dijken in Duitsland al overstroomd zijn, waardoor het water Nederland niet via de rivieren binnenkomt. In dit onderzoek beperken we ons tot overstromingen in Nederland vanuit de rivier.

### 2.2.3 Noodoverloopgebieden

Er kan zich altijd een hoge rivierafvoer voordoen waar het hoogwaterbeschermingssysteem niet op berekend is. Uit het kabinetsstandpunt *Anders omgaan met Water* blijkt dat het kabinet er in die situatie "de voorkeur aan geeft om het overstromen zo gecontroleerd mogelijk te laten verlopen" [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000]. Een gebied waar het water in die situaties dan tijdelijk wordt opgeslagen wordt een noodoverloopgebied genoemd. Een noodoverloopgebied heeft puur rivierkundig gezien dezelfde werking als een retentiegebied. Retentiegebieden worden ingezet bij afvoeren lager dan het maatgevende niveau, noodoverloopgebieden worden pas ingezet bij dreigende bovenmaatgevende omstandigheden, wanneer het er naar uitziet dat er een ongecontroleerde overstroming zal plaatsvinden. Op dat moment zouden de eventuele retentiegebieden al benut zijn [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002].

Door de inzet van een noodoverloopgebied in het bovenrivierengebied wordt getracht bovenmaatgevende hoogwatergolven af te toppen waardoor de maximale afvoer en de waterstanden benedenstrooms verminderen. Het is de bedoeling om op deze manier een ongewenste en ongecontroleerde overstroming te voorkomen. Er bestaan verschillende definities van een noodoverloopgebied. Twee definities zijn weergegeven in Kader 2-3.

#### **Definities noodoverloopgebied**

Een noodoverloopgebied is een (deel van een) dijkkringgebied dat wordt geïnundeerd in bovenmaatgevende hoogwatersituaties teneinde overstroming elders te voorkomen of de gevolgen daarvan zoveel mogelijk te beperken [Klopstra et al., 2001].

Een noodoverloopgebied is een gebied waar het water bij extreme rivierafvoer wordt opgevangen, zodat een ongecontroleerde overstroming op een onvoorspelbare tijd en plaats wordt voorkomen [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002].

*Kader 2-3    Definities van een noodoverloopgebied*

In dit onderzoek houden we geen rekening met de gevolgen van overstromingen. Van de eerste definitie nemen we daarom het tweede deel (beperken van de gevolgen van een overstroming) niet mee. In de tweede definitie wordt de indruk gewekt dat een noodoverloop-



gebied in alle gevallen een ongecontroleerde overstroming voorkomt. In de praktijk zou het kunnen gebeuren dat er bij een ingezet noodoverloopgebied alsnog een ongecontroleerde overstroming optreedt.

In dit onderzoek bepalen we overschrijdingskansen in de situaties met en zonder noodoverloopgebied en hebben we niet direct iets te maken met de gevolgen of het voorkomen van overstromingen. Daarom gebruiken we de volgende definitie: *Een noodoverloopgebied is een (deel van een) dijkkringgebied dat wordt geïnundeerd in extreme hoogwatersituaties teneinde overstroming elders te voorkomen.*

## 2.3 Voorgaand onderzoek naar noodoverloopgebieden

In deze paragraaf wordt een korte samenvatting gegeven van het voorgaande onderzoek naar noodoverloopgebieden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen onderzoek naar effecten op waterstanden en effecten op overbelastingskansen.

### 2.3.1 Onderzoek naar waterstandsveranderingen

Een noodoverloopgebied bovenstrooms van de Pannerdensch Kop, dat geschematiseerd is als een onttrekking van alle afvoer boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s, kan zorgen voor een waterstandsverlaging van maximaal enkele decimeters [Van der Linden, 2002]. Er is gerekend met een maximale Rijnaafvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s. Deze waterstandsverlagingen nemen geleidelijk af tot nul bij de benedenlopen van de Lek, de Beneden Merwede en de Nieuwe Merwede, doordat de invloed van de Noordzee vanaf daar dominant is.

Ander onderzoek [WL|Delft Hydraulics, 2001] toont eveneens aan dat inzet van één of meerdere noodoverloopgebieden een waterstandsval tot gevolg kan hebben van enkele decimeters. Hierbij is gerekend met een gemiddelde golfvorm en een maximale piekafvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s. De waterstanden die dan optreden blijven hoger dan het toetspeil [Silva, 2000].

### 2.3.2 Onderzoek naar overbelastingskansen

Het advies van Commissie Noodoverloopgebieden [2002] is onder andere gebaseerd op onderzoek [Heynert, 2002] waaruit het volgende naar voren komt: een noodoverloopgebied met een capaciteit van 350 miljoen m<sup>3</sup> bovenstrooms van de Pannerdensch Kop leidt bij een afvoergolf met een piek van 18.000 m<sup>3</sup>/s en een 75% golfvorm (75% van de golven is smaller, zie ook Figuur A-2 op pagina 73) tot een reductie van de overbelastingskans van 1/1250 per jaar naar 1/5500 per jaar. De effectiviteit, die de verhouding van deze kansen weergeeft, is gelijk aan 4. Hierbij is alleen gerekend met het faalmechanisme overloop (zie ook Figuur 2-3 en paragraaf 3.6.3). Er is sprake van optimale inzet van het noodoverloopgebied. In paragraaf 4.1 wordt uitgelegd op welke manier deze kansen zijn bepaald.

Probabilistisch onderzoek [Stijnen et al., 2002], [Kok et al., 2003] toont aan dat het meenemen van onzekerheden (zoals onzekerheden in de afvoer, waterstand, windrichting en windsnelheid) leidt tot een overbelastingskans tussen de 1/800 en 1/2000 per jaar. In dat onderzoek is gerekend met een noodoverloopgebied van 250 miljoen m<sup>3</sup> nabij Lobith, waarbij wordt begonnen met inlaten bij afvoeren groter dan 16.000 m<sup>3</sup>/s. De faalmechanismen waarmee gerekend is zijn overloop en golfoverslag (zie Figuur 2-3). Inzet van dat noodoverloopgebied leidt, zonder onzekerheden, tot een reductie van de overbelastingskans met een

factor 3.6 (effectiviteit). Daarnaast komt naar voren dat het meenemen van een groter aantal stochastische grootheden leidt tot een toename van de overbelastingskans en een afname van de effectiviteit tot 1.1 à 1.3.

### **2.3.3 Opmerkingen over voorgaand onderzoek**

In de onderzoeken naar de effecten op de waterstanden is geen rekening gehouden met onzekerheden. In de onderzoeken naar de overbelastingskansen is door Heynert [2002] alleen rekening gehouden met de onzekerheid in de golfvorm. In het onderzoek van Stijnen et al. [2002] zijn verschillende onzekerheden meegenomen: onzekerheid in de afvoer, wind (snelheid en richting), waterstand (als gevolg van afvoerverdeling splitsingspunten, geometrie en ruwheid en interpolatie tussen meetstations) en golfvorm. In deze onderzoeken is geen rekening gehouden met de besluitvorming omtrent de evacuatie en de inzet van het noodoverloopgebied.

Het vernieuwende aspect van het huidige onderzoek, is dat we rekening houden met de besluiten over evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied. Deze besluiten moeten worden genomen op basis van onzekere hoogwatervoorspellingen. In de volgende paragraaf wordt hier verder op ingegaan.

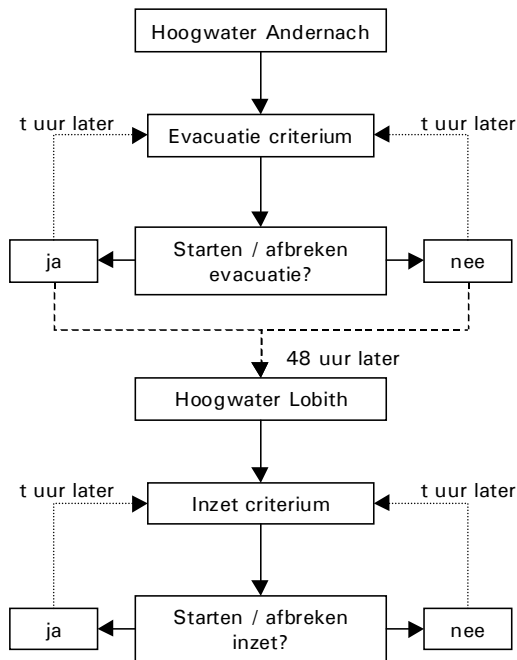
## **2.4 Onzekerheden bij noodoverloopgebieden**

Bij hoogwaterbescherming (en bij de maatregel noodoverloopgebieden) spelen verschillende onzekerheden een rol. In bijlage A wordt ingegaan op onzekerheidsbronnen en daar komen ook de specifieke onzekerheden naar voren die van belang zijn bij de hoogwaterbescherming. Bij het bepalen van de effectiviteit van noodoverloopgebieden is het belangrijk om rekening te houden met onzekerheden. Onderzoek [Stijnen et al., 2002] heeft aangetoond dat het meenemen van onzekerheden leidt tot lagere waarden van de effectiviteit.

In de vorige paragraaf is naar voren gekomen dat in dit onderzoek expliciet rekening wordt gehouden met de onzekere hoogwatervoorspellingen. De onzekerheid in de hoogwatervoorspellingen komt in principe voort uit alle onzekerheden die spelen bij hoogwater. We houden echter niet met al die onzekerheden rekening. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op de wijze waarop we in dit onderzoek met de onzekere hoogwatervoorspellingen omgaan.

## **2.5 Toekomstbeeld evacuatie en inzet van noodoverloopgebied**

In deze paragraaf wordt het toekomstbeeld (van de auteur) geschetst van het gebruik van noodoverloopgebieden. Het gebruik van een noodoverloopgebied omvat in ieder geval de processen evacuatie en inzet (inundatie) van het noodoverloopgebied. Indien het kabinet daadwerkelijk besluit tot het aanwijzen van noodoverloopgebieden, zal bij extreme situaties naar verwachting de volgende beslisboom moeten worden doorlopen. Hierbij is er vanuit gegaan dat er slechts één noodoverloopgebied is. In de volgende twee subparagrafen wordt de beslisboom toegelicht.



Figuur 2-4 Beslisboom bij evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied

### 2.5.1 Evacuatie

De benodigde tijd voor preventieve evacuatie bestaat uit de besluitvorming en de daadwerkelijke evacuatie [Barendregt et al., 2002]. De voorkeur wordt gegeven aan evacuatie vóór de inzet van het noodoverloopgebied en niet tijdens de inzet. De totale benodigde tijd voor evacuatie van het noodoverloopgebied bedraagt ongeveer twee dagen [Klopstra, 2001]. Daarom moet twee dagen voordat het noodoverloopgebied eventueel ingezet gaat worden het besluit over evacuatie worden genomen. De gemiddelde looptijd van een hoogwatergolf van Andernach (Duitsland, zie ook Figuur 2-1) tot Lobith bedraagt ongeveer twee dagen [Sprokkereef, 2001], de afstand bedraagt ongeveer 250 km. De Moezel, die voor ongeveer 35% bijdraagt aan de Rijnafvoer, is net voor Andernach met de Rijn samengekomen [Sprokkereef, 2003]. Daarom wordt verwacht dat het beslissingsproces begint bij een extreme rivierafvoer bij Andernach (of eventueel verder bovenstrooms).

Het besluit tot evacuatie van het noodoverloopgebied zal waarschijnlijk worden genomen op basis van de verwachte overstromingskansen, de verwachte schade en de verwachte sociale gevolgen. Bij het bepalen van deze factoren wordt rekening gehouden met onzekerheden (die in bijlage A zijn beschreven). De verwachte schade bij de evacuatie van het noodoverloopgebied bestaat voornamelijk uit de kosten voor de evacuatie en de indirecte schade als gevolg van productie-stop [Klopstra, 2001].

Er komt op het traject van Andernach tot Lobith nieuwe informatie beschikbaar, waardoor de verwachte overstromingskansen en schade kunnen veranderen. Daarom kan na het besluit over evacuatie na elke tijdstap (t) worden besloten om de evacuatie (alsnog) te starten of af te breken. Als er bijvoorbeeld een dijkdoorbraak plaatsvindt in Duitsland, is gebruik van het noodoverloopgebied bij Lobith waarschijnlijk niet nodig.

## 2.5.2 Inzet

Nadat besloten is of het gebied geëvacueerd zal worden, komt na ongeveer twee dagen de afvoergolf aan bij Lobith. Op basis van de verwachte overstromingskansen, de verwachte schade en de verwachte sociale gevolgen wordt besloten of het gebied wordt ingezet. Ook bij het inzetcriterium wordt bij het bepalen van de factoren rekening gehouden met zoveel mogelijk onzekerheden.

De verwachte schade bij inzet bestaat uit de directe schade in de vorm van mogelijke slachtoffers bij niet-tijdige evacuatie en de directe schade aan onroerende en roerende goederen en natuur. Daarnaast is indirecte schade van groot belang, die ontstaat door productieverlies, inkomstenderving en kosten voor het schoonmaken [Klopstra, 2001]. Als na evacuatie wordt besloten om het gebied niet in te zetten, betekent dit dat het gebied (achteraf gezien) onnodig geëvacueerd is.

In extreme situaties zou er voor gekozen kunnen worden om het gebied in te zetten zonder dat het geëvacueerd is, waarbij de evacuatie dus tijdens de inundatie plaats vindt. Hierbij moet worden opgemerkt dat het een zeer uitzonderlijke situatie betreft. Een bestuurder zal zeker niet snel de beslissing nemen om het noodoverloopgebied in te zetten zonder dat het geëvacueerd is. Er bestaat in dat geval namelijk de kans dat er slachtoffers zullen vallen [Barendregt et al., 2002]. De mogelijkheid bestaat om het besluit over inzet van het gebied na elke tijdstap te herzien. Er kan, aan de hand van nieuwe informatie, worden besloten om de inundatie alsnog te starten of af te breken.

## 3 Methode van het onderzoek

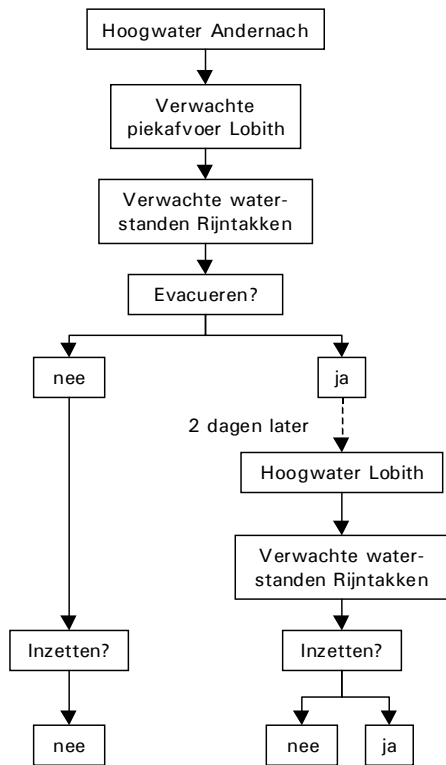
### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de methode van het onderzoek beschreven. In paragraaf 3.2 komt naar voren op welke manier we in dit onderzoek omgaan met de beslissingen over evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied. Daarna wordt in paragraaf 3.3 de schematisatie van het noodoverloopgebied toegelicht en vervolgens worden in paragraaf 3.4 de verschillende onderzoekslocaties besproken. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op de onzekere hoogwatervoorspellingen we in dit onderzoek meenemen. In paragraaf 3.6 behandelen we op welke manier we de effectiviteit van het noodoverloopgebied gaan berekenen. Hiervoor moeten we eerst de overschrijdingskansen berekenen, op welke manier we dat doen wordt ook beschreven in paragraaf 3.6. De werklijn bij Andernach, die de jaarlijkse overschrijdingsfrequenties van afvoeren weergeeft, komt naar voren in paragraaf 3.7 en tenslotte bespreken we in paragraaf 3.8 de afvoergolf.

### 3.2 Beperkte beslisboom evacuatie en inzet noodoverloopgebied

In dit onderzoek hanteren we niet de beslisboom die in de paragraaf 2.5 is weergegeven. Het onderzoek beperkt zich tot één besluit bij Andernach (over evacuatie) en daarop volgend één besluit bij Lobith (over inzet). We gebruiken de vereenvoudigde beslisboom die in Figuur 3-1 staat, waarbij beslissingen over evacuatie en inzet niet kunnen worden teruggedraaid. Als het noodoverloopgebied niet is geëvacueerd, kan het niet worden ingezet. We gaan niet in op de kosten en baten of op de maatschappelijke effecten. Op het moment doet VNK (Veiligheid Nederland in Kaart) onderzoek naar overstromingsrisico's van verschillende dijkkringgebieden in Nederland [VNK, 2003].

De beslissingscriteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied zijn in het huidige onderzoek alleen gebaseerd op conditionele overschrijdingskansen. Het evacuatiecriterium is gebaseerd op de conditionele overschrijdingskans bij een onderzoekslocatie bij gegeven piekafvoer bij Andernach, het inzetcriterium is gebaseerd op de conditionele overschrijdingskans bij een onderzoekslocatie bij gegeven piekafvoer bij Lobith. Bij het bepalen van de overschrijdingskansen wordt rekening gehouden met de onzekerheden in de hoogwatervoorspellingen, zie paragraaf 3.5. Een kwantificering van de criteria wordt in de volgende hoofdstukken gegeven.



Figuur 3-1 Vereenvoudigde beslisboom bij evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied

### 3.3 Schematisatie noodoverloopgebied

#### 3.3.1 Noodoverloopgebied bij Lobith

In dit onderzoek wordt gerekend met één noodoverloopgebied bij Lobith. Dit noodoverloopgebied is een schematisatie van Rijnstrangen en Ooijpolder die door Commissie Noodoverloopgebieden zijn aangeraden om aan te wijzen als noodoverloopgebieden, zie Figuur 3-2. De bergingscapaciteit van Rijnstrangen bedraagt 90 miljoen m<sup>3</sup>, de bergingscapaciteit van de Ooijpolder bedraagt (wanneer de woonkernen niet extra beschermd worden) 130 miljoen m<sup>3</sup> [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. Als het te bergen volume kleiner is dan 90 miljoen m<sup>3</sup>, wordt alleen Rijnstrangen gebruikt. Zodra het volume groter wordt, zal ook de Ooijpolder worden aangewend. Het noodoverloopgebied in dit onderzoek heeft een bergingscapaciteit van 220 miljoen m<sup>3</sup>.



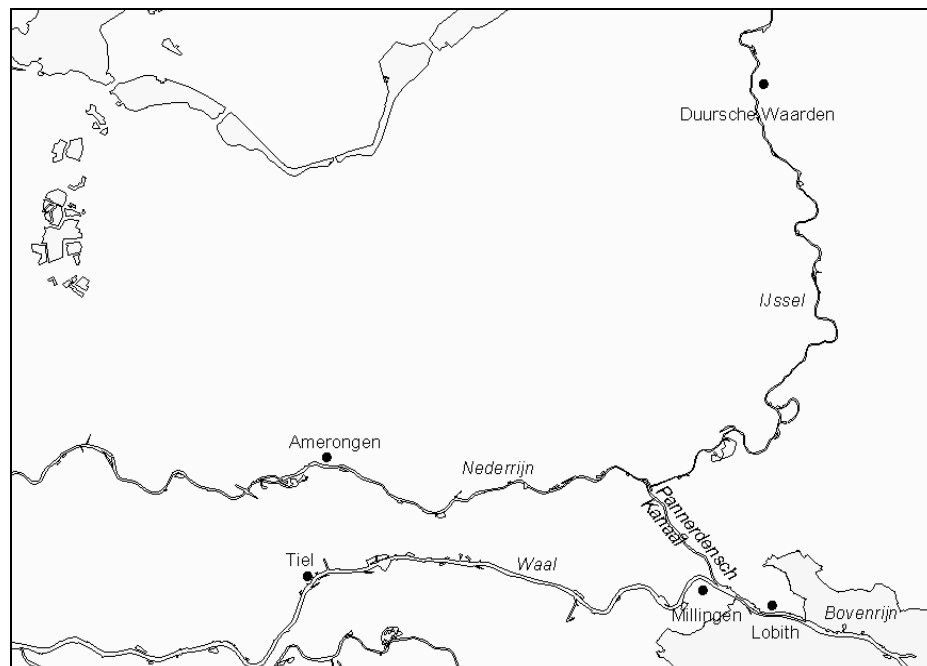
Figuur 3-2 Geografische ligging Rijnstrangen en Ooijpolder [HKV LIJN IN WATER en WL | Delft Hydraulics, 2003]

### 3.3.2 Instroom noodoverloopgebied

Het inlaatwerk van het noodoverloopgebied is een vaste overlaat waarbij wordt begonnen met inlaten zodra de afvoer groter wordt dan de afvoer die hoort bij het inzetcriterium. Doordat we uitgaan van een vaste overlaat, is er geen sprake van verschillende manieren van aftoppen [Stijnen et al., 2002]. We nemen aan dat het inlaatwerk zich op het meest bovenstroomse punt van het noodoverloopgebied bevindt. Het maximale instroomdebiet is 2000 m<sup>3</sup>/s, deze waarde is ook verondersteld in het onderzoek van Heynert [2002] waar het advies van de Commissie Noodoverloopgebieden (onder andere) op gebaseerd is. De wijze waarop wordt omgegaan met de aftopping van de afvoergolf en de instroom naar het noodoverloopgebied is te vinden in Stijnen et al. [2002].

### 3.4 Onderzoekslocaties

De overschrijdingskansen worden in dit onderzoek bepaald voor een aantal onderzoekslocaties langs de Rijntakken. Deze locaties en gegevens daarvan zijn weergegeven in Tabel 3-1 en in Figuur 3-3. Er is voor deze locaties gekozen, omdat dezelfde locaties eerder zijn onderzocht in Stijnen et al. [2002]. Langs elk van de Rijntakken is een onderzoekslocatie gesitueerd (Tiel, Amerongen en Duursche Waarden). Verder is er nog een onderzoekslocatie bij Lobith en een onderzoekslocatie bij Millingen, vlakbij het splitsingspunt van de Waal en het Pannerdensch Kanaal. De verschillende onderzoekslocaties zijn gelegen bij MSW-meetstations (Monitoring Systeem Water).



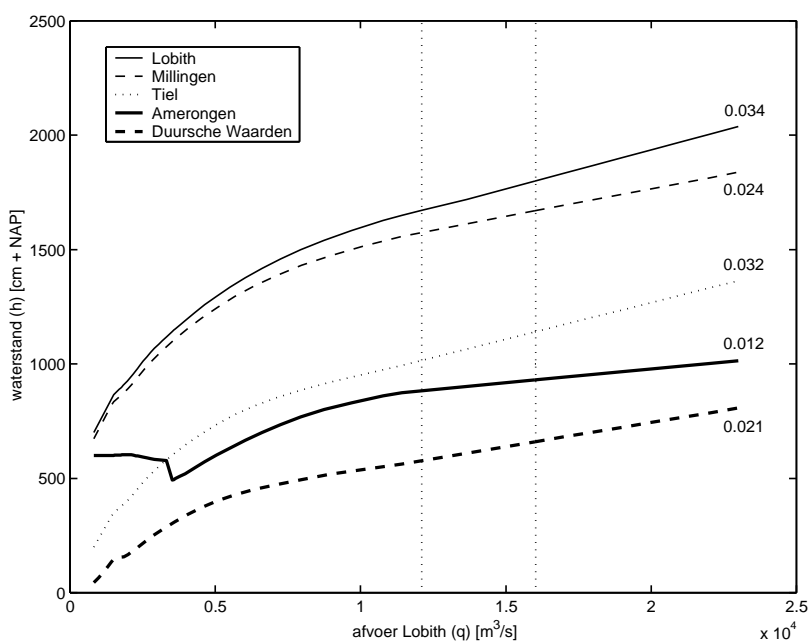
Figuur 3-3 Geografische ligging van onderzoekslocaties [Stijnen et al., 2002]

In paragraaf 2.2 is naar voren gekomen dat de waakhogte van de dijk onder andere dient voor golfoverslag en de onzekerheid in de berekende toetspeilen. Omdat we op het traject van Lobith tot de onderzoekslocaties alleen rekening houden met onzekerheden in de waterstandsvoorspellingen, kiezen we een extra hoogte voor de onzekerheid in de waterstand. Het is echter niet zo dat precies een bepaald deel van de waakhogte bedoeld is voor deze onzekerheid. We kiezen ervoor om te rekenen met een extra hoogte van 30 centimeter.

Voor elk van de vijf locaties zijn er relaties tussen de afvoer bij Lobith ( $q$ ) en de waterstand ( $h$ ) op die locaties, de zogenaamde  $qh$ -relaties. Deze relaties zijn weergegeven in Figuur 3-4 [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001], [Stijnen et al., 2002].

Plaats	Kilometerraai	Rivier	Toetspeil [m + NAP]	Dijkhoogte [m + NAP] (met extra hoogte)
Lobith	862 (r)	Bovenrijn	18.0	18.3
Millingen	868 (l)	Waal	16.7	17.0
Tiel	915 (r)	Waal	11.4	11.7
Amerongen	918 (l)	Nederrijn	9.3	9.6
Duursche Waarden	961 (r)	IJssel	6.6	6.9

Tabel 3-1 Gegevens van onderzoekslocaties,  $r$  = rechtoever,  $l$  = linkeroever



Figuur 3-4 Relaties tussen afvoer bij Lobith en waterstanden bij verschillende onderzoekslocaties [Stijnen et al., 2002], getallen geven steilheid weer boven  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  in  $\text{cm}/\text{m}^3\text{s}^{-1}$

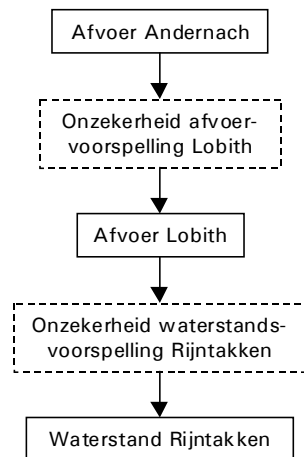
De  $qh$ -relaties verschillen van elkaar op twee aspecten: de hoogte en de helling. De verschillen in hoogte worden veroorzaakt door de verschillende hoogteliggingen van de onderzoekslocaties, de verschillen in dwarsprofielen en de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. Het verschil in helling wordt veroorzaakt door verschillen in dwarsprofielen en verschillen in ruwheid in uiterwaarden. Rivieren met bredere dwarsprofielen hebben een vlakkere  $qh$ -relatie. De knik in de  $qh$ -relatie bij Amerongen wordt veroorzaakt door een stuw. In dit onderzoek rekenen we met extreem hoge afvoeren (in ieder geval hoger dan  $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en is de knik niet van belang.

Het deel van de  $qh$ -relaties van  $12.060 \text{ m}^3/\text{s}$  (hoogst gemeten afvoer) tot  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  is verkregen door lineaire interpolatie [Stijnen et al., 2002], waarbij de toetspeilen (bij een afvoer van  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) komen uit de Hydraulische Randvoorwaarden [2002]. De  $qh$ -relaties voor afvoeren boven de  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  worden verkregen door lineaire extrapolatie.



### 3.5 Onzekere hoogwatervoorspellingen

De onzekere hoogwatervoorspellingen worden op twee verschillende manieren meegenomen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de afvoervoorspelling voor Lobith en de waterstandsvoorspellingen voor de verschillende onderzoekslocaties langs de Rijntakken, zie Figuur 3-5. In de volgende twee paragrafen komt naar voren welke onzekerheden, die in bijlage A zijn besproken, worden meegenomen.



Figuur 3-5 Onzekere hoogwatervoorspellingen

#### 3.5.1 Afvoervoorspelling Lobith

De eerste voorspellingonzekerheid is de onzekerheid in de voorspelling van de piekafvoer bij Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach. Uit metingen leiden we een verband af tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith: een betrekkinglijn. Deze data-analyse (zie bijlage B) leidt tevens tot een bepaalde onzekerheid in de vorm van een normale verdeling om de verwachte piekafvoer bij Lobith als functie van de gegeven piekafvoer bij Andernach. De onzekerheid wordt gevormd door factoren als afvoeren van zijrivieren en invloeden van het weer. We maken een onderscheid tussen een betrekkinglijn zonder de onzekerheid in de afvoervoorspelling en met deze onzekerheid. In bijlage B komt de afleiding van beide betrekkinglijnen naar voren.

##### Betrekkinglijn zonder onzekerheid afvoervoorspelling

Wanneer geen rekening wordt gehouden met onzekerheden in de afvoervoorspelling, is de volgende betrekkinglijn geldig, met  $a = 1.1$ . De piekafvoer bij Lobith wordt gegeven door  $qL$  en de piekafvoer bij Andernach wordt gegeven door  $qA$ .

$$qL = a \cdot qA \quad (3.1)$$

##### Betrekkinglijn met onzekerheid afvoervoorspelling

Als we de onzekerheid in de afvoervoorspelling wel meenemen, wordt de parameter  $a$  onzeker. Deze parameter heeft een normale verdeling. We gebruiken de volgende waarden voor de verwachtingswaarde en de standaarddeviatie van de piekafvoer bij Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach, met  $a_1 = 1.0429$ ,  $a_2 = 265 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $a_3 = 0.09$  (zie ook bijlage B).

$$\begin{aligned} \mu_{qL} &= E(qL) = a_1 \cdot qA + a_2 \\ \sigma_{qL} &= a_3 \cdot qA \end{aligned} \quad (3.2)$$

### 3.5.2 Waterstandsvoorspelling Rijntakken

De tweede bron van onzekerheid wordt gevormd door de waterstandsvoorspellingen voor de verschillende onderzoekslocaties langs de Rijntakken die gebaseerd zijn op de piekafvoer bij Lobith. Deze onzekerheid komt voort uit onzekerheden in de afvoerverdeling op de splitsingspunten, de geometrie, de ruwheid, de interpolatie van waterstanden tussen de meetstations en de onzekerheid bij het gebruik van noodoverloopgebieden [Stijnen et al., 2002]. In hoofdstuk 6 wordt de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling gekwantificeerd.

## 3.6 Effectiviteit van noodoverloopgebied

### 3.6.1 Effectiviteit

De effectiviteit van het noodoverloopgebied wordt gedefinieerd met de volgende formule [Stijnen et al., 2002].

$$E_{NOG} = \frac{\text{overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied}}{\text{overschrijdingskans met noodoverloopgebied}} \quad (3.3)$$

Deze definitie van de effectiviteit van het noodoverloopgebied is alleen afhankelijk van de overschrijdingskansen. De waarde van de effectiviteit ligt tussen bijna 0 en oneindig.

### 3.6.2 Overschrijdingskansen

De overschrijdingskansen zijn nodig voor het bepalen van de effectiviteit. Ze worden berekend met behulp van numerieke integratie (in de volgende hoofdstukken komt dit naar voren). Er wordt rekening gehouden met de onzekere hoogwatervoorspellingen en de overschrijdingskansen worden berekend voor twee verschillende situaties. De eerste is de situatie waarin er geen gebruik wordt gemaakt van noodoverloopgebieden, de tweede is de situatie waarin we beschikken over een noodoverloopgebied en de mogelijkheid hebben om het te gebruiken.

#### Zonder noodoverloopgebied

De overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied bepalen we door de kans te berekenen dat de waterstand hoger wordt dan de dijkhoogte. De dijkhoogte is eerst gelijk aan het toetspeil, later gelijk aan het toetspeil plus de extra hoogte.

#### Met noodoverloopgebied

Bij het bepalen van de overschrijdingskans met noodoverloopgebied gaan we er vanuit dat noodoverloopgebieden zijn aangewezen en ingezet kunnen worden. Hiermee wordt bedoeld dat we beschikken over een noodoverloopgebied. Als de hoogwatergolf bij Andernach is, moet worden besloten over evacuatie en over mogelijke inzet. (In de situatie met noodoverloopgebied kan dus ook worden besloten om het gebied niet te evacueren of in te zetten.)

De formule voor het bepalen van de overschrijdingskans met noodoverloopgebied is weer gegeven in vergelijking (3.4) en bestaat uit twee delen. Het eerste deel is de overschrijdingskans waarbij het noodoverloopgebied niet geëvacueerd is (en dus ook niet wordt ingezet), dit is de linker tak in Figuur 3-1. Het tweede deel is de kans op overschrijding waarbij het noodoverloopgebied wel geëvacueerd is, dit is de rechter tak in Figuur 3-1. Bij deze tweede kans wordt het noodoverloopgebied ingezet zodra de afvoer bij Lobith een bepaalde afvoer (inzet criterium) overschrijdt.

$$\begin{aligned}
 P(\text{overschrijden}) &= P(\text{overschrijden} \cap \text{geen evacuatie}) + \\
 &\quad P(\text{overschrijden} \cap \text{evacuatie}) = \\
 P(\text{overschrijden}) &= P(\text{overschrijden} | \text{geen evacuatie}) \cdot P(\text{geen evacuatie}) + \\
 &\quad P(\text{overschrijden} | \text{evacuatie}) \cdot P(\text{evacuatie})
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

### 3.6.3 Faalmechanisme overloop

Uitgangspunt bij het ontwerpen van dijken is dat overloop en golfoverslag de belangrijkste bijdrage leveren aan de overstromingskans [Stijnen et al., 2002], [HKV LIJN IN WATER, 2003] (zie ook Figuur 2-3). Wanneer er vanuit wordt gegaan dat zwakkere plekken van dijken lokaal worden versterkt [Kok et al., 2002] is het eveneens aannemelijk dat overloop en golfoverslag de meeste invloed hebben op de overstromingskans. Daarom beperken we ons in de eerste plaats tot de faalmechanismen met betrekking tot de dijkhoogte.

In verband met het tijdsbestek van dit onderzoek, wordt alleen het mechanisme *overloop* bestudeerd. De consequentie van deze beperking is dat de overschrijdingskansen die berekend worden kleiner zijn dan in werkelijkheid het geval is. In de discussie (hoofdstuk 9) wordt hierop teruggekomen.

### 3.6.4 Grenstoestandsfunctie

Of in een dijkvak wel of geen overbelasting (algemeen) optreedt, kan beschreven worden met een grenstoestandsfunctie. Voor deze grenstoestandsfunctie wordt de letter  $Z$  gebruikt. De functie is opgebouwd uit twee delen, één deel voor de sterkte van de dijk, het andere deel voor de belasting op de dijk.

$$Z = \text{sterkte} - \text{belasting} \tag{3.5}$$

In alle gevallen waarvoor geldt dat  $Z > 0$  is er geen overbelasting, aangezien de sterkte op dat moment groter is dan de belasting. Wanneer geldt dat  $Z < 0$  en de belasting dus groter is dan de sterkte, is er wel sprake van overbelasting. De waarden waarvoor geldt dat  $Z = 0$  vormen de grenstoestand. Voor elk faalmechanisme kan een grenstoestandsfunctie worden opgesteld.

Wanneer het mechanisme overloop wordt onderzocht, kan de volgende grenstoestandsfunctie worden opgesteld. In het dijkvak wordt de dijkhoogte wel overschreden wanneer de waterstand  $h$  hoger wordt dan een bepaalde kritieke waterstand,  $h_c$ .

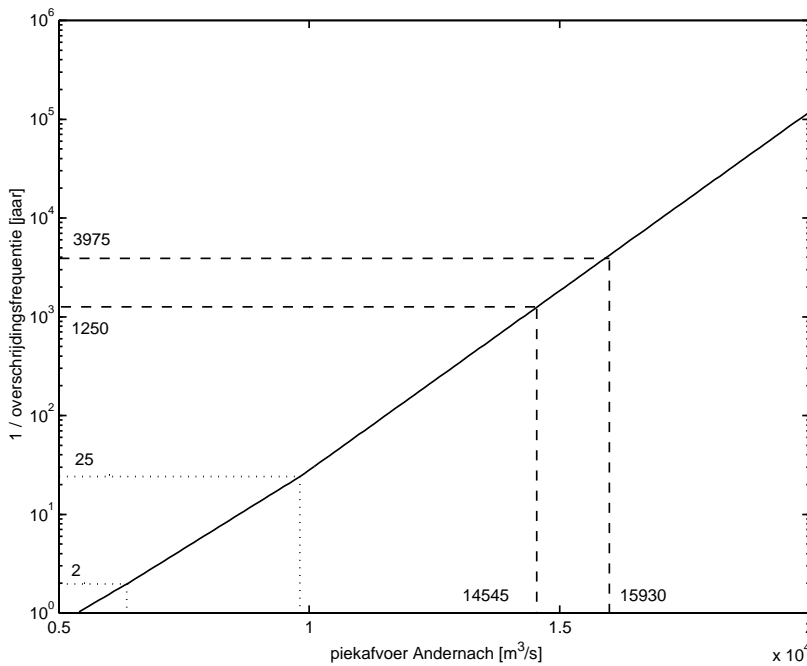
$$Z^h = h_c - h \tag{3.6}$$

De kritieke waterstand  $h_c$  stellen we gelijk aan het toetspeil (later plus de extra hoogte). De waterstand  $h$  bepalen we met behulp van qh-relaties (zie paragraaf 3.4).

## 3.7 Werklijn bij Andernach

Een werklijn  $\Psi(q)$  geeft de overschrijdingsfrequentie van de afvoer  $q$  in één jaar weer. De werklijn bij Andernach,  $\Psi_A$ , is gebaseerd op de werklijn bij Lobith (voor afleiding zie bijlage C). De werklijn bij Andernach wordt gegeven door vergelijking (3.7) en is weergegeven in Figuur 3-6.

$$qA(T) = \begin{cases} 5357.5 + 1473.4 \ln(T) & 1 \leq T < 2 \\ 5422.4 + 1379.8 \ln(T) & 2 \leq T < 25 \\ 6011.5 + 1196.8 \ln(T) & 25 \leq T < 10.000 \end{cases} \quad (3.7)$$



Figuur 3-6 Werklijn bij Andernach

In de figuur zijn de overschrijdingsfrequenties van de afvoeren bij Andernach te zien. Naast de knikken (bij  $T = 2$  jaar en  $T = 25$  jaar) die met gestippelde lijnen zijn weergegeven, zijn er twee andere punten aangegeven met de gestreepte lijnen. Het gaat hier om twee specifieke afvoeren bij Andernach. Het eerste punt, bij een afvoer van  $14.545 \text{ m}^3/\text{s}$  met een overschrijdingsfrequentie van  $1/1250$  per jaar, komt overeen met de maatgevende afvoer van  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. Het andere punt, bij een afvoer van  $15.930 \text{ m}^3/\text{s}$  met een overschrijdingsfrequentie van  $1/3975$  per jaar, komt overeen met een afvoer van  $17.520 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. In paragraaf 4.3.2 wordt het belang van dit laatste punt uitgelegd.

Voor berekeningen in dit onderzoek hebben we geen frequenties nodig, maar kansen per jaar. Bij hoge afvoeren (met een herhalingstijd groter dan 10 jaar) kan gesteld worden dat kansen en frequenties gelijk zijn [Van Noortwijk, 2002], [Stijnen et al., 2002]. Dit is weergegeven in vergelijking (3.8). De overschrijdingskans van een bepaalde afvoer  $P(Q > q)$  is dan gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van die afvoer  $\Psi(q)$ .

$$P(Q > q) = \Psi(q) \quad \text{voor } T > 10 \text{ jaar} \quad (3.8)$$

Met behulp van de werklijn kunnen de jaarlijkse overschrijdingskansen van bepaalde afvoeren worden berekend.

### 3.8 Afvoergolf

In dit onderzoek is de duur van een afvoergolf vastgesteld op 23 dagen: 13 voor de was en 10 voor de val van de golf [Stijnen et al., 2002]. De afvoergolf wordt in blokjes van 12 uur opgedeeld. Ieder blokje is gelijk aan de maximale waterstand binnen het betreffende blokje. Bij elk blokje van de afvoergolf kan de waterstand de dijkhoogte overschrijden.

In bijlage A is naar voren gekomen dat de vorm van de afvoergolf onzeker is. Onderzoek toont aan dat het meenemen van de *onzekerheid in de golfvorm* weinig invloed heeft op de resulterende effectiviteit van het noodoverloopgebied [Stijnen et al., 2002]. Het meenemen van de golfvorm zelf is echter wel belangrijk. De 50% golfvorm geeft een goede representatie van de onzekerheden in de golfvorm, daarom wordt in dit onderzoek alleen gerekend met de 50% golfvorm. In Figuur A-2 (pagina 73) zijn verschillende golfvormen te zien.

Als we de onzekerheden in de waterstandsvoorspellingen voor de verschillende onderzoekslocaties niet meenemen, is er precies één afvoer bij Lobith aan te wijzen die het eerst tot overschrijding zal leiden. Bij alle afvoeren daarboven wordt ook de dijkhoogte overschreden. Zodra de onzekere waterstandsvoorspellingen wel worden meegenomen, kan het gebeuren dat tijdens de piek van de golf de waterstand de dijkhoogte niet overschrijdt, terwijl dit in een waterstandsblokje ernaast wel gebeurt. De waterstanden en de waterstandsvoorspellingen in de blokken van 12 uur zijn onafhankelijk. In hoofdstuk 6 wordt hier verder op ingegaan.



## 4 Overschrijdingskansen zonder onzekerheden

### 4.1 Overschrijdingskansen volgens Commissie Noodoverloopgebieden

Zoals in paragraaf 2.3.2 is vermeld, is door de Commissie Noodoverloopgebieden onderzoek gedaan naar noodoverloopgebieden. In deze paragraaf worden de voor dit onderzoek relevante resultaten gepresenteerd. De informatie komt uit Heynert [2002]. De overschrijdingskansen zijn berekend door voor een bekende piekafvoer te bepalen bij welke golfvorm de afvoergolf precies afgetopt kan worden. De overschrijdingskans is dan de kans op bredere golfvormen dan die specifieke golfvorm. In Kader 4-1 is een voorbeeld weergegeven. Bij deze berekening wordt uitgegaan van optimale inzet.

Er is een noodoverloopgebied beschikbaar met een capaciteit van 220 miljoen m<sup>3</sup>. Stel dat zich bij Lobith een piekafvoer ( $qL$ ) voordoet van 17.500 m<sup>3</sup>/s. Met behulp van onderstaande vergelijking kan het volume van de golf boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s worden berekend bij een bepaalde golfvorm.

$$V = a \left( \frac{qL}{16000} \right)^{1-b} \left( \frac{qL - 16000}{1000} \right)^b$$

De waarden van  $a$  en  $b$  zijn afhankelijk van de golfvorm. Bij een golfvorm van 50% hoort  $a = 116$  en  $b = 1.7$ , bij een golfvorm van 55% geldt  $a = 227.9$  en  $b = 1.7$ . Het volume van de golf boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s is bij een 50% golfvorm gelijk aan 217.1 miljoen m<sup>3</sup> en bij een 55% golfvorm gelijk aan 227.9 miljoen m<sup>3</sup>. Door middel van interpolatie kan berekend worden bij welke golfvorm het noodoverloopgebied van 220 miljoen m<sup>3</sup> precies vol raakt. Dit gebeurt bij een golfvorm van 51.3%. Dit betekent dat er een kans van 51.3% is dat er een kleinere golfvorm optreedt.

Concluderend kan gesteld worden dat wanneer een hoogwatergolf plaatsvindt met een piekafvoer van 17.500 m<sup>3</sup>/s er een kans is van 0.513 dat de golf afgetopt kan worden tot 16.000 m<sup>3</sup>/s en dus een kans op overschrijding van  $(1 - 0.513) = 0.487$ .

*Kader 4-1 Voorbeeld bepalen overschrijdingskansen Commissie Noodoverloopgebieden [Heynert, 2002]*

Wanneer de berekening wordt uitgevoerd voor alle mogelijke piekafvoeren en deze resultaten worden gecombineerd met de overschrijdingskansen van die piekafvoeren (zie ook paragraaf 3.7), kan de totale overschrijdingskans bepaald worden.

De overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied is gelijk aan 1/1250. Inzet van een noodoverloopgebied met een capaciteit van 220 miljoen m<sup>3</sup> levert een overschrijdingskans van 1/3872. Hierbij is er vanuit gegaan dat het gebied altijd ingezet kan worden, evacuatie speelt geen rol. De waarde van de effectiviteit is 3.1.

### 4.2 Evacuatie- en inzetcriterium

In dit hoofdstuk wordt geen rekening gehouden met onzekerheden; één bepaalde piekafvoer bij Andernach leidt tot één piekafvoer bij Lobith die resulteert in één waterstand op een locatie langs de Rijntakken. Het noodoverloopgebied wordt geëvacueerd zodra de afvoer bij Andernach zonder noodoverloopgebied zal leiden tot overschrijding, dat is bij 14.545 m<sup>3</sup>/s. Het noodoverloopgebied wordt ingezet zodra de afvoer bij Lobith de 16.000 m<sup>3</sup>/s overschrijdt.

## 4.3 Overschrijdingskansen zonder extra hoogte

### 4.3.1 Zonder noodoverloopgebied

Overschrijding treedt op zodra de waterstand hoger wordt dan het toetspeil. Omdat de dijkhoogte gelijk is aan het toetspeil en het toetspeil rechtstreeks volgt uit een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, is de overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied gelijk aan de overschrijdingskans van de afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith komt overeen met een afvoer van 14.545 m<sup>3</sup>/s bij Andernach, zie vergelijking (3.1). De overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied wordt dan gegeven door vergelijking (4.1).

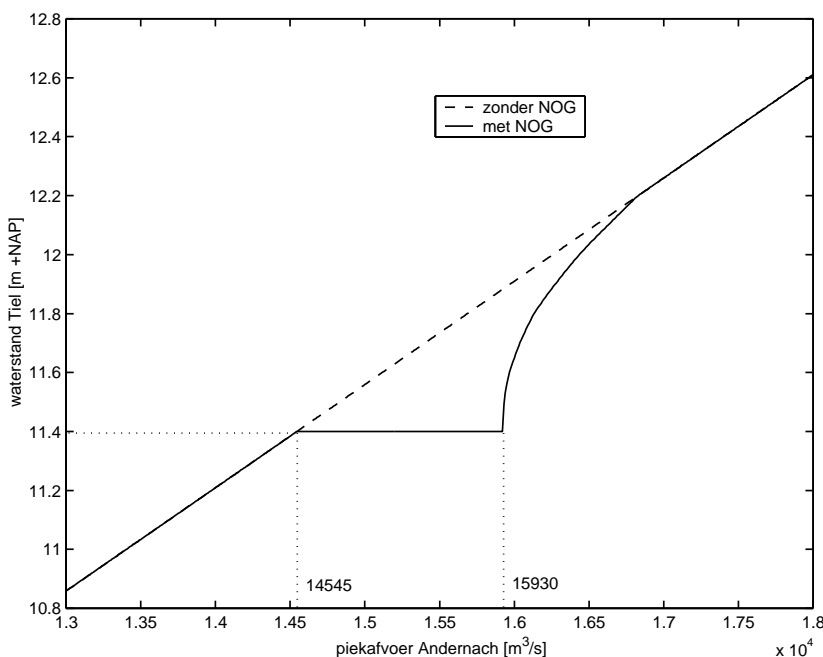
$$\begin{aligned} P(\text{overschrijden zonder NOG}) &= P(qL > 16000) = \\ P(qA > 14545) &= \Psi_A(14545) = 1/1250 \end{aligned} \quad (4.1)$$

### 4.3.2 Met noodoverloopgebied

De methode die in paragraaf 3.6.2 is beschreven om de overschrijdingskans met noodoverloopgebied te bepalen passen we in dit hoofdstuk niet toe. Omdat er geen onzekerheden worden meegenomen, is er precies één afvoer aan te wijzen, waarbij het noodoverloopgebied geëvacueerd en ingezet wordt. Er treedt overschrijding op zodra het noodoverloopgebied vol is. Bij het noodoverloopgebied met een capaciteit van 220 miljoen m<sup>3</sup> gebeurt dit zodra de afvoer bij Lobith groter wordt dan 17.520 m<sup>3</sup>/s. Deze afvoer komt overeen met een afvoer van 15.930 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. De overschrijdingskans wordt berekend met de volgende vergelijking (zie ook Figuur 3-6).

$$\begin{aligned} P(\text{overschrijden met NOG}) &= P(qL > 17520) = \\ P(qA > 15930) &= \Psi_A(15930) = 1/3975 \end{aligned} \quad (4.2)$$

In Figuur 4-1 zijn voor de locatie Tiel de qh-relaties weergegeven met en zonder inzet van het noodoverloopgebied.

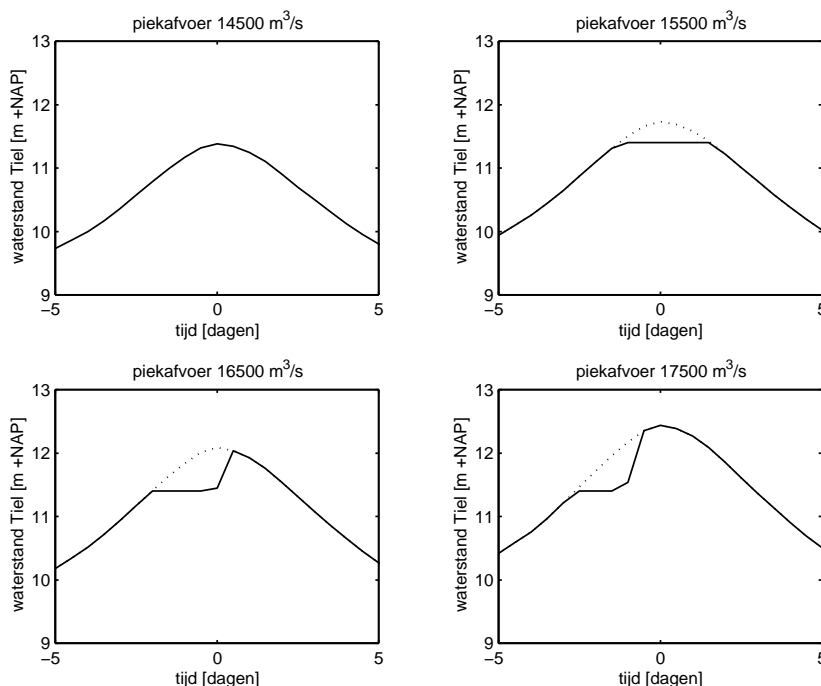


Figuur 4-1 Qh-relatie bij Tiel, met en zonder noodoverloopgebied



Uit Figuur 4-1 komt naar voren dat het noodoverloopgebied wordt ingezet bij een afvoer bij Lobith die bij Tiel leidt tot een waterstand van 11.4 m + NAP. Dit is het toetspeil dat direct volgt uit de afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, wat overeenkomt met een afvoer van 14.545 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. De waterstand neemt tijdelijk niet meer toe. Vanaf de piekafvoer waarbij het noodoverloopgebied precies vol raakt (een afvoer van 15.930 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) zorgt het restvolume (dat niet meer in het noodoverloopgebied past) voor een steeds hogere waterstand totdat de twee qh-relaties weer gelijk zijn.

In Figuur 4-2 (zie onderstaand) zijn de waterstanden bij Tiel uitgezet als functie van afvoeren met verschillende piekafvoeren bij Andernach. Bij een afvoergolf met een piekafvoer van 14.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach wordt het noodoverloopgebied niet ingezet, dit is linksboven. Zodra de afvoer groter wordt dan 14.545 m<sup>3</sup>/s wordt het noodoverloopgebied ingezet en een afvoergolf met een piekafvoer van bijvoorbeeld 15.500 m<sup>3</sup>/s kan helemaal worden afgetopt (rechtsboven). Inlaten van water begint precies bij een waterstand van 11.4 m + NAP (toetspeil). Een afvoergolf met een piekafvoer van 15.930 m<sup>3</sup>/s bij Andernach kan nog precies worden afgetopt. Zodra de afvoer bij Andernach groter wordt, kan niet de gehele afvoergolf worden geborgen in het noodoverloopgebied (linksonder). Het restvolume leidt tot een waterstandsverhoging. De waterstand is dan niet gelijk aan de waterstand zonder noodoverloopgebied, omdat de piek van de afvoergolf niet bereikt wordt. De qh-relaties met en zonder noodoverloopgebied zijn dan nog niet aan elkaar gelijk (zie Figuur 4-1). Bij een afvoergolf met een piekafvoer van 17.500 m<sup>3</sup>/s is het noodoverloopgebied vol voordat de piek van de golf zich voordoet (rechtsonder). De qh-relaties met en zonder noodoverloopgebied zijn dan weer aan elkaar gelijk. In deze laatste figuur valt op dat het inlaten van water iets eerder begint dan bij 16.000 m<sup>3</sup>/s. Dit wordt veroorzaakt door de numerieke berekening. Bovendien loopt de afvoergolf met noodoverloopgebied na begin van inlaat niet het hele stuk horizontaal, maar zit er een knik in, die gevolg is van het maximale instroomdebiet van 2000 m<sup>3</sup>/s. In paragraaf 7.2 is het verloop van de afvoergolf met noodoverloopgebied uitgebreider toegelicht.



Figuur 4-2 Effect van een noodoverloopgebied op afvoergolven met verschillende piekafvoeren bij Andernach

### 4.3.3 Effectiviteit

De effectiviteit van het noodoverloopgebied wordt bepaald met vergelijking (3.3) en geeft als resultaat een waarde van 3.2. De resultaten van de Commissie Noodoverloopgebieden (paragraaf 4.1) komen overeen met deze resultaten.

## 4.4 Overschrijdingskansen met extra hoogte

In deze paragraaf veranderen we de dijkhoogte, die nu gelijk wordt gesteld aan het toetspeil plus de extra hoogte. Deze hoogte is eigenlijk bedoeld voor de onzekerheid in de waterstand (die we in dit hoofdstuk niet meenemen). Omdat we in hoofdstuk 7 wel de onzekere waterstandsvoorspellingen meenemen, rekenen we nu ook alvast met de extra hoogte.

De overschrijdingskansen en waarden van de effectiviteit verschillen per locatie (door verschillen in qh-relaties) en kunnen niet meer rechtstreeks uit de werklijn worden afgeleid. De overschrijdingskans kunnen we berekenen met vergelijking (4.3). Dit is de basisvergelijking in het huidige onderzoek.

$$P(\text{overschrijden}) = \int_{qA=0}^{\infty} P(\text{overschrijden} | qA) f_{qA}(qA) dqA \quad (4.3)$$

De kansdichtheidsfunctie van de piekafvoer bij Andernach wordt weergegeven door  $f_{qA}$ . Integreren van de kansdichtheidsfunctie over een bepaald interval levert een kans. De oppervlakte onder de kansdichtheidsfunctie is altijd gelijk aan 1. De afgeleide van de werklijn (paragraaf 3.7) is de frequentiedichtheidsfunctie van de piekafvoer bij Andernach. Omdat we rekenen met grote terugkeertijden kan de frequentiedichtheidsfunctie gelijk worden gesteld aan de kansdichtheidsfunctie (zie ook paragraaf 3.7), dit is weergegeven in vergelijking (4.4). De  $f_{qA}$  kan dan bepaald worden met behulp van de werklijn.

$$\begin{aligned} \psi(q) &= -\frac{d}{dq} \Psi(q) \\ f_q(q) &= \psi(q) \end{aligned} \quad (4.4)$$

De conditionele kans gegeven de piekafvoer bij Andernach,  $P(\text{overschrijden} | qA)$ , berekenen we met behulp van de grenstoestandsfunctie (zie ook paragraaf 3.6.4). Bij de grenstoestandsfunctie is  $Z < 0$  gedefinieerd als overschrijding. In de grenstoestandsfunctie wordt de waterstand vergeleken met de dijkhoogte. Omdat de waterstanden ( $h$ ) volgen uit de piekafvoer bij Andernach ( $qA$ ) kan de volgende vergelijking worden opgesteld, let op:  $Z^{qA}$  (de grenstoestandsfunctie van de piekafvoer bij Andernach) is niet gelijk aan  $Z^h$  (de grenstoestandsfunctie van de waterstand).

$$P(\text{overschrijden} | qA) = P(Z^{qA}(qA) < 0 | qA) = P(Z^h(h) < 0 | h) \quad (4.5)$$

NB: Omdat in dit hoofdstuk geen rekening gehouden wordt met onzekerheden is de  $P(\text{overschrijden} | qA)$  gelijk aan 0 of 1. In de volgende hoofdstukken, waarbij wel onzekerheden worden meegenomen, is dit niet meer het geval en kan de waarde variëren tussen 0 en 1.

Omdat de vergelijkingen die we gebruiken uiteindelijk numeriek berekend moeten worden, gebruiken we de indicatorfunctie  $\mathcal{I}$  om de grenstoestandsfunctie mee te nemen. Deze is gedefinieerd in vergelijking (4.6).

$$\mathcal{I}_B(x) = \begin{cases} 1 & \text{als } x \in B \\ 0 & \text{als } x \notin B \end{cases} \quad (4.6)$$

In dit onderzoek gebruiken we de indicatorfunctie met  $x = Z$  en  $B = (-\infty, 0)$ . Onderstaande vergelijking is dan geldig.

$$\mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z^{qA}(qA)) = \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z^h(h)) \quad (4.7)$$

We kunnen de overschrijdingskans berekenen met vergelijking (4.8). Op deze manier worden alleen die afvoeren meegenomen die bijdragen aan de overschrijdingskans (de waarde van de indicatorfunctie is dan 1).

$$P(\text{overschrijden}) = \int_{qA=0}^{\infty} \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z(qA)) f_{qA}(qA) dqA \quad (4.8)$$

Discretisatie van deze vergelijking door middel van numerieke integratie en gebruik van vergelijking (4.7) levert vergelijking (4.9). Deze vergelijking is de gediscretiseerde basisvergelijking in het huidige onderzoek.

$$\begin{aligned} P(\text{overschrijden}) &= \sum_{i=1}^N P(\text{overschrijden} | qA_i) f_{qA}(qA_i) \Delta qA = \\ &= \sum_{i=1}^N \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z(h_i)) f_{qA}(qA_i) \Delta qA \end{aligned} \quad (4.9)$$

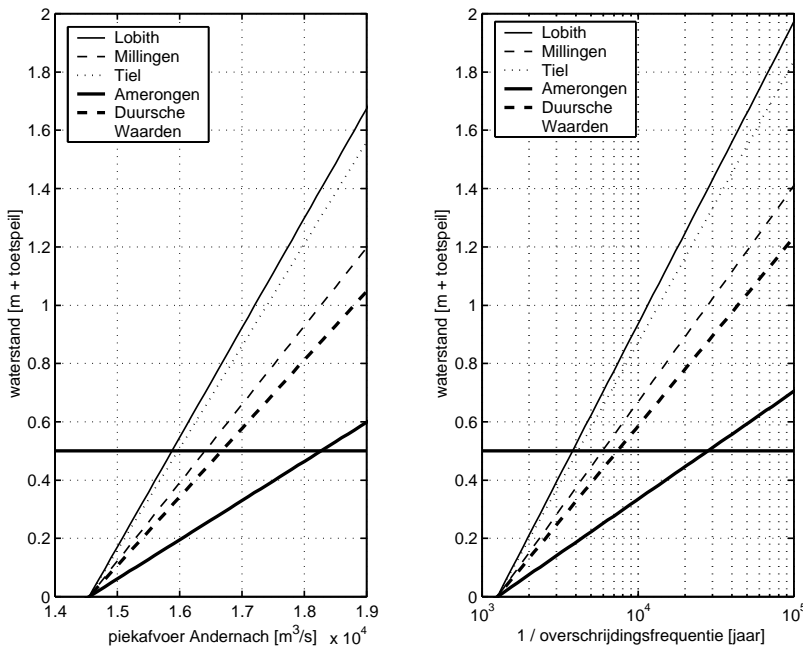
Hierin is  $qA_i$  de piekafvoer bij Andernach die hoort bij de  $i^e$  stap,  $N$  staat voor het aantal stappen in de discretisatie,  $Z$  is de grenstoestandsfunctie en  $h_i$  is de waterstand die hoort bij de  $i^e$  stap en bij  $qA_i$ . Verder geldt dat  $\Delta qA$  gelijk is aan de stapgrootte tussen twee opeenvolgende afvoeren en  $qA_i = qA_1 + (i - 1) \Delta qA$  met  $qA_1$  de ondergrens van de afvoeren die mee worden genomen in de numerieke berekening. Onderscheid tussen de situatie zonder en met noodoverloopgebied wordt gemaakt door verschillen in waterstanden.

In Tabel 4-1 zijn de resultaten weergegeven. De kritieke afvoer is de afvoer bij Andernach die de grens aangeeft tussen wel en niet overschrijden.

Locatie	Overschrijdingskans [-]		Kritieke afvoer [m³/s]		Effectiviteit NOG [-]
	Geen NOG	Wel NOG	Geen NOG	Wel NOG	
Lobith	1 / 2448	1 / 4393	15400	16100	1.8
Millingen	1 / 3145	1 / 4776	15700	16200	1.5
Tiel	1 / 2662	1 / 4393	15500	16100	1.7
Amerongen	1 / 7881	1 / 7881	16800	16800	1.0
Duursche Waarden	1 / 3717	1 / 4776	15900	16200	1.3

Tabel 4-1 Overschrijdingskansen zonder onzekerheden

De overschrijdingskansen zijn kleiner zijn nu de extra hoogte is meegenomen. Vooral de locatie Amerongen heeft een kleine overschrijdingskans. De effectiviteit van het noodoverloopgebied is voor alle locaties kleiner geworden, vergeleken met 3.2 (paragraaf 4.3.3). Bovendien is bij Amerongen de effectiviteit zelfs precies gelijk aan één. In de volgende tekst wordt hier op ingegaan.

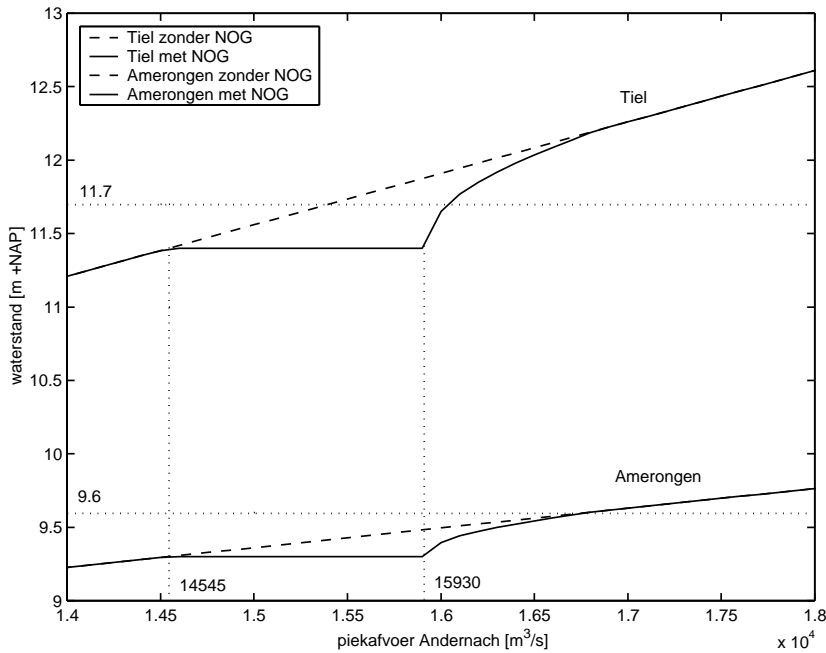


Figuur 4-3 Verband tussen waterstanden boven toetspeil, afvoeren en overschrijdingsfrequenties

De verschillen in overschrijdingskansen worden veroorzaakt doordat de hoogte van de dijk groter is. Links in Figuur 4-3 is per locatie het verband tussen de piekafvoer bij Andernach en de waterstand boven het toetspeil weergegeven. Bij een piekafvoer van  $14.545 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Andernach is de waterstand boven het toetspeil gelijk aan 0. Een waterstand die gelijk is aan het toetspeil plus de extra hoogte van 30 centimeter (de dikke horizontale lijn) levert per locatie een andere bijbehorende piekafvoer bij Andernach. Voor bijvoorbeeld de locatie Lobith wordt de waterstand van 30 centimeter boven het toetspeil overschreden zodra de afvoer bij Andernach groter wordt dan  $15.400 \text{ m}^3/\text{s}$  (vergelijk Tabel 4-1).

Rechts is de waterstand boven het toetspeil uitgezet tegen de overschrijdingsfrequentie. Alle verbanden snijden het toetspeil bij een overschrijdingsfrequentie van  $1/1250$  per jaar. De waterstanden van 30 centimeter boven het toetspeil hebben voor alle locaties een andere overschrijdingsfrequentie en dus een andere overschrijdingskans. Bijvoorbeeld voor Amerongen heeft de waterstand van 30 centimeter boven het toetspeil een overschrijdingsfrequentie van ongeveer  $1/8000$ , wat overeenkomt met de waarde in Tabel 4-1.

In Figuur 4-4 zijn de  $qh$ -relaties met en zonder noodoverloopgebied van Tiel en Amerongen uitgezet tegen de piekafvoer bij Andernach. Inlaten van water in het noodoverloopgebied begint zodra de afvoer bij Lobith groter wordt dan  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  wat overeenkomt met het toetspeil van  $11.4 \text{ m} + \text{NAP}$  bij Tiel en  $9.3 \text{ m} + \text{NAP}$  bij Amerongen. De dijkhoogtes zijn nu gelijk aan het toetspeil verhoogd met de extra hoogte van 30 centimeter. Bij locatie Tiel treedt overschrijding op zodra de waterstand hoger wordt dan  $11.7 \text{ m} + \text{NAP}$ . Het noodoverloopgebied is al ingezet bij een waterstand van  $11.4 \text{ m} + \text{NAP}$ . Eigenlijk heeft alleen de "hap" uit de  $qh$ -relatie boven de  $11.7 \text{ m} + \text{NAP}$  effect op de overschrijdingskansen. Daarom is de effectiviteit veel kleiner dan wanneer geen extra hoogte wordt meegenomen (vergelijk Figuur 4-1). Bij Amerongen is het effect van het noodoverloopgebied op de waterstand al uitgewerkt als de waterstand de dijkhoogte van  $9.6 \text{ m} + \text{NAP}$  bereikt. Daardoor heeft het noodoverloopgebied geen invloed op de overschrijdingskansen en is de effectiviteit gelijk aan 1.



*Figuur 4-4 Qh-relaties zonder en met noodoverloopgebied bij Tiel en Amerongen, met extra hoogte*

Concluderend kan gesteld worden dat de verschillen in overschrijdingskansen en waarden van de effectiviteit bij de onderzoekslocaties alleen veroorzaakt worden doordat elke locatie een andere qh-relatie (met een andere helling) heeft. De waarde van de effectiviteit van het noodoverloopgebied neemt toe naarmate de helling van de qh-relatie groter wordt.

Verhogen van het inzetcriterium (inzetten bij een hogere piekafvoer bij Lobith) tot de afvoer waarbij het toetspeil plus de extra hoogte wordt overschreden, zal leiden tot grotere waarden van de effectiviteit. We moeten er dan wel rekening mee houden dat deze afvoer verschilt per onderzoekslocatie. Omdat de extra hoogte bedoeld is voor onzekerheden in de waterstandsvoorspellingen (die in dit hoofdstuk niet zijn meegenomen) wordt het inzetcriterium niet hoger dan 16.000 m³/s bij Lobith.



## 5 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoervoorspelling

### 5.1 Conditionele kansen bij gegeven piekafvoer Andernach

In paragraaf 4.4 is naar voren gekomen dat om de overschrijdingskans in één jaar te berekenen, de kans op overschrijden *bij een gegeven piekafvoer bij Andernach*:  $P(\text{overschrijden} | qA)$  nodig is, een conditionele overschrijdingskans. Omdat er een onzekerheid bestaat in het verband tussen de piekafvoer bij Andernach en Lobith, is deze waarde niet precies gelijk aan 0 of 1 (wat in het vorige hoofdstuk wel het geval was). Om deze kansen te berekenen hebben we de kansdichtheidsfunctie van de piekafvoer bij Lobith als functie van de piekafvoer bij Andernach nodig:  $f_{qL}$ . De parameters van deze functie zijn gegeven in paragraaf 3.5.1. We kunnen de conditionele kans berekenen met de volgende vergelijking.

$$P(\text{overschrijden} | qA) = \int_{qL=q_{k0}}^{\infty} f_{qL}(qL | qA) dqL \quad (5.1)$$

De waarde  $q_{k0}$  is de piekafvoer bij Lobith die nog net gekeerd kan worden voordat de dijkhoogte wordt overschreden. Deze waarde verschilt per locatie. Om vergelijking (5.1) op te lossen maken we gebruik van een indicatorfunctie (zie ook paragraaf 4.4). Op deze manier rekenen we met alle afvoeren, maar nemen we alleen die afvoeren bij Lobith mee, die groter zijn dan  $q_{k0}$  en dus een bijdrage leveren aan de overschrijdingskans. (Bij afvoeren groter dan  $q_{k0}$  is de waarde van  $(q_{k0} - qL)$  kleiner dan 0, dat geeft voor de indicatorfunctie een 1 en die waarde wordt meegenomen.) We krijgen dan vergelijking (5.2).

$$P(\text{overschrijden} | qA) = \int_{qL=0}^{\infty} \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(q_{k0} - qL) f_{qL}(qL | qA) dqL \quad (5.2)$$

Het oplossen van vergelijking (5.2) doen we door middel van numerieke integratie. Discretisatie van vergelijking (5.2) geeft vergelijking (5.3). Omdat er een directe relatie bestaat tussen  $qL$  en  $h$  vervangen we de term  $(q_{k0} - qL)$  door de grenstoestandsfunctie van de waterstand:  $Z(h)$ .

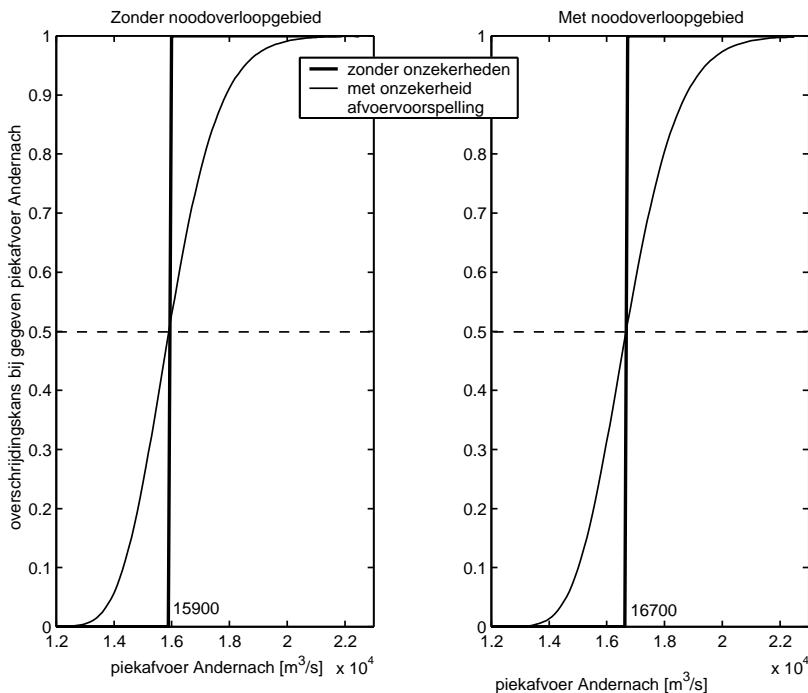
$$P(\text{overschrijden} | qA) \approx \sum_{i=1}^N \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z(h_i)) f_{qL}(qL_i | qA) \Delta qL \quad (5.3)$$

Hierin is  $qL_i$  de piekafvoer bij Lobith die hoort bij de  $i^e$  stap,  $N$  is het aantal stappen,  $\Delta qL$  is de stapgrootte,  $Z$  is de grenstoestandsfunctie en  $h_i$  is de waterstand die hoort bij de  $i^e$  stap en bij  $qL_i$ . Verder geldt dat  $qL_i = i \Delta qL$ .

Met behulp van deze discretisatie kan voor elke gegeven afvoer bij Andernach bepaald worden wat de conditionele kans is bij de verschillende onderzoekslocaties. In Figuur 5-1 is links de conditionele kans bij gegeven piekafvoer bij Andernach zonder noodoverloopgebied te zien als functie van die piekafvoer.

De conditionele kans wanneer wel een noodoverloopgebied wordt ingezet berekenen we op een analoge wijze. In deze situatie treedt overschrijding op zodra er zich bij Lobith een afvoer

voordoet die groter is dan die afvoer die nog kan worden afgetopt door het noodoverloopgebied,  $q_{k1}$ . De waarde van deze afvoer verschilt per onderzoekslocatie. Om de conditionele kans bij gegeven piekafvoer bij Andernach te bepalen met inzet van een noodoverloopgebied kunnen we gebruik maken van dezelfde discretisatie als zonder noodoverloopgebied, vergelijking (5.3). Het enige verschil is dat de  $h_i$ , de waterstand die hoort bij de  $i^e$  stap en bij  $qL_i$ , anders is doordat het noodoverloopgebied wordt ingezet. Met andere woorden: onderscheid tussen de situatie zonder en met noodoverloopgebied wordt gemaakt door verschillen in qh-relaties. De conditionele kans bij Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach met inzet van noodoverloopgebied is rechts weergegeven in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Conditionele kans bij Lobith met en zonder noodoverloopgebied bij gegeven piekafvoer bij Andernach

De dikke getrokken lijnen in beide figuren in Figuur 5-1 geven de conditionele overschrijdingskans weer wanneer onzekerheden geen rol spelen. Er is in dat geval één specifieke afvoer bij Andernach aan te wijzen, waarbij overschrijding op zal treden. Let op, doordat de betrekkinglijn tussen de piekafvoeren veranderd is, zijn de kritieke afvoeren bij Andernach die volgen uit hoofdstuk 4 en die in bovenstaande figuur staan niet aan elkaar gelijk. In de situatie zonder noodoverloopgebied is de kritieke afvoer gelijk aan  $15.900 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Andernach; een afvoer die volgens vergelijking (3.2) overeenkomt met een afvoer van  $16.800 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. Volgens de betrekkinglijn zonder onzekerheden (vergelijking (3.1)) komt dat overeen met een afvoer van  $15.400 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Andernach (zie Tabel 4-1). Een zelfde redenering geldt voor de kritieke afvoer met noodoverloopgebied:  $16.700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Wanneer de onzekerheid in de afvoersvoorspelling wel wordt meegenomen geven de dunne getrokken lijnen de conditionele kansen weer. De dikke lijn snijdt de dunne getrokken lijn precies bij een conditionele kans van 0.5. Dit komt doordat we hebben gekozen voor een normale verdeling, die symmetrisch is.



## 5.2 Evacuatie- en inzetcriterium

Omdat we in dit hoofdstuk de, in paragraaf 3.6.2 beschreven, theorie toepassen om de overschrijdingskans met noodoverloopgebied te bepalen, is het nodig om een evacuatiecriterium vast te stellen. Het criterium voor evacuatie is gebaseerd op de conditionele overschrijdingskans op basis van de afvoer bij Andernach zonder noodoverloopgebied, die we in de vorige paragraaf hebben berekend. Het enige verschil is dat hierbij de extra hoogte niet is meegenomen (alleen bij het bepalen van het evacuatiecriterium!). Deze extra hoogte is namelijk bedoeld voor de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen die we in dit hoofdstuk niet meenemen.

We gaan er vanuit dat de conditionele overschrijdingskans voor het evacuatiecriterium in ieder geval kleiner zal zijn dan 0.5, we willen namelijk liever vaker onnodig evacueren dan niet evacueren terwijl het achteraf gezien wel nodig was. We kiezen ervoor, dat zodra de afvoer bij Andernach die een conditionele kans heeft van 0.2 (we noemen deze afvoer  $q_c$ ) wordt overschreden, besloten wordt tot evacuatie. Met andere woorden, het noodoverloopgebied wordt geëvacueerd als de afvoergolf tenminste twee van de tien keer tot overschrijding zal leiden als geen noodoverloopgebied wordt ingezet. In paragraaf 7.1 wordt ingegaan op andere conditionele overschrijdingskansen die gebruikt worden voor evacuatiecriterium. De waarde van  $q_c$  volgt uit de conditionele kans bij gegeven piekafvoer bij Andernach (net als in paragraaf 5.1, maar dan zonder de extra hoogte). De waarde van de afvoer die hoort bij een conditionele overschrijdingskans van 0.2 is gelijk aan  $14.100 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Omdat we de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling niet meenemen in dit hoofdstuk, wordt het noodoverloopgebied ingezet zodra de afvoer bij Lobith de  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  overschrijdt.

## 5.3 Overschrijdingskansen

### 5.3.1 Zonder noodoverloopgebied

Om de overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied te berekenen hebben we de  $P(\text{overschrijden} | qA)$  nodig. In paragraaf 5.1 is uitgelegd hoe we daaraan komen. De totale overschrijdingskans in één jaar wordt dan gegeven door substitutie van vergelijking (5.3) in vergelijking (4.9).

$$P(\text{overschrijden}) \approx \sum_{j=1}^{N_A} \left[ \sum_{i=1}^{N_L} \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(Z(h_i)) f_{q_L}(qL_i | qA_j) \Delta qL \right] f_{q_A}(qA_j) \Delta qA \quad (5.4)$$

In het binnenste sommatieteken staat  $qL_i$  voor de piekafvoer bij Lobith die hoort bij de  $i^e$  stap,  $N_L$  is het aantal stappen in de discretisatie,  $Z$  is de grenstoestandsfunctie,  $\Delta qL$  is de stapgrootte en  $h_i$  is de waterstand die hoort bij  $qL_i$ . Verder geldt dat  $qL_i = i \Delta qL$ . In het buitenste sommatieteken is  $qA_j$  de piekafvoer bij Andernach die hoort bij de  $j^e$  stap,  $N_A$  staat voor het aantal stappen. Verder geldt dat  $\Delta qA$  gelijk is aan de stapgrootte tussen twee opeenvolgende afvoeren en  $qA_j = qA_1 + (j-1) \Delta qA$  met  $qA_1$  de ondergrens van de afvoeren die mee worden genomen in de numerieke berekening. De resultaten van de berekeningen staan in Tabel 5-2.

### 5.3.2 Met noodoverloopgebied

De overschrijdingskans met noodoverloopgebied berekenen we aan de hand van de methode die is beschreven in paragraaf 3.6.2.

$$P(\text{overschrijden}) = P(\text{overschrijden} \cap qA < q_c) + P(\text{overschrijden} \cap qA > q_c) \quad (5.5)$$

Het eerste deel van het rechterlid is de kans op overschrijden als het noodoverloopgebied niet wordt geëvacueerd en daarna ook niet wordt ingezet. Het tweede deel is de overschrijdingskans wanneer het noodoverloopgebied wel wordt geëvacueerd en vervolgens ingezet wordt zodra de afvoer bij Lobith groter wordt dan 16.000 m<sup>3</sup>/s. De afvoer waarbij wordt besloten tot evacuatie,  $q_c$ , is bepaald in paragraaf 5.2 en bedraagt 14.100 m<sup>3</sup>/s bij Andernach.

Om de overschrijdingskans met noodoverloopgebied te berekenen maken we gebruik van vergelijking (5.6) en (5.7). Voor de situatie zonder evacuatie (en zonder inzet) integreren we alleen tot  $q_c$ . Bij de situatie met evacuatie en eventuele inzet integreren we vanaf  $q_c$ , zie onderstaande vergelijkingen.

$$P(\text{overschrijden} \cap qA < q_c) = \int_{qA=0}^{q_c} P(\text{overschrijden} | qA) f_{qA}(qA) dqA \quad (5.6)$$

$$P(\text{overschrijden} \cap qA > q_c) = \int_{qA=q_c}^{\infty} P(\text{overschrijden} | qA) f_{qA}(qA) dqA \quad (5.7)$$

Het deel uit vergelijking (5.6) en (5.7)  $P(\text{overschrijden} | qA)$  kan berekend worden volgens de manier uit paragraaf 5.1. Discretisatie van vergelijking (5.6) geeft dezelfde vergelijking als vergelijking (5.4), maar met andere waarden voor de afvoeren bij Andernach. De waarden van de parameters binnen het eerste sommatieteken zijn gelijk aan wat onder vergelijking (5.4) is beschreven. In het specifieke geval zonder evacuatie (vergelijking (5.6)) geldt dat  $qA_j = (j-1)\Delta qA$  en  $\Delta qA = q_c / N_A$ . Voor de situatie met evacuatie en mogelijke inzet (vergelijking (5.7)) geldt dat  $qA_1 = q_c$  en  $qA_j = q_c + (j-1)\Delta qA$ .

Omdat we gebruik maken van een evacuatiecriterium kleiner dan 50% zal het eerste deel van het rechterlid van vergelijking (5.5) relatief klein zijn. Het rechter deel van het rechter lid zal groter zijn. De verschillende deelkanssen zijn in Tabel 5-1 weergegeven. Er blijkt dat het deel zonder evacuatie een kleinere bijdrage levert aan de totale overschrijdingskans dan het deel met evacuatie. De verschillen in de resultaten worden veroorzaakt door de verschillen in de qh-relaties. Stel dat de limiet wordt genomen van het evacuatiecriterium naar 100% (er wordt dus altijd geëvacueerd), resulteert dat in nullen voor de situatie zonder evacuatie. Voor de situatie met evacuatie leidt dat tot de overschrijdingskansen van de kritieke afvoeren.

Locatie	Overschrijdingskans [-]		Totale overschrijdingskans met NOG [-]
	Zonder evacuatie	Met evacuatie	
Lobith	1 / 21325	1 / 4477	1 / 3670
Millingen	1 / 47344	1 / 4797	1 / 4356
Tiel	1 / 25857	1 / 4477	1 / 3816
Amerongen	≈ 0	1 / 7888	1 / 7888
Duursche Waarden	1 / 72499	1 / 5144	1 / 4803

Tabel 5-1 Deelkansen voor de situatie met noodoverloopgebied

De resultaten van de hiervoor beschreven berekeningen zijn in Tabel 5-2 weergegeven.

Locatie	Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
	Geen NOG	Wel NOG	
Lobith	1 / 2398	1 / 3670	1.5
Millingen	1 / 3226	1 / 4356	1.4
Tiel	1 / 2583	1 / 3816	1.5
Amerongen	1 / 7860	1 / 7888	1.0
Duursche Waarden	1 / 3741	1 / 4803	1.3

Tabel 5-2 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoervoorspelling

Uit bovenstaande tabel komt naar voren dat het toevoegen van de onzekerheid in de afvoervoorspelling voor de overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied vrijwel geen effect heeft (vergelijk resultaten in Tabel 4-1). De resultaten zonder noodoverloopgebied zonder en met de onzekere afvoervoorspelling zijn aan elkaar gelijk. Het kleine verschil wordt veroorzaakt door de aanpassing van de betrekkinglijn tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith (zie bijlage B).

De overschrijdingskansen met noodoverloopgebied met onzekerheid in de afvoervoorspelling zijn wat groter (ongeveer 5 tot 10%) dan zonder die onzekerheid. Dit verschil werkt door in de effectiviteit van het noodoverloopgebied, waarvan de waarden wat kleiner zijn. Locatie Amerongen is nog steeds de onderzoekslocatie met de kleinste overschrijdingskans. De lage waarde van de effectiviteit voor Amerongen wordt veroorzaakt doordat de invloed van het noodoverloopgebied is uitgewerkt als de piekafvoer optreedt (zie ook paragraaf 4.4).



## 6 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoeren waterstandsvoorspelling

### 6.1 Waterstandsvoorspellingen Rijntakken

In dit hoofdstuk houden we naast de onzekerheid in de afvoervoorspellingen bij Lobith, ook rekening met de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen voor de verschillende locaties langs de Rijntakken.

De afvoer bij Lobith leidt via de qh-relaties tot verwachte waterstanden bij de verschillende locaties. De kansdichtheidsfunctie van de waterstand bij een gegeven piekafvoer bij Lobith wordt gegeven door  $f_h$ . Voor de waarden van de parameters van de kansverdeling beschikken we over twee bronnen. Een eerste bron is Stijnen et al. [2002], waarbij de onzekerheid in de waterstand theoretisch is bepaald. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de situatie zonder of met noodoverloopgebied. Een tweede bron is de hoogwatergolf van 2003, waarbij de voorspellingen worden vergeleken met de gegevens van Koolwijk [zie bijlage D]. De onzekerheid in de waterstandsvoorspelling wordt gemodelleerd in de vorm van een normale verdeling om de waterstand die volgt uit de qh-relatie. De parameters van beide methoden zijn weergegeven in onderstaande tabel. De verwachtingswaarde  $\mu$  is bij Stijnen et al. [2002] het verschil met de waterstand die volgt uit de qh-relaties en bij de hoogwatergolf van 2003 het verschil met de voorspelling. De standaarddeviatie wordt weergegeven door  $\sigma$ .

Locatie	Stijnen et al. [2002]			Metingen 2003	
	$\mu$ [m]	$\sigma$ [m] zonder NOG	$\sigma$ [m] met NOG	$\mu$ [m]	$\sigma$ [m]
Lobith	0	0.11	0.15	-0.04	0.12
Millingen	0	0.12	0.14	-0.06	0.09
Tiel	0	0.12	0.14	-0.08	0.11
Amerongen	0	0.17	0.17	0.11	0.15
Duursche Waarden	0	0.25	0.25	0.12	0.18

Tabel 6-1 Onzekerheden in de waterstanden volgens Stijnen et al. [2002] en metingen 2003

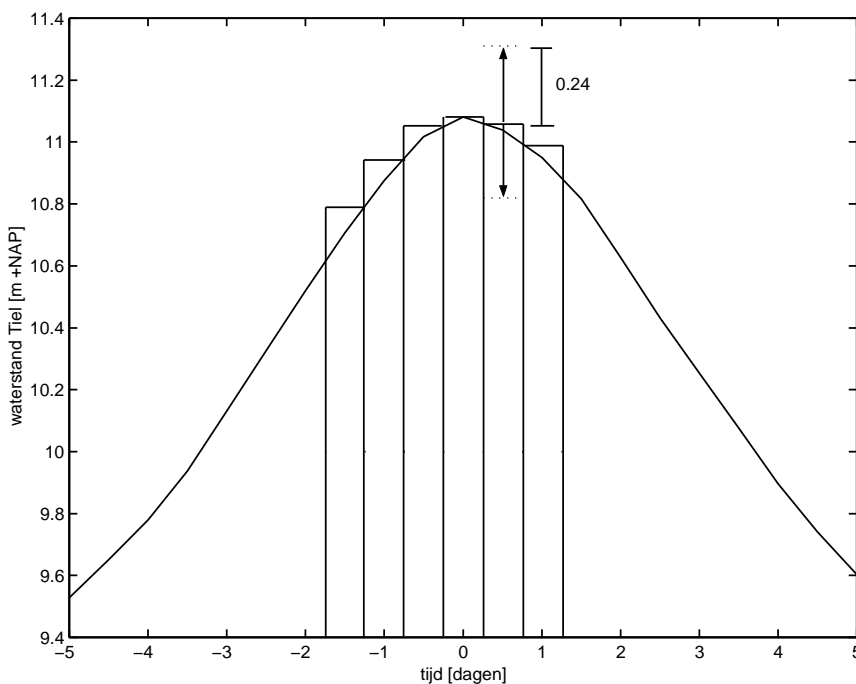
Uit de tabel blijkt dat de orde grootte van de parameters gelijk is. Omdat de gegevens van de afvoergolf van 2003 zijn gebaseerd op een ander model (FloRijn-NL, [Sprokkereef, 2001]) om de waterstanden te voorspellen en omdat er slechts één afvoergolf is gebruikt, kiezen we ervoor om de waarden van Stijnen et al. [2002] te gebruiken. Bovendien kunnen we de resultaten van dit onderzoek dan vergelijken met resultaten van Stijnen et al. [2002]. De waarden van deze parameters zijn gebaseerd op verschillende onzekerheidsbronnen; de afvoerverdeling op de splitsingspunten, onzekerheden in de ruwheden en de geometrie en onzekerheden in de interpolatie tussen de meetstations. Voor de situatie met noodoverloopgebied wordt een wat hogere sigma gehanteerd die de onzekerheid rond de inzet van het noodoverloopgebied representeert [Stijnen et al., 2002]. Dit heeft te maken met de onzekerheid rond de werking van het noodoverloopgebied (bijvoorbeeld de instroom). De samenstelling van de waarden van de standaarddeviaties is te vinden in Stijnen et al. [2002].

## 6.2 Conditionele kans bij gegeven piekafvoer Andernach

We berekenen de totale overschrijdingskans weer aan de hand van basisvergelijking (4.3). Om het deel  $P(\text{overschrijden} | qA)$  te berekenen maken we gebruik van onderstaande vergelijking.

$$P(\text{overschrijden} | qA) = \int_{qL=0}^{\infty} P(\text{overschrijden} | qL) f_{qL}(qL | qA) dqL \quad (6.1)$$

Uit bovenstaande vergelijking komt naar voren dat we onder andere de conditionele overschrijdingskans bij een gegeven piekafvoer bij Lobith nodig hebben. Overschrijden treedt niet meer alleen op tijdens de piek van de golf, maar kan er ook naast optreden. In Figuur 6-1 is de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling weergegeven. De stippelijntjes geven voor het betreffende blokje het 95% betrouwbaarheidsinterval weer (voor Tiel:  $2 \times 0.12$  m).



Figuur 6-1 Onzekere waterstand bij Tiel bij golf met piekafvoer 15.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith opgedeeld in stapjes van 12 uur

Om de kans op overschrijding bij gegeven piekafvoer bij Lobith te bepalen gaan we er vanuit dat de waterstanden in de blokjes onderling onafhankelijk zijn. Ook de waterstandsvoorspellingen in de blokjes ( $j$ ) zijn onderling onafhankelijk. Overschrijden treedt op als in één of meerdere blokjes de waterstand de dijkhoogte overschrijdt. Het is gemakkelijker om de kans op geen overschrijding te berekenen, overschrijding treedt namelijk niet op als geen enkel blokje tot overschrijding leidt. We bepalen van elk blokje eerst de kans op *niet* overschrijden en vermenigvuldigen (vanwege de veronderstelde onafhankelijkheid) vervolgens alle kansen op *niet* overschrijden met elkaar. We hebben dan de kans op *niet* overschrijden van de gehele afvoergolf. Door die kans van 1 af te trekken verkrijgen we de kans op overschrijden binnen de afvoergolf. Dit is weergegeven in de volgende vergelijking.

$$P(\text{overschrijden} \mid qL) = 1 - \prod_{j=1}^{\infty} (1 - P(\text{overschrijden in blokje } j \mid qL)) \quad (6.2)$$

$$P(\text{overschrijden in blokje } j \mid qL) = \int_{h=0}^{\infty} \mathcal{I}_{(-\infty,0)}(Z(h)) f_h(h \mid h_j(qL)) dh$$

$$P(\text{overschrijden} \mid qL) \approx 1 - \prod_{j=1}^{N_j} \left[ 1 - \sum_{i=1}^{N_i} \mathcal{I}_{(-\infty,0)}(Z(h_i)) f_h(h_i \mid h_j(qL)) \Delta h \right] \quad (6.3)$$

In bovenstaande vergelijkingen zijn:

$\mathcal{I}_{(-\infty,0)}$	Indicatorfunctie	$\Delta h$	Stapgrootte in waterstanden
$Z$	Grenstoestandsfunctie	$N_j$	Aantal stappen in waterstanden
$f_h$	Kansdichtheidsfunctie waterstand	$N_j$	Aantal stappen in afvoergolf
$h_i$	Onzekere waterstand binnen blokje	$f_{qL}$	Kansdichtheidsfunctie piekafvoer Lobith
$h_j$	Verwachte waterstand	$qL$	Afvoer Lobith

De overschrijdingskans bij gegeven piekafvoer bij Andernach verkrijgen we door vergelijking (6.4) uit te rekenen. Het onderscheid tussen zonder en met noodoverloopgebied wordt gemaakt met behulp van de waterstanden die verschillen door de qh-relaties in de situatie zonder en met noodoverloopgebied.

$$P(\text{overschrijden} \mid qA) \approx \sum_{k=1}^{N_k} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{N_j} \left[ 1 - \sum_{i=1}^{N_i} \mathcal{I}_{(-\infty,0)}(Z(h_i)) f_h(h_i \mid h_j(qL_k)) \Delta h \right] \right] f_{qL}(qL_k \mid qA) \Delta qL \quad (6.4)$$

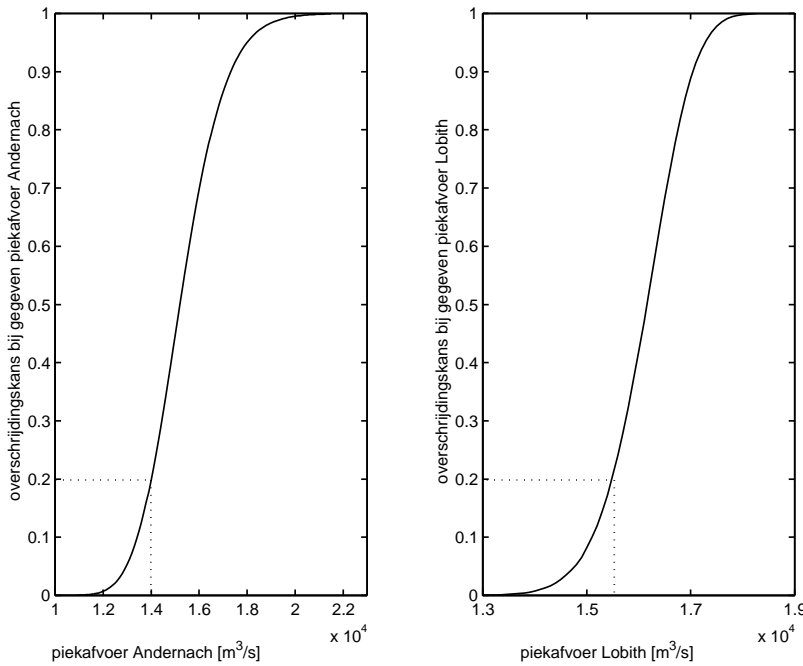
In deze vergelijking gelden dezelfde variabelen als bij de hierboven beschreven vergelijkingen. Daarnaast geldt nog dat  $qL_k$  de piekafvoer Lobith voorstelt,  $f_{qL}$  is de kansdichtheidsfunctie van de piekafvoer bij Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach:  $qA$ . Verder is  $\Delta qL$  de stapgrootte van de piekafvoeren bij Lobith en  $N_k$  het aantal stappen in de piekafvoeren bij Lobith.

### 6.3 Evacuatie- en inzetcriterium

Om het evacuatie- en inzetcriterium te bepalen nemen we de extra hoogte wel mee, omdat we rekening houden met de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling. Het evacuatiecriterium is dan niet meer gelijk aan die uit het vorige hoofdstuk en het inzetcriterium is nieuw.

We maken weer gebruik van een evacuatiecriterium van 0.2 (twee van de tien afvoergolven leiden zonder noodoverloopgebied tot overschrijding). Omdat de onzekerheid in de waterstand verschilt per riviertak en dus niet voor alle onderzoekslocaties gelijk is, leidt een evacuatiecriterium van 0.2 per locatie tot verschillende waarden van  $q_c$ . We kiezen de waarde van  $q_c$  die hoort bij de locatie die de grootste overschrijdingskans heeft zonder noodoverloopgebied, dat is de Duursche Waarden (zie ook Tabel 6-2).

In Figuur 6-2 is links de conditionele overschrijdingskans bij de Duursche Waarden weer gegeven als functie van de gegeven piekafvoer bij Andernach. Zowel de onzekerheid in de afvoervoorspelling als de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling zijn meegenomen. De piekafvoer bij Andernach die hoort bij een conditionele overschrijdingskans van 0.2 is gelijk aan 14.000 m<sup>3</sup>/s. Er geldt  $q_c = 14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figuur 6-2 *Conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden, zonder noodoverloopgebied met extra hoogte*

Bij het inzetcriterium gaan we er weer vanuit dat het gebied liever vaker onnodig wordt ingezet dan dat het niet wordt ingezet en het achteraf wel nodig was. We kiezen er daarom voor om het gebied in de zetten bij een conditionele overschrijdingskans van 0.2. Dit betekent dat die afvoer (die we  $q_d$  noemen) zonder noodoverloopgebied twee van de tien keer tot overschrijding zal leiden. We kiezen weer voor de waarde die hoort bij de Duursche Waarden,  $q_d = 15.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , zie Figuur 6-2 (rechts).

## 6.4 Overschrijdingskansen

### 6.4.1 Zonder noodoverloopgebied

De totale overschrijdingskans in één jaar wordt gegeven door onderstaande vergelijking, waarin vergelijking (6.4) is gecombineerd met vergelijking (6.1) en (4.3).

$$P(\text{overschrijden}) \approx \sum_{i=1}^{N_i} \left[ \sum_{k=1}^{N_k} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{N_j} \left[ 1 - \sum_{l=1}^{N_l} \mathcal{I}_{(-\infty,0)}(Z(h_l)) f_h(h_l | h_j(qL_k)) \Delta h \right] f_{qL}(qL_k | qA_l) \Delta qL \right] f_{qA}(qA_l) \Delta qA \right] \quad (6.5)$$

Hierin zijn:

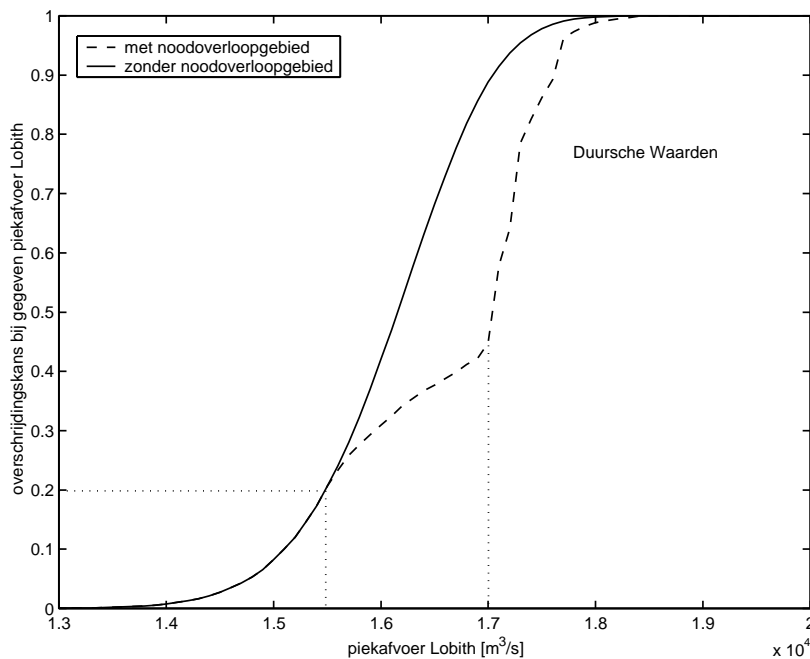
$\mathcal{I}_{(-\infty,0)}$	Indicatorfunctie	$f_{qL}$	Kansdichtheidsfunctie piekafvoer Lobith
$Z$	Grenstoestandsfunctie	$qL_k$	Piekafvoer Lobith
$f_h$	Kansdichtheidsfunctie van waterstand	$qA_l$	Piekafvoer Andernach
$h_i$	Onzekere waterstand binnen blokje	$\Delta qL$	Stapgrootte piekafvoeren Lobith
$h_j$	Verwachte waterstand	$N_k$	Aantal stappen in piekafvoeren Lobith
$\Delta h$	Stapgrootte in waterstanden	$f_{qA}$	Kansdichtheidsfunctie piekafvoer Andernach
$N_i$	Aantal stappen in waterstanden	$\Delta qA$	Stapgrootte piekafvoeren Andernach
$N_j$	Aantal stappen in afvoergolf	$N_l$	Aantal stappen piekafvoeren Andernach



### 6.4.2 Met noodoverloopgebied

Om de overschrijdingskans met noodoverloopgebied te bepalen maken we gebruik van dezelfde methode als in paragraaf 5.3.2. De gediscretiseerde vergelijkingen om de twee delen van de overschrijdingskans met noodoverloopgebied te berekenen zijn gelijk aan vergelijking (6.5). We maken gebruik van dezelfde variabelen zoals die zijn beschreven onder de betreffende vergelijking. Voor de situatie zonder evacuatie geldt dat  $qA_j = (j-1)\Delta qA$  en  $\Delta qA = q_c / N_A$ . Als er wel wordt geëvacueerd geldt dat  $qA_1 = q_c$  en  $qA_j = q_c + (j-1)\Delta qA$  waarbij het verschil tussen inzet en geen inzet wordt gemaakt door verschillen in qh-relaties. De overschrijdingskansen zijn weergegeven in Tabel 6-2.

In Figuur 6-3 zijn de conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden bij gegeven piekafvoer bij Lobith uitgezet tegen de piekafvoer bij Lobith. Deze conditionele kansen zijn nodig voor het berekenen van de overschrijdingskansen. Zowel de situatie zonder als met noodoverloopgebied is weergegeven. Het inzetcriterium is aangegeven met de gestippelde lijn (bij 0.2 en 15.500 m<sup>3</sup>/s).



Figuur 6-3 *Conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden zonder en met noodoverloopgebied*

De knik in de situatie met noodoverloopgebied wordt veroorzaakt doordat het noodoverloopgebied bij een afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s vol raakt. In Tabel 4-1 is te zien dat de kritieke afvoer voor de Duursche Waarden gelijk is aan 16.200 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. In die situatie wordt het noodoverloopgebied echter ingezet bij een piekafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s (Lobith), terwijl het nu wordt ingezet bij 15.500 m<sup>3</sup>/s (Lobith). Dat geeft een kritieke afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach, wat overeenkomt met een afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

Locatie	Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
	Geen NOG	Wel NOG	
Lobith	1 / 2233	1 / 2901	1.3
Millingen	1 / 2089	1 / 2762	1.3
Tiel	1 / 1955	1 / 2661	1.4
Amerongen	1 / 1982	1 / 2401	1.2
Duursche Waarden	1 / 1155	1 / 1293	1.1

Tabel 6-2 Overschrijdingskansen met onzekerheid afvoer- en waterstandsvoorspelling

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de overschrijdingskansen groter zijn geworden door toevoeging van de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling en het inzetcriterium. Amerongen is niet meer de onderzoekslocatie met de kleinste overschrijdingskans, maar dat is nu Lobith. De grote toename van de overschrijdingskansen bij Amerongen en de Duursche Waarden wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid in de waterstandsvoorspelling (de grote waarde van de standaarddeviatie) en de vlakke qh-relaties.

Het noodoverloopgebied zorgt voor een verkleining van de overschrijdingskans, maar de waarden van de effectiviteit zijn kleiner geworden door het toevoegen van de onzekerheid in de waterstandsvoorspelling.

## 6.5 Voorwaardelijke kansen

In deze paragraaf gaan we in op voorwaardelijke kansen. We bedoelen hiermee de kansen over de inzet waarbij er al besloten is of er geëvacueerd wordt. Een voorbeeld is: Als het noodoverloopgebied geëvacueerd is, wat is dan de kans dat het ingezet wordt?

$$\begin{aligned}
 P(\text{geen inzet} | \text{geen evacuatie}) &= 1 \\
 P(\text{inzet} | \text{geen evacuatie}) &= 0 \\
 P(\text{geen inzet} | \text{evacuatie}) &= P(qL < q_d | qA > q_c) \\
 P(\text{inzet} | \text{evacuatie}) &= P(qL > q_d | qA > q_c)
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Omdat zonder evacuatie inzet niet mogelijk is, is de eerste kans uit vergelijking (6.6) gelijk aan 1 en de tweede kans gelijk aan 0. De overige twee kansen berekenen we onderstaand. Deze kansen zijn afhankelijk van het evacuatie- en het inzetcriterium.

De kans op geen inzet bij gegeven evacuatie bepalen we met behulp van onderstaande vergelijking.

$$P(qL < q_d | qA > q_c) = \frac{P(qL < q_d \cap qA > q_c)}{P(qA > q_c)} \tag{6.7}$$

De noemer uit bovenstaande vergelijking bepalen we met behulp van de werklijn bij Andernach. De teller berekenen we aan de hand van onderstaande vergelijking.

$$P(qL < q_d \cap qA > q_c) = \int_{qA=q_c}^{\infty} P(qL < q_d | qA) f_{qA}(qA) dqA \tag{6.8}$$

Om het deel  $P(qL < q_d | qA)$  uit vergelijking (6.8) te bepalen maken we gebruik van onderstaande vergelijking. We gebruiken hierbij een soort grenstoestandsfunctie,  $(qL_i - q_d)$ , waarin de piekafvoer bij Lobith wordt vergeleken met de afvoer waarbij wordt besloten tot inzet.

$$P(qL < q_d | qA) = \int_{qL=0}^{q_d} f_{qL}(qL | qA) dqL \approx \sum_{i=1}^{N_i} \mathcal{I}_{(-\infty, 0)}(qL_i - q_d) f_{qL}(qL_i | qA) \Delta qL \quad (6.9)$$

De variabelen in bovenstaande vergelijking zijn al eerder beschreven bij vergelijking (6.5) met  $qL_i = (i - 1)\Delta qL$  en  $\Delta qL = q_d / N_i$ . In de situatie met  $q_c = 14.000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $q_d = 15.500 \text{ m}^3/\text{s}$  levert dit:

$$P(\text{geen inzet} | \text{evacuatie}) = P(qL < q_d | qA > q_c) = 0.4 \quad (6.10)$$

De kans op wel inzetten van het noodoverloopgebied bij gegeven evacuatie wordt berekend met behulp van vergelijking (6.11).

$$P(\text{inzet} | \text{evacuatie}) = 1 - P(\text{geen inzet} | \text{evacuatie}) = 0.6 \quad (6.11)$$

Uit voorgaande berekening komt naar voren dat bij gegeven evacuatie de kans op inzet gelijk is aan 0.6 en de kans op geen inzet gelijk is aan 0.4. Met andere woorden: als het noodoverloopgebied geëvacueerd is, is er een kans van 60% dat het gebied wordt ingezet. In hoofdstuk 7 worden deze kansen ook berekend voor andere criteria voor evacuatie en inzet van het gebied.



## 7 Gevoeligheidsanalyses

### 7.1 Evacuatie- en inzetcriterium

In de voorgaande hoofdstukken hebben we gerekend met een evacuatiecriterium van een afvoer bij Andernach die hoort bij een conditionele overschrijdingskans van 0.2. Dit betekent dat de afvoergolf met die piekafvoer één van de vijf keer tot overschrijding zal leiden. Hierbij hoort  $q_c = 14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Het inzetcriterium waar we mee gerekend hebben is een piekafvoer bij Lobith die hoort bij een conditionele overschrijdingskans van 0.2. Het noodoverloopgebied wordt ingezet als de piekafvoer bij Lobith groter is dan  $15.500 \text{ m}^3/\text{s}$  (alleen als het noodoverloopgebied geëvacueerd is),  $q_d = 15.500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

In deze gevoeligheidsanalyse bepalen we de overschrijdingskansen en waarden van effectiviteit voor twee andere evacuatiecriteria. We doen dit alleen voor de situatie dat zowel de onzekerheden in de afvoer- als in de waterstandsvoorspelling worden meegenomen (net als in hoofdstuk 6). Het eerste andere evacuatiecriterium is een conditionele overschrijdingskans van 0.1 waarbij  $q_c = 13.400 \text{ m}^3/\text{s}$  hoort. Het tweede is een conditionele overschrijdingskans van 0.5, wat overeenkomt met  $q_c = 15.200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

We nemen ook twee andere inzetcriteria mee, namelijk met een conditionele overschrijdingskans van 0.1 met  $q_d = 15.100 \text{ m}^3/\text{s}$  en met een conditionele kans van 0.4 waarbij geldt dat  $q_d = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zodra de afvoer bij Lobith groter wordt dan  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  worden de verwachte waterstanden hoger dan het toetspeil en wordt de extra hoogte aangewend die bedoeld is voor de onzekere waterstandsvoorspelling. Het noodoverloopgebied wordt niet pas ingezet bij afvoeren boven de  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 7.1.1 Overschrijdingskansen en effectiviteit

Criterium		Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
Evacuatie	Inzet	Geen NOG	Wel NOG	
0.1	0.1	1 / 2233	1 / 2677	1.2
	0.2		1 / 3100	1.4
	0.4		1 / 3706	1.7
0.2	0.1		1 / 2567	1.1
	0.2		1 / 2901	1.3
	0.4		1 / 3387	1.5
0.5	0.1		1 / 2326	1.0
	0.2		1 / 2460	1.1
	0.4		1 / 2660	1.2

Tabel 7-1 Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Lobith voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

Criterium		Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
Evacuatie	Inzet	Geen NOG	Wel NOG	
0.1	0.1	1 / 2089	1 / 2633	1.3
	0.2		1 / 2980	1.4
	0.4		1 / 3068	1.5
0.2	0.1		1 / 2488	1.2
	0.2		1 / 2762	1.3
	0.4		1 / 2869	1.4
0.5	0.1		1 / 2202	1.1
	0.2		1 / 2313	1.1
	0.4		1 / 2389	1.1

Tabel 7-2 Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Millingen voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

Criterium		Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
Evacuatie	Inzet	Geen NOG	Wel NOG	
0.1	0.1	1 / 1955	1 / 2507	1.3
	0.2		1 / 2911	1.5
	0.4		1 / 3073	1.6
0.2	0.1		1 / 2356	1.2
	0.2		1 / 2661	1.4
	0.4		1 / 2819	1.4
0.5	0.1		1 / 2067	1.1
	0.2		1 / 2180	1.1
	0.4		1 / 2268	1.2

Tabel 7-3 Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Tiel voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

Criterium		Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
Evacuatie	Inzet	Geen NOG	Wel NOG	
0.1	0.1	1 / 1982	1 / 2468	1.2
	0.2		1 / 2526	1.3
	0.4		1 / 2367	1.2
0.2	0.1		1 / 2338	1.2
	0.2		1 / 2401	1.2
	0.4		1 / 2300	1.2
0.5	0.1		1 / 2095	1.1
	0.2		1 / 2136	1.1
	0.4		1 / 2122	1.1

Tabel 7-4 Overschrijdingskansen en effectiviteit bij Amerongen voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

Criterium		Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
Evacuatie	Inzet	Geen NOG	Wel NOG	
0.1	0.1	1 / 1155	1 / 1419	1.2
	0.2		1 / 1346	1.2
	0.4		1 / 1236	1.1
0.2	0.1		1 / 1334	1.2
	0.2		1 / 1293	1.1
	0.4		1 / 1215	1.1
0.5	0.1		1 / 1202	1.0
	0.2		1 / 1197	1.0
	0.4		1 / 1173	1.0

Tabel 7-5 Overschrijdingskansen en effectiviteit bij de Duursche Waarden voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

Uit de tabellen blijkt dat voor alle onderzoekslocaties geldt dat een hogere waarde van het evacuatiecriterium (waarbij het noodoverloopgebied pas bij hogere afvoeren bij Andernach wordt geëvacueerd) leidt tot grotere overschrijdingskansen en lagere waarden van de effectiviteit. De kans dat het noodoverloopgebied niet ingezet kan worden (doordat het niet geëvacueerd is) wordt dan groter. Hierdoor worden de overschrijdingskansen groter en daalt de waarde van de effectiviteit. Bij een evacuatiecriterium van 0.1 zijn de overschrijdingskansen het kleinst en is de waarde van de effectiviteit het grootst.

Per locatie verschilt het inzetcriterium dat de hoogste waarde van de effectiviteit oplevert. Als we uit bovenstaande mogelijkheden de optimale waarden voor het evacuatie- en inzetcriterium moeten kiezen, maken we gebruik van de Duursche Waarden, die de grootste overschrijdingskans heeft zonder noodoverloopgebied. Het inzetcriterium dat de grootste effectiviteit oplevert is een conditionele overschrijdingskans van 0.1.

### 7.1.2 Kansen op inzet en geen inzet bij gegeven evacuatie

Criterium		Kans bij gegeven evacuatie	
Evacuatie	Inzet	Geen inzet	Inzet
0.1	0.1	0.5	0.5
	0.2	0.6	0.4
	0.4	0.7	0.3
0.2	0.1	0.3	0.7
	0.2	0.4	0.6
	0.4	0.6	0.4
0.5	0.1	0.1	0.9
	0.2	0.2	0.8
	0.4	0.3	0.7

Tabel 7-6 Kansen op inzet en geen inzet bij gegeven evacuatie voor verschillende evacuatie- en inzetcriteria

De kans op inzet van het noodoverloopgebied bij gegeven evacuatie is groter bij een hogere waarde van het evacuatiecriterium. Dit komt doordat het gebied dan geëvacueerd wordt bij

een hogere afvoer bij Andernach. De kans dat de afvoer bij Lobith het inzetcriterium overschrijdt neemt dan toe, waardoor de kans op inzet bij gegeven evacuatie toeneemt.

Bij een hogere waarde van het inzetcriterium daalt de kans op inzet bij gegeven evacuatie. Dit komt doordat het noodoverloopgebied dan bij hogere afvoeren bij Lobith wordt ingezet. Als het gebied al geëvacueerd is leidt dat tot kleinere kansen op het inzetten van het noodoverloopgebied.

De combinatie van het evacuatie- en inzetcriterium zoals ze zijn gebruikt in hoofdstuk 6 leiden bij gegeven evacuatie tot een kans op inzet van 60%. De combinatie die is afgeleid in de vorige paragraaf (voor beide criteria een conditionele overschrijdingskans van 0.1) leidt bij gegeven evacuatie tot een kans op inzet van 50%. De kans dat het gebied bij gegeven evacuatie niet wordt ingezet is dan ook gelijk aan 50%.

## 7.2 Golfvorm

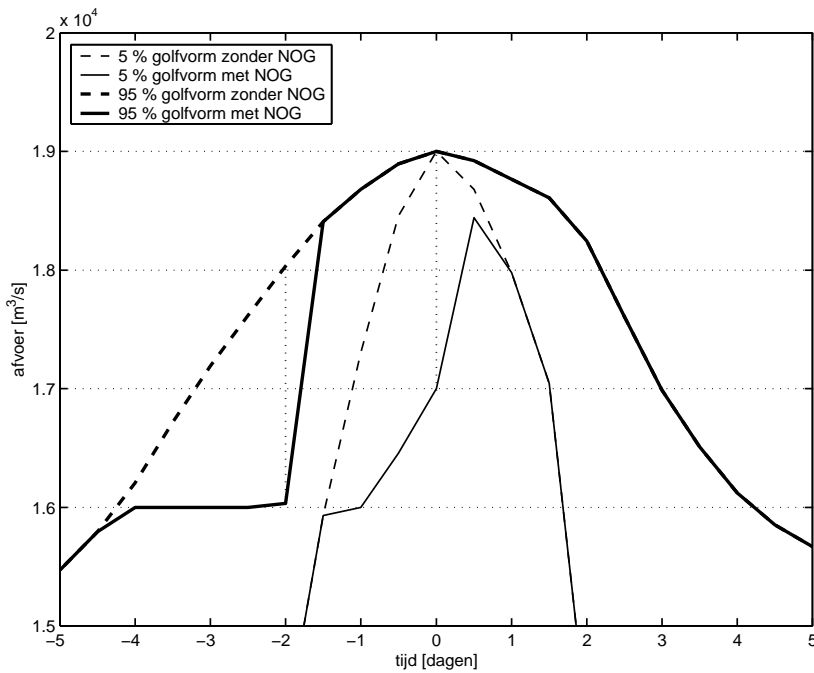
Om de invloed van de golfvorm te bestuderen, berekenen we de overschrijdingskansen en waarden van de effectiviteit naast voor de 50% golfvorm, ook voor de 5% en de 95% golfvormen. Op deze manier verkrijgen we de grenzen van het 95% betrouwbaarheidsinterval. Het evacuatiecriterium is gelijk aan 14.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en het inzetcriterium is een piekafvoer van 15.500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. De resultaten van de berekeningen zijn opgenomen in Tabel 7-7. De kansen op inzet en geen inzet bij gegeven evacuatie zijn alleen afhankelijk van de piekafvoer (die losstaat van de golfvorm) en worden daarom niet nogmaals berekend.

Uit de tabel komt naar voren dat het noodoverloopgebied bij een smallere golfvorm (5%) effectiever is en minder effectief bij een bredere afvoergolf (95% golfvorm). Dit verschijnsel wordt verklaard aan de hand van Figuur 7-1, waarin afvoergolven zijn weergegeven met een 5% en een 95% golfvorm.

Locatie	Golfvorm [%]	Overschrijdingskans [-]		Effectiviteit NOG [-]
		Geen NOG	Wel NOG	
Lobith	5	1 / 2362	1 / 4022	1.7
	50	1 / 2233	1 / 2257	1.0
	95	1 / 2087	1 / 2238	1.1
Millingen	5	1 / 2266	1 / 3838	1.7
	50	1 / 2089	1 / 2240	1.1
	95	1 / 1889	1 / 2102	1.1
Tiel	5	1 / 2085	1 / 3656	1.8
	50	1 / 1955	1 / 2110	1.1
	95	1 / 1807	1 / 2050	1.1
Amerongen	5	1 / 2418	1 / 3449	1.4
	50	1 / 1982	1 / 2452	1.2
	95	1 / 1574	1 / 1726	1.1
Duursche Waarden	5	1 / 1377	1 / 1719	1.2
	50	1 / 1155	1 / 1499	1.3
	95	1 / 947	1 / 986	1.0

Tabel 7-7 Overschrijdingskansen bij verschillende golfvormen





Figuur 7-1 Afvoergolven met 5% en 95% golfvorm zonder en met noodoverloopgebied, inlaat noodoverloopgebied bij 16.000 m<sup>3</sup>/s

Uit de figuur blijkt dat bij de brede golfvorm, de overschrijdingskans groter is. De piek wordt niet afgetopt, terwijl bij de smalle golf de piek wel afgetopt wordt. De afvoer waarbij de afvoergolf met noodoverloopgebied af gaat wijken van de afvoergolf zonder noodoverloopgebied ligt in de figuur onder de 16.000 m<sup>3</sup>/s. Dit komt door de numerieke berekening die we gebruiken om de afvoergolf met inzet van het noodoverloopgebied te bepalen. Verder valt op dat zodra begonnen is met inlaten van water, de lijn niet eerst horizontaal loopt, maar meteen stijgt. Dit wordt veroorzaakt door het maximale instroomdebiet van 2000 m<sup>3</sup>/s. De gestippelde verticale lijnen geven dit maximale instroomdebiet weer.



## 8 Resultaten samengevat

### 8.1 Zonder extra hoogte

In deze paragraaf worden de resultaten weergegeven van de berekeningen zonder extra hoogte. In dat geval zijn de resultaten voor alle onderzoekslocaties gelijk.

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Commissie NOG	1 / 1250	1 / 3872	3.1
Geen	1 / 1250	1 / 3975	3.2

Tabel 8-1 Resultaten algemeen, zonder extra hoogte

Uit de tabel komt naar voren dat als geen onzekerheden worden meegenomen, de overschrijdingskans door de inzet van een noodoverloopgebied met een factor 3.2 afneemt, de effectiviteit is gelijk aan 3.2. De resultaten van de Commissie Noodoverloopgebieden zijn vrijwel gelijk aan de resultaten van dit onderzoek zonder onzekerheden.

### 8.2 Met extra hoogte

In deze paragraaf presenteren we de resultaten voor de verschillende onderzoekslocaties waarbij de extra hoogte wel is meegenomen in de berekeningen. De onderste rij in Tabel 8-2 tot en met Tabel 8-6 bevat de resultaten wanneer wordt gerekend met de evacuatie- en inzetcriteria die de grootste effectiviteit opleveren voor de Duursche Waarden (hoofdstuk 7, met EC = evacuatiecriterium, IC = inzetcriterium).

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Geen	1 / 2448	1 / 4393	1.8
Afvoervoorspelling (EC 0.2)	1 / 2398	1 / 3670	1.5
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.2, IC 0.2)	1 / 2233	1 / 2901	1.3
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.1, IC 0.1)	1 / 2233	1 / 2677	1.2

Tabel 8-2 Resultaten locatie Lobith

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Geen	1 / 3145	1 / 4776	1.5
Afvoervoorspelling (EC 0.2)	1 / 3226	1 / 4365	1.4
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.2, IC 0.2)	1 / 2089	1 / 2762	1.3
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.1, IC 0.1)	1 / 2089	1 / 2633	1.3

Tabel 8-3 Resultaten locatie Millingen

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Geen	1 / 2662	1 / 4393	1.7
Afvoervoorspelling (EC 0.2)	1 / 2583	1 / 3816	1.5
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.2, IC 0.2)	1 / 1955	1 / 2661	1.4
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.1, IC 0.1)	1 / 1955	1 / 2507	1.3

Tabel 8-4 Resultaten locatie Tiel

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Geen	1 / 7881	1 / 7881	1.0
Afvoervoorspelling (EC 0.2)	1 / 7860	1 / 7888	1.0
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.2, IC 0.2)	1 / 1982	1 / 2401	1.2
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.1, IC 0.1)	1 / 1982	1 / 2468	1.2

Tabel 8-5 Resultaten locatie Amerongen

Onzekerheden	Overschrijdingskansen		Effectiviteit
	Zonder NOG	Met NOG	
Geen	1 / 3717	1 / 4776	1.3
Afvoervoorspelling (EC 0.2)	1 / 3741	1 / 4803	1.3
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.2, IC 0.2)	1 / 1155	1 / 1293	1.1
Afvoer- en waterstandsvoorspelling (EC 0.1, IC 0.1)	1 / 1155	1 / 1419	1.2

Tabel 8-6 Resultaten locatie Duursche Waarden

### 8.2.1 Geen onzekerheden

1. Het meenemen van de extra hoogte in de situatie zonder onzekerheden leidt tot kleinere overschrijdingskansen. De extra hoogte is waterkerend verondersteld en de kans dat de waterstand de dijkhoogte overschrijdt wordt kleiner. De verschillen in overschrijdingskansen bij de onderzoekslocaties worden veroorzaakt door de verschillende hellingen van de qh-relaties. Door de vlakke qh-relatie van onderzoekslocatie Amerongen is dat de meest veilige onderzoekslocatie. Lobith is de minst veilige locatie.
2. Als de extra hoogte wordt meegenomen in de berekeningen daalt de waarde van de effectiviteit, die varieert tussen 1.8 bij Lobith en 1.0 bij Amerongen. Deze afname wordt veroorzaakt doordat het noodoverloopgebied al wordt aangewend voor waterstanden die niet zouden leiden tot overschrijding (zie ook paragraaf 4.4).

### 8.2.2 Onzekerheid afvoervoorspelling

1. Als de onzekerheid in de afvoervoorspelling wordt meegenomen, passen we het verband tussen de piekafvoeren bij Lobith en Andernach aan, zodat de werklijn bij Lobith niet verandert (zie bijlage B). Door deze aanpassing zijn de overschrijdingskansen zonder noodoverloopgebied met en zonder de onzekere afvoervoorspelling vrijwel aan elkaar gelijk.
2. Het toevoegen van de onzekerheid in de afvoervoorspelling en het evacuatiecriterium leidt voor de situatie met noodoverloopgebied tot overschrijdingskansen die minimaal bijna gelijk (Amerongen en Duursche Waarden) tot maximaal 20% (Lobith) groter zijn dan

zonder onzekerheden. Amerongen blijft de meest veilige onderzoekslocatie, Lobith de minst veilige.

3. Het evacuatiecriterium leidt ertoe dat het noodoverloopgebied voor de locatie Amerongen geen effect heeft op de overschrijdingskans, de effectiviteit is 1.0. De hoogste waarde van de effectiviteit is te vinden bij Lobith en Tiel met een waarde van 1.5.

### **8.2.3 Onzekerheid afvoer- en waterstandsvoorspelling**

1. Het toevoegen van de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen leidt in de situatie zonder noodoverloopgebied tot overschrijdingskansen die 10% tot 300% (bij Amerongen) groter zijn dan zonder onzekerheden. Onderzoekslocatie Duursche Waarden is, zonder noodoverloopgebied, de minst veilige locatie. Lobith is de meest veilige locatie.
2. In de situatie met noodoverloopgebied leidt het toevoegen van de onzekere waterstandsvoorspellingen en het inzetcriterium tot 60% à 240% grotere overschrijdingskansen dan zonder onzekerheden. De verschillen in resultaten per onderzoekslocatie worden veroorzaakt door de verschillen in qh-relaties en de verschillen in onzekerheden bij de waterstandsvoorspellingen langs de verschillende Rijntakken. Het evacuatie- en inzetcriterium worden bepaald door de locatie de Duursche Waarden, die zonder noodoverloopgebied de grootste overschrijdingskans heeft.
3. De waarde van de effectiviteit varieert van 1.1 (Duursche Waarden) tot 1.4 (Tiel).
4. Verlagen van het evacuatiecriterium (evacueren bij lagere afvoeren bij Andernach) leidt tot kleinere overschrijdingskansen.
5. Een evacuatiecriterium van een conditionele overschrijdingskans van 0.1 leidt tot grotere waarden van de effectiviteit.
6. Een inzetcriterium van een conditionele overschrijdingskans van 0.1 leidt voor de Duursche Waarden tot de kleinste overschrijdingskans.
7. De waarde van de effectiviteit met evacuatie- en inzetcriteria van conditionele overschrijdingskansen van 0.1 varieert dan tussen 1.2 (Lobith, Amerongen en Duursche Waarden) en 1.3 (Millingen en Tiel). Deze waarden geven aan dat er een zeer gering is verschil tussen de overschrijdingskansen zonder en met noodoverloopgebied.



## 9 Discussie

In dit hoofdstuk schenken we aandacht aan de consequenties van belangrijke uitgangspunten voor de overschrijdingskansen en de waarden van de effectiviteit.

### 9.1 Uitgangspunten

1. Alleen het faalmechanisme overloop is meegenomen.
2. De dijkvakbenadering is toegepast.
3. Er is gerekend met overschrijdingskansen.
4. De maatgevende afvoer bedraagt 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.
5. De dijken hebben een hoogte van het toetspeil plus de extra hoogte voor de onzekerheid in de waterstand.
6. De extra hoogte voor de onzekerheid in de waterstand bedraagt 30 centimeter, die waterkerend is.
7. De qh-relaties boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s zijn verkregen via lineaire extrapolatie.
8. De duur van een afvoergolf is 23 dagen: 13 voor de was en 10 voor de val.
9. In een afvoergolf zijn de waterstanden in stappen van 12 uur onafhankelijk van elkaar en we hebben een 50% golfvorm gebruikt.
10. Het noodoverloopgebied heeft een bergingscapaciteit van 220 miljoen m<sup>3</sup>.
11. Het maximale instroomdebiet naar het noodoverloopgebied bedraagt 2000 m<sup>3</sup>/s.
12. Als de piek van de afvoergolf bij Andernach is, wordt besloten over evacuatie van het noodoverloopgebied.
13. Als de afvoergolf bij Lobith is, wordt besloten of het noodoverloopgebied wordt ingezet.
14. Als het noodoverloopgebied niet is geëvacueerd kan het niet worden ingezet.
15. Het evacuatiecriterium is gebaseerd op conditionele overschrijdingskansen bij de minst veilige locatie bij gegeven piekafvoer bij Andernach.
16. Het inzetcriterium is gebaseerd op conditionele overschrijdingskansen bij de minst veilige locatie bij gegeven piekafvoer bij Lobith en is niet hoger dan 16.000 m<sup>3</sup>/s.

### 9.2 Mechanisme overloop

We hebben in dit onderzoek alleen gerekend met het mechanisme overloop. Doordat we alle andere mechanismen buiten beschouwing hebben gelaten, zijn de overschrijdingskansen die we hebben berekend kleiner dan in de praktijk het geval zal zijn. We verwachten dat de mechanismen overloop en golfoverslag samen de grootste invloed hebben op de overbelastingkansen. Let op: we hebben dan te maken met overbelastingkansen in plaats van overschrijdingskansen!

In het onderzoek van Stijnen et al. [2002] zorgt het meenemen van i) het mechanisme golfoverslag, ii) de onzekerheden in de windrichting en –snelheid en iii) de waakhoogte voor de golfoverslag tot waarden van de effectiviteit die 20% kleiner zijn dan zonder deze golfoverslagfactoren. Omdat we in dit onderzoek min of meer dezelfde aanpak hebben gehanteerd, zal de invloed van golfoverslag ongeveer dezelfde invloed hebben op de resultaten van dit onderzoek.

### 9.3 Betrekkingslijnen en qh-relaties

De resultaten van dit onderzoek hangen in sterke mate af van de gebruikte betrekkingslijn (tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith) en de qh-relaties (tussen de piekafvoer bij Lobith en de waterstanden op de onderzoekslocaties).

Voor de betrekkingslijn hebben we aangenomen dat er sprake is van een lineair verband tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith met een normale verdeling als gevolg van de onzekere afvoervoorspelling. We hebben aangenomen dat de onzekerheid in de afvoervoorspelling zijn gemodelleerd kan worden in de vorm van een normale verdeling rond de betrekkingslijn. Daarnaast hebben we deze betrekkingslijn aangepast zodat de werklijn bij Lobith niet verandert. Deze veronderstellingen leiden tot een betrekkingslijn waarvan de betrouwbaarheid onzeker is.

De qh-relaties zijn bij afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith lineair geëxtrapoleerd. Omdat er zich, sinds er wordt gemeten, nog nooit zulke hoge afvoeren hebben voorgedaan, kan deze extrapolatie niet worden geverifieerd aan de hand van metingen. Extrapolatie van qh-relaties is altijd onzeker en hangt samen met het dwarsprofiel van de rivier [Shaw, 1999]. In dit onderzoek hebben we de onzekerheid in de qh-relaties weergegeven door de onzekere waterstandsvoorspellingen in de vorm van normale verdelingen. Bovendien kan het zijn, dat de onzekerheid in de qh-relaties in werkelijkheid anders is.

### 9.4 Onzekere hoogwatervoorspellingen

Bij de onzekere hoogwatervoorspellingen hebben twee onzekerheidsbronnen meegenomen: de onzekere afvoervoorspellingen bij Lobith bij een gegeven piekafvoer bij Andernach en de onzekere waterstandsvoorspellingen bij de onderzoekslocaties bij een gegeven piekafvoer bij Lobith. Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat het toevoegen van onzekerheden leidt tot een kleinere waarde van de effectiviteit van het noodoverloopgebied. Omdat veel onzekerheden niet zijn meegenomen, zullen we in de praktijk te maken hebben met grotere overschrijdingskansen dan die we berekend hebben en waarschijnlijk een kleinere effectiviteit. Aan de andere kant kunnen we in de toekomst naar verwachting nauwkeurigere hoogwatervoorspellingen doen, waardoor de onzekerheden kleiner worden. Hierdoor kunnen de evacuatie- en inzetcriteria beter bepaald worden waardoor de effectiviteit toeneemt.

### 9.5 Evacuatie- en inzetcriterium

Het evacuatie- en inzetcriterium spelen een belangrijke rol bij de overschrijdingskansen met gebruik van een noodoverloopgebied. Daarmee hebben ze ook invloed op de waarde van de effectiviteit. Evacuatie en inzet van een noodoverloopgebied gebeuren idealiter als een ongecontroleerde overstroming onvermijdelijk is en het noodoverloopgebied deze ongecontroleerde overstroming kan voorkomen. We kunnen na dit onderzoek nog niet aangeven bij welke afvoer een ongecontroleerde overstroming onvermijdelijk is (zoals door de TAW is aangekaart), maar we hebben wel meer inzicht gekregen in de kans erop. Bovendien kunnen we tijdens een hoogwatergolf al meer zeggen over de processen tijdens hoogwater en de onzekerheden waar we mee te maken hebben. Op die manier kunnen we de extra informatie die beschikbaar komt gebruiken bij de beslissingen over evacuatie en inzet.



Er is naar voren gekomen dat de effectiviteit van het noodoverloopgebied het grootst is bij een evacuatiecriterium van 0.1 en een inzetcriterium van 0.1. De effectiviteit van het noodoverloopgebied is het grootst bij een zo laag mogelijk evacuatiecriterium (dus bij lage afvoeren bij Andernach besluiten tot evacuatie). Echter, in de praktijk zal het onwenselijk zijn om een gebied steeds te evacueren en relatief niet vaak in te zetten in verband met kosten die daaraan verbonden zijn en de maatschappelijke onrust die het oplevert. In de praktijk zullen waarschijnlijk andere criteria worden gehanteerd om te besluiten over evacuatie van het noodoverloopgebied. De waarde van de effectiviteit zal bij een hoger evacuatiecriterium dalen.

## 9.6 Dijkhoogte

In dit onderzoek hebben we aangenomen dat de dijkhoogte gelijk is aan het toetspeil plus de extra hoogte (alleen dat deel van de waakhoogte dat gerelateerd is aan de onzekerheid in de waterstand). Het is echter zo, dat de hoogte van de dijken pas uiterlijk in 2015 gelijk moet zijn aan het toetspeil plus de waakhoogte. Momenteel hoeft dit niet zo te zijn. Bovendien is de extra hoogte (voor de onzekerheid in de waterstand) een aangenomen waarde. De waakhoogte varieert per onderzoekslocatie door andere invloeden (bijvoorbeeld de wind). Het uitgangspunt dat de dijkhoogte gelijk is aan het toetspeil plus de extra hoogte leidt door het voorgaande tot andere overschrijdingskansen dan die in de praktijk zullen gelden.

## 9.7 Overig

In deze paragraaf komen nog een paar andere discussiepunten aan de orde. In de eerste plaats hebben we ons beperkt tot één noodoverloopgebied bij Lobith. Het is mogelijk dat een combinatie van verschillende noodoverloopgebieden of een noodoverloopgebied verder bovenstrooms (in samenwerking met Duitsland) een hogere waarde van de effectiviteit oplevert. Een grotere bergingscapaciteit zal leiden tot hogere waarden van de effectiviteit.

We hebben de overschrijdingskansen en de effectiviteit bepaald voor vijf onderzoekslocaties. Het doel van het noodoverloopgebied is het hele bovenriviereengebied beschermen tegen overstromingen. Andere locaties zijn niet meegenomen in het onderzoek. Misschien zijn er andere locaties die grotere overschrijdingskansen hebben dan de Duursche Waarden, waardoor de afvoeren waarbij wordt besloten tot evacuatie en inzet lager worden en de effectiviteit van het noodoverloopgebied af zal nemen.

De afvoergolf, die we in dit onderzoek gebruiken, heeft een duur van 23 dagen en een 50% golfvorm. Onderzoek heeft aangetoond [Stijnen et al., 2002] dat de 50% golfvorm een goede representatie is van de onzekerheid in de golfvorm. Daarnaast zijn de waterstanden in de afvoergolf in blokken van 12 uur berekend en onderling onafhankelijk verondersteld. Omdat is gerekend met de maximale waterstand per 12 uur leidt deze beperking van het onderzoek mogelijk tot grotere overschrijdingskansen dan die in de praktijk zullen gelden. De waterstanden per 12 uur zijn in de praktijk niet onderling onafhankelijk. Als de waterstand in blokje  $j$  groot is, zal de waterstand in blokje  $(j + 1)$  naar verwachting ook groot zijn. De invloed van deze veronderstelling kunnen we niet direct afleiden, er is een onderzoek voor nodig om het te bepalen.

We hebben niet gerekend met een fysisch maximum. Onderzoek van Stijnen et al. [2002] toont aan dat het beperken van de afvoer die Nederland kan bereiken tot 18.000 m<sup>3</sup>/s vrijwel geen invloed heeft op de overbelastingskansen. We kunnen verwachten dat het rekenen met

een fysisch maximum in dit onderzoek eveneens vrijwel geen effect heeft op de resultaten, omdat we ongeveer dezelfde aanpak hebben gehanteerd.

We hebben ons beperkt tot overstromingen in Nederland vanuit de rivier. In werkelijkheid kunnen overstromingen tussen Andernach en Lobith plaatsvinden. Meenemen van die mogelijkheid zal leiden tot lagere overschrijdingskansen omdat de rivierafvoer afneemt. We hebben dan echter wel te maken met andere vormen van overstromingen en schade, waar in dit onderzoek geen aandacht aan is besteed.

## 10 Conclusies en aanbevelingen

### 10.1 Conclusies

In de Wet op de Waterkering wordt gesteld dat het bovenrivierengebied van de Nederlandse Rijn takken uiterlijk in 2015 beschermd moet zijn tegen hoogwaters met een gemiddelde jaarlijkse kans van voorkomen van 1/1250. Wanneer onzekerheden niet worden meegenomen bedraagt de jaarlijkse overschrijdingskans voor het mechanisme overloop, in overeenstemming met de Wet op de Waterkering, 1/1250. Als er gebruik wordt gemaakt van een noodoverloopgebied daalt de overschrijdingskans tot ongeveer 1/4000. De effectiviteit, die in dit onderzoek is gedefinieerd als het quotiënt van de overschrijdingskans in de situatie zonder noodoverloopgebied en de situatie met noodoverloopgebied, bedraagt 3.2.

In de praktijk hebben we te maken met allerlei onzekerheidsbronnen. In dit onderzoek zijn de onzekerheid in de afvoervoorspelling voor Lobith bij gegeven piekafvoer bij Andernach en de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen voor de onderzoekslocaties langs de Rijn takken bij gegeven piekafvoer bij Lobith meegenomen. We houden ook rekening met de aangenomen extra hoogte van de dijken (van 30 centimeter), die bedoeld is voor de onzekerheid in de waterstand. Incalculeren van de onzekere afvoer- en waterstandsvoorspellingen heeft tot gevolg dat de jaarlijkse overschrijdingskansen bij de vijf onderzoekslocaties variëren van 1/2250 (Lobith) tot 1/1150 (Duursche Waarden).

Het noodoverloopgebied bij Lobith dat in dit onderzoek is gebruikt, representeert Rijnstrangen en de Ooijpolder, die door Commissie Noodoverloopgebieden zijn aanbevolen om aan te wijzen als noodoverloopgebied. Het criterium voor evacuatie van het noodoverloopgebied bij Lobith is gebaseerd op de conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden bij gegeven piekafvoer bij Andernach. Bij een piekafvoer bij Andernach die zonder noodoverloopgebied een kans van 20% op overschrijding heeft (conditionele overschrijdingskans 0.2) wordt besloten tot evacuatie van het gebied (14.000 m<sup>3</sup>/s). Het inzetcriterium hangt af van de conditionele overschrijdingskansen bij de Duursche Waarden bij gegeven piekafvoer bij Lobith. Een piekafvoer bij Lobith die zonder noodoverloopgebied een kans van 20% op overschrijding heeft leidt tot inzet van het noodoverloopgebied (15.500 m<sup>3</sup>/s). Het gebied kan niet worden ingezet als het niet geëvacueerd is.

Gebruik van het noodoverloopgebied leidt tot kleinere overschrijdingskansen bij de verschillende onderzoekslocaties. De jaarlijkse overschrijdingskansen met noodoverloopgebied variëren van 1/2900 (Lobith) tot 1/1300 (Duursche Waarden). De effectiviteit varieert van 1.1 (Duursche Waarden) tot 1.4 (Tiel). Als het noodoverloopgebied geëvacueerd is, is er een kans van 60% dat het wordt ingezet.

Het minimale evacuatiecriterium dat in dit onderzoek is gebruikt is de afvoer die hoort bij een conditionele overschrijdingskans van 0.1. Bij het gebruik van evacuatie- en inzetcriteria bij conditionele overschrijdingskansen van 0.1 bij de Duursche Waarden (grootste overschrijdingskans zonder noodoverloopgebied) varieert de effectiviteit van het noodoverloopgebied tussen 1.2 (Lobith, Amerongen en Duursche Waarden) en 1.3 (Millingen en Tiel). Bij gegeven evacuatie is er een kans van 50% dat het noodoverloopgebied wordt ingezet.

Het meenemen van de onzekere afvoer- en waterstandsvoorspellingen, samen met de criteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied, leidt tot waarden van de effectiviteit die dalen van 3.2 tot 1.2 en 1.3. Deze lage waarden van de effectiviteit van het noodoverloopgebied geven aan dat er vrijwel geen verschil is tussen de overschrijdingskans zonder en met de mogelijkheid om het noodoverloopgebied te gebruiken.

## 10.2 Aanbevelingen

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat een noodoverloopgebied bij Lobith de overschrijdingskansen verkleint. Op basis van dit onderzoek kan echter niet bepaald worden of noodoverloopgebieden een goede maatregel zijn om Nederland te beschermen tegen ongecontroleerde overstromingen. Om daar een uitspraak over te kunnen doen, is het noodzakelijk om een aantal aspecten nader te onderzoeken, waarop in deze paragraaf wordt ingegaan.

### 10.2.1 Aanbevelingen met betrekking tot resultaten huidig onderzoek

1. Aan de hand van dezelfde methode die in dit onderzoek van Stijnen et al. [2002] gebruikt is, kan het mechanisme golfoverslag worden meegenomen. Overloop en golfoverslag leveren naar verwachting de belangrijkste bijdrage aan de faalkans. De onzekerheid in de wind (richting en snelheid) kan dan ook worden meegenomen.
2. Als ook de andere mechanismen worden meegenomen en wordt overgegaan op de dijkringbenadering kunnen de overstromingskansen worden berekend. Veiligheid Nederland in Kaart (VNK) doet onderzoek naar overstromingskansen in een dijkkringbenadering waarbij alle mechanismen (uit Figuur 2-3) worden meegenomen [VNK, 2003].
3. De betrekkingsslijn tussen de piekafvoer bij Andernach en bij Lobith is afgeleid uit metingen. RIZA doet onderzoek naar deze betrekkingsslijnen. Zodra die gepubliceerd zijn kunnen ze worden gebruikt in onderzoek. Op die manier worden de resultaten van dit onderzoek betrouwbaarder.
4. Op basis van de betrekkingsslijn tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith is de werklijn bij Andernach afgeleid. In de toekomst kan gebruik gemaakt worden van een werklijn bij Andernach die op een nauwkeurigere en betrouwbaardere manier is bepaald.
5. De onzekerheid in de waterstandsvoorspelling kan gebaseerd worden op uitgegeven voorspellingen en de uiteindelijk gemeten waterstanden. Dit zal een ander beeld geven van de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen, waardoor de berekende overschrijdingskansen betrouwbaarder zijn.
6. Met nauwkeurigere waarden voor de dijkhoogten en extra hoogten wordt de nauwkeurigheid van de resultaten van dit onderzoek groter.
7. In dit onderzoek hebben we de overschrijdingskansen bij vijf locaties langs de Rijntakken onderzocht. Het uitbreiden van het aantal onderzoekslocaties zal de resultaten van dit onderzoek betrouwbaarder maken.
8. De resultaten van het huidige onderzoek kunnen worden verbeterd door meerdere onzekerheidsbronnen mee te nemen die in bijlage A naar voren zijn gekomen.

### 10.2.2 Algemene aanbevelingen

9. In toekomstige onderzoeken naar noodoverloopgebieden is het belangrijk om rekening te houden met diverse bronnen van onzekerheden in hoogwatervoorspellingen en de beslissingen over evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied.

10. De onzekerheid in de hoogwatervoorspellingen kan verkleind worden door nieuwe kennis mee te nemen bij voorspellingen. Als er een hoge afvoergolf heeft plaatsgevonden kan deze nieuwe informatie worden meegenomen, waardoor de hoogwatervoorspellingen minder onzeker worden.
11. De resultaten van dit onderzoek kunnen worden meegenomen in kostenbatenanalyses. Op basis van daarvan, en op basis van vergelijkingen met resultaten van andere hoogwaterbeschermingsmaatregelen, kan worden onderzocht in welke mate noodoverloopgebieden passen binnen de Nederlandse hoogwaterbescherming.
12. We hebben de criteria voor evacuatie en inzet van het noodoverloopgebied gebaseerd op conditionele overschrijdingskansen. De criteria voor evacuatie en inzet zullen sterk samenhangen met de verbonden kosten en baten. Voor vervolgonderzoek is het daarom belangrijk om ook de kosten en baten die gemoeid zijn met het gebruik van noodoverloopgebieden in ogenschouw te nemen. Ook met overige besluitvormingsprocessen kan rekening worden gehouden.
13. We hebben gerekend met één noodoverloopgebied bij Lobith. In de praktijk kunnen meerdere noodoverloopgebieden worden gebruikt. Het verdient aanbeveling om te onderzoeken in welke mate de combinatie van een aantal noodoverloopgebieden de overschrijdingskansen kan reduceren. Daarnaast kunnen ook de mogelijkheden voor noodoverloopgebieden in Duitsland worden onderzocht in samenwerking met de Duitse autoriteiten en/of overheden.



## 11 Referenties

- Van Asselt, M.B.A., 2000. *Perspectives on uncertainty and risk. The PRIMA approach to decision support*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Barendregt, A., Van Noortwijk, J.M., Van Maarseveen, M.F.A.M., Tutert, S.I.A., Zuidgeest, M.H.P., Van Zuilekom, K.M., 2002. *Evacuatie bij dreigende overstromingen*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Universiteit Twente en HKV LIJN IN WATER, HKV LIJN IN WATER rapport PR546.
- Bedford, T., Cooke, R.M., 2001. *Mathematical tools for probabilistic risk analysis*. Cambridge University Press.
- De Boer, E., 2003. *Het noodoverloopgebied: Airbag of luchtzak? Een kritiek op het rapport van de Commissie Luteijn*. TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.
- Commissie Noodoverloopgebieden, 2002. *Gecontroleerd overstromen*. Commissie Noodoverloopgebieden, Den Haag.
- Duits, M.T., Havinga, H., Van Noortwijk, J.M., 2000. *Nauwkeurighedsanalyse 'Ruimte voor Rijntakken', Onzekerheden in waterstanden en kosten onderzocht*. Land en Water jaargang 40 nummer 9.
- Elling, R., Andeweg, B., De Jong, J., Swankhuisen, C., 1994. *Rapportagetechniek*. Wolters-Noordhoff Groningen.
- Heynert, K., Dijkman, J., Klijn, F., 2001. *Waterstaatkundige inrichting noodoverloopgebieden, een overzicht*. Opdrachtgever: DG Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, namens Commissie Noodoverloopgebieden. WL|Delft Hydraulics rapport Q3155.
- Heynert, K., 2002. *Werkzaamheden aan het Rijnsysteem ten behoeve van de Commissie Noodoverloopgebieden*. Opdrachtgever: DG Rijkswaterstaat RIZA. WL|Delft Hydraulics rapport Q3208.
- HKV LIJN IN WATER en WL|Delft Hydraulics, 2003. *Beperking van overstromingsrisico's langs Bovenrivieren. Een verkennende beleidsanalyse van rampenbeheersing en structurele maatregelen langs de Rijn*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA, HKV LIJN IN WATER rapport PR640.
- Kallenberg, W.C.M., 1999. *Statistiek II voor CT&M*. Faculteit der toegepaste wiskunde, Universiteit Twente.
- Van der Klis, H., 2003. *Uncertainty analysis applied to numerical models of river bed morphology*. Delft University Press.
- Klopstra, D., Duits, M.T., 1999. *Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Rijn bij Lobith*. Opdrachtgever: WL|Delft Hydraulics, Rijkswaterstaat RIZA, HKV LIJN IN WATER rapport PR204.
- Klopstra, D., De Graaff, B., Vermeer, K., 2001. *Managementsamenvatting Noodoverloopgebieden, met aanvullingen*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA, HKV LIJN IN WATER rapport PR444.
- Kok, M., Stijnen, J.W., Silva, W., 2003. *Uncertainty analysis of river flood management in the Netherlands*. HKV LIJN IN WATER en Rijkswaterstaat RIZA.

- Kotz, S., Balakrishnan, N., Johnson, N.L., 2000. *Continuous multivariate distributions*. Second Edition, New York: Wiley.
- Van der Linden, T., 2002. *Nut en noodzaak van noodoverloopgebieden voor en in het benedenrivierengebied*. RIZA werkdocumentnummer 2002.096x, Dordrecht.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000. *Anders omgaan met water – waterbeleid in de 21e eeuw*. Kabinetsstandpunt.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000. *Ruimte voor de rivier*. Kabinetsstandpunt.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001. *Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van waterkeringen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003. *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Hoofdrapport, Resultaten van de eerste toetsronde van 1996 – 2001*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Mood, A.M., Graybill, F.A., Boes, D.C., 1974. *Introduction to the theory of statistics, third edition*. McGraw-Hill, ISBN 0070428646.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksaangelegenheden, 2004. *Kabinet besluit tot voorlopige reservering van noodoverloopgebieden*. <http://www.noodoverloop.nl>
- Van Noortwijk, J.M., Kalk, H.J., Duits, M.T., Chbab, E.H., 2001. *The use of Bayes factors for model selection in structural reliability*. In Corotis, R.B., Schuëller, G.I., Shinozuka, M., editors, *Structural Safety and Reliability*; Proceedings of the Eighth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Newport Beach, California, U.S.A., 17-22 June 2001. Lisse: Balkema.
- Van Noortwijk, J.M., 2002. *Frequentie en kans (bijlage A)*. In: *Onzekerheidsanalyse Hoogwaterbescherming Rijntakken* door Stijnen et al. [2002], HKV LIJN IN WATER rapport PR464.
- Parmet, B.W.A.H., Sprokkereef, E., 1995. *Hoogwaterberichtgeving Rijn, januari/februari 1995*. RIZA Rijkswaterstaat, RIZA werkdocumentnummer 95.052X.
- Parmet, B.W.A.H., Van den Langemheen, W., Chbab, E.H., Kwadijk, J.C.J., Klopstra, D., 2002. *Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith*. Rijkswaterstaat, RIZA rapport 2002.021.
- Poortema, K., 1999. *Statistiek I voor CT&M*. Faculteit der toegepaste wiskunde, Universiteit Twente.
- RIZA, 2003. *Probabilistisch model voor de IJsseldelta*. Rijkswaterstaat RIZA, RIZA werkdocumentnummer 2003.091.x.
- Shaw, E.M., 1999. *Hydrology in Practice*. Stanley Thornes Ltd, Cheltenham, United Kingdom.
- Silva, W., Klijn, F., Dijkman, J., 2000. *Ruimte voor Rijntakken, Wat het onderzoek ons heeft geleerd*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA, RIZA rapport 2000.026, WL rapport R3294.
- Silva, W., 2001. *Hoogwaterbescherming langs de Rijntakken, Onzekerheden en omgaan met onzekerheden*. Rijkswaterstaat RIZA, RIZA werkdocumentnummer 2000.179X.



- Slijkhuis, K.A.H., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, H.K., Vrouwenvelder, A.C.W.M., 1999. *On the lack of information in hydraulic engineering models. Safety and Reliability: 713-718*, Rotterdam.
- Sprokkereef, E., 2001. *FloRIJN 2000, Verlenging van de zichttijd van hoogwatervoorspellingen voor de Rijn in Nederland tot drie dagen*. Rijkswaterstaat RIZA, RIZA rapport 2001.060.
- Sprokkereef, E., 2002. *Hoogwaterberichtgeving Rijn, februari/maart 2002*. RIZA Rijkswaterstaat, RIZA werkdocumentnummer 2002.103X.
- Sprokkereef, E., 2003. *Hoogwaterberichtgeving Rijn, januari 2003*. RIZA Rijkswaterstaat, RIZA werkdocumentnummer 2003.036X.
- Stijnen, J.W., Kok, M., Duits, M., 2002. *Onzekerheidsanalyse Hoogwaterbescherming Rijntakken, Onzekerheidsbronnen en gevolgen van maatregelen*. Opdrachtgever Rijkswaterstaat RIZA, HKV LIJN IN WATER rapport PR464.
- TAW, 1985. *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 – bovenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW, 1995. *Druk op dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW, 1999. *Leidraad Toetsen op Veiligheid*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW, 2000. *Van overschrijdingskans naar overstromingskans*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Verschuren, P., Doorewaard, H., 2000. *Het ontwerpen van een onderzoek*. Lemma BV, Utrecht.
- VNK, 2003. *Veiligheid Nederland in Kaart*. [www.projectvnk.nl](http://www.projectvnk.nl)
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., Steenberg, H.M.G.M., Slijkhuis, K.A.H., 2001. *Theoriehandleiding PC-Ring Versie 2.0. Deel A: Mechanismen-beschrijvingen*. TNO rapport 98-CON-R1430. TNO Bouw, Delft.
- Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., Van der Sluijs, J.P., Van Asselt, M.B.A., Janssen, P., Kreyer von Krauw, M.P., 2003. *Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. Integrated Assessment, 4(1): 5-17*.
- Wikipedia, 2003. *Rijn*. Wikipedia, de vrije encyclopedie. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Rijn>



## **Bijlagen**



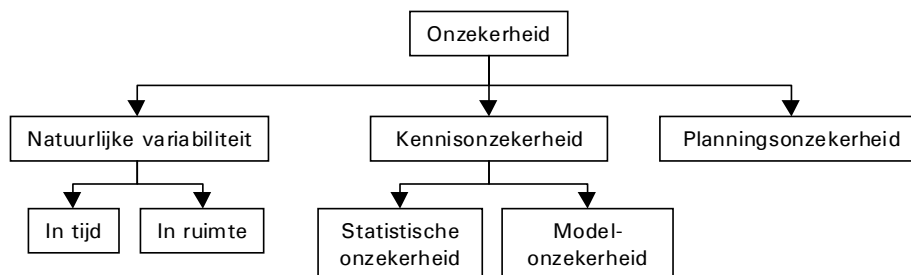
## Bijlage A: Onzekerheden

In deze bijlage wordt aandacht besteed aan onzekerheden. Bedford et al. [2001] definiëren onzekerheid als hetgeen dat verdwijnt zodra ergens zekerheid over bestaat. In de wetenschap wordt een deel van de onzekerheid gereduceerd door het doen van waarnemingen. Onzekerheid hangt daardoor sterk samen met de resultaten van mogelijke waarnemingen [Van der Klis, 2003]. Door Walker et al. [2003] wordt onzekerheid gedefinieerd als iedere afwijking van het (onhaalbare) ideaal van de alles omvattende kennis van een bepaald systeem.

### Bronnen van onzekerheden

Er zijn verschillende manieren om onzekerheden te ordenen. Een eerste ordening kan plaatsvinden op basis van de bron van de onzekerheid, dat komt in deze paragraaf aan de orde. Een andere mogelijkheid is het ordenen op de manier waarop de onzekerheid zich manifesteert in modellen. In Van der Klis [2003] zijn de verschillende manieren van manifestatie beschreven. Op deze tweede wijze van ordenen wordt in dit onderzoek niet ingegaan.

Slijkhuis et al. [1999] maken van de onzekerheidsbronnen een indeling naar natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheid. Stijnen et al. [2002] en Kok et al. [2003] voegen nog een derde onzekerheid toe: de planningsonzekerheid. De verschillende bronnen van onzekerheden zijn schematisch weergegeven in Figuur A-1.



Figuur A-1 Bronnen van onzekerheden naar Kok et al. [2002].

### Natuurlijke variabiliteit

Natuurlijke variabiliteit (ook wel inherente onzekerheid genoemd) representeert de stochasticiteit of variabiliteit van de natuur. Het gaat om natuurlijke variabiliteit in de tijd en in de ruimte. Een voorbeeld van natuurlijke variabiliteit is dat zelfs met een lange data-geschiedenis, niet kan worden vastgesteld wat in het komende jaar de maximale waterstand in een rivier zal worden [Slijkhuis et al., 1999]. Het is niet mogelijk om natuurlijke variabiliteit te reduceren, maar kan in de vorm van kansverdelingen worden gemodelleerd, zodat er rekening mee kan worden gehouden [Duits et al., 2000].

### Kennisonzekerheid

Kennisonzekerheid resulteert uit het gebrek aan kennis over een fysisch systeem of door onvoldoende data [Duits et al., 2000], [Slijkhuis et al., 1999]. De twee belangrijkste typen van kennisonzekerheid zijn *statistische onzekerheid* en *modelonzekerheid* [Van Noortwijk et al., 2001]. Slijkhuis et al. [1999] maken binnen de statistische onzekerheid onderscheid tussen onzekerheden in de gebruikte parameters en onzekerheid in de gebruikte kansverdeling

van die parameter, die nauw met elkaar samenhangen. Statistische onzekerheid kan worden gereduceerd door het doen van meer waarnemingen [Benjamin et al. 1970], [Van Noortwijk et al., 2001], [TAW, 2000]. Modelonzekerheid komt voort uit onbekende fysische verschijnselen en door het niet meenemen van bepaalde processen. Deze onzekerheid kan worden verkleind door modellen te toetsen aan de werkelijkheid en ze aan de hand daarvan te verbeteren [TAW, 2000].

Van Asselt [2000] en Van der Klis [2003] beschrijven de bronnen van kennisonzekerheid als een spectrum dat kan variëren van onbetrouwbaarheid tot een structurele onzekerheid. Onbetrouwbaarheid kan worden gereduceerd door het vergroten van het aantal waarnemingen. De structurele onzekerheid, die bijvoorbeeld veroorzaakt wordt door onbekende of onmeetbare processen, kan niet of nauwelijks worden gereduceerd; er moet een schatting van gemaakt worden [Van der Klis, 2003].

### **Planningsonzekerheid**

De planningsonzekerheid representeert de onzekerheid die bijvoorbeeld komt kijken bij evacuatie en daadwerkelijke inzet van een noodoverloopgebied. Onder planningsonzekerheid valt dan bijvoorbeeld wie over het gebruik van het noodoverloopgebied moet beslissen, het tijdstip waarop die bestuurder het besluit neemt om het noodoverloopgebied te evacueren en in te zetten en wanneer dat daadwerkelijk gebeurt [Kok et al., 2003], [Stijnen et al., 2002].

### **Conclusie**

De verschillende bronnen van onzekerheid hangen nauw samen en de grenzen zijn vaak niet eenvoudig te bepalen. Vaak is een bepaalde onzekerheid een combinatie van verschillende categorieën. Een voorbeeld hiervan is verandering van de bodemruwheid in de tijd. Dit is een vorm van natuurlijke variabiliteit, die kan worden gemodelleerd door middel van een probabilistisch model. Zo een soort model bevat kennisonzekerheid, omdat er geen zekerheid bestaat over morfologische processen op de bodem tijdens extreme situaties.

In dit onderzoek worden de verschillende onzekerheden niet geordend volgens de hiervoor beschreven methode. Wel proberen we per onzekerheidsbron te bepalen met wat voor soort onzekerheid we te maken hebben, wat inzicht geeft in de manier waarop de onzekerheden verkleind kunnen worden.

### **Onzekerheden bij hoogwaterbescherming**

Bij de hoogwaterbescherming in Nederland en ook bij noodoverloopgebieden spelen veel onzekerheden. In deze bijlage worden de belangrijkste onzekerheden besproken. Onzekerheden zijn van belang bij de hoogwatervoorspellingen, die in dit onderzoek worden meegenomen. Er zijn onzekerheden die buiten beschouwing worden gelaten, bijvoorbeeld de invloed van de watertemperatuur op de dichtheid van het water en daardoor op de afvoer. De onzekerheden die in deze paragraaf naar voren komen zijn verdeeld in vijf groepen; de belasting op de dijken, de sterkte van de dijken, het inundatieproces, de schade en onzekerheden in modellen. Let op: niet alle onzekerheden die hier worden beschreven worden vervolgens meegenomen in dit onderzoek.

## Onzekerheden in belasting

De optredende waterstand vormt een belangrijk deel van de belasting op de dijken. Het gaat om de hoogte van de waterstand en de duur van die waterstand. Ander soort belastingen, zoals het verkeer op de dijk worden buiten beschouwing gelaten. De onzekerheid in de waterstand (hoogte en duur) wordt onder andere beïnvloed door de hieronder beschreven onzekerheden.

## Waterstand en golven

### Piekafvoer

Er bestaat onzekerheid over welke piekafvoer van de Rijn Nederland zou kunnen bereiken. Op het moment overstromen de dijken in Nordrhein-Westfalen in Duitsland bij een afvoer groter dan 14.500 m<sup>3</sup>/s. Dit betekent dat in de huidige situatie een afvoer van 14.500 m<sup>3</sup>/s het maximum is dat Nederland via de Rijn kan bereiken [De Boer, 2003]. Zodra in uiterlijk 2015 het dijkversterkingsprogramma in Duitsland afgerond is, wordt het maximum dat Nederland binnen kan komen 18.000 m<sup>3</sup>/s [HKV LIJN IN WATER, 2003], [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. De onzekerheid in de piekafvoer is een vorm van natuurlijke variabiliteit. In dit onderzoek houden we geen rekening met een fysisch maximum (de maximale afvoer die Nederland bij Lobith binnen kan komen via de rivier). We hebben namelijk ook te maken met planningsonzekerheid, omdat we bijvoorbeeld niet precies kunnen voorspellen hoe het hoogwaterbeschermingsprogramma in Duitsland zich zal ontwikkelen.

### Verdeling van de Rijnafvoer bij de splitsingspunten

De verdeling van de Rijnafvoer bij de splitsingspunten, zoals bijvoorbeeld de Pannerdensche Kop, is van grote invloed op de waterstanden langs de Rijntakken. Bij maatgevend hoogwaterberekeningen wordt de afvoerverdeling vooral bepaald door de geometrie van het rivierbed en door de stromingsweerstand (zomerbed en uiterwaarden). Sinds er metingen worden gedaan, is er geen maatgevende afvoer opgetreden. Daarom is het niet mogelijk geweest de afvoerverdeling te controleren aan de hand van metingen [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. In hoofdstuk 2 is naar voren gekomen welke afvoerverdeling zich voordoet bij normale omstandigheden en wat verwacht wordt bij hoge rivierafvoeren. De onzekerheid in de afvoerverdeling valt binnen de kennisonzekerheid.

### Geometrie en ruwheid

Naast de afvoerverdeling bij de splitsingspunten zijn de onzekerheden in de geometrie en ruwheid van belang voor de waterstanden. De geometrie bestaat uit de afmetingen van de rivier en het verhang. De geometrie hangt nauw samen met de bodemligging van de rivier. Bij maatgevende omstandigheden kan de bodemligging van het zomerbed en van de uiterwaarden anders zijn dan waar vanuit wordt gegaan (natuurlijke variabiliteit) [Silva, 2000]. Het is moeilijk om de bodemligging te meten tijdens hoogwater. Dat is een vorm van kennisonzekerheid. Bovendien bestaat er veel onzekerheid over de morfologische processen op de bodem tijdens hoogwater (kennisonzekerheid) [Silva, 2000], zoals duinvorming. De bodemruwheid en duinvorming hebben invloed op de waterstanden bij hoogwater. Voor de berekening van waterstanden worden veronderstellingen gedaan over de stromingsweerstand en bodemruwheid. Deze veronderstellingen leiden tot een onzekerheid in waterstanden van enkele decimeters. Bovendien wordt verwacht dat bij het herinrichten van uiterwaarden met meer natuur, deze onzekerheid nog zal toenemen. De ruwheid en stromingsweerstand van bepaalde vegetatietypen zijn namelijk moeilijk in te schatten en kunnen niet geverifieerd worden aan de hand van metingen bij maatgevende en bovenmaatgevende situaties, omdat die er (nog) niet

zijn (geweest) (natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheid) [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002].

#### Zijdelingse toestroming

Een andere onzekerheid die invloed heeft op de waterstanden is de zijdelingse toestroming via beken en kanalen. Vooral langs de IJssel speelt deze factor een belangrijke rol. Bij het hoogwater in 1995 bedroeg de zijdelingse toestroming ongeveer 10% van de IJsselafvoer. Benedenstrooms leverde dit een verhoging van de waterstanden op van ongeveer vijftien centimeter [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. De onzekerheid in de zijdelingse toestroming is een combinatie van natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheid.

#### Wind

De onzekerheid in de wind (natuurlijke variabiliteit) wordt veroorzaakt door de onzekerheid in de snelheid en in de richting [Stijnen et al., 2002]. Wind veroorzaakt onder andere golven waardoor andere waterstanden kunnen optreden en golfoverslag kan plaatsvinden. Daarnaast kan de wind van invloed zijn op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten [Silva, 2000].

#### IJsvorming

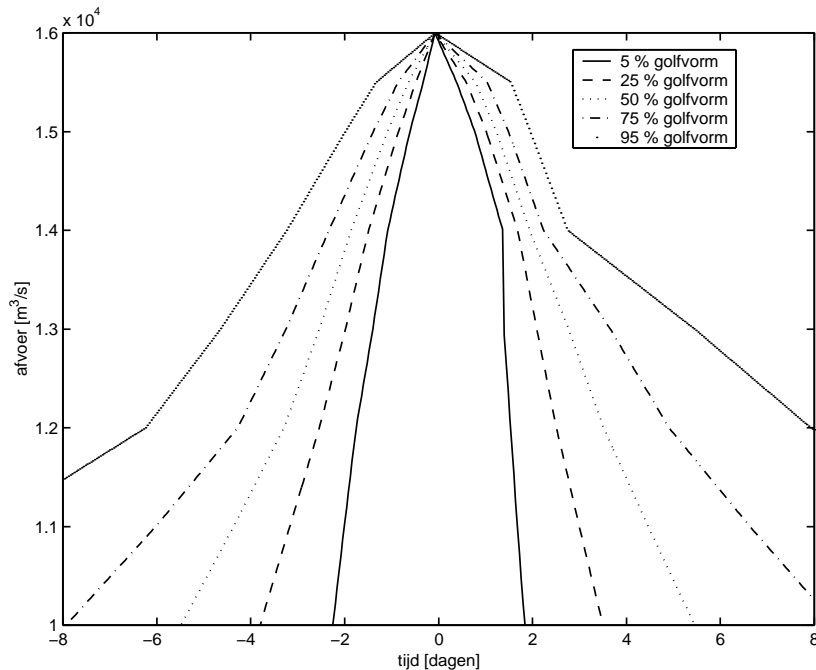
Veel overstromingen zijn in het verleden veroorzaakt door ijsvorming in de rivieren. Door normalisatiewerken (bijvoorbeeld kribben) en lozingen van koel- en afvalwater is de kans op deze verschijnselen sterk gedaald. Toch moet hier rekening mee worden gehouden, zeker bij de natuurontwikkeling in de uiterwaarden [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. Bij natuurontwikkeling in de uiterwaarden ontstaan daar lagere stroomsnelheden waardoor eerder ijsvorming op zal treden. De onzekerheid bij ijsvorming in rivieren valt in de categorie kennisonzekerheid en natuurlijke variabiliteit.

### **Duur van het hoogwater**

De vorm van de hoogwatergolf is van groot belang bij hoogwater in rivieren. De duur van de afvoergolf kan tientallen procenten korter zijn dan en meer dan twee keer zo lang als de verwachte duur (natuurlijke variabiliteit) [Klopstra et al., 2001]. Een andere golfvorm leidt tot andere effecten van het noodoverloopgebied, bijvoorbeeld wanneer de afvoergolf twee achtereenvolgende toppen heeft [Silva, 2000], [Commissie Noodoverloopgebieden, 2002]. Een dergelijke golfvorm kan ertoe leiden dat het noodoverloopgebied al is volgestroomd voordat de tweede (misschien hogere) piek zich voordoet, waardoor er alsnog een (ongecontroleerde) overstroming plaatsvindt (planningsonzekerheid).

In Figuur A-2 zijn voorbeelden van afvoergolven te zien, die gegenereerd zijn met de golfvormgenerator, waarin gemeten afvoergolven zijn opgeschaald [Klopstra et al., 1999]. De 75% golfvorm betekent dat van alle golfvormen met 75% zekerheid gesteld kan worden, dat een nieuwe afvoergolf smaller dan of gelijk is aan die 75% golfvorm [Stijnen et al., 2002]. Het gaat in Figuur A-2 om golven met een piekafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Voor hogere piekafvoeren levert de golfvormgenerator vergelijkbare golven op.





Figuur A-2 Verschillende golfvormen bij een piekafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s [Stijnen et al., 2002]

### Onzekerheden in sterkte

De sterkte van een dijk wordt gekarakteriseerd door de kruinhoogte (om te beschermen tegen hoge waterstanden) en de stabiliteit van de dijk (om te beschermen tegen langdurig hoogwater). We hebben hier te maken met natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheid. Bij hoogwaterberekeningen wordt uitgegaan van bepaalde hoogten en stabiliteiten. Er bestaat echter een onzekerheid in de daadwerkelijke hoogte en stabiliteit van de dijken. Door zettingen van het dijklichaam kan de dijkhoogte lager zijn dan waar vanuit wordt gegaan [TAW, 1985]. Door bijvoorbeeld erosie kan de stabiliteit lager zijn. Van de 3291 km dijken en dammen die direct bescherming bieden tegen overstroming vanuit de Noordzee, de grote rivieren en de IJssel- en Markermeer, voldoet (op 1 januari 2002) 46% aan de gestelde normen, die gebaseerd zijn op de hoogte en de stabiliteit van de dijken en dammen. Daarnaast voldoet 17% niet en over 37% kan geen oordeel worden uitgesproken [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003]. Een deel van de dijken en dammen die niet aan de normen voldoen maken onderdeel uit van het programma Deltaplan Grote Rivieren dat nog niet is afgerond [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003].

### Onzekerheden bij inundatieproces

Bij het inundatieproces spelen een aantal factoren een rol. Het gaat om het soort inlaatwerk, de instroom en de bestuurlijke processen rond de inundatie.

#### Inlaatwerk en instroom

Het water stroomt het noodoverloopgebied in via het inlaatwerk. Er bestaan verschillende soorten inlaatwerken, namelijk een vaste overlaat, een overlaat met een beweegbare kruin, een harde drempel in het dijklichaam en een regelbaar inlaatwerk [Heynert et al., 2001]. Er bestaat een onzekerheid in de manier waarop het water het noodoverloopgebied instroomt (kennisonzekerheid). De modellen waarmee het inundatieverloop in het noodoverloopgebied en de bijbehorende wateronttrekking aan de rivier worden berekend, kunnen niet worden gecalibreerd en gevalideerd, omdat er in Nederland geen inundatie van een noodoverloop-

gebied plaats heeft gevonden. De belangrijkste parameters zijn de inundatiediepte, het inundatieoppervlak en de stroomsnelheden. De onzekerheid in het inundatieoppervlak wordt vooral gevormd door de onzekerheid hoe het noodoverloopgebied gemodelleerd is en wat de effecten bij inundatie zijn van de aanwezige lichamen (zoals (spoor)wegen, dijken en secundaire keringen) op het inundatieverloop [Klopstra, 2001]. De inundatiediepte heeft invloed op het debiet dat onttrokken wordt aan de rivier. Zodra er al veel water in het noodoverloopgebied aanwezig is, zal er onvolkomen instroom plaatsvinden: het instroomdebiet is dan niet optimaal is.

#### Bestuurlijke processen

Deze onzekerheid heeft te maken met het op het juiste moment evacueren en inzetten van het gebied. Als een gebied niet is geëvacueerd, is de beslissing om het gebied toch in te zetten niet eenvoudig gemaakt.

Als het noodoverloopgebied wel is geëvacueerd en er te vroeg wordt begonnen met de inlaat van water, bestaat de kans dat het gebied al vol is voordat de piek van de golf er is. Wanneer te laat wordt begonnen met inlaten, is de piek van de hoogwatergolf al voorbij. In beide gevallen kan een eventuele overstroming verder benedenstrooms waarschijnlijk niet meer voorkomen worden. Daarnaast is hierbij van belang welk noodoverloopgebied ingezet moet worden. De onzekerheden bij de bestuurlijke processen horen thuis in de planningsonzekerheid.

### **Onzekerheden in schade**

Bij het gebruik van noodoverloopgebieden moet rekening worden gehouden met verschillende soorten schade: economische schade, sociale schade en schade aan het milieu en cultuurhistorie [Klopstra et al., 2001]. Bovendien moet er bij inundatie zonder evacuatie rekening worden gehouden met mogelijke slachtoffers. De onzekerheden die spelen bij de schade komen vooral voort uit de modellen die de schade bepalen. Bijvoorbeeld bij de economische schade wordt dit veroorzaakt door onzekerheden in inundatiediepte, inundatieoppervlak en stroomsnelheden [Klopstra et al., 2001]. De onzekerheden in de schade worden veroorzaakt door een vorm van kennisonzekerheid.

### **Onzekerheden in modellen**

In deze paragraaf komen alleen de onzekerheden in de modellen naar voren die in dit onderzoek worden gebruikt.

#### Betrekkinglijnen

Een betrekkinglijn is een verband tussen afvoeren (of waterstanden) op verschillende locaties. Op het moment van schrijven wordt er onderzoek gedaan naar betrekkinglijnen tussen Andernach en Lobith met behulp van een Sobek-model van de Rijntakken van Andernach tot Lobith [RIZA, 2003]. Resultaten van het betreffende onderzoek zijn nog niet gepubliceerd en kunnen niet gebruikt worden. In dit onderzoek wordt uit metingen een betrekkinglijn voor piekafvoeren in Andernach en Lobith afgeleid, zie ook bijlage B. Er is aangenomen dat er een lineair verband bestaat tussen de piekafvoer bij Andernach en bij Lobith! Zowel het aangenomen lineaire verband als de beperking door het aantal metingen leiden tot de onzekerheid in deze betrekkinglijn. Het gaat hier om kennisonzekerheid.

### Qh-relaties

In dit onderzoek worden de waterstanden op de verschillende onderzoekslocaties langs de Rijntakken bepaald met qh-relaties. Dat zijn relaties tussen afvoeren (q) bij Lobith en waterstanden (h) bij verschillende locaties langs de Rijntakken. Deze qh-relaties volgen uit berekeningen met het hydraulische model WAQUA [Stijnen et al., 2002]. Voor de afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith zijn deze relaties geëxtrapoleerd en kunnen ze niet worden vergeleken met metingen. Zodra bij extreem hoge afvoeren de dijken overstromen, is het erg onzeker hoe de waterstanden hierop reageren (natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheid). Daarnaast kunnen bij één bepaalde afvoer meerdere waterstanden voorkomen. Het verschijnsel hysteresis, dat afvoergolven bij de was van de golf een andere waterstand opleveren dan bij de val van de golf bij dezelfde afvoer, wordt niet meegenomen (kennisonzekerheid). De qh-relaties zijn bekend voor een aantal locaties langs de Rijntakken (MSW meetstations). Indien we tussen die locaties de waterstanden willen berekenen moeten we rekening houden met de onzekerheid door de interpolatie tussen de locaties.

### Numerieke berekening

De overbelastingskansen die in dit onderzoek naar voren komen, worden berekend met behulp van numerieke integratie. Dat er *numeriek* wordt gerekend heeft tot gevolg dat het antwoord altijd een fout bevat. Deze afwijking zal verwaarloosbaar klein zijn. Ook de *stapgrootte* in de numerieke berekening genereert een fout in het antwoord. Dit zijn vormen van kennisonzekerheid.



## Bijlage B: Verband tussen piekafvoer Andernach en Lobith

### Gebruikte hoogwatergolven

Voor dit onderzoek hebben we het verband nodig tussen de piekafvoer bij Andernach ( $qA$ ) en de piekafvoer bij Lobith ( $qL$ ), een betrekkinglijn. Om deze betrekkinglijn te verkrijgen analyseren we hoogwatergolven in de periode van 1931 tot 2000. De data bij Lobith (Donar) komen van de heer Buiteveld, RIZA (QL0100\_tabel.xls). De data bij Andernach komen van de heer Belz, BfG (Andernach\_W\_Q\_.xls).

Omdat bij extreme situaties ook de afvoeren van de zijrivieren op het traject Andernach tot Lobith erg groot zijn, verwachten we bij hogere piekafvoeren bij Andernach ook hogere piekafvoeren bij Lobith. We nemen daarom aan dat het verband tussen de piekafvoer bij Lobith en bij Andernach lineair is. Dat betekent dat we een betrekkinglijn gebruiken van de volgende vorm, waarbij we in dit onderzoek rekenen met  $b = 0$ .

$$qL = a \cdot qA + b$$

We ontwikkelen in deze bijlage twee betrekkinglijnen, de één wordt gebruikt in de situatie zonder de onzekerheid in de afvoervoorspelling, de ander gebruiken we als de onzekerheid in de afvoervoorspelling wel wordt meegenomen.

### Zonder onzekerheid afvoervoorspelling

Uit de data komt naar voren dat de piekafvoer bij Lobith gemiddeld 8% hoger is dan de piekafvoer bij Andernach. De volgende betrekkinglijn is bij benadering geldig:

$$qL = 1.1 qA$$

### Met onzekerheid afvoervoorspelling

De onzekerheid in de afvoervoorspelling modelleren we door de waarde van  $a$  als onzeker te beschouwen. De volgende vergelijking is geldig.

$$qL = a \cdot qA$$

We nemen aan dat de waarde van  $a$  normaal verdeeld is met verwachting  $\mu_a$  en standaarddeviatie  $\sigma_a$ :  $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$ . De waarden van  $\mu_a$  en  $\sigma_a$  schatten we op basis van de data. De verwachting en de standaarddeviatie bepalen we met behulp van de volgende schatters.

$$\mu_{\text{schatting}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X}$$

$$\sigma_{\text{schatting}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

De  $X_i$ 's zijn de waarden van de piekafvoer bij Lobith gedeeld door de bijbehorende piekafvoer bij Andernach. De waarde van de schatter is  $\mu_a$  is gelijk aan 1.1, die van  $\sigma_a$  bedraagt 0.09.

De kansdichtheidsfunctie die bij de kansverdeling van de piekafvoer bij Lobith bij een gegeven piekafvoer bij Andernach hoort duiden we aan met  $f_{qL}$ . De kansdichtheidsfunctie van de piekafvoer bij Lobith bij een gegeven piekafvoer bij Andernach, wordt gedefinieerd door de volgende vergelijking:

$$f_{qL}(qL | \mu_{qL}(qA), \sigma_{qL}(qA)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{qL}(qA)^2}} \exp\left\{-\frac{(qL - \mu_{qL}(qA))^2}{2\sigma_{qL}(qA)^2}\right\}$$

Hierin staat  $\mu_{qL}$  voor de verwachtingswaarde van de piekafvoer bij Lobith, die een functie is van de piekafvoer bij Andernach. De  $\sigma_{qL}$  is de standaarddeviatie als functie van de piekafvoer bij Andernach. Met behulp van de volgende drie vergelijkingen kunnen we de waarden van deze parameters afleiden.

$$a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$$

$$a \cdot qA \sim N(a \cdot qA, (\sigma_a \cdot qA)^2)$$

$$qL \sim N(\mu_{qL}, \sigma_{qL}^2) = N(a \cdot qA, (\sigma_a \cdot qA)^2)$$

Uit deze vergelijkingen komt naar voren dat geldt:

$$\mu_{qL} = E(qL) = a \cdot qA = 1.1 qA$$

$$\sigma_{qL} = \sigma_a qA = 0.09 qA$$

### Aanpassing betrekkinglijn

Als we de hierboven beschreven betrekkinglijn met onzekere afvoervoorspellingen gebruiken, heeft dat tot gevolg dat de werklijn bij Lobith verandert. Omdat de werklijn bij Lobith als gegeven wordt beschouwd, maken we gebruik van de volgende (pragmatische) methode om ervoor te zorgen dat de overschrijdingsfrequenties van afvoeren bij Lobith niet veranderen (de werklijn blijft hetzelfde).

De werklijn bij Lobith is bekend en heeft een exponentiële verdeling. De werklijn bij Andernach en de betrekkinglijn (met een onzekerheid) zijn onbekend. We gaan er vanuit dat de werklijn bij Andernach ook exponentieel verdeeld is. De gezamenlijke verdeling van twee exponentiële verdelingen is een bivariate exponentiële verdeling. Er bestaan verschillende bivariate exponentiële verdelingen [Kotz et al., 2000], die vrij ingewikkeld zijn. In dit onderzoek gebruiken we een normale verdeling die de onzekerheid in de afvoervoorspelling weergeeft, omdat daar gemakkelijk mee te rekenen is.

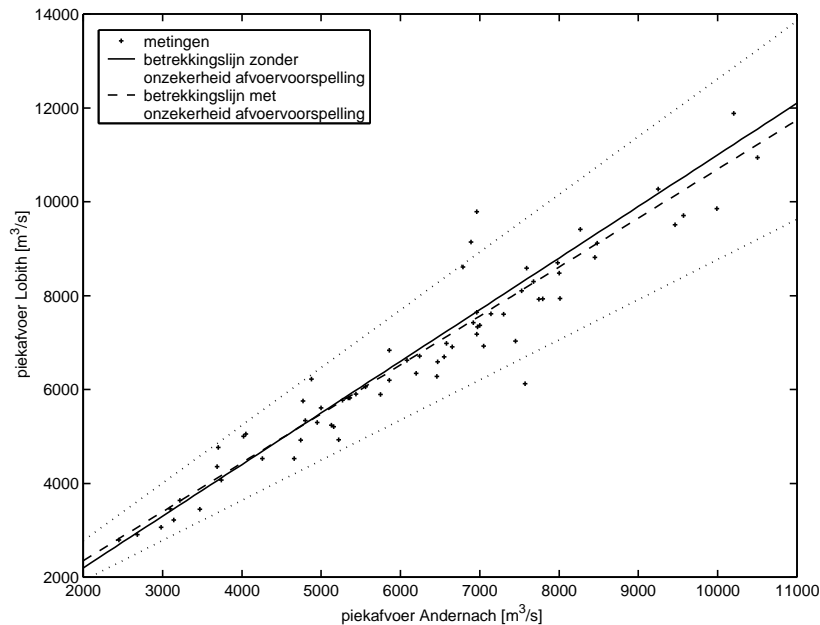
Het gevolg van deze veronderstellingen is dat de betrekkinglijn aangepast moet worden om de werklijn bij Lobith niet te veranderen. Een proces van trial-and-error leidt tot de nieuwe betrekkinglijn. De verwachtingswaarde van de afvoer bij Lobith wordt dan gegeven volgens onderstaande vergelijking met  $a_1 = 1.0429$  en  $a_2 = 265 \text{ m}^3/\text{s}$ . De waarde van de standaarddeviatie blijft gelijk.

$$\mu_{qL} = E(qL) = a_1 \cdot qA + a_2$$

In het kader op de volgende pagina is een voorbeeld gegeven.

Bij een piekafvoer van 10.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach bedraagt de verwachting voor de piekafvoer bij Lobith 10.700 m<sup>3</sup>/s. De standaarddeviatie is in dat geval 900 m<sup>3</sup>/s.

In onderstaande figuur zijn de twee verschillende verbanden te zien, één zonder de onzekerheid in de afvoervoorstelling, de andere met. Ook de gebruikte hoogwatergolven zijn aangegeven.



Figuur B-1 Betrekkingslijnen met en zonder onzekere afvoervoorstelling

De getrokken lijn is het verband zonder onzekerheden. De gestreepte lijn is het aangepaste verband tussen de piekafvoeren bij Andernach en Lobith voor de situatie met de onzekerheid in de afvoervoorstelling. De gestippelde lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval weer van het verband met onzekerheden. Sommige meetpunten blijken buiten dit interval te liggen. Het gaat om 3 van de 69 punten (4.3%), wat redelijk overeenkomt met het 95% betrouwbaarheidsinterval, waarbij 5% van de metingen buiten ligt. Deze meetpunten zijn echter afvoeren die lager zijn dan de extreme situaties waar in dit onderzoek mee gerekend wordt. Daarom wordt aangenomen dat de afgeleide kansverdeling een goede representatie geeft van het verband tussen piekafvoeren bij Andernach en Lobith.





## Bijlage C: De werklijn bij Andernach

### Werklijn bij Lobith

De werklijn bij Andernach leiden we af uit de werklijn bij Lobith. Deze werklijn komt uit [Parmet et al., 2002] en is gegeven volgens de volgende vergelijking, waarin  $T$  staat voor de herhalingstijd in jaren.

$$qL(T) = \begin{cases} 5893.3 + 1620.7 \ln(T) & 1 \leq T < 2 \\ 5964.63 + 1517.78 \ln(T) & 2 \leq T < 25 \\ 6612.61 + 1316.43 \ln(T) & 25 \leq T < 10.000 \end{cases}$$

Omdat er een direct verband is aangenomen tussen de piekafvoeren bij Lobith en die bij Andernach (vergelijking (3.1)), is de werklijn bij Andernach eenvoudig te bepalen. Dit komt hieronder naar voren.

### Afleiding werklijn bij Andernach

De overschrijdingsfrequentie van de maximale piekafvoer per jaar (voor grote afvoeren) is gelijk aan de reciproque van de gemiddelde herhalingstijd.

$$P(qA \geq q) = \frac{1}{T} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{q - A_1}{B_1}\right), & A_1 \leq q \leq \frac{B_2 A_1 - B_1 A_2}{B_2 - B_1} \\ \exp\left(-\frac{q - A_2}{B_2}\right), & \frac{B_2 A_1 - B_1 A_2}{B_2 - B_1} \leq q \leq \frac{B_3 A_2 - B_2 A_3}{B_3 - B_2} \\ \exp\left(-\frac{q - A_3}{B_3}\right), & \frac{B_3 A_2 - B_2 A_3}{B_3 - B_2} \leq q \end{cases}$$

Als we de overschrijdingsfrequentie vereenvoedigen (met andere woorden, we laten het domein weg), krijgen we de volgende overschrijdingsfrequenties: één voor Andernach en één voor Lobith, waarbij index A staat voor Andernach en index L voor Lobith.

$$P(qA > q) = \exp\left(-\frac{qA - A_A}{B_A}\right) \quad \text{en} \quad P(qL > q) = \exp\left(-\frac{qL - A_L}{B_L}\right)$$

De verwachting van de piekafvoer bij Lobith bij een gegeven piekafvoer bij Andernach is gegeven volgens  $E(qL) = C \cdot qA$ . Voor alle afvoeren via dat verband moeten de overschrijdingsfrequenties gelijk zijn. De volgende vergelijking is dan geldig.

$$\frac{qA - A_A}{B_A} = \frac{qL - A_L}{B_L} = \frac{C \cdot qA - A_L}{B_L} = \frac{qA - \frac{A_L}{C}}{\frac{B_L}{C}}$$

Hieruit volgt dat  $A_A = A_L / C$  en  $B_A = B_L / C$ . Met de waarde  $C = 1.1$  leidt dat tot de werklijn bij Andernach in paragraaf 3.7.



## Bijlage D: Onzekerheid waterstandsvoorspelling

Voor het bepalen van de onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen aan de hand van gegevens van de heer Koolwijk, Directie Oost-Nederland, hebben we de volgende gegevens gebruikt. Het gaat om twee daagse voorspellingen van het model Florijn RIZA van een deel van de afvoergolf in 2003. De waarden van de verwachting en de standaarddeviatie zijn berekend met behulp van dezelfde schatters als in bijlage B.

Voorspelde waterstand [m + NAP]	Gemeten waterstand [m + NAP]	Verschil		
15.40	15.26	0.14		
15.70	15.66	0.04		
15.50	15.67	-0.17		
15.30	15.45	-0.15		
15.05	15.10	-0.05	Verwachting	-0.04
14.55	14.61	-0.06	Standaarddeviatie	0.12

Tabel D-1 Voorspelde en gemeten waterstanden Lobith

Voorspelde waterstand [m + NAP]	Gemeten waterstand [m + NAP]	Verschil		
12.28	12.26	0.02		
12.64	12.72	-0.08		
15.61	12.76	-0.15		
12.57	12.58	0.01		
12.32	12.37	-0.05	Verwachting	-0.06
11.97	12.06	-0.09	Standaarddeviatie	0.09

Tabel D-2 Voorspelde en gemeten waterstanden Millingen (gebruikt Nijmegen)

Voorspelde waterstand [m + NAP]	Gemeten waterstand [m + NAP]	Verschil		
8.84	8.95	-0.11		
9.35	9.51	-0.16		
9.50	9.61	-0.11		
9.55	9.48	0.07		
9.25	9.28	-0.03	Verwachting	-0.08
8.84	9.00	-0.16	Standaarddeviatie	0.11

Tabel D-3 Voorspelde en gemeten waterstanden Tiel

Voorspelde waterstand [m + NAP]	Gemeten waterstand [m + NAP]	Vershil		
6.91	6.53	0.38		
7.26	7.09	0.17		
7.51	7.62	-0.11		
7.64	7.65	-0.01		
7.75	7.54	0.21	Verwachting	0.11
7.32	7.29	0.03	Standaarddeviatie	0.15

Tabel D-4 Voorspelde en gemeten waterstanden Amerongen

Voorspelde waterstand [m + NAP]	Gemeten waterstand [m + NAP]	Vershil		
5.46	5.15	0.31		
5.65	5.21	0.44		
5.56	5.39	0.17		
5.53	5.53	0.00		
5.42	5.48	-0.06	Verwachting	0.12
5.21	5.35	-0.14	Standaarddeviatie	0.18

Tabel D-5 Voorspelde en gemeten waterstanden Duursche Waarden (gebruikt Olst)

## Lijst van notaties en symbolen

$a$	Constante	[-]
$a_1$	Constante	[-]
$a_2$	Constante	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$a_3$	Constante	[-]
$E_{NOG}$	Effectiviteit van het noodoverloopgebied	[-]
$f_{qA}$	Kansdichtheidsfunctie van piekafvoer Andernach	[-]
$f_{qL}$	Kansdichtheidsfunctie van piekafvoer Lobith bij gegeven piekafvoer Andernach	[sm <sup>-3</sup> ]
$f_h$	Kansdichtheidsfunctie van waterstand bij gegeven piekafvoer Lobith	[m <sup>-1</sup> ]
$h$	Waterstand	[m + NAP]
$h_c$	Kritieke waterstand	[m + NAP]
$q_c$	Piekafvoer Andernach waarbij wordt besloten tot evacuatie	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$q_d$	Piekafvoer Lobith waarbij wordt besloten tot inzet	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$q_{k0}$	Kritieke afvoer Lobith zonder noodoverloopgebied	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$q_{k1}$	Kritieke afvoer Lobith met noodoverloopgebied	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$qA$	Piekafvoer Andernach	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$qL$	Piekafvoer Lobith	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$T$	Herhalingstijd	[jaren]
$Z^h$	Grenstoestandsfunctie waterstand	[m]
$Z^{qA}$	Grenstoestandsfunctie piekafvoer Andernach	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\mathcal{I}$	Indicatorfunctie	[-]
$\Psi_A$	Werklijn bij Andernach	[-]
$\Psi_L$	Werklijn bij Lobith	[-]
$\sigma_{qL}$	Standaarddeviatie piekafvoer Lobith	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\mu_{qL}$	Verwachting piekafvoer Lobith	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]



## Index

### A

aftopping, 15, 23  
 afvoergolf, 1, 21, 38, 55, 57  
 afvoerverdeling, 6, 10, 18, 37, 71  
 afvoervoorspelling, 4, 17, 37, 56, 77  
 Amerongen, 15  
 Andernach, 11, 13, 17

### B

bekleding, 7  
 belasting, 71  
 bergingscapaciteit, 55  
 betrekkinglijn, 17, 56, 60, 74, 77  
 Boven Merwede, 5  
 Bovenrijn, 5  
 bovenriviereengebied, 6

### C

Commissie Noodoverloopgebieden, 1  
 conditionele overschrijdingskans, 3, 31, 32, 38

### D

dijkhoogte, 18, 57, 60  
 dijkringgebied, 3  
 dijkvak, 3  
 dijkvakbenadering, 3, 55  
 duur, 55  
 Duursche Waarden, 15

### E

effectiviteit, 3, 10, 18, 26, 27, 35  
 erosie, 7  
 evacuatie, 1, 10, 18, 55  
 evacuatie, preventieve, 11  
 evacuatiecriterium, 3, 11, 13, 23, 33, 39, 45, 47, 55, 57, 61  
 extra hoogte, 3, 26, 27, 55, 60

### F

faalwijze, 7  
 frequentiedichtheidsfunctie, 26  
 fysisch maximum, 57, 71

### G

geometrie, 10, 18, 37, 71

glijcirkel, 7  
 golfoploop, 7  
 golfoverslag, 7, 19, 55, 60  
 golfvorm, 10, 21, 23, 48, 72  
 grenstoestand, 19  
 grenstoestandsfunctie, 19, 26

### H

hoogwater, 6  
 hoogwaterbescherming, 70  
 hoogwatervoorspellingen, 1, 2, 10  
 hysteresis, 75

### I

IJssel, 5  
 IJsselmeer, 5  
 ijsvorming, 72  
 indicatorfunctie, 26, 31  
 inherente onzekerheid, 69  
 inlaatwerk, 3, 15, 73  
 instroom, 74  
 instroomdebiet, 49, 55  
 interpolatie tussen meetstations, 10, 18, 37  
 inundatie, 10  
 inundatieproces, 73  
 inundatieverloop, 73  
 inzet, 1, 10, 18, 55  
 inzetcriterium, 4, 12, 13, 15, 23, 29, 33, 39, 45, 47, 55, 57, 61

### K

kansdichtheidsfunctie, 26  
 kennisonzekerheid, 69  
 kostenbatenanalyse, 61

### L

Lek, 5  
 Lobith, 3, 5, 11, 12, 13, 14, 15, 17

### M

maatgevende afvoer, 6, 55  
 MHW, 6  
 Millingen, 15  
 modelonzekerheid, 69  
 Moezel, 11

- N
- natuurlijke variabiliteit, 69
  - Nederrijn, 5
  - noodoverloopgebied, 3, 8, 9, 10, 13, 57, 61
- O
- onbetrouwbaarheid, 70
  - onderloopsheid, 7
  - onderzoekslocatie, 57, 60
  - onzekerheden, 10, 69
  - Ooijpolder, 3, 14
  - opbarsten, 7
  - overbelastingskans, 8, 9
  - overhoogte, 7
  - overloop, 3, 7, 19, 55
  - overschrijdingsfrequentie, 19
  - overschrijdingskans, 3, 8, 18, 20, 23, 24, 28, 33, 40, 55
  - overstromingskans, 8, 60
- P
- Pannerdensch Kanaal, 5
  - piekafvoer, 17, 18, 71
  - piping, 7
  - planningsonzekerheid, 69, 70
- Q
- qh-relatie, 16, 55, 56, 75
- R
- retentiegebied, 8
- Rijn, 5
- Rijnstrangen, 3, 14
  - ruwheid, 10, 18, 37, 71
- S
- schade, 74
  - statistische onzekerheid, 69
  - sterkte, 73
  - structurele onzekerheid, 70
- T
- Tiel, 15
  - toetspeil, 3, 6, 8, 9, 55
- V
- veiligheid, 3
  - voorwaardelijke kansen, 42
- W
- waakhoogte, 6, 15
  - Waal, 5
  - waterstand, 9
  - waterstandsvoorspelling, 4, 18, 37, 56, 60, 83
  - werklijn, 19, 81
  - Wet op de Waterkering, 6
  - wind, 72
- Z
- zeespiegel, 1
  - zijdelingse toestroming, 72